



Проф. Ф. ШАФФЕРНАК

# ГИДРОЛОГИЯ

Перевод с предисловием и примечаниями  
инж. А. М. ГАВРИЛОВА

*Под редакцией*  
*проф. Д. Л. СОКОЛОВСКОГО*

ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО  
ЛЕНИНГРАД — 1938 - МОСКВА

Prof. Fr. SCHAFFERNAK

# HYDROGRAPHIE

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Курс гидрологии проф. Шаффернака, вышедший в Вене в 1935 г. первым изданием, отличается рядом положительных особенностей, благодаря которым он представляет ценность и интерес и для советского гидролога и гидротехника. Эти особенности следующие.

Проф. Шаффернак рассматривает гидрологию в самом широком и практическом значении этого слова. В его курсе в систематической связи приводятся сведения по гидрологии, начиная от гидрологических изысканий (метеорологические и водомерные наблюдения и гидрометрия) и кончая прогнозами и водохозяйственными расчетами. Автор излагает этот обширный материал под углом зрения наилучшего его использования в технических целях, и эти обстоятельства — широкий охват предмета и инженерный подход к нему — придают курсу проф. Шаффернака характер пособия по гидрологии, отвечающего в значительной степени требованиям, предъявляемым к гидрологии со стороны гидротехнического строительства во всех его стадиях—изысканий, проектирования и строительства. Поэтому курс проф. Шаффернака с полным правом мог бы быть назван курсом инженерной гидрологии.<sup>1</sup>

Во второй главе своего курса, т. е. после рассмотрения способов получения гидрологических данных и перед изложением сведений об их использовании, автор приводит основные сведения по аналитической статистике и теории корреляции, сопровождая эти сведения примерами и пояснениями. В систематическом изложении эти сведения приводятся в курсе гидрологии, насколько известно, впервые. Потребность в указанных сведениях ощущается между тем довольно часто не только гидрологом-исследователем в его научной работе, но и инженером-гидротехником, сталкивающимся с гидрологическими расчетами при проектировании. Нетвердое знание начал аналитической статистики и теории корреляции (в большинстве вузов эти дисциплины не проходятся) требовало в подобных случаях обращения к специальным пособиям, где предмет изложен вне связи с гидрологическими явлениями. Поэтому включение указанных сведений в курс гидрологии с пояснением их применения к гидрологическим данным бесспорно является ценной особенностью труда проф. Шаффернака.

Курс проф. Шаффернака обладает и другими положительными сторонами. Расположение материала в книге следует тому порядку, который проходят гидрологические данные в действительности—от их получения в "сыром" виде до превращения в конечные аналитические или графические расчетные выражения, что облегчает усвоение материала. Обстоятельство изложения особенно сказывается при описании водомерных устройств и гидрометрических приборов, где автором приводится много интересного и нового с подробностью, нередко исключаящей необходимость обращения к каталогам. Иллюстрация изложения фактическими данными проходит красной

<sup>1</sup> В переводе курс проф. Шаффернака назван курсом гидрологии, а в оригинале этот курс именуется курсом гидрографии (Hydrographie).

нитью через весь курс. Теоретической стороне дела проф. Шаффернак уделяет всюду должное внимание.

Наряду с достоинствами курс проф. Шаффернака не лишен и недостатков, которые относятся главным образом к неполноте сведений по отдельным вопросам. Явно недостаточны сведения по испарению с водной поверхности, по расчетам стока, недостаточно полны сведения о наносах, несмотря на то, что именно в Австрии в последние годы проведены большие работы по исследованию режима наносов (работы Шоклича, Эренбергера и Мюльхольфера на Дунае и Инне), не упомянуты американские и советские работы, посвященные кривым распределения и их применению в гидрологии. Советскому специалисту по водному хозяйству также несколько элементарными покажутся приемы водохозяйственных расчетов, в области которых у нас в Союзе на основе большого опыта достигнуты значительные успехи, не нашедшие, к сожалению, до сих пор выражения на страницах систематизированного труда. Это является справедливым и в отношении всей области расчетов стока, в которой наряду с некоторыми новыми методами расчетов максимальных расходов подробно излагаются и рекомендуются малоприменимые формулы Ишковского и где советский гидролог найдет мало нового и полезного для себя.

Переводчик не стремился к дословному переводу текста подлинника, но ставил себе целью точную передачу мыслей автора и сущности вопроса. Поэтому часто применялся свободный перевод, который, однако, только в немногих случаях носит характер пересказа. Допущенные при переводе сокращения незначительны и выразились в исключении нескольких рисунков (главным образом карт и графиков, представляющих ограниченный интерес) и в небольших пропусках, преимущественно в третьей главе (так например, опущен способ Хауфа по определению максимальных расходов для расчетов канализационных сетей, как относящийся больше к курсу канализации, чем гидрологии).

*А. Гаврилов*

## ВВЕДЕНИЕ

**Построение гидрологии.** Решение задач конструктивной гидротехники покоится в основном на применении математики, механики и физики — тех основных наук, которые общи всем специальным отраслям инженерного дела. Однако гидротехника нуждается особо еще в исследовании явлений движения характерного для нее элемента — воды. Таким исследованиям, по необходимости, должно предшествовать изучение закономерности в проявлении этого элемента. Результаты этих работ, которые имеют своим предметом кругооборот воды, находят общее выражение в гидрологии,

С включением этой дисциплины, гидротехника обнаруживает по отношению к прочим специальностям инженера известную особенность, так как в последних ни природный фактор, сам по себе, ни количество и характер проявлений элемента, воздействующего на тип и размеры сооружений, не имеют такого решающего значения.

Изучение законов природных явлений со столь запутанными зависимостями, как в области кругооборота воды, должно пройти путь через планомерный сбор наблюдений и данных измерений и критическую систематизацию их. Из такого фактического материала могут быть затем сделаны те выводы, которые приводят к числовым выражениям.

Здесь заканчивается путь, который обычно избирает гидрологическое исследование, — путь большей частью удовлетворяющий потребностям практики. Лишь в отдельных местах на помощь привлекаются чисто теоретические положения: в первую очередь именно там, где гидрология соприкасается с гидравликой.

Гидрология поэтому начинает с наблюдения, измерения, а также планомерного сбора фактических данных. Далее следует систематизация собранного материала посредством аналитического или графического изображения зависимостей наблюдаемых природных явлений — математическая статистика. Работы гидрологии приводят в заключение к переработке полученных результатов наблюдений в выражения общего характера и к проработке отдельных задач, выдвигаемых практикой гидротехнического дела.

Этим обрисовано современное состояние гидрологии. Оно является первой стадией для этой непрерывно развивающейся научной дисциплины, и эта стадия сменится или, по меньшей мере, окажется под сильным воздействием научно-исследовательского направления, обоснованного теоретически. Привлечение математической статистики является подготовительным шагом к этому. В дальнейшем указанное направление должно быть углублено в сторону вскрытия внутренней сущности явлений.

Для этого придется обратиться к методам точного физического анализа, так как они только и могут помочь вскрыть сущность явления.

**Область гидрологии.** Чтобы окинуть взглядом всю область гидрологии, необходимо ближе коснуться кругооборота воды.

Непрерывный приток солнечного тепла обуславливает испарение воды, находящейся на земле. Восходящие воздушные течения, причины которых по своей природе могут быть термического или динамического характера, увле-

кают водяной пар до тех слоев атмосферы, где после охлаждения ниже точки росы, то есть после перехода через предел насыщения воздуха водяными парами, наступает сгущение их в туман и облака. В случае дальнейшего распространения конденсации, обусловливаемой падением температуры, выделяются осадки в жидком или твердом виде — дождь или снег, град и крупа. Сюда присоединяются еще другие дополнительные формы осадков, как роса, морось и изморозь, которые обычно не учитываются, однако составляют существенное дополнение к общему количеству осадков.

Здесь, при изображении кругооборота воды, начинается отрезок его пути, который приходится на область на земной поверхности или под нею, и отдельные процессы которого учитываются в балансе влаги на земле.

Из суммы многообразных влияний, которым подвергается вода на земле, вытекает естественный водный режим как рек, так равно и подземных вод. Описание и определение характеризующих этот режим величин составляют основу гидрологического исследования.

Использование этих данных для решения задач гидротехнической практики приводит в заключение к водохозяйственным вопросам гидрологии. Эта область применения, служащая целесообразному использованию воды в хозяйственных целях, включает все то, что связано с переводом естественного водного режима в искусственный водный режим.

Представление о пределах гидрологии возможно получить исходя еще из другой точки зрения. Размежевание с родственными областями знания и внедрение в них позволяют сделать в этом отношении некоторые заключения. Солнечная энергия является причиной, обеспечивающей поддержание общего кругооборота воды, а процессы в воздушной оболочке земли обуславливают только частные явления его. Учение об этом объединено в метеорологии. В случае же рассмотрения реакции земной поверхности на процессы погоды и отношения последних к органической жизни, этот специальный отдел метеорологии называют климатологией. В то время как метеорология, в более узком смысле слова, является скорее ответвлением физики, — климатология, подобно гидрологии, обязана своими успехами статистическим методам.

Метеорология, климатология и гидрология разграничены, следовательно, в своих областях, однако, с другой стороны, они связаны через общее использование материалов наблюдений и исследований.

Осадки являясь в первую очередь связующим звеном, так как они с одинаковым правом могут быть рассматриваемы и как конечная производная метеорологических и климатологических явлений и как начальное звено в ряду гидрологических процессов. Взаимодействие заходит, однако, еще дальше, поскольку гидролог, наряду с собственно гидрологическими элементами наблюдения, как осадки, уровень, сток и потери стока, занимается также, с целью обнаружить новые зависимости, наблюдением различных метеорологических элементов, а именно температуры, давления и влажности воздуха и ветра.

**Баланс влаги на земле.** Если водосбор речного потока, то есть ту область, откуда он получает свою воду, требуется характеризовать с точки зрения гидрологии, то сразу же встает вопрос о балансе влаги на земле. Этот последний может быть лучше всего представлен в форме уравнения, связывающего объемные величины, согласно которому объем воды, поступившей на водосбор, равняется отданному им объему воды плюс накопление, имевшее место в пределах водосбора за тот же промежуток времени.

Приход воды составляется из осадков; обозначим его через  $N$ , пока без указания единицы измерения. Расход воды разделяется на поверхностный: сток  $A_0$ , подземный сток  $A_u$ , и испарение  $V$ . Накопленный объем воды составляется из накопления на земной поверхности — в озерах, водохранилищах, снежном покрове, глетчерах и в растительном покрове —  $R_0$ , а также из

подземного накопления<sup>1</sup> —  $R_u$ , образующегося за счет некоторой доли просачивающейся под землю влаги.

Итак, основное уравнение водного баланса замкнутого водосбора<sup>2</sup> имеет вид:

$$N = A_o + A_u + V + R_o + R_u,$$

откуда наглядно видна взаимная связь между осадками, стоком и потерями воды, а именно испарением и просачиванием в грунт.<sup>3</sup>

**Периодичность гидрологических и метеорологических процессов.** Расположенные в хронологическом порядке гидрологические, а также метеорологические наблюдения, так называемые хронологические ряды, обнаруживают неровный и повторяющийся в своих отклонениях ход явлений.

Графические изображения хронологических рядов явлений или хронологические графики обнаруживают колебания четырех родов:

1. Колебания, повторяющиеся в течение одного или нескольких дней, причины которых следует искать как в космических, так и в атмосферных явлениях.

2. Колебания, наступающие благодаря смене времен года, то есть сезонные колебания, завершающие свой цикл, примерно, в течение годового срока.

3. Колебания больших периодов, которые могут быть установлены только путем исследования хронологических графиков за длинный ряд наблюдений. В таком случае говорят о вековом колебании или о вековом периоде. Подобные колебания с длинными волнами, повидимому, в большей мере космического происхождения. Пытались связывать их с примерно 11-летним периодом изменения солнечных пятен и с 35-летним Брюкнеровским климатическим периодом.

4. Колебания, протекающие совершенно незакономерно и вызванные случайными явлениями.

Особенное значение для гидрологии имеет годовой период как цикл наиболее типичных колебаний, обусловленных осадками и отраженных в более или менее резкой волнообразной форме в стоке, а тем самым и в уровне рек. Последнее служит основанием для введения в гидрологии годового периода осадков или метеорологического года и годового периода стока или гидрологического года.

Метеорологический год в Альпах, даже для местностей, расположенных на разной высоте, почти совпадает с календарным годом и дает, в среднем, сдвиг, примерно на один месяц против календарного года (рис. 1).

Гидрологический год, наоборот, не для всех водотоков укладывается в один и тот же календарный отрезок времени. Он в гораздо большей степени является по своим срокам гидрологической характеристикой для данного водосбора. Так, у горных рек Средней Европы начало гидрологического года наблюдается после 1 января (рис. 2), тогда как равнинные реки раньше этого срока достигают наинизшего своего уровня — границы годовых циклов (рис. 3).

Ежегодно повторяющиеся колебания осадков, уровня и стока служат побуждением к выводу средних арифметических значений из данных наблюдений. Эти средние могут быть выведены для одних и тех же моментов времени или за одинаковые календарные отрезки времени. Если осреднение охватывает срок по меньшей мере в 25 годовых периодов, получают, в конце

<sup>1</sup> Подземное накопление происходит не только в жидком виде, — в холодном климате и при глинистых грунтах оно может происходить также в форме отложений льда.

<sup>2</sup> K. Fischer. Die Grundgleichung des Wasserhaushaltes eines Flussgebietes. Zentralblatt der Bauverwaltung, N. 18, 1925.

<sup>3</sup> При этом осталась неучтенной очень небольшая доля влаги, которая теряется при химических процессах, связанных с климатологическими процессами.



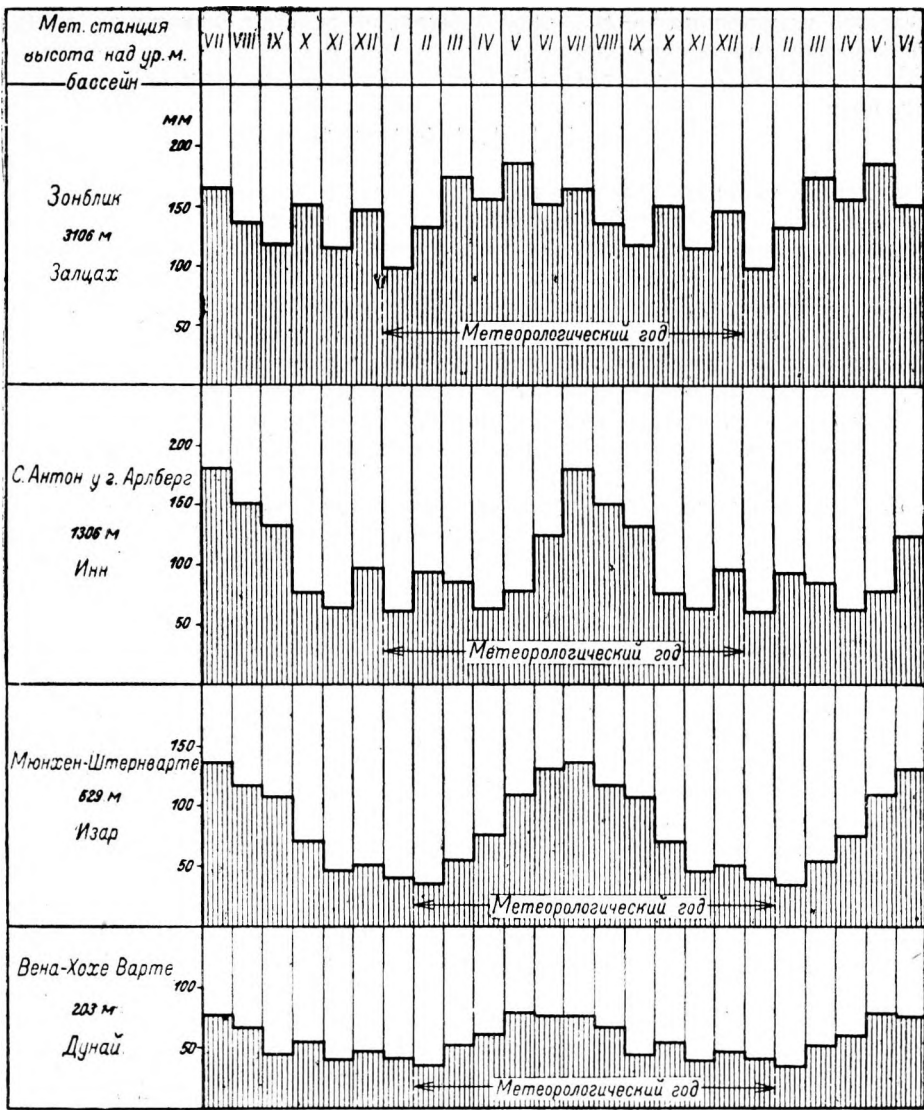


Рис. 1. Метеорологический год для станций, расположенных на разной высоте над уровнем моря.

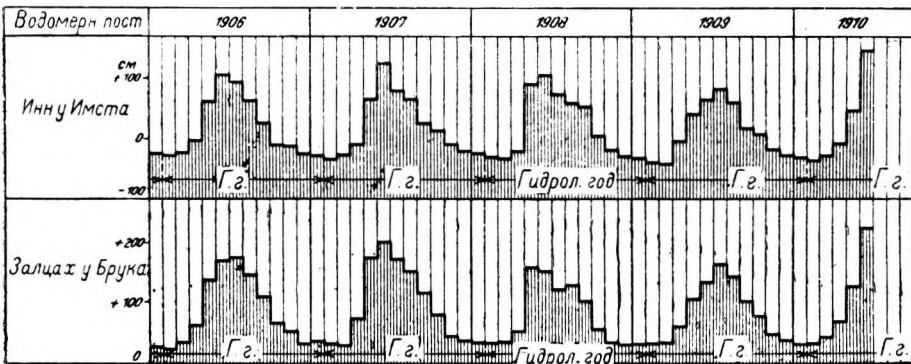


Рис. 2. Гидрологический год на горных реках.

концов, так называемый нормальный годовой период какого-либо гидрологического явления, нормальный или средний фиктивный год, и, как изображение этого явления во времени,—график среднего фиктивного года. Взятые с графика значения называют средними значениями, и эти средние, с увеличением числа годовых периодов, послуживших к их выводу, все более

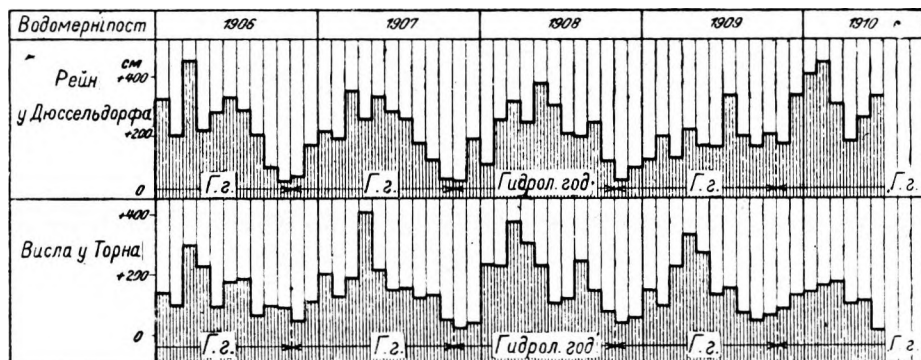


Рис. 3. Гидрологический год на равнинных реках.

приближаются к устойчивым средним значениям исследуемых величин. Вследствие этого они также становятся важной характеристикой исследованного района.

**Отношение гидрологии к морфологии рек.** Со стоком воды происходят видоизменения земной коры, выражающиеся как в том, что водой сносятся предварительно разрыхленные под воздействием климатических факторов твердые частицы коры, так и в том, что приводятся вновь в движение уже отложившиеся наносы. Тем самым вызывается непрерывное изменение форм поперечного и продольного профилей русла, а вместе с тем и такое же непрерывное изменение режима движения воды отдельных речных потоков. Такое взаимодействие требует дополнения исследования режима движения воды исследованием режима движения наносов в той мере, в какой это может вскрыть факторы, влияющие на точность гидрологических данных.

К морфологическим факторам речного потока следует еще причислить взвешенные наносы, а также, в самом широком смысле слова, — лед. Взвешенные наносы являются последней стадией в процессе дробления твердых частиц земной коры и при известных обстоятельствах принимают в изменениях речного русла большее участие, чем влекомые наносы. Лед, в виде глетчеров, еще и в наше время производит стирание и перенос твердых веществ и своим ударным действием изменяет живое сечение рек.

Изучение морфологических факторов, — влекомых и взвешенных наносов и льда, — является таким образом необходимым дополнением для полного представления о гидрологии.

## ГЛАВА ПЕРВАЯ

### НАБЛЮДЕНИЕ И СБОР ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ, МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ И МОРФОЛОГИЧЕСКИХ ДАННЫХ

Предпосылкой для успешного развития гидрологии является получение богатого по содержанию и надежного материала наблюдений. Это требует наличия единой и целесообразно организованной службы наблюдений, которая по своим масштабам имеет общегосударственное значение.

Первые шаги в деле развития службы наблюдений были сделаны во Франции, где в 1854 г. была основана под руководством Белграна "La Service hydrometrique du bassin de la Seine". В 1875 г. в Праге была учреждена "Государственная гидрометрическая и омброметрическая станция" под руководством Гарлахера. В 1883 г. в Бадене под руководством Гонселля открыло свою деятельность "Das Zentralbüro für Meteorologie und Hydrographie" — прообраз гидрологических учреждений в Германии. Вслед за ним последовало открытие прочих (с подобной ему организацией) гидрологических учреждений в Германии. В 1893 г. в Австрии образовалось под управлением Лауда центральное учреждение „Das Hydrographische Zentralbüro" — в Вене. Швейцария получила свое союзное гидрометрическое бюро, ныне Союзное управление водного хозяйства — „Eidgenössische Amt für Wasserwirtschaft" — в Берне в 1895 г.

Для гидрологической службы в Италии прообразом явилось, основанное в 1907 г. в Венеции, "Ufficio Idrografico del R. Magistrato alle Acque"; в 1917 г. гидрологическая служба была преобразована в сторону однообразия ее организации. В США широко разветвленную гидрологическую службу обслуживает с 1902 г. "Water-Resources Branch", входящий в состав "Geological Survey", с большим числом сотрудников. В настоящее время все цивилизованные государства, где вода играет роль как объект водного хозяйства, имеют центральные управления гидрологической службы,<sup>1</sup> которые по своему устройству подобны упомянутым выше учреждениям.

Гидрологические исследования, однако, не должны ограничиваться пределами одного государства. Признание этого способствовало не только оживленному обмену печатными изданиями между отдельными гидрологическими учреждениями, но и созыву конференций соседних стран с общими гидрологическими условиями, что существенно помогает установлению общих точек зрения. В 1924 г. была образована гидрологическая секция внутри Международного геодезического и геофизического союза, который учредил, наряду с комиссиями по потамологии, лимнологии и гласеологии, также комиссии по изучению подземных вод, по применению методов математической статистики и по применению гидрологии при разрешении проблем водоиспользования. С 1926 г. Балтийские страны проводят периодические конференции, которые уже дали ценные результаты.

<sup>1</sup> В СССР — гидрометеорологической службой ведает, как известно, Главное управление гидрометеорологической службы СССР при Совнаркомом Союза ССР. (Прим. пер.).

В последние десятилетия область гидрологических исследований значительно расширилась, что является весьма полезным для развития гидрологии. Разработка вопросов утилизации водных сил доставила гидрологии ценных сотрудников, работающих в предприятиях, занимающихся строительством и эксплуатацией гидроэлектростанций.

Для проведения собственно наблюдательной службы отдельными гидрологическими управлениями выработаны инструкции, которые в доступной форме дают наблюдателю установки и необходимые сведения по отдельным наблюдениям.

Служба наблюдения должна быть контролируема либо непосредственно через инспекционные органы, либо путем сравнения в гидрологических управлениях данных, полученных на соседних пунктах наблюдений.

Специальные работы — определения расходов воды при истечении через отверстия, всякого рода точные измерения, — которые, не входя в общую службу наблюдений, служат разработке специальных гидрологических задач, должны производиться обязательно под руководством соответственно подготовленных инженеров, ибо в подобных случаях дело заключается не в навыке, а в обладании гидрологическими знаниями специального характера.

Результаты наблюдений высылаются отдельными наблюдателями через более или менее короткие сроки, примерно один раз в месяц, в установленное для данного речного бассейна место, где они подвергаются проверке на достоверность и правильность вычислений и затем передаются в центральное государственное управление. На его обязанности лежит собственно статистическая обработка наблюдений, однообразная по форме систематизация их и, наконец, их опубликование.

Принято опубликовывать гидрологические данные в систематизированном виде в форме периодических изданий, так называемых гидрологических ежегодников, чтобы таким путем сделать результаты наблюдений доступными для всех. Наряду с материалами непосредственных наблюдений, отдельные ежегодники дают также некоторый предварительный анализ наблюденного материала, причем нередко некоторые особые гидрологические явления, представляющие общий интерес, как например ливни, катастрофические половодья, заторы и зажоры (Wasserklemmen) и ледоходы подвергаются в них более подробному рассмотрению.

## I. ОСАДКИ

### ОРГАНИЗАЦИЯ СЛУЖБЫ НАБЛЮДЕНИЙ НАД ОСАДКАМИ

Исследуемый бассейн реки покрывается сетью дождемерных (омброметрических) станций; густота сети зависит от формы поверхности, расположения местности относительно уровня моря, а также от цели наблюдений. Так, инструкция по проведению омброметрической службы в Австрии указывает:

"Чтобы достигнуть, по возможности, одинаковой полноты наблюдений, необходимо стремиться к организации более густой сети станций в горах, где осадки выпадают интенсивнее, чаще и неравномернее, чем в равнинной или холмистой местности.

Кроме того, надо особое внимание обращать на то, чтобы отчетливо выявился различный в отношении осадков характер отдельных частей речного бассейна. Это может быть достигнуто только тем, что в долинах, на склонах и на водоразделах устанавливается число станций, соответствующее характеру выпадения осадков на этих частях водосбора, причем склоны, повидимому, требуют наибольшего числа станций".

Распределение станций намечается этими общего характера указаниями только в самых грубых чертах. Дело опыта организовать новые станции там,

где характеристика осадков оказывается недостаточной, снабдить действующие станции самопишущими приборами или прекратить наблюдения там, где станции, на основе ряда лет наблюдений, оказались излишними. При этом особое внимание придется уделить тем станциям, которые располагаются на пересечениях воздушных течений, так как они регистрируют аномальные условия и не годятся для общей характеристики. Последнее время наблюдается стремление к увеличению числа высокогорных станций, так как для развивающейся гидроэнергетики знание количества осадков в высокогорных районах приобрело решающее значение.

Густота сети наблюдательных станций в отдельных странах весьма различна, например в Австрии одна станция приходится на каждые 113 кв. км.

Однако не только густотой сети определяется разница в полноте и точности наблюдений, она определяется и родом наблюдений, а также оборудованием станций измерительными приборами. Проводя различие между станциями в указанном отношении, разделяют их на разряды.

Дождемерные станции 1-го разряда производят наблюдения над осадками не реже одного раза в час, причем одновременно регистрируется температура, давление и влажность воздуха, сила и направление ветра и облачность. Станции 2-го разряда производят полные и регулярные наблюдения над осадками и прочими метеорологическими элементами не реже трех раз в сутки; станции 3-го разряда производят наблюдения над осадками и температурой один раз в сутки, а станции 4-го разряда ограничиваются наблюдением над осадками один раз в сутки.

Помимо этих станций, устраиваемых для измерения как твердых, так и жидких осадков, имеются станции или пункты, служащие только для снегомерных наблюдений. При наличии снежного покрова, отсчеты по этим пунктам производятся ежедневно, а при малой доступности мест наблюдения — в зависимости от степени их доступности.

Для высоких гор встает вопрос также и о смешанных измерениях снега и дождя, причем отсчет производится всего несколько раз за метеорологический год. Для подобных наблюдений пользуются так называемым дождемером-собирателем или тотализатором.

Значение вышеупомянутых станций возрастает при производстве на них специальных наблюдений над промерзанием почвы и над процессом снеготаяния.

### **ПРОИЗВОДСТВО НАБЛЮДЕНИЙ НАД ОСАДКАМИ (ОМБРОМЕТРИЯ)**

Для определения количества выпавших в каком-либо районе осадков необходимо знать площадь района, площадь выпадения осадков и высоту слоя осадков.

Для того чтобы в дальнейшем иметь возможность сравнивать количество выпавшей в осадках воды с количеством стекшей воды, необходимо общую поверхность разбить по бассейнам отдельных рек или определенных речных участков. При рассмотрении вопроса под таким углом зрения, районы общего характера выпадения осадков становятся водосборами, так как выпавшие на них осадки определяют режим движения воды речного потока в том пункте на реке, в том живом сечении ее, которым кончается данный речной участок.

Обводка подобного рода водосборов на карте, путем соединения между собой водораздельных линий, приводит к разбивке всей площади района на отдельные бассейны или водосборы. При подобной разбивке как бы подразумевается, что площади водосборов поверхностного стока и грунтового стока совпадают между собой. Между тем совпадение топографического и гидрологического водосборов не всегда имеет место как вследствие того, что водонепроницаемые наклонные пласты могут заходить за поверхностные водоразделы, так и потому, что пористые горные породы благоприятствуют притоку просачивающихся осадков из соседних бассейнов или уходу их из данного

бассейна. Во избежание неправильных выводов эта возможность должна предусматриваться и учитываться с тем большим вниманием, чем меньше водосбор. Разбивку на бассейны начинают с обводки бассейнов морей по главным водоразделам. Тем самым разграничиваются бассейны 1-го порядка, например бассейн Дуная от бассейна Рейна. Далее следует разбивка на бассейны 2-го порядка, например бассейны Инна и Майна, затем на бассейны 3-го порядка и т. д.

Подобная систематическая разбивка на бассейны, вплоть до самых маленьких притоков ключевого питания, выполняется отдельными гидрологическими управлениями в большинстве случаев как подготовительная работа, и затем публикуется ими под наименованием Указателей площадей бассейнов.

Высотой слоя осадков  $h_N$ , обычно выражаемой в миллиметрах, обозначают ту высоту, которой достиг бы слой осадков при выпадении его за определенный промежуток времени, если бы осадки, не испаряясь, могли собраться на непроницаемой, бессточной и горизонтальной поверхности. При этом твердые осадки предполагаются обращенными в жидкое состояние.

Под количеством выпавших осадков (Niederschlags — Ergiebigkeit) понимают ту высоту слоя осадков, которая является суммарным результатом какого-либо выпадения осадков. При некоторой определенной продолжительности выпадения осадков  $t_r$  и при условии равномерного распределения их по всему водосбору, имеют место следующие равенства:

Объем осадков = высота слоя осадков X площадь водосбора.  
Осадки, выпавшие в единицу времени, или

$$\text{расход осадков} = \frac{\text{объем осадков}}{\text{продолжительность выпадения}}$$

и осадки, выпавшие в единицу времени на единицу площади водосбора, или

$$\text{модуль осадков} = \frac{\text{объем осадков}}{\text{продолжительность выпадения} \times \text{площадь водосбора}}$$

При некоторых исследованиях целесообразно исходить из величины слоя осадков, выпадающих в единицу времени, т. е. из интенсивности осадков:

$$\text{интенсивность осадков} = \frac{\text{высота слоя осадков}}{\text{продолжительность выпадения}}$$

и далее:

модуль осадков = интенсивность осадков X единицу площади водосбора.

Поскольку принято выражать модуль осадков в л/сек с га или  $\text{м}^3/\text{сек}$  с 1 кв. км и интенсивность осадков в мм мин., надо при пользовании приведенными равенствами следить за правильной размерностью величин.

Например, если высота слоя осадков достигла 120 мм за двух часовой

период и величина водосбора равняется 5 кв. км, то соответственно получается:  
Объем осадков..... =  $600\,000 \text{ м}^3 = 0,6 \text{ мил. м}^3$ ,  
Расход осадков..... =  $83,3 \text{ м}^3/\text{сек}$ ,

Модуль осадков ..... =  $16,7 \text{ м}^3/\text{сек}$  на 1 кв. км =  $167 \text{ л/сек}$  на 1 га,

Интенсивность осадков..... = 1 мм мин,

и если бы выпадение осадков ограничилось двумя часами:

Количество осадков..... = 120 мм

Для измерения высоты слоя осадков употребляются измерительные приборы, система и устройство которых различаются в зависимости от цели наблюдений, от финансовых средств, от характера местности в месте установки и еще в зависимости от требуемой от данных наблюдений точности.

Исходя из этих признаков, можно расположить описание измерительных приборов в нижеследующем порядке.

Снегомерные посты. Для измерения высоты снегового покрова в недоступных зимою высокогорных местах можно, хотя бы для приближенной оценки высоты снегового покрова, вести наблюдения по высокогорным постам, производя

отсчеты в подзорную трубу. Высокогорные посты представляют собой установленные на открытых местах сигнальные рейки с короткими поперечинами через каждые 0,5 м по длине рек.

Если пункт наблюдений доступен, хотя бы по временам, то снегомерный пост обычно устраивается в виде сантиметровой рейки, шириною в ладонь и длиною от 2 до 3 м, закрепленной у поверхности земли на уровне нуля. Место под пост выбирается защищенное от заносов и освещаемое солнцем, примерно, в течение половины дня. По возможности, оно должно находиться на восточном или на западном склоне и быть огороженным.

Наблюдения должны начинаться с первого снегопада, продолжаться до схода снега и производиться ежедневно, примерно, в 7 час. утра. При неравномерном отложении снега в непосредственной близости вокруг поста, необходимо, в целях контроля отсчета по посту, измерять высоту снежного покрова в нескольких местах вокруг поста и среднее из этих отсчетов наносить как исправленный отсчет.

Для пересчета высоты снежного слоя в равноценную высоту водяного столба необходимо определить водный эквивалент снежного покрова. Он выражается различно по форме, а именно, как высота водяного столба, соответствующего 10 мм снежного слоя, в виде веса в килограммах 1 м<sup>3</sup> снега или в виде плотности снега, то есть относительным числом.

В первом случае из снежного покрова во всю его высоту вырезается проба (помощью цилиндрического или квадратного сосуда и подложенной снизу дощечки), а затем путем таяния определяется соответствующая высота водяного столба. В двух остальных случаях нагревание, часто связанное с хлопотами, отпадает, и необходимо только вывесить вырезанный образец снега.

Три вышеуказанных значения находятся в отношении друг друга в следующей зависимости. Высота водяного столба  $u$  мм, равноценная слою снега

в 10 мм высотой, соответствует весу снега в 100  $u$  в кг/м<sup>3</sup> и плотности  $\frac{u}{10}$ .

Т а б л и ц а 1

**Вес снега по измерениям в горных проходах Швейцарских Альп в 1907—1916 гг.  
(в кг/м<sup>3</sup>)**

Годы	Умб-райль 2512 м	Флюэола 2370 м	Бернина 2334 м	Жулье 2287 м	Офенберг 2155 м	Шплюген 2117 м	Бернардин 2063 м	Оберальп 2052 м	Лукманье 1842 м	Малойя 1811 м	Средние
1907	—	529	356	358	—	327	395	472	—	453	413
1908	—	465	240	350	345	344	358	385	—	425	382
1909	535	394	300	331	343	—	353	400	410	—	383
1910	431	—	657	530	336	387	343	410	530	402	447
1911	—	—	630	410	—	445	445	444	395	575	478
1912	—	—	642	629	525	420	443	400	490	583	516
1913	484	392	558	435	550	399	531	480	560	—	467
1914	390	325	—	—	402	376	360	390	557	—	400
1915	460	437	—	403	523	383	383	438	562	375	441
1916	370	465	—	371	460	426	450	485	490	415	437
Средние	445	428	524	424	435	390	388	430	499	461	438

Если, например, высота слоя воды, определенная по первому способу, равняется 3,25 мм, то это соответствует весу снега в 325 кг/м<sup>3</sup> и плотности 0,325.

Ряд измерений, произведенных в Швейцарских Альпах, результаты которых приведены в табл. 1, показывает, насколько сильно колеблется водный эквивалент снега даже в его средних годовых значениях. Эти данные свидетельствуют также, как необходимы периодически повторяемые (густо покрывающие местность) определения водного эквивалента в тех случаях, когда хотят получить хоть сколько-нибудь надежные переводные коэффициенты для больших покрытых снегом пространств.

При сравнении между собой большого числа данных о плотности снега с одновременным учетом условий образования соответствующих снежных покровов, возможно установить зависимость плотности снега от характера снега при его выпадении и от изменений, которые претерпевает в своем строении выпавший снег под влиянием веса верхних слоев и от солнечного тепла и нагрева почвой в соединении с процессом таяния.

Детальные физические исследования строения снега привели пока только к характеристикам общего характера.<sup>1</sup> Плотность свежес выпавшего снега сильно варьирует. Так, например, измерения в Соданкила (Sodankylä) в Финляндии дали следующие плотности:

Пушистый снег.....	0,010
Слабо-хлопчатый снег.....	0,031
Зернистый снег.....	0,063
Мучнистый снег.....	0,072
Снежная корка.....	0,126
Снежный шлак.....	0,257

Далее было установлено, что плотность свежего снега мало изменяется с географической широтой, но с падением температуры убывает. Если снег некоторое время полежит, он садится и тем более, чем мягче погода. Ветер и температура изменяют строение снега. При мягкой погоде наступает испарение в виде мельчайшей кристаллизации; дождевая и талая вода ускоряют этот процесс, а при похолодании водяной пар вновь конденсируется.

Плотность снега на местах более высоко расположенных повышается до 0,3, в низинах — до 0,4. В нижнем слое снежного покрова, непосредственно у поверхности земли, скопляется талая и дождевая вода и образуется кашеобразная масса, причем плотность повышается до 0,5. Наибольшая плотность снега наблюдается на высоких горах, где ветры, солнечный свет и влажность оказывают свое действие на снежный покров в течение гораздо более продолжительного времени, а потому и вызывают в нем более сильные изменения в строении и самые различные явления кристаллизации. Фирновый снег обладает плотностью свыше 0,5, у фирнового льда она возрастает до 0,85 и у глетчеров — до 0,9.

**Суммарный дождемер — тотализатор.** Чтобы иметь возможность измерять как жидкие, так и твердые осадки в местах не всегда доступных, устанавливают приборы, которые собирают осадки за более длительные промежутки времени. При этом должно быть предусмотрено, чтобы твердые осадки самопроизвольно переходили в жидкое состояние, испарения не происходило, и прибор был установлен таким образом, чтобы уловленные им осадки являлись действительно близкими к средним для окружающей местности.

Непрерывный, самопроизвольный переход в воду уловленного прибором снега и льда происходит под действием добавляемого хлористого кальция,

<sup>1</sup> A. Nippoldt., J. Keränen und E. Schweidler. Einführung in die Geophysik II, Berlin 1929; W. Paulke Forschungen über Schnee und Lawinen in Naturlaboratorien. Kosmos. H. 2, 1933.



который обеспечивает переход до температуры  $-30^{\circ}$ . Испарение уменьшается в сильной степени уже вследствие свойства хлористого кальция жадно впитывать воду и с трудом ее отдавать; сверх того испарение уменьшают еще добавлением вазелинового масла, которое теряет свое действие также лишь при  $-30^{\circ}$ .

В бурную погоду легко могут произойти неточности в наблюдениях из-за воздушных вихрей вокруг и над прибором. Этот источник ошибок стараются исключить приданием приборам соответствующей целесообразной формы. Из предложенных до настоящего времени образцов собирателей

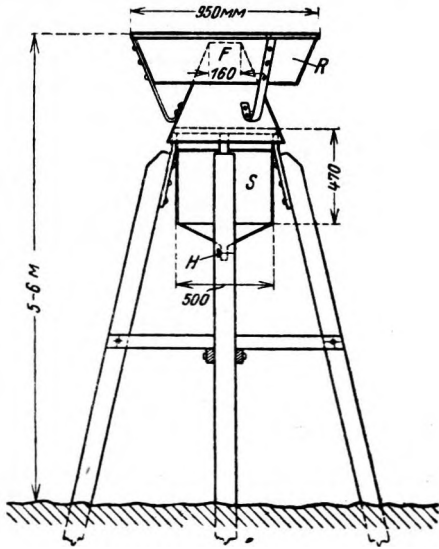


Рис. 4. Дождемер-собиратель по Мугину.

*F* — поверхность приемника; *S* — собиратель; *H* — выпускной кран; *R* — защита от ветра.

наилучшим является прибор Мугина, снабженный кольцевой защитой от ветра (рис. 4).

Размеры суммарного дождемера следует выбрать такие, чтобы, при сохранении возможной его портативности, он обладал достаточным объемом для накопления осадков за возможно более длительные промежутки времени. Опыт показал, что для Альп удобны размеры, указанные на рис. 4.

Собирательный сосуд *S* имеет цилиндрическую форму с коническим дном и такой же крышкой. Верхний край приемника защищен так называемой кольцеобразной защитой Нифера или Маурера, по форме также конусообразной. Для спуска осадков служит кран *H*. Собираатель ставится на деревянную или железную подставку такой высоты, чтобы по возможности предотвратить умышленную порчу прибора и сделать невозможным вдувание в него снега.

Величина дождемера сообразуется с продолжительностью периода измерения, которая может быть от 1 до 6 месяцев. Поверхность приемника составляет обычно  $200 \text{ см}^2$ , что соответствует поперечнику отверстия в 160 мм. Поперечные размеры собирателя выбираются такими, чтобы слою осадков в 1 мм соответствовала высота слоя воды в сосуде, равная 0,1 мм.

Перед началом наблюдений в дождемер вливают определенное количество воды и притом столько, чтобы коническое дно сосуда полностью ею покрывалось; осадки накапливаются только в цилиндрической части сосуда. Затем смешивают равные количества хлористого кальция и дистиллированной воды, обычно по 5 кг, и после растворения хлористого кальция вливают раствор в сосуд и добавляют 1 кг вазелинового масла.

Скопившиеся в дождемере осадки измеряются взвешиванием, методом объемного измерения, методом линейных отсчетов или химическим способом (с введением соли).

При определении количества осадков взвешиванием все содержимое сосуда выпускается через кран в дне сосуда, после чего устанавливается вес осадков с учетом начального объема воды в сосуде.

Необходимость брать с собой в высокогорные районы весы требует дополнительного персонала, почему указанный способ и нельзя рекомендовать в пересеченных местностях.

При объемном измерении объем жидкости устанавливается при помощи протарированных сосудов, и из этого объема опять-таки вычитается начальный объем.

При применении метода линейных отсчетов положение зеркала воды в цилиндре-собирателе определяется отсчетом от верхнего края кольца цилиндра-приемника помощью какой-либо размеченной линейки или рейки. Для этого сосуд перед его установкой должен быть тщательно протарирован. Этот способ находит большое применение вследствие своей простоты.

Химический способ основан на идее, что заключать об объемах жидкости можно по степени концентрации соляного раствора, которая устанавливается в различные моменты помощью титрования.<sup>1</sup>

Добавление соли производится перед началом пользования прибором.

Самым точным способом следует признать взвешивание. При объемном измерении может произойти ошибка вследствие уменьшения объема при переходе насыщенного хлорно-кальциевого раствора в раствор меньшей концентрации. Согласно опытам, величина ошибки при учете годовых слоев осадков — ничтожна. Для промежуточных измерений ошибка может составлять до 2%. Поэтому следует рекомендовать, когда требуется особая точность, производить специальное определение уменьшения объема для добавляемого раствора. Ошибки, которые могут встречаться при употреблении способа линейных отсчетов, установлены путем сравнения с прочими способами. По исследованиям в высокогорных районах Швейцарских Альп способ линейных отсчетов дает результаты на 1—2% большие, чем объемное измерение. Химический способ показал также удовлетворительные результаты; ошибка не превосходит 1%.

К указанным ошибкам, получающимся при измерении уже уловленных осадков, могут присоединиться и другие недостатки; причина их коренится в неправильном поступлении осадков в сосуд. В бурную погоду в собиратель попадает, несмотря на Ниферову защиту, меньше осадков, чем следовало бы попасть, исходя из площади поверхности приемника. Проистекающая отсюда ошибка в отношении к годовому количеству осадков, однако, не столь значительна, так как наблюдения показывают, что самые обильные осадки выпадают при тихой погоде. Далее может встретиться случай, когда отверстие приемника будет забито снегом и в периоды с исключительными холодами на поверхности раствора будут образовываться снежные и ледяные комья, которые заполняют собиратель снегом.

Все перечисленные недостатки полностью не могут быть устранены. Тем не менее показания дождемера-собирателя, правильно устроенного, установленного и заправленного, находящегося под надежным присмотром, надо полагать, обладают точностью порядка  $\pm 10\%$ .

Обыкновенный дождемер—омброметр. Повсюду, где имеется возможность постоянного контроля, применяется прибор изображенный на рис. 5.

Воронкообразный сосуд приемника Т плотно насаживается на цилиндр В, чтобы, по возможности, уменьшить испарение жидких осадков, стекших в кружку К. Измерительный стакан дополняет оборудование такого рода наблюдательной станции.

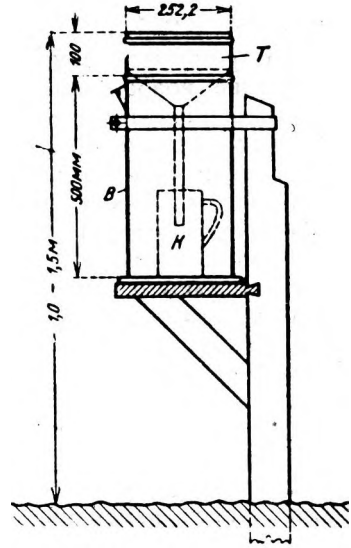


Рис. 5. Обыкновенный дождемер.  
Т — приемник; В — цилиндр-футляр;  
К — кружка.

<sup>1</sup> Согласно Р. Mercator; см. Verhandlungen der schweizerischen naturforschenden Gesellschaft, 1916: О химическом способе (с введением в воду соли) см. ниже.

Высота слоя осадков  $h_N$  (в мм) равняется:  $h_N = \frac{f'}{f} y$ , где  $f$  — площадь поверхности дождемера, а  $f'$  и  $y$  (в мм) — площадь поперечного сечения и глубина наполнения измерительного стакана.

Если выбрано  $\frac{f'}{f} = \frac{1}{20}$ , обычно принимаемое отношение, тогда слою осадков в 1 мм в измерительном стакане соответствует слой воды в 20 мм.

Дождемер следует устанавливать на ровном огороженном месте таким образом, чтобы осадки имели свободный доступ к приемнику и не возникало отклоняющих их воздушных течений.

Горизонтальная поверхность приемника дождемера, площадь которой выбирают от 200 до 2000 см<sup>2</sup>, должна находиться на высоте от 1 до 1,5 м над поверхностью земли. При более высоком положении прибора в него (вследствие возрастания скорости ветра) попадает, согласно наблюдениям, преуменьшенное количество осадков; в то же время при более низком положении существует опасность задувания снега или возможность того, что свежий снег или брызги дождя, подхваченные ветром, попадут в прибор. В высоких местностях из-за большой глубины снега, в виде исключения приходится поднимать прибор выше над поверхностью земли.

Помимо всего прочего, подлежит также решению вопрос, следует ли ставить дождемер с ветровой защитой или без нее. Эта защита может быть изготовлена в виде защитного кольца, повсеместно употребляемого для дождемеров-собирателей, или в виде креста из жести, закладываемого в приемник. В целях сравнения, в Швейцарии были произведены с большой тщательностью наблюдения на открытых местах, и они показали, что дождемеры с защитой от ветра регистрируют до 10% больше осадков, чем не имеющие такой защиты.

Выбор места под установку прибора имеет значение еще в отношении желательности измерения дополнительных, так называемых горизонтальных осадков как роса, морось и изморозь.

Роса является продуктом конденсации, при которой влага, оседающая главным образом на растительном покрове, большей частью берется из почвы. Роса, следовательно, является в основном воспроизведением прежних осадков и сообщает поверхности земли ничтожное количество новых осадков.<sup>1</sup>

Морось дает немалое дополнение к осадкам, но не поддается измерению дождемерами, установленными на открытых местах. Опыты, производившиеся в течение ряда лет в богатых туманами лесных районах с дождемерами, установленными под деревьями, показали, что регистрируемые ими осадки в среднем за год на 60%, а в некоторые зимние месяцы на 300% больше осадков, получающихся по дождемерам, установленным на открытых местах.<sup>2</sup> Равным образом дождемеры, снабженные пучком хвороста, возвышавшимся на 30 см над верхним краем прибора, показывали в некоторые месяцы до 4,6 того количества осадков, которое получалось по обыкновенным дождемерам. Такие исключительно большие значения, однако, могли быть обусловлены отчасти тем, что (при косом дожде) пучками хвороста улавливается больше осадков, чем это соответствует поверхности приемника.<sup>3</sup>

Результаты как тех, так и других опытов показывают, что для богатых туманами лесных районов, следовательно для средней полосы в горах, зна-

<sup>1</sup> Н. Keller. Ueber Taumessungen im ariden Hochland Transvaals. Meteorologische Zeitschrift, Bd. 30, H. 9, 1933.

<sup>2</sup> F. Linke. Niederschlagsmessungen unter Bäumen. Meteorologische Zeitschrift, S. 277, 1921.

<sup>3</sup> R. Drenkhahn. Die Hydrographischen Grundlagen für die Planung von Wasserkraftwerken in Südwestdeutschland. Berlin, 1926.

чения, полученные по дождемерам на открытых местах, могут дать неверную картину фактического баланса влаги.

Изморозь образуется из переохлажденного тумана, который, приходя в соприкосновение с деревьями, кустами или с растительным покровом, тотчас замерзает и оседает на них, нередко довольно толстым слоем. Измерить этот вид осадков до сих пор не удалось; однако в высокогорных районах он может быть немалым добавлением к общему количеству осадков.<sup>1</sup>

Как на один из видов дополнительных осадков можно было бы указать на осадки, попавшие на листву деревьев и стряхнутые ими на поверхность земли в ветреную погоду спустя некоторое время после выпадения. Эти осадки по величине учитываются дождемерами на открытых местах, однако появление их на поверхности земли происходит с разницей во времени, которая в некоторых случаях может представлять интерес для суждения о процессе стока. В этом отношении имеется еще мало наблюдений<sup>2</sup>.

Влияние, оказываемое величиной поверхности дождемера на его показания, также подвергалось исследованию. Она мало сказывается на точности измерений, если только ее величина выбрана не меньше 200 см.<sup>3</sup>

Если осадки поступили в форме снега, града или крупы, и сами еще не растаяли, их надо растопить. Таяние вызывается либо прибавлением некоторого заранее известного объема теплой воды или нагревом в снабженном крышкой горшке. Чтобы вызвать в зимнее время непрерывное таяние, применяется нагревание внутренности полого цилиндра *B* посредством электрической лампочки. Надо только следить, чтобы не вызвать черезчур большим нагревом испарения талой воды. Последнее может быть избегнуто при помощи терморегуляторов, которые при определенной температуре выключают источник нагрева.

Собственно наблюдения, то есть отсчет выпавших осадков, производятся при нормальных условиях один раз в сутки в 7 ч. утра или в 12 ч. дня. Результаты наблюдений в Австрии и Швейцарии в журнале наблюдений принято относить ко дню, предшествующему наблюдению. При дождях с большой интенсивностью, то есть при ливнях, наблюдения следует производить чаще, примерно каждые полчаса, и срочно сообщать их результаты центральным гидрологическим управлениям.

В журналах наблюдений и в ежегодниках осадки приводятся в миллиметрах водяного слоя, причем условными знаками обозначается, выпали ли осадки в виде дождя ●, снега \*, града ▲ или крупы Δ.

**Самопишущий дождемер — омброграф.** Простые дождемеры при дождях большой интенсивности могут отказаться работать, так что часто не представляется возможным проследить за ходом выпадения осадков, которые к тому же продолжаются всего несколько минут, при помощи обыкновенного объемного измерения в том виде, как оно было выше описано. Поэтому следует предпочитать самопишущие приборы, так как регистрация наблюдений в них происходит непрерывно и результаты наблюдений оказываются непосредственно представленными в графическом виде. График позволяет установить слой осадков в любой момент времени, значение которого может определиться иногда только впоследствии, и непосредственно дает ход интенсивности осадков.

<sup>1</sup> P. Descombes. Der Einfluss der Wiederaufforstung auf die unmittelbare Oberflächenkondensation. Mémoire de la Société météorologique de France, H. 2, 1920.

<sup>2</sup> E. Scheure. Zur Anschwellung des Hochwassers bei Wind, Z. d. österr. Arch.—Vereines, H. 51 u. 52, 1921.

Ing.

<sup>3</sup> О работе с дождемером-собирателем и простым дождемером в высокогорных местностях и о результатах измерений по ним производились исследования Лютшигом. О. Lutschig. Ueber Niederschlag u. Abfluss im Hochgebirge, Zürich 1926.

См.

Повсеместному введению самопишущих приборов, вместо простых дождемеров, препятствует как большая стоимость последних, так и невозможность в любом месте найти подходящий обслуживающий персонал. Опыт показывает, что достаточно заменить в важнейших пунктах гидрологической сети простые дождемеры омбрографами.

Самопишущий дождемер является соединением простого дождемера с устройством, автоматически регистрирующим приращение уловленных дождемером осадков. Это происходит или посредством нанесения на бумагу линий колебания уровня воды в мерном сосуде при помощи плавающего в нем поплавка или посредством опрокидывателей, снабженных автоматическими счетчиками наполнений мерного сосуда определенного объема.

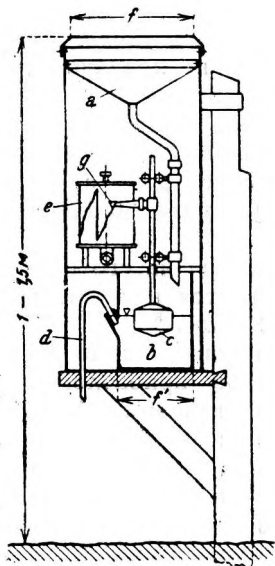


Рис. 6. Самопишущий дождемер системы Ганзена (Вена).

*a*—приемник; *b*—мерный сосуд; *c*—поплавок; *d*—сифон; *e*—барабан с часовым механизмом; *g*—самопишущее перо.

Омбрографы первой системы оказываются выгоднее, так как в них получается омброграмма в виде непрерывно нарастающей линии, допускающая детальный анализ хода осадков. Омбрографы второй системы, напротив, дают омброграммы с изображением нарастания скачками, но за то они представляют преимущество простотой передачи наблюдаемой величины осадков на расстояние.

Чтобы защитить омбрографы от замерзания и обеспечить быстрое таяние осадков при снегопаде, в них устраивается небольшой источник тепла в роде упомянутого при описании простого дождемера. Образец омбрографа первой системы изображен на рис. 6.

Воронкообразный сосуд — приемник *a* поверхностью *f* передает осадки мерному сосуду *b* поверхностью *f'*. Поплавок *c* поднимает перо *g* соответственно приращению осадков в мерном сосуде и чертит на

графленой бумаге барабана *e* в масштабе  $\frac{f}{f_1}$  наблюдаемую высоту уровня воды, а тем самым и высоту слоя осадков.<sup>1</sup>

Чтобы иметь возможность измерять любой силы осадки без применения несоразмерно больших размеров барабанов и мерных сосудов, вода из мерного сосуда после каждого его наполнения высасывается помощью сифона *d*.

На графленой бумаге по горизонтальной оси нанесен масштаб времени, который назначается, исходя из размеров окружности барабана и времени его оборота; для образца на рис. 6 масштаб составляет один или два дня.

Омброграмма представляет собой интегральную кривую, прерываемую вертикальными линиями, которые обозначают наступающие (время от времени) наполнения мерного сосуда (рис. 7). Так как ординаты суммарной кривой (составляющейся иногда из нескольких отрезков) представляют высоту слоя осадков до данного момента времени, а абсциссы — продолжительность осадков до этого же момента, то тангенс угла наклона  $\alpha$  выражает интенсивность осадков.

Ход барабана, приводимого в движение от часового механизма (которому барабан служит футляром), составляет обычно семь дней. При известных обстоятельствах можно в течение всего семидневного срока употреблять для записей одну и ту же графленую бумагу. Чтобы различать в подобных случаях начерченные одна над другой омброграммы, является целесообразным

<sup>1</sup> Применение взамен перьев карандашей и серебряных штифтов не особенно себя зарекомендовало. Серебряные штифты требуют баритовой бумаги.

отмечать отличительными знаками начало и конец каждой отдельной омброграммы.

Образец дождемера с измерениями, перебиваемыми опорожнениями мерного сосуда, дает рис. 8. Этот способ измерения приспособлен также для передачи хода осадков на расстояние.

Оборудование состоит из дождемера с присоединенным к нему электрическим передатчиком и приемником, снабженным самопишущим устройством, место установки которого является независимым от места установки собственно дождемера.

Измерение осадков в дождемерах данной системы происходит посредством челнока Хорна. Последний состоит из двух чашек *a, a*, которые попеременно принимают каждая по  $5 \text{ см}^3$  воды, что составляет слой в  $0,1 \text{ мм}$  осадков, при поверхности дождемера в  $500 \text{ см}^2$ . С наполнением одной из чашек челнока, он опрокидывается, опорожняется и своим поворотом при-

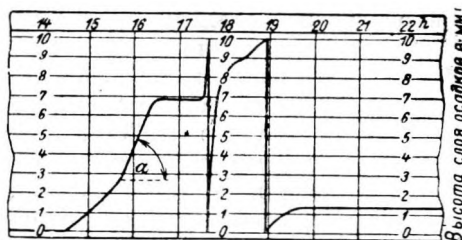


Рис. 7. Омброграмма к дождемеру на рис. 6.

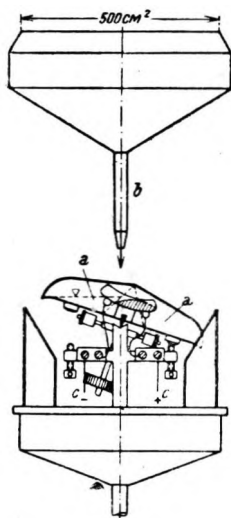


Рис. 8. Передатчик дождемера, приспособленного для передачи наблюдений электрическим путем на расстояние, системы Шпрунг—Фюсс.

*a*—челнок; *b*—трубка, подводящая осадки; *c*—провода передачи.

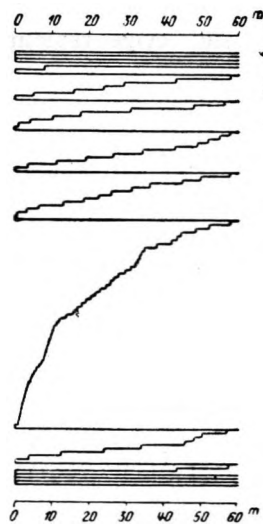


Рис. 9. Омброграмма к дождемеру на рис. 8.

водит другую чашку под подводящую трубку *b*. При каждом опорожнении любой из чашек *a* по проводам передачи *c* проходит ток, вызывающий в приемнике передвижение ленты самописца на  $0,5 \text{ мм}$ . Перо самописца автоматически передвигается поперек ленты трехсантиметровой ширины, пересекая ее за час времени, и затем быстро возвращается назад, благодаря чему омброграмма приобретает изображенную на рис. 9 ступенчатую форму. В конце каждого часа перед обратным пробегом пера лента самописца опускается на  $0,5 \text{ мм}$ , чтобы предотвратить тем самым расплывание чернил по бумаге в те периоды, когда не бывает осадков. Последнее должно быть учтено при установлении общей высоты слоя осадков. Этот измерительный прибор требует постоянного тока напряжением в 6 вольт.

## II. УРОВЕНЬ ВОДЫ

### ОРГАНИЗАЦИЯ РЕЧНОЙ ВОДОМЕРНОЙ СЛУЖБЫ

Уровень воды в открытом водотоке, отводящем воду с какого-либо водосбора, равно как уровень воды в подземном водотоке, находится в причинной связи с осадками.

Бедствия, причиняемые высокими водами, как видно, раньше всего обратили внимание на это обстоятельство и подали повод к наблюдениям и закреплению на местности исключительных по высоте стояний уровня воды.<sup>1</sup> Затем, рост сельскохозяйственного использования земель наряду с осознанием значения удобряющего действия богатых илистыми наносами паводковых вод повели к установлению постоянных наблюдений уровня воды. Судоходство, использование водной энергии и сельское хозяйство из технических и правовых соображений требовали усовершенствования способов наблюдений и однообразной организации водомерной службы.

Как и при наблюдениях над осадками, водосборы речных систем покрываются сетью водомерных станций. На этих станциях в определенные сроки производятся измерения уровня поверхности воды. Простейшим образом это производится путем отсчета высоты уровня по некоторой, разбитой на деления шкале, то есть по рейке (Pegel).<sup>2</sup>

Выбор места под водомерный пост, расстояние между постами, производство наблюдений и сбор водомерных данных регулируются общими правилами, существующими на этот счет, и отчасти местными условиями и, наконец, целью, преследуемой наблюдениями. Здесь выработаны установки и, которые, хотя и учитывают в зависимости от условий отдельных стран, и районов их особенности, в общем и целом обнаруживают известное единообразие.<sup>3</sup>

При выборе места под водомерный пост необходимо следить за тем, чтобы уровень воды в профиле поста являлся производной только естественных условий стока в данном речном русле. Изменение продольного профиля поверхности воды под влиянием действия разборчатых плотин, подпора от притоков или от главной реки, когда пост расположен на притоке, не должны распространяться до поста. Надо также следить за тем, чтобы чисто местные препятствия, как то: камни, расположенные ниже поста по течению, самый способ прикрепления реек к сваям или мостовым устоям, тип поста — не нарушали естественного стояния уровня и тем самым не снижали точности наблюдений. Необходимо также предусмотреть возможность залома поста сплавом, промерзания и заиления его и принять меры, обеспечивающие доступ воды к нему в течение продолжительного времени.

Водомерные посты надо размещать таким образом, чтобы они располагались на главной реке (выше и ниже впадения более крупных притоков) и на самих притоках, на устьевых участках. Между каждым двумя крупными притоками при большом между ними расстоянии помещают еще один пост или, если расстояние между устьями притоков очень велико, несколько постов. Во избежание дорого стоящего и чрезмерного дробления водомерной.

<sup>1</sup> Так, например, сведения о наивысшем из известных на Дунае уровнях высоких вод в 1501 г. дошли до нас в виде ряда художественно исполненных марок. На воротах в г. Линце на Дунае на мраморной плите имеется такая надпись:

"Hiemit disem Stain betzaichent stat Wie hoch die Tunaw geraichet hat Das ist beschehen im Monet Augusti bey Regierung römischen König Maximilian Da von Christi gepurde ergangen war Tawsennt Fünfhundert und ain Jar\*."

<sup>2</sup> Термин "Pegel" означает, строго говоря, шкалу с делениями, рейку. Но в курсе им обозначается и водомерное устройство в целом, то есть водомерный пост. Во всех таких случаях слово „Pegel“ переводилось как водомерное устройство или водомерный пост. (Прим. пер.).

<sup>3</sup> Сжатый обзор дает R. R u n d o . Die Arbeitsmethoden auf dem Gebiete des Pegelwesens- und deren Vereinheitlichung. Труды III Гидрологической конференции Балтийских стран 1930 г.

сети, на менее крупных притоках следует ограничиться только одним постом на устьевом участке. Особое внимание при разбивке сети следует еще уделять тому обстоятельству, чтобы участок реки, на котором устанавливается пост, был возможно более правильной формы и находился в состоянии временного равновесия.

Правда, удовлетворить полностью указанным общим правилам не всегда представляется возможным, так как выбор водомерных наблюдений привязывает водомерные посты к более крупным населенным пунктам, а (при известных обстоятельствах) решающим фактором для выбора места под водомерный пост оказывается наличие мостов и мостиков, конструкции которых весьма удобны для прикрепления водомерных реек.

Местоположение поста следует выражать в километрах по длине реки, считая от устья вверх по реке, так как устье реки обычно можно установить совершенно бесспорно.

Высотное положение водомерных постов выражается через высотное положение нуля поста (нуля делений поста — der Pegelteilung). Положение этой существенно важной точки устанавливается путем измерения разности по высоте между нулем и репером, установленным в непосредственной близости от него, и, в дальнейшем, путем привязки отметки репера к государственной сети точных нивелировок. Установлению этих величин следует придавать очень большое значение, так как иначе, при замене поврежденного поста (постовой рейки), он мог бы оказаться в высотном отношении в неправильном положении и, при неизвестной величине смещения нуля, все дальнейшие по нему наблюдения были бы, если и не совершенно обесценены, то во всяком случае могли бы быть использованы только с известными допущениями.<sup>1</sup>

Разбивка водомерной сети в окончательном виде—дело опыта. Во всяком случае, надо стремиться обойтись возможно меньшим числом постов, что достигается целесообразным размещением их и установкой постов специального устройства и назначения. Так, для целей проектирования и сооружения, гидростанции могут обойтись устройством вспомогательных или временных постов (Hilfspegeln), которые разместятся между областными или постоянными постами (Gebietspegeln), то есть постами опорной сети с долготным сроком наблюдений. При устройстве водомерной сети следует, так же как и для дождемерной сети, стремиться продвигать водомерные посты в высокогорные районы, чтобы иметь возможность точнее проследить там явления таяния, которые еще недостаточно исследованы.

Густота водомерной сети изменяется вместе с густотой речной сети, связана с орографическими условиями страны и, в конечном счете, является показателем ее водохозяйственного развития. В Австрии один водомерный

<sup>1</sup> Рассматривая главным образом речные посты, то есть посты с неподвижной шкалой делений, проф. Шаффернак понимает нуль поста (или графика) как нуль этой шкалы или нуль рейки. Он совершенно правильно считает недопустимым изменение этим нулем своего положения, но при этом связывает это условие с требованием обязательной установки рейки при ее заменах точно в прежнее положение. В нашей специальной литературе и в производстве важнейшее понятие нуля поста (или графика, что одно и то же) толкуется более широко. Нулем поста называется неизменная высотная отметка, выбираемая в створе поста при единственном условии, чтобы она была ниже наинизшего возможного уровня воды. (Последнее условие связано с неудобством выражать уровни отрицательными числами.) При этом условии нуль рейки, головки свай и другие возможные точки или нули наблюдений, в возвышении над которыми производится непосредственное измерение (отсчет) уровня воды, обычно располагаются выше нуля поста. Их высотное положение определяется нивелировкой от репера, а возвышение каждой из них над нулем поста вычисляется как разность нивелировочной отметки точки и принятой отметки нуля поста. Эти возвышения называют приводками (приводка нуля рейки, приводка свай № 1 и т. д.). Нуль поста не меняется, но, поскольку он не связан с точками наблюдений, изменение рейкой или сваями своего положения не отразится на его неизменности и является допустимым, при условии немедленного закрепления нивелировкой нового положения нуля рейки, головки свай и т. д. Понятно, что изменения в положении нуля рейки и головок свай приводят к изменению их приводок. (Прим. пер.).



пост приходится в среднем на  $170 \text{ км}^2$  площади водосбора или, соответственно, на  $20 \text{ км}$  речной сети.

Водомерные посты различаются также по своему устройству и оборудованию и по дополнительным наблюдениям на них.

Так, за постами, оборудованными обыкновенными деревянными рейками с односрочными наблюдениями в 7 ч. утра или в 12 ч. дня, следуют посты, снабженные специально изготовленными водомерными рейками, и трехсрочными наблюдениями в 7, 12 и 17 часов. Наконец имеются посты с самопишущими приборами, которые дают непрерывную запись уровня воды и бывают соединены еще с устройством для передачи уровня на большие расстояния.

На некоторых постах к измерению уровня воды присоединяются наблюдения над температурой воды, ледовыми явлениями и движением взвешенных

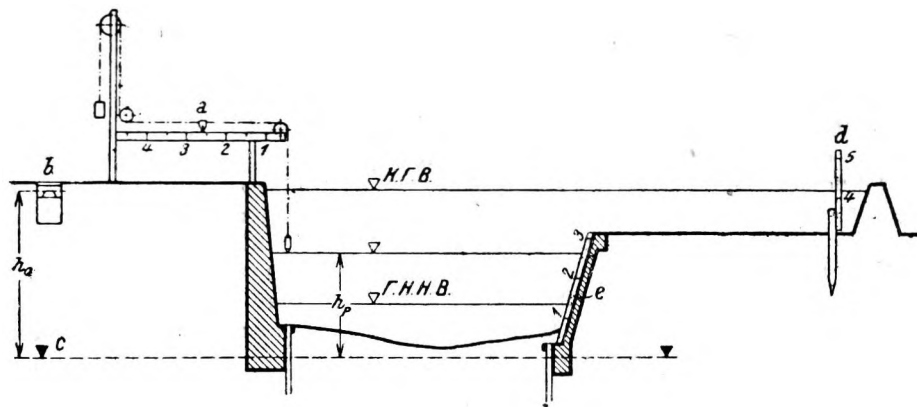


Рис. 10. Схема водомерного поста (в поперечном разрезе).

*a*—горизонтальная рейка; *b*—репер; *c*—нуль поста (нуль рейки); *d*—вертикальная рейка для высоких уровней; *e*—наклонная рейка для низких уровней.

наносов, а также над различными явлениями погоды. Кроме того, в случаях особо высоких подъемов воды, если пост не оборудован самопишущими приборами, наблюдатели обязаны производить измерение уровня воды через более короткие промежутки времени, обычно каждые полчаса, и возможно скорее передавать сведения в центральные гидрологические учреждения.

#### ПРОИЗВОДСТВО ВОДОМЕРНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ НА РЕКАХ

Измерение уровня воды производится в профиле водомерного поста, то есть в поперечном сечении водотока, совпадающем с водомерным постом.

Расположение и устройство поста зависит от общих технических условий на месте, от формы и строения русла в створе поста (рис. 10). Обычными являются посты с вертикальной рейкой; наклонные рейки применимы только там, где имеются защищенные одеждой береговые откосы с достаточным углом наклона и не приходится опасаться их осадки; горизонтальные посты встречаются как исключение. Для поперечных сечений с поймой, часто из соображений лучшей доступности, оказывается необходимым разбить пост на две части — для низких вод и для высоких вод.

Нуль поста следует закладывать глубже наинизшего когда-либо возможного уровня воды и притом с учетом возможного углубления русла, чтобы всегда получать только положительные отсчеты, которые, как известно из опыта, влекут за собой меньше ошибок, чем отсчеты, при которых приходится считаться со знаком (плюс или минус)

Уровень воды на посту  $h_p$  дается обычно в сантиметрах. Если при отсчете замечается периодическое колебание уровня воды, следует брать сред-

нее из наибольшего и наименьшего отсчетов. Ненадежными показания поста становятся при временных сужениях профиля поста,<sup>1</sup> при прибыли воды от таяния, а также при заборе воды из реки или попуске воды в реку, вследствие чего в русле могут возникнуть явления с резким характером изменений во времени. В качестве редких (однако все же заслуживающих внимания) фактов влияния на показания поста в стоячих водах следует упомянуть давление ледяного покрова, сейши и ветровой подпор.

При разрушении поста должен быть возможно скорее установлен аварийный пост, нуль которого следует затем увязать с восстановленным постом, чтобы иметь возможность использовать произведенные за это время по аварийному посту отсчеты.

Оборудование водомерных постов, служащее для измерения уровня воды, количественно и качественно разнообразнее приборов, употребляемых для измерения осадков, так как в первом случае необходимость приспособляться к цели и месту производства измерений требует большего разнообразия. Ниже, при описании оборудования, оно расположено в порядке возрастающей точности и применимости устройств и приборов.

**Водомерные колья или сваи.** Они пригодны только для второстепенного значения наблюдений и забиваются в грунт на мелком месте у левого или правого уреза воды. Головки свай нивелируются, а уровень поверхности воды измеряется от них.

**Водомерные рейки.** Для наблюдений более длительных, но временного характера, применяют водомерную рейку с обыкновенным сантиметровым делением, прикрепляемую к деревянной свае.

Для постов постоянного действия, следовательно для постов опорной сети, в целях облегчения отсчетов уровня, употребляются постовые приспособления наподобие реек с точным делением, прочной выделкой и разнообразной формы. Прочность достигается хорошим качеством и пропитыванием дерева, а также изготовлением делений и цифр из железа, алюминия, меди или целлулоида (рис. 11). Имеются в употреблении рейки, целиком сделанные из чугуна или железа. Их для большей прочности покрывают масляной краской или эмалью (рис. 12).

Для облегчения отсчетов применяются рейки с делениями, исполненными в несколько красок, как и у нивелирных реек. Особенность представляет рейка, преимущественно употребляемая швейцарской гидрологической службой, вырезаемая нацело из полосы железа (рис. 13). Эта рейка, благодаря продуманному расположению на ней прямоугольных и остроугольных зубчатых делений, позволяет легко производить отсчеты при любого рода освещении и на любом фоне. Вследствие своей незначительной толщины она не вызывает подпора и волнений на поверхности воды, которые могли бы неблагоприятно отразиться на отсчетах.

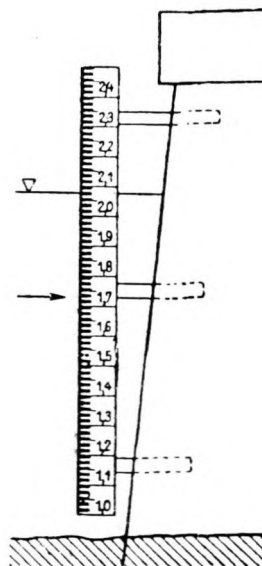


Рис. 11. Обыкновенная деревянная рейка на мостовом устье.

<sup>1</sup> Одним из серьезных факторов стеснения русла, вызывающим повышения уровня воды, является зарастание русла травой. На многих подверженных этому явлению реках зарастание русла ставит под вопрос применимость кривых связи уровней и расходов воды. Исследование этого явления только начинается. См. Г е р б и х. Определение влияния растительности на подъем уровня воды в реках: Брда, Чарна-Вода, Вирчик и Радунь. Труды IV Гидрологической конференции Балтийских стран, вып. 103; инж. Фауст. Основные черты метода исследования процесса течения на заросших растительностью речных участках. Труды IV Гидрологической конференции Балтийских стран, Ленинград. (Прим. пер.)

**Водомерные устройства с поплавком.** Водомерные рейки, благодаря прочному изготовлению их, хорошо зарекомендовали себя даже при перемен-

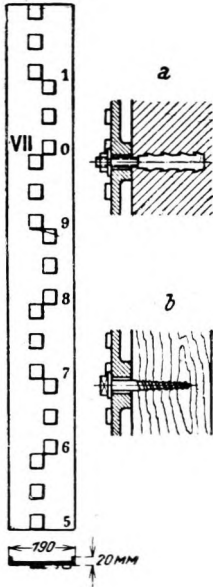


Рис. 12. Чугунная рейка.  
а—закрепление в каменной кладке; б—закрепление в дереве.

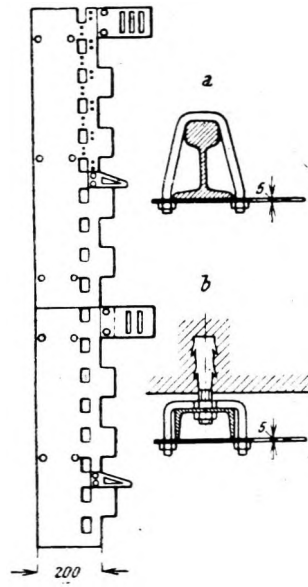


Рис. 13. Железная рейка.  
а—прикрепление к железнодорожному рельсу; б—прикрепление к железу U-образного сечения.

ных климатических условиях. Они, однако, неприменимы там, где затруднена их видимость, как например, при закрытом зеркале воды непосредственно выше и ниже силовых установок. В таких случаях с успехом применяют водомерные устройства с поплавком. Поплавок, изготовленный из дерева, или лучше из железа, покоится на поверхности воды, и уровень воды передается от него при помощи направляющей стойки или шнура к указателю, а через него на вертикальную шкалу делений или на циферблат.

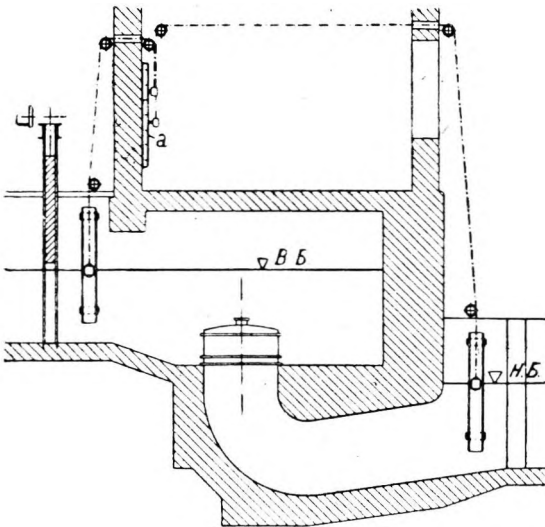


Рис. 14. Водомерное устройство в машинном здании гидростанции, служащее для регистрации уровней в верхнем и нижнем бьефах.

Если подлежит сравнению высота стояния уровня двух водных поверхностей, помещают, ради удобства, передачи указателей и деления обеих рек рядом, что дает возможность непосредственно отсчитывать разность уровней (рис. 14). Улучшения в этом устройстве можно достигнуть тем, что нижний поплавок будет передавать свои движения на подвижную рейку, перемещающуюся между обеими неподвижными рейками верхнего и нижнего бьефов. Подобное устройство называют дифференциальной рейкой (рис. 15).

Чтобы сделать возможным отчет уровня с больших расстояний, что часто бывает желательным при судоходстве, передают движения поплавка на два больших барабана, по которым скользит лента, размеченная делениями и цифрами. Подобные скользящие рейки (Rollbandpegel) имеют передаточные масштабы до 5:1, и отсчеты по ним можно легко брать с расстояния до 1 км (рис. 16).

Устройства с циферблатом вполне позволяют согласно с законами механики, передавать для отсчетов изменения уровня воды в отношении

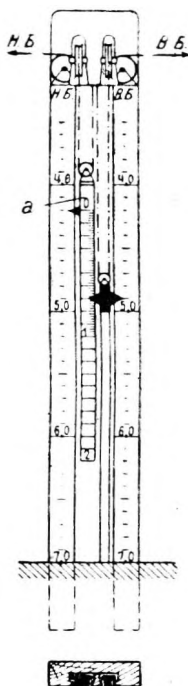


Рис. 15. Дифференциальная рейка.  
а—подвижная рейка.

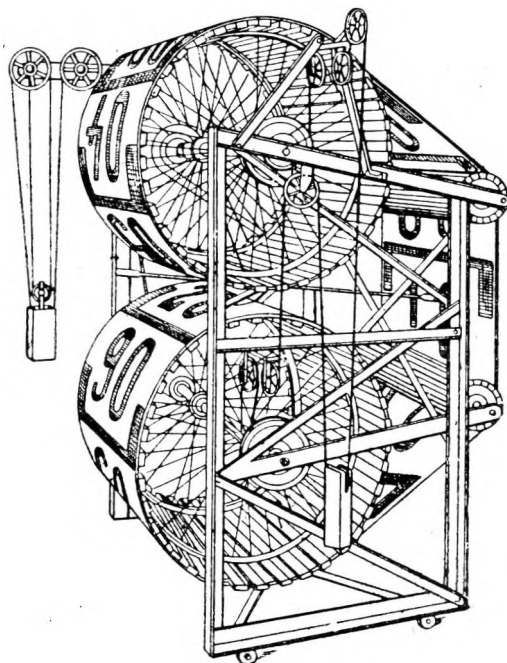


Рис. 16. Рейки на катушках.

до 20:1. Устройства с циферблатом с успехом применяются на водосливах и при измерении уровня грунтовых вод, где требуется исключительная точность измерений.

В устройстве, изображенном на рис. 17, поплавок  $S$  подвешен на шелковой нити, намотанной на зубчатый барабан с радиусом  $r$ , который приводит в движение стрелку, длиной  $R$ , с незначительным собственным весом. Гиля  $G$  служит противовесом. Движению стрелки не препятствуют никакие другие части конструкции, почему для отсчетов может быть использован полный круг циферблата.

В устройстве, показанном на рис. 18, благодаря применению балансира, достигается большая чувствительность. Однако амплитуда колебания стрелки здесь ограничена и вместе с тем сужены, по сравнению с конструкцией рис. 17, пределы измерения.

Некоторые исследования требуют определения среднего положения уровня воды, который даже при постоянном расходе воды подвержен небольшим периодическим колебаниям. Эти колебания происходят вследствие явлений пульсации в водном потоке. Для решения указанной задачи необходимо возможно большее смягчение колебаний. В поплавковых устройствах.

такое смягчение достигается посредством уменьшения входного сечения для доступа воды в колодец или трубу, где плавает поплавок.

Пример поплавкового устройства, оборудованного радикальным гасителем колебаний уровня, представляет гидрометрическая нивелировочная

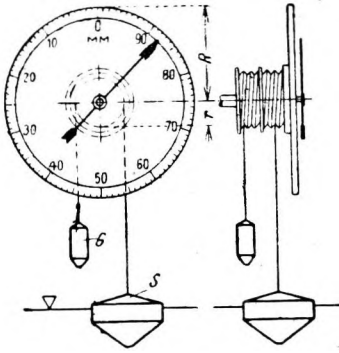


Рис. 17. Водомерное устройство с циферблатом при неограниченной амплитуде колебания стрелки.

$S$  — поплавок;  $G$  — противовес;  $R/r$  — передаточное число.

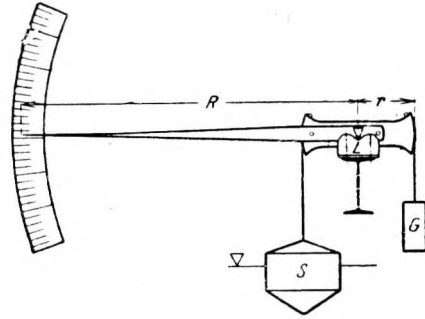


Рис. 18. Водомерное устройство с циферблатом при ограниченной амплитуде колебания стрелки.

$S$  — поплавок;  $G$  — противовес;  $L$  — балансир;  $R/r$  — передаточное число.

рейка (рис. 19). Она служит для измерения средних уровней водных поверхностей в отдельных точках.

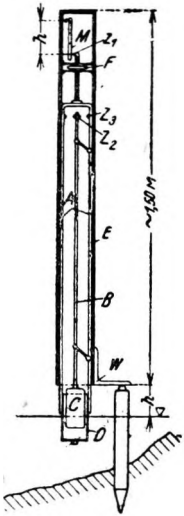


Рис. 19. Гидрометрическая нивелирная рейка системы Шаффернака.

Это устройство состоит из футляра  $E$  с неподвижной шкалой делений  $M$ , укрепленной при помощи уголка  $W$  на свае и из U-образной рамы  $A$  с сосудом-гасителем  $D$ , в котором помещается поплавок  $C$  на подвижной штанге  $B$ . Если переставлять раму  $A$  установочным винтом  $F$  до тех пор, пока совпадут указатели  $Z_2$  и  $Z_3$ , тогда указатель  $Z_1$  покажет высоту уровня воды относительно головки сваи. Размеры успокоителя должны немного превосходить размеры поплавка, изготовляемого с плоскими гранями. Длину прибора надлежит выбрать таким образом, чтобы отсчитываемый горизонт приходился, примерно, на уровне глаза наблюдателя.

#### Посты с самопишущими приборами — лимниграфы.

В тех случаях, когда приходится придавать значение непрерывному измерению уровня воды, то есть имеется в виду подробно исследовать ход уровня, рекомендуется устанавливать самопишущий прибор, называемый лимниграфом. Все типы его основаны на соединении поплавочного устройства с приспособлением для автоматической записи наблюдений, при помощи которого колебания уровня воды изображаются в определенном масштабе на графленной бумаге в виде графика хода уровня, называемого лимниграммой.

Барaban лимниграфа приводится в движение пружинным или электрическим часовым механизмом. Нить, на которой подвешен поплавок, не должна подвергаться значительному влиянию температуры и влажности. Инерция движущихся масс поплавка и преодолевающего трение в подшипниках противовеса создает конструктивные трудности. Лимниграфы изготовляются самых различных систем: переносные (ручные) и неподвижные (закрепляемые на месте), с вертикальным и с горизонтальным барабаном, с различной длитель-

ностью хода, автоматической остановкой часов и разных масштабов. В отношении ухода за лимниграфами действительно все то, что указано для самопишущих дождемеров. Надо иметь в виду, что на лимниграммах расплывчатые линии получаются не только от нечистых перьев, но и от периодических коротких колебаний уровня и под влиянием инерции прибора. Чтобы получать чисто написанные лимниграммы, надо стремиться к возможному смягчению этих колебаний. Из этих соображений большие лимниграфы ставят над колодцами, которые сообщаются с рекой посредством узких глубоко заложенных труб (рис. 20 и 21) или высоко проведенных сифонов (рис. 22). Чем меньше отношение между входным сечением труб и сечением колодца, тем действительнее гашение колебаний. Это отношение должно составлять 1:120 или еще менее.

Предохранить поплавки от замерзания можно введением в колодец минеральных масел.

Маслянистый слой должен

быть толще, чем самый толстый слой льда. Это покрытие воды слоем масла обладает еще тем достоинством, что предотвращает подъем водяных паров и осаждение их на металлических частях прибора. Поэтому можно не отапливать лимниграфной будки при введении в колодец масла.

Небольшие лимниграфы снабжаются узкими закрытыми

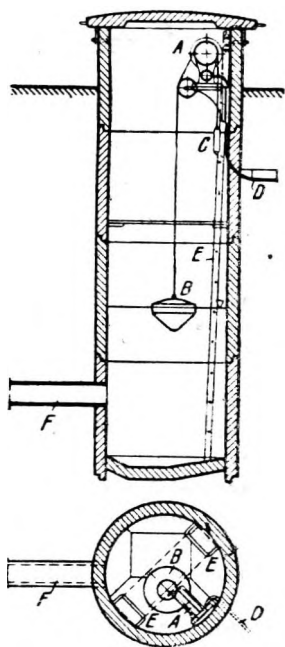


Рис. 21. Поплавочный колодец водомерного устройства с электрическим передатчиком на расстояние (системы Отта).

A—передатчик; B—поплавок; C—противовес; D—линия передачи; E—лесенка; F—соединительная труба.

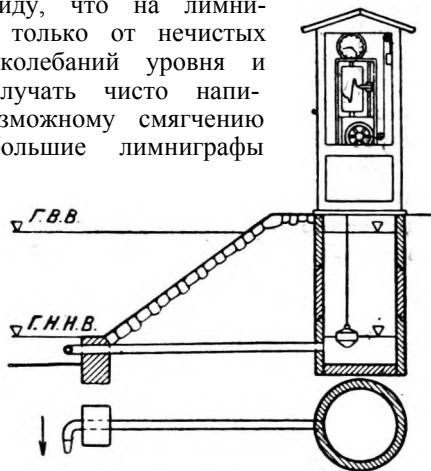


Рис. 20. Лимниграф с глубоко заложеной соединительной трубой от колодца к водотoku.

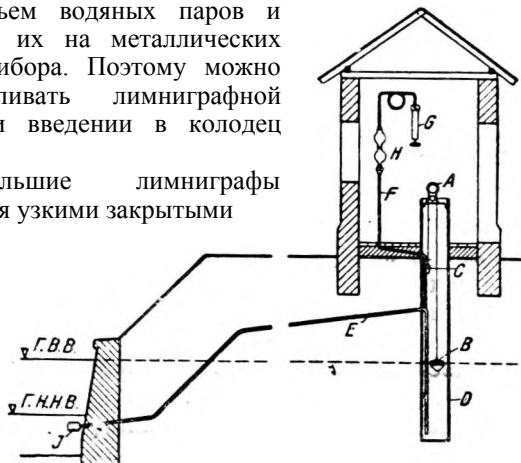


Рис. 22. Водомерное устройство с передачей на расстояние и высоко проложенной соединительной трубой-сифоном.

A—передатчик; B—поплавок; C—противовес; D—колодец; E—труба-сифон; F—всасывающая труба; G—воздушный насос; H—отделитель воздуха; I—всасыватель.

поплавковыми трубами с небольшими отверстиями в дне. Они прикрепляются к сваям и стенкам набережных или к специальным опорам. Дно трубы должно быть съемное для чистки ее от возможного заилиения. Внутренний диаметр трубы должен быть, по крайней мере, на 4 см больше диаметра поплавка (рис. 23).

В дополнение к лимниграфу следует устанавливать речный пост. Последний помещается рядом с лимниграфом над одним общим нулем и должен служить в качестве контрольного и вспомогательного поста.

Для защиты приборов от повреждений и погоды имеют обыкновение устанавливаться закрывающиеся будки, подобно изображенным на рис. 20, 22 и 23, и делать их доступными со стороны реки.

Наиболее употребительные типы лимниграфов показаны на рис. 24 и 28.

Для измерений уровня воды, которые должны производиться с особенной точностью и при которых имеют значение длинные периоды записи, следует рекомендовать лимниграфы с вертикальным барабаном (рис. 24).

Все части прибора заключены в прочном чугунном корпусе *St*, расположены компактно, но легко обозримы. Часы *U* и барабан *T* приводятся в движение общим часовым механизмом с пружинным заводом. Длительность завода обычно от одного дня до месяца, но может быть увеличена. Под

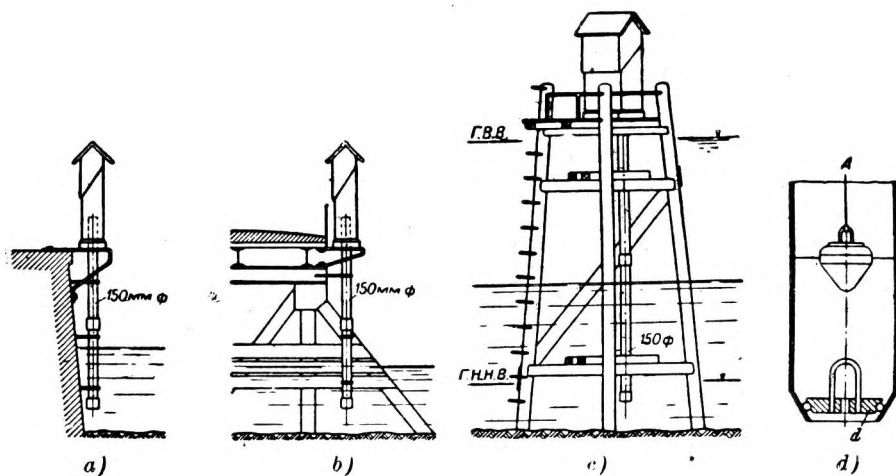


Рис. 23. Малый лимниграф с поплавковой трубой.

*a*)—прикрепленный к набережной; *b*)—укрепленный на мосту; *c*)—установленный на специальной конструкции; *d*)—нижний конец трубы с гасителем колебаний.

барабаном помещаются поплавковое колесо *GR* и переменные зубчатки *KR*, при помощи которых вертикальный масштаб может быть изменяем с 1:1 до 1:20. Рядом с барабаном помещается передача от зубчаток к обойме пера *SK* и сокращенная водомерная рейка *P*. Обойма с пером *F* приводится в движение зубчатой рейкой *Z* или проволоочной передачей. Повыше поплавкового колеса приспособлено контрольное промерное устройство с бронзовой лентой *M*. Опуская на ней лот до диска *LT* поплавка, можно проконтролировать правильность записи лимниграфа.

Улучшение самопишущего устройства может быть достигнуто включением обратного механизма (рис. 25). Благодаря ему пики уровня *a'*, *b'* и т. д., которые иначе терялись бы за пределами графика, загибаются вовнутрь по линиям *a*, *b* и т. д. Это достигается червячной штангой, имеющей как правую, так и левую нарезку, которые против краев барабана соединены петлей и вследствие этого изменяют направление движения регистрирующего рычага.

Загнутые участки лимниграммы находят по двойным острым вершинам, выступающим по краю бумаги. При подобном устройстве лимниграфа его амплитуда записи не ограничена.

Лимниграф описанной конструкции может получить еще разнообразные приспособления. Метки времени предохраняют записи от сокращений бумаги. Этот источник ошибок может быть исключен также тем, что острие производит запись (вместо бумаги) прямо по покрытому черным лаком барабану, Особенно длинные периоды записи, до 6 месяцев, на одном барабане получают при многократных оборотах барабана и автоматическом и непрерывном сдвиге его самого (рис. 26) или толчкообразном сдвиге обоймы

с пером (рис. 27). При этом рисунок получается в виде линий, расположенных одна внутри другой или одна над другой.

На одном и том же барабане может одновременно производиться запись нескольких явлений, например: колебаний уровня верхнего и нижнего

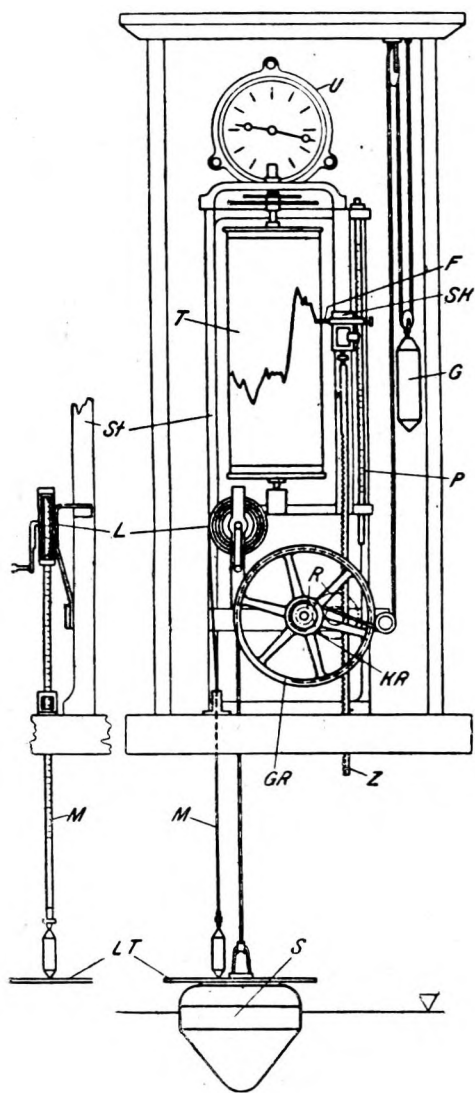


Рис. 24. Лимниграф с вертикальным барабаном системы Отта (1/12 nat. вел.).

*U*—точные часы; *T*—барабан-самописец; *F*—самопишущее перо; *S*—поплавок; *GR*—большой поплавокый блок; *KR*—малый блок противовеса; *G*—противовес; *R*—переменные зубчатки для разных передач; *Z*—зубчатая рейка; *SK*—обойма пера; *P*—сокращенная водомерная рейка.

Блок *R* тесно связан с барабаном лимниграфа через сцепление *K* и систему зубчатых колес  $Z_1—Z_7$ . Включением по выбору переменных зубчаток  $Z_4$  и  $Z_5$  можно уменьшать действительные колебания уровня при их записи в отношениях 1:20, 1:10, 1:5, 1:2. При сдвиге сцепления *K* вправо осуществляется непосредственное соединение колеса *R* с осью барабана и достигается масштаб изображения 1:1.

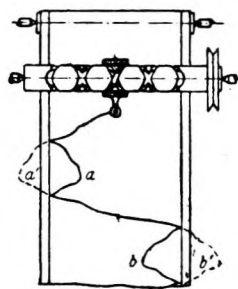


Рис. 25. Оборотный механизм.

бьефа, разности уровней у гидроэлектрической установки или открытия лопастей нескольких турбин.

К нормальным установкам присоединяют еще секундные контактные механизмы с быстро вращающимися барабанами, делающими один оборот за несколько минут. Они имеют значение, преимущественно, для научных исследований. Кроме того, могут присоединяться дополнительные приспособления со сравнительно простыми механизмами, которые (наряду с уровнем) вычерчивают колебания и расходы воды или, сверх того, производят еще суммирование уровней или расходов воды.

Для записи уровня с очень большой амплитудой колебаний, как, например, в подпертых бьефах, удобны лимниграфы с горизонтальным барабаном, где ось уровней проходит по окружности барабана, а ось времени—параллельно оси барабана (рис. 28).

Барабан может вращаться в обоих направлениях бесконечно; поэтому и наибольшие колебания уровня могут быть на нем воспроизведены в крупном масштабе.

Нить от поплавка *S* направляется через ведущий блок *R* к противовесу  $G_1$ .



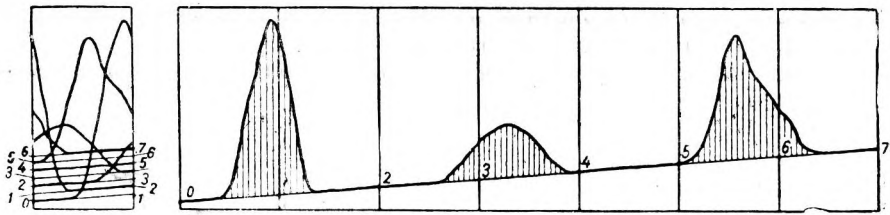


Рис. 26. Лимниграмма при неоднократных оборотах барабана и равномерном его передвижении.

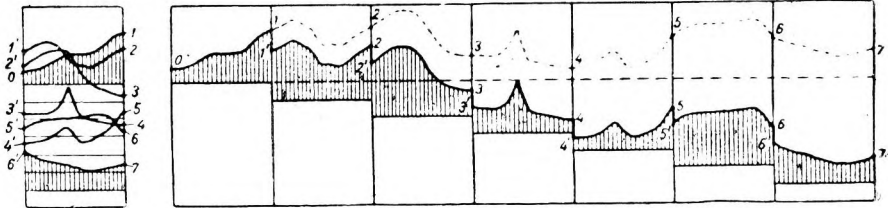


Рис. 27. Лимниграмма при неоднократных оборотах барабана и ступенчатом сдвиге обоймы с пером.

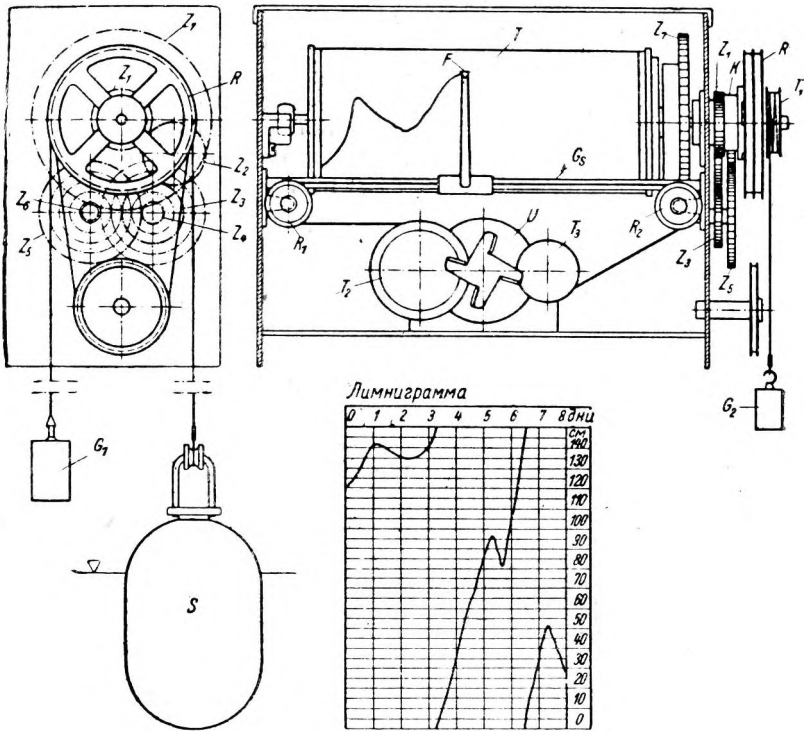


Рис. 28. Лимниграф с горизонтальным барабаном (1/5 нат. вел.).  
*S*—поплавок; *R*—ведущий блок; *G*<sub>1</sub>, *G*<sub>2</sub>—противовесы; *K*—сцепление; *Z*<sub>1</sub>, *Z*<sub>2</sub>—зубчатки;  
*T*—барабан-самописец; *F*—самопишущее перо; *G*<sub>3</sub>—стержень; *U*—часовой механизм;  
*T*<sub>1</sub>—*T*<sub>3</sub>—колеса передачи; *R*<sub>1</sub>, *R*<sub>2</sub>—катушки.

Гиря  $G_2$  уравновешена с гирей  $G_1$  (а также с поплавком) и служит для устранения мертвого хода зубчатой передачи. Регистрирующее перо  $F$  скользит по стержню  $G_3$  слева направо и приводится в движение от часового механизма при посредстве тросовой передачи, пропущенной через колесо  $T_2$ , катушки  $R_1$  и  $R_2$  и зубчатое колесо  $T_3$ . Помощью переменных зубчаток может быть выбрано перемещение пера в 6,0, 1,0 и 0,25 мм в час, соответствующее общему времени хода его, определяемому длиной барабана, в 32 часа, 8 дней и 32 дня.

Изменения и упрощения описанных стационарных лимниграфов приводят к типам, которые при меньшей точности обладают большей портативностью. Переносные лимниграфы с вертикальными и горизонтальными барабанами и незначительной полезной высотой, до 20 см, могут одинаково служить для записи уровня в открытых водотоках и для наблюдений за уровнем грунтовых вод.

Защита механизмов от пыли и насекомых осуществляется и у типов с самыми малыми размерами (рис. 29).

**Передаточные посты.** Лимниграфы описанных выше конструкций отлично служат для получения лимниграмм, а вместе с тем и для анализа хода уровня. При эксплуатации гидросиловых установок, прежде всего в деле прогноза уровней, требуется, однако, еще скорейшая передача уровня на более или менее значительные расстояния. Этому требованию удовлетворяют автоматически действующие устройства по передаче уровней на расстояние, так называемые передаточные посты.

Подобные устройства состоят в основном из передатчика (Geber), то есть из устройства, которое на месте регистрирует изменения уровня, из собственно передачи на расстояние этих изменений, осуществляемой механическим, гидравлическим, пневматическим или электрическим путем, и из одного или нескольких приемников, которые воспроизводят переданные наблюдения на шкале делений или на самопишущем приборе.

Механическая передача осуществляется веревочной или проволочной тягой. При помощи ее можно передавать движения поплавка к регистрирующему устройству на расстояние около 30 м (см. рис. 14).

При передачах гидравлическим способом используется принцип сообщающихся сосудов, причем в качестве соединителя между руслом и колодез, где плавают поплавки, применяется узкая труба. Эта труба, которая и представляет гидравлическую передачу, либо заложена на большой глубине (см. рис. 20 и 21), либо во избежание лишней земляных работ, устроена в виде сифона с заложением ниже глубины промерзания грунта (см. рис. 22). Гидравлическая передача применяется только на небольшие расстояния и служит нередко лишь первой ступенью для примыкающей к ней электрической передачи уровней воды на большие расстояния (см. рис. 21).

Пневматической передачей могут покрываться расстояния, примерно, до 300 м.

При пневматической передаче обычно, вместо плавающего в колодезе поплавка, применяется медный воздушный колокол  $a$ , который должен располагаться обязательно ниже наинизшего уровня воды. Передачей и соединителем водомерного пункта с приемником служит толстостенная свинцовая труба  $b$ , диаметром в свету от 3 до 4 см, закладываемая, во избежание температурных явлений, возможно глубже в землю.

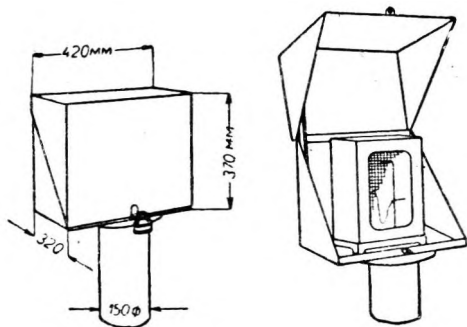


Рис. 29. Железный футляр для переносных лимниграфов.

Приемник представляет собой или ртутный манометр  $g$ , позволяющий делать точные отсчеты, или протарированный циферблат или самопишущий прибор (рис. 30). Если применяется ртутный манометр, то глубина погружения воздушного колокола  $\Delta h$  передается в масштабе

$$1 : \frac{\gamma_q}{\gamma_w}, \text{ где } \gamma_q \text{ — удельный вес ртути и } \gamma_w \text{ — удельный вес воды.}$$

В линию передачи следует накачивать воздух, примерно, каждые четыре недели, для чего предусмотрен воздушный насос  $f$ . Во избежание накачивания влажного воздуха, который мог бы послужить к конденсации влаги в трубах, к воздушному насосу пристраивается камера, наполненная серной кислотой, где накачиваемый воздух подвергается высушиванию. В самопишущем приборе изменения уровня ртути в трубке манометра передаются на бумагу  $l$  помощью стеклянного поплавка  $i$  и самопишущего пера  $k$ .

Другого рода пневматическое передаточное устройство работает по такому принципу (рис. 31) Один конец железной передаточной трубы  $R$  опускается под воду (не меньше чем на глубину в 20 см) в пункте  $A$ , где должен быть определен уровень воды, в то время как другой конец трубы присоединен к приемнику—небольшому резервуару  $C$ —с погруженным в него поплавком. Маленький воздушный насос  $P$  непрерывно накачивает воздух в передаточную линию  $R$ ; этот воздух все время выходит у конца трубы  $A$ . В силу этого дополнительное давление воздуха в линии передачи определяется высотой столба воды  $\Delta h$  у входного отверстия трубы  $R$ . В резервуаре  $C$  погружен в воду воздушный колокол  $G$ , воздушное пространство которого соединено с линией передачи. Изменяющемуся с глубиной погружения  $\Delta h$  конца трубы  $A$  напор в колоколе отвечает сокращение винтовой пружины  $F$ , в результате чего колокол ходит вверх и вниз точно в соответствии с колебаниями уровня воды в месте наблюдения.

Описанное выше устройство применимо прежде всего в соединении с регулятором скорости турбины для автоматического поддержания постоянным уровня верхнего бьефа силовой установки. На рис. 31 изображено подобное устройство в соединении с регулятором  $D$  спиральной турбины. Линия передачи при этом вполне правильно расположена внутри трубопровода турбины.

Электрические передаточные посты находят себе применение там, где приходится перекрывать очень большие расстояния и где хотя из одного пункта наблюдений приводить одновременно в движение ряд регистрирующих приборов, располагая их в местах, для других способов передач непригодных вследствие слишком высокого или наоборот низкого положения пунктов наблюдений или из-за их трудной доступности. Отдельные системы электрических передаточных постов различаются по роду передатчика, по источнику электроэнергии, а равно и по конструкции приемника.

Изменение уровня или его положения в пункте наблюдений может фиксироваться при помощи поплавка или же через посредство электрических сопротивлений. Передача, а равно и действие передатчика и приемника, может производиться сильными и слабыми токами, постоянным и переменным током; только электрическая аппаратура в целях эксплуатационной безопасности получает специальное устройство, в зависимости от применяемого источника энергии. Для сокращения расходов принято вместо более надежного подземного кабеля применять для передачи открытую проводку (по образцу телеграфной) с обратной проводкой через землю. Стремятся также к использованию в этих целях существующей телеграфной и междугородной телефонной сети.

Почти все крупнейшие механические мастерские, занимающиеся также изготовлением гидрологических приборов, имеют своего типа электрические передаточные устройства. Эти устройства обладают каждое своими особен-

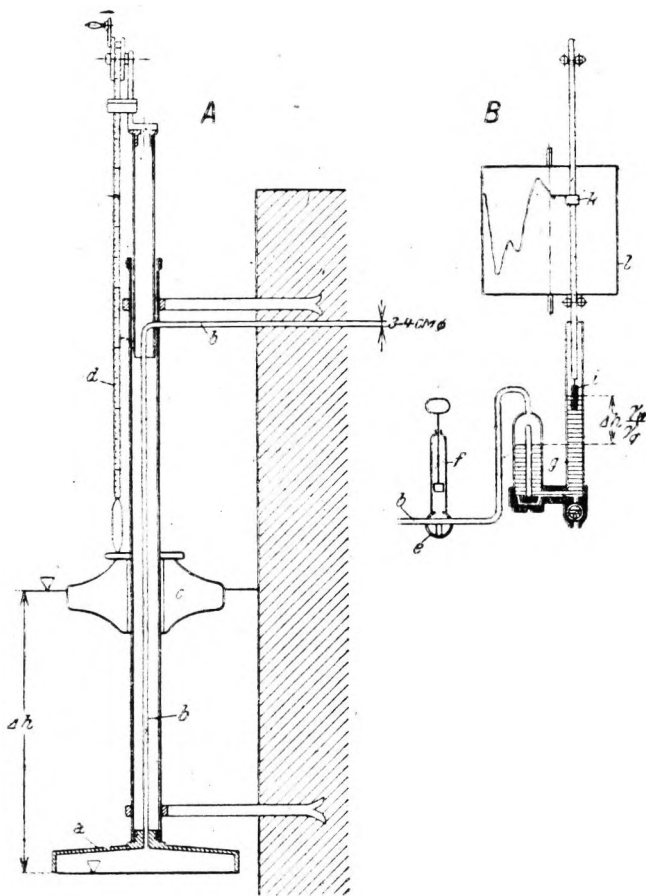


Рис. 30. Водомерное устройство с пневматической передачей.

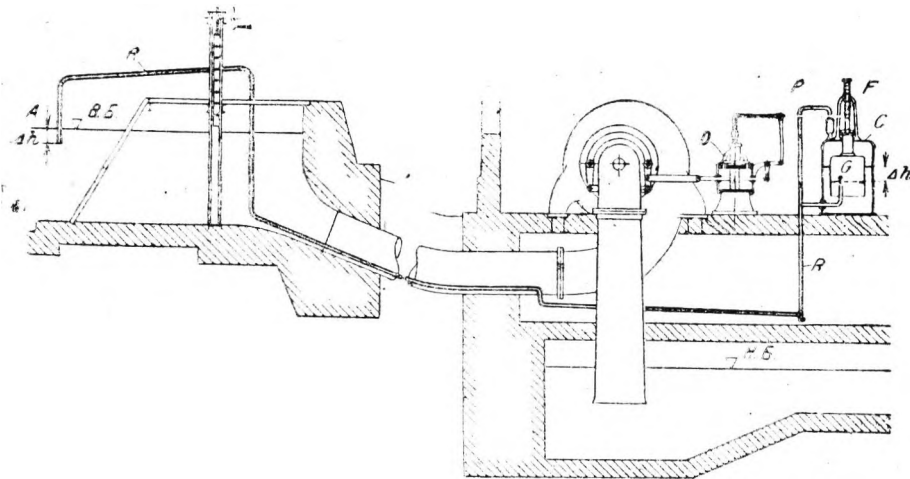


Рис. 31. Водомерное устройство с пневматической передачей при накачивании воздуха в линию передачи.

ностями и представляют преимущества в тех или иных определенных условиях.

У передаточного поста системы Отта передача движения поплавка из пункта наблюдения к регистрационному прибору приемника осуществляется по ступеням. После изменения положения поплавка  $S$  на известную вели-

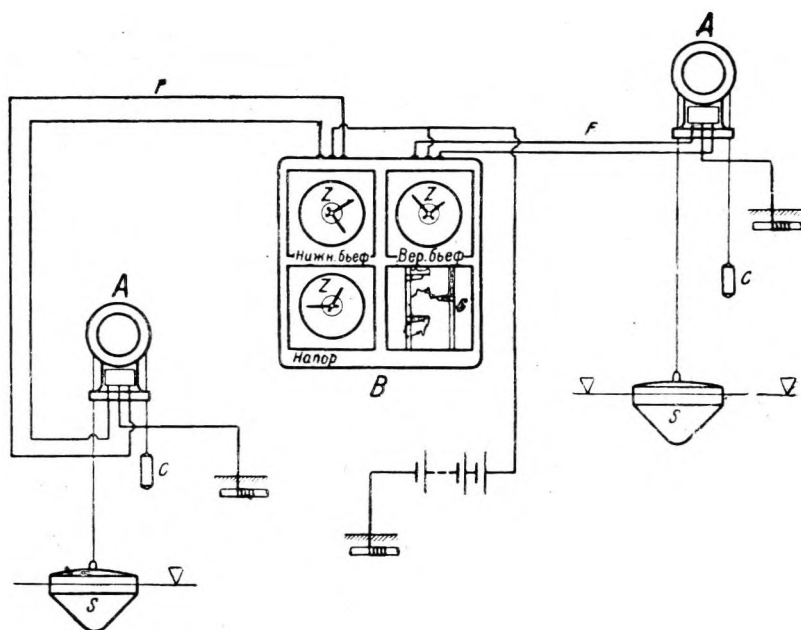


Рис. 32. Схема соединения для водомерного устройства с электрической передачей на расстояние системы Отта.

чину от 1 до 10 см, в передатчике происходит замыкание электрической цепи и по линии передачи  $F$  проходит ток (рис. 32). При этом электромагниты  $a_1$  и  $a_2$  в приемнике вызывают соответствующее передаточному масштабу передвижение стрелки циферблата в обычных приборах-указателях (рис. 33) (номерных аппаратах) или самопишущего пера — в самописцах.

Фирмой Отта устраиваются центральные приемные станции, объединяющие до 10 аппаратов. Они дают широкие возможности для приспособления к природным условиям.

Линия передачи может еще служить для сигнализации при достижении уровнем воды критических положений и для приключения служебных телефонов.

При очень большом расстоянии между передатчиком и приемником надо включать реле, чтобы таким образом обходиться малыми напряжениями, которые вообще стараются поддерживать между 6 и 12 вольтами. С помощью поляризованного двойного реле возможно обслуживать прием-

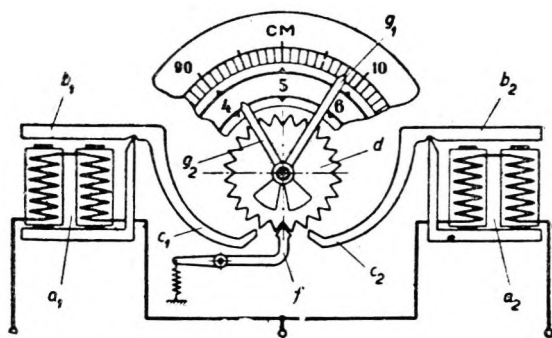


Рис. 33. Схема указателя (номерного аппарата) системы Отта.

ник только одним проволочным проводником. Лучшим проводником для линии передачи являются закладываемый в землю двужильный кабель. Ток берется постоянный от батареи аккумуляторов, от батареи мокрых или сухих элементов или от осветительной сети с включением редуктора для понижения напряжения. При пользовании переменным током надо включить в сеть

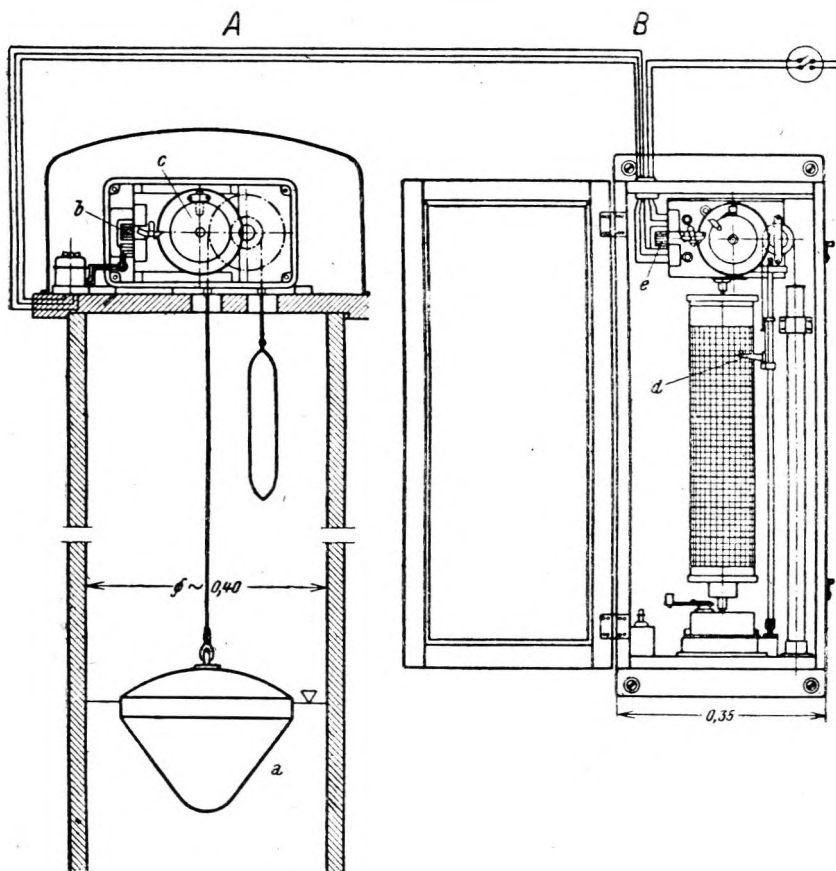


Рис. 34. Водомерное устройство с электрической передачей на расстояние системы Амслера—Шафхаузена.

*A* — передатчик; *B* — приемник.

выпрямитель тока. В общем расход энергии ничтожен, он составляет при наибольшей допустимой частоте замыканий всего 40 ватт-часов в месяц.

Передающий пост системы Амслера—Шафхаузена работает также с поплавком *a*, привешенным на тонкой проволоке, которая приводит в действие механизм передатчика (рис. 34). Этот механизм состоит из маленького синхронного двигателя переменного тока *b*, которым приводится в движение с тем же числом оборотов диск *c*. Он, в свою очередь, вызывает ряд движений и, в конце концов, это приводит в зависимости от положения поплавка в различные моменты одного оборота диска *c*, к разрывам в цепи однофазного переменного тока.

Приемник обладает приспособлением, которое каждые 5 мин. поднимает с равномерной скоростью карандаш *d* вдоль барабана вверх и затем дает ему опуститься опять вниз. Поднятие карандаша на высоту, соответствующую положению уровня воды, происходит посредством синхронного двига-

теля переменного тока  $e$ , аналогичного по устройству двигателю, примененному в передатчике. Вследствие толчкообразного способа вычерчивания, лимниграмма составляется из коротких, примерно в 1 мм длиной, вертикальных черточек, которые сливаются для глаза в одну линию.

Моторы передатчика и приемника работают синхронно с частотой той сети переменного тока, к которой они присоединены. Каждые 5 мин. происходит автоматическая синхронизация передаточных устройств, так что перебои сразу же устраняются. Надо отметить, что передаточный пост данной

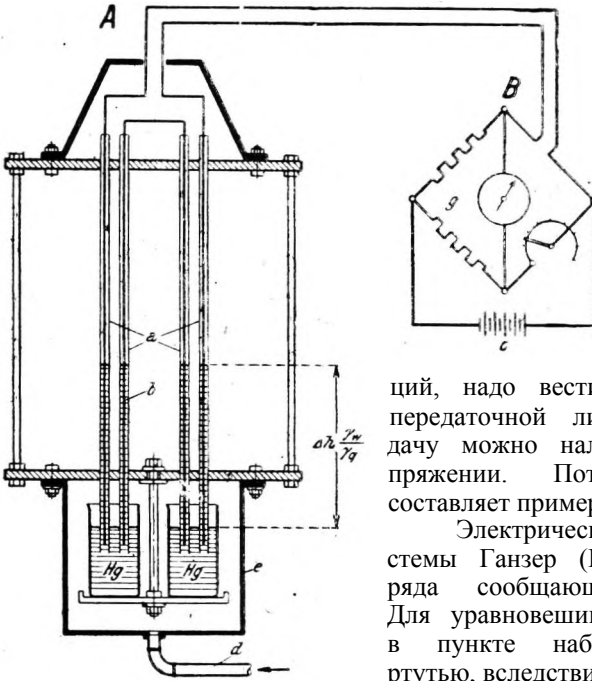


Рис. 35. Водомерное бесплоплавковое устройство с электрической передачей на расстояние системы Ганзера. А — передатчик; В — приемник.

конструкции регистрирует не изменения уровня воды, как то имеет место в устройстве системы Отта, а само положение уровня, чем исключается возможность накопления ошибок.

Если передатчик и приемник присоединяются к одной и той же сети переменного тока, достаточно одной линии проводки. Если присоединиться к сети возможно только на одной из станций, надо вести три линии. Если протяжение передаточной линии превышает 30 км, передачу можно наладить также при высоком напряжении. Потребление тока передатчиком составляет примерно 30 ватт.

Электрический передаточный пост системы Ганзер (Вена) имеет передатчик в виде ряда сообщающихся стеклянных трубок  $a$ . Для уравнивания давления столба воды  $\Delta h$  в пункте наблюдения, трубки наполняются ртутью, вследствие чего отсчитываемая по ним

высота получается равной  $\Delta h \frac{\gamma_w}{\gamma_q}$  (рис. 35).

В трубки вставляется соответствующая проволока для сопротивления  $b$ , которая, в зависимости от высоты уровня воды, погружается в ртуть в большей или меньшей степени и

вместе с тем оказывает прохождению электрического тока различное по величине сопротивление. Проволоки для сопротивления соединяются с приемником двухпроводной линией передачи  $f$ .

Приемник состоит из мостика сопротивлений  $g$ , который измеряет сопротивление концов проволоки, выступающих из ртути. Это позволяет судить о длине этих концов и, в результате, о высоте уровня воды в створе поста.

Предпосылкой для точной работы описанной установки прежде всего является применение проволоки для сопротивления с одинаковым удельным сопротивлением, что, судя по опыту, можно выполнить с достаточной степенью точности. Приемник имеет для измерения сопротивления гальванометр и три стрелки указателя для метров, дециметров и сантиметров. Стрелки вращаются до тех пор, пока гальванометр не станет вновь на нуль своей шкалы. После этого уровень воды может быть отсчитан по положению стрелок с точностью от 2 до 5 см. В качестве источника энергии пользуются постоянным током с напряжением в 10 вольт, который лучше всего брать от батареи аккумуляторов  $c$ . Предельное расстояние для передачи при указанном способе практически не ограничено.

Передающий пост системы Сименс и Гальске работает по принципу вращающегося магнитного поля (рис. 36).

Передачик и приемник имеют заключенные между магнитными полями неподвижные якоря. Якоря обмотаны тремя катушками, под углом  $120^\circ$  одна к другой. Стыки катушек присоединены к изолированным контактным кольцам  $R$ , которые помещаются на якорных валах. Переменный ток, пропущенный через обмотку магнитов, возбуждает в трех якорных катушках как передатчика, так и приемника, напряжения, величина которых зависит от положения плоскостей обмоток относительно направления магнитного поля. Если оба якоря находятся относительно магнитного поля в одном положении, тогда возникающие в них электродвижущие силы равны, и ток не возбуждается. Вращение оси передатчика, вызываемое подъемом или опусканием поплавка  $S$ , и изменение ее положения относительно магнитного поля возбуждает в передатчике токи, под влиянием

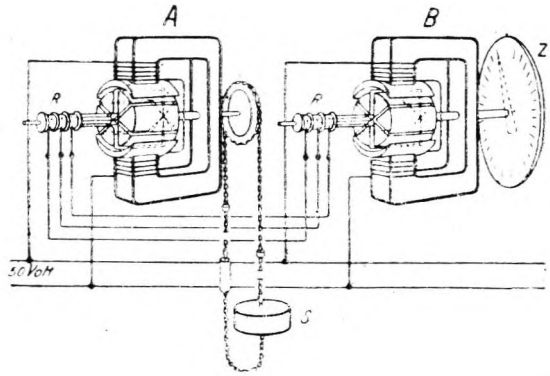


Рис. 36. Водомерное устройство с передачей на расстоянии системы Сименс и Гальске.

$A$ —передатчик;  $B$ —приемник.

Вращение оси передатчика, вызываемое подъемом или опусканием поплавка  $S$ , и изменение ее положения относительно магнитного поля возбуждает в передатчике токи, под влиянием

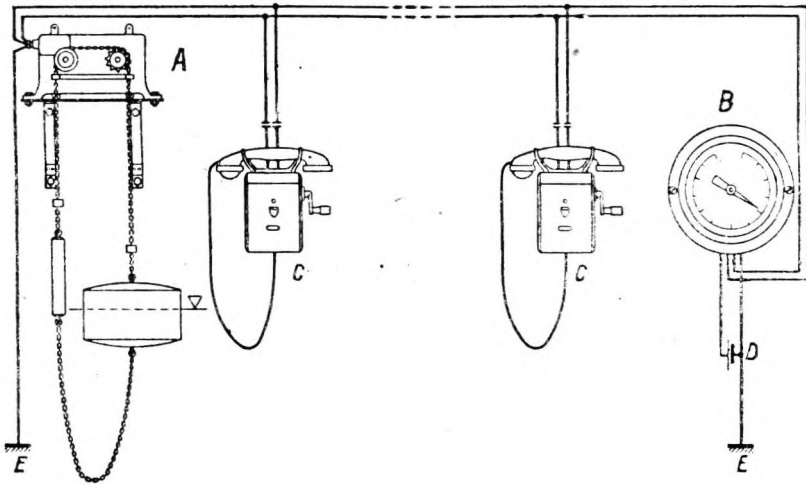


Рис. 37. Схема приключения телефонов к проводам передаточного поста.

$A$ —передатчик;  $B$ —приемник;  $C$ —телефон;  $D$ —батарея;  $E$ —земля.

которых ось якоря приемника повернется так же, как и ось передатчика. Приемник следует, таким образом, малейшим движениям передатчика и регистрирует уровень воды в уменьшенном масштабе на циферблате или вычерчивает колебания уровня на передвигающейся полосе бумаги.

Передачик и приемник обычно соединяются пятью линиями проводов. Однако, если обе станции присоединены к одной и той же сети, достаточно трех проводов.

Провода передаточного поста допускают без ущерба для действия поста приключение сигнальных станций и телефонов общего пользования, которые служат в то же время для проверки действия самого передаточного устройства (рис. 37).



Устройство описанной выше конструкции применимо, преимущественно, для действующих гидротехнических сооружений с большими внезапно наступающими колебаниями уровня воды, как то имеет место на судоходных шлюзах или на гидростанциях.

Электродвигатели при шлюзных воротах, затворах плотин и т. д. часто приводятся в движение с большого расстояния, например от распределительной доски силовой установки (Schalttafel), так что

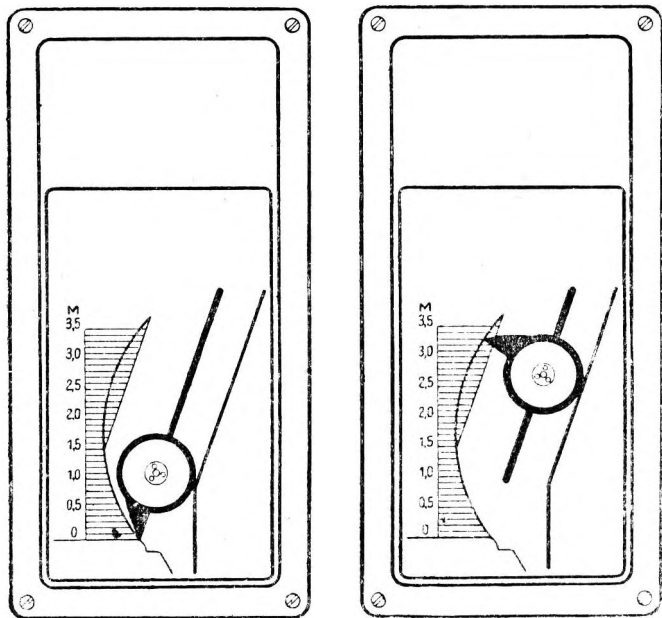


Рис. 38. Указатель открытия для плотины с цилиндрическим затвором.

дежурному при каком-либо сооружении вполне доступно следить за действием рабочих устройств в обслуживаемом им пункте. В таких случаях является целесообразным соединять приемник передаточного поста с так называемым указателем положения, который дает синхронное и наглядное изображения действия управляемого с расстояния устройства.

На рис. 38 в виде примера изображен указатель положения для плотины с цилиндрическим затвором. Цилиндр с козырьком представлен в виде схематической его модели. Подпертый бьеф

подразумевается слева от цилиндра, нижний бьеф — справа. При открытии плотины цилиндр и козырек описывают вращательное движение, которое воспроизводится указателем положения, причем конец козырька модели чертит кривую на шкале рейки в сокращенном масштабе.

**Мерная игла.**<sup>1</sup> Этот измерительный прибор служит для особо точного определения уровня воды. При этом для некоторых отсчетов применяют мерные иглы специальной формы и точно действующие установочные приспособления, а при известных обстоятельствах — и гасители колебаний уровня. В соединении с устройствами для точного установления положения нуля отсчета мерная игла представляет ценный измерительный прибор для гидротехнических лабораторий, впрочем она находит применение и в естественных условиях.

В стоячей воде могут применяться, главным образом, иглы с концами острой формы, которые подводятся к поверхности воды снизу (рис. 39). В условиях текучей воды пригодны иглы как с острыми концами, так и с плоскими наконечниками, причем в обоих случаях иглу подводят к поверхности воды сверху (рис. 40). В качестве гасителей колебаний уровня могут быть рекомендованы устройства, изображенные на рис. 41 и 42.

Первое приспособление пригодно при измерении средних уровней воды в отдельных точках и заключается в присоединении маленького сосуда обтекаемой формы с небольшими отверстиями в дне.

<sup>1</sup> Мерная игла иногда называется тестером. (Прим. пер.)

Второе устройство служит для определения положения среднего уровня для поверхностей воды значительных размеров. Определение уровня достигается при помощи трубок-уровнителей, которые снабжаются капиллярными трубками-приемниками или узкими щелями и соединяются с цилиндром водомерного устройства. Благодаря им в цилиндре

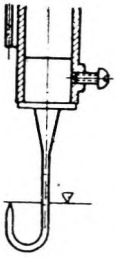


Рис. 39. Мерная игла для измерения уровня в стоячей воде.

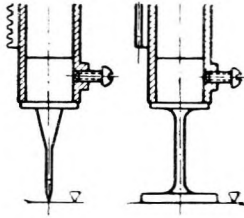


Рис. 40. Мерная игла для измерения уровня в текущих водах.

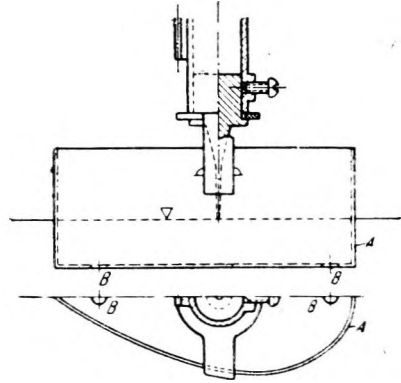


Рис. 41. Мерная игла с простым гасителем колебаний уровня.

достигается вполне достаточное гашение незначительных колебаний уровня водной поверхности.

Отсчет и установка мерной иглы могут производиться также при помощи

оптического приспособления, которое позволяет наблюдателю видеть в одном поле зрения погруженное острие, его отражение и масштаб с нониусом (рис. 42). Пользуясь этим приспособлением можно отсчитать высоту уровня водной поверхности с точностью до 0,05 мм.

**Измеритель уровня по мениску.** В интересах полноты изложения следует упомянуть еще об одном своеобразном типе водомерного устройства—измерителе уровня воды по мениску столба жидкости. Это устройство находит применение повсюду, где возможна непосредственная передача уровня по принципу сообщающихся сосудов (рис. 43).

В этом приборе следует учитывать целый ряд источников ошибок. Загрязнение стеклянных стенок трубки приводит к различной высоте капиллярного столба жидкости. Поэтому нужно

держат трубку в абсолютной чистоте. Постоянная капиллярного подъема для воды сравнительно высока: в трубке, диаметром  $d$  мм, она составляет около

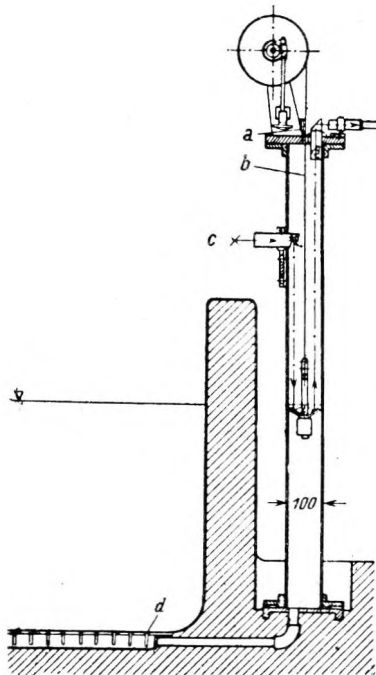


Рис. 42. Мерная игла с гасителем колебаний уровня при помощи капиллярных трубок-щупальцев.

$a$ —нониус;  $b$ —мерная лента;  $c$ —источник света;  $d$ —трубки.

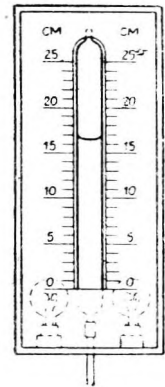


Рис. 43. Водомерное устройство с мениском. Освещение снизу.

$\frac{d}{30}$

и сильно зависит от температуры. Из этих соображений следует делать отверстие отсчетной трубки в свету равным, по меньшей мере, 30 мм. Для достижения хорошей видимости при отчетах с больших расстояний оказалось вполне применимым освещение мениска при помощи явления полного отражения.

### ПРОИЗВОДСТВО НАБЛЮДЕНИЙ НАД УРОВНЕМ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

При рассмотрении водного баланса влаги уже указывалось, что и подземные воды имеют водохозяйственное значение. Поэтому вполне естест-

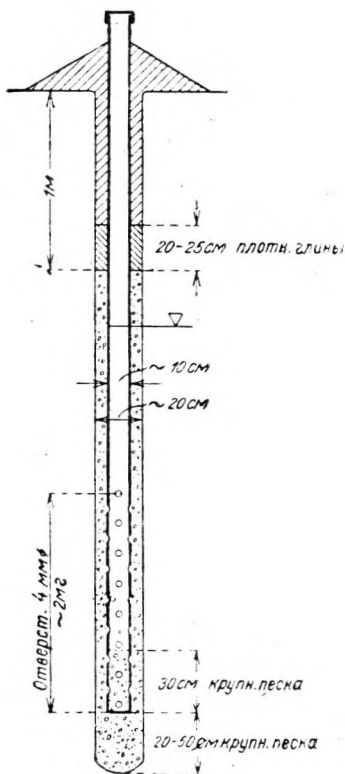


Рис. 44. Наблюдательная труба водомерного устройства по измерению уровня подземных вод.

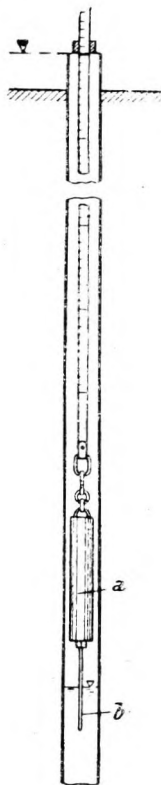


Рис. 45. Измерение уровня стояния подземных вод с помощью лота.

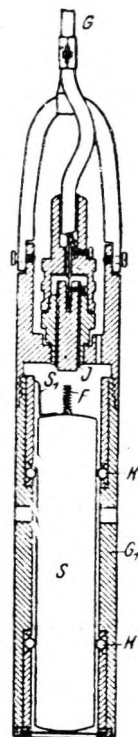


Рис. 46. Устройство по измерению уровня подземных вод при помощи лота и с электрической сигнализацией.

венно, что гидрологические учреждения взялись за наблюдение и измерение подземных вод.

Распределение пунктов наблюдений над подземными водами—постов подземных вод—встречает трудности, так как залегание подземных вод связано не только с аллювиальными наносами современных речных долин,—подземные воды залегают также в старых речных долинах, так называемых древних долинах рек, и в моренах. Кроме того, водоносный слой может располагаться в несколько этажей и, наконец, может быть так называемая артезианская вода. Два последних вида залегания подземных вод приводят часто к установлению неверного уровня подземных вод, так как при

бурении на воду на уровень воды оказывают влияние выходы воды из одного водоносного слоя в другой или из артезианского напорного водного слоя к поверхности земли.

Устройство водомерного поста для наблюдения над подземными водами вызывает, в общем, более крупные денежные затраты, так как при устройстве поста сначала надо открыть доступ к воде. Конечно пытаются использовать существующие колодцы, но это часто встречает препятствие из-за постоянного забора воды из колодцев и тем самым произвольного воздействия на уровень воды в них.

При устройстве водомерных пунктов наново необходимо опустить наблюдательные трубы в скважину, образованную с помощью обсадных труб (рис. 44).<sup>1</sup>

Наблюдательная труба снабжена на нижнем конце отверстиями и обсыпается снизу крупным песком. Для защиты от проникновения почвенных вод сверху скважину надо закладывать слоем глины. Наблюдательная труба должна быть снабжена крышкой с затвором.

Верхние концы всех наблюдательных труб нивелируются и связываются с государственной сетью нивелировок.

Отсчет уровня воды производится от верхнего занивелированного конца трубы с применением для этого деревянных наметок, лотов на гибких лентах с электрической сигнализацией и без нее, при помощи реек с ковшом или поплавочных устройств.

У обыкновенного устройства с лотом *a* прикрепленный к нему снизу штырь *b* натирается отмученным мелом, чтобы иметь возможность установить степень погружения его в воду (рис. 45). Устройство для электрической сигнализации может быть сконструировано, примерно, так, как показано на рис. 46.

Поплавок *S* с погружением в воду поднимается и пружина *F* замыкает электрическую цепь. Последняя ведет через посредство проводов резинового кабеля *G*, который одновременно служит подвесным тросом и для измерения глубин, к лампочке, загорающей при замыкании тока. Шариковые подшипники *K* обеспечивают прибору высокую чувствительность, благодаря чему достигается при отсчетах точность до 0,5 мм.

У водомерного устройства с ковшом осевое отверстие у верхнего конца закрывается маленькой трубкой (свистком) *B*, через который при погружении прибора в воду выходит с характерным свистом сжатый воздух (рис. 47). При этом звуке отсчитывают по рулетке против верхнего края трубы глубину стояния уровня, затем извлекают прибор из трубы, определяют глубину погружения по наполненным водою маленьким стаканчикам,

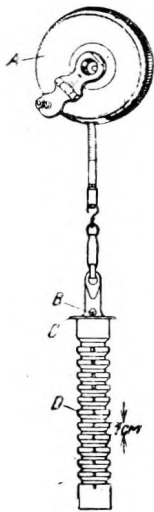


Рис. 47. Водомерное устройство с ковшом.

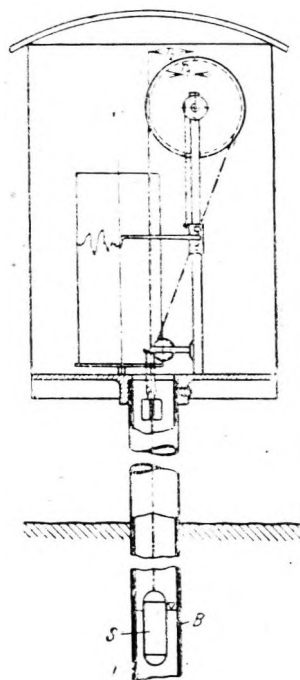


Рис. 48. Самопишущий прибор для измерения уровня подземных вод.

<sup>1</sup> W. K o e h n e. Die Ausführung und Verwertung von Grundwasserstandsbeobachtungen. Deutsche Wasserwirtschaft, № 3, 1923.

которые расположены и размечены по сантиметрам, и исправляют значение глубины через вычитание прочитанной глубины погружения. Тарелки С препятствуют попаданию земли и водяных капель в стаканчики прибора.

Употребляются также приборы с многократным увеличением изменений уровня воды или с самопишущими устройствами. Последние похожи на самописцы для поверхностных вод, но снабжаются узкими продолговатыми поплавками, чтобы иметь возможность применять наблюдательные трубы около 10 см диаметром (рис. 48).

### III. СТОК

Процессы, происходящие при постепенном переводе осадков из первоначального распределения их в плоскости на поверхности земли в определенной формы потоки водной сети, по природе своей весьма запутаны. Испарение, которое определяется как содержанием тепла в атмосфере и земной коре, так и морфологическими и биологическими условиями в верхних слоях земной поверхности, решает в первую очередь вопрос о величине тех остаточных масс воды, которые отводятся в реки и в конечном счете в океаны. Эти массы воды состоят в преобладающей своей части из поверхностного стока и в меньшей части из подземного стока, имеющего место в проницаемых грунтах по водоносным слоям.

К получению величины поверхностного стока ведет непосредственное измерение стекающих водных масс или определение их (посредственным путем) через осадки.

Первый путь может дать точные результаты при условии применения соответствующих способов измерения, но возможен только при стоке воды по определенной формы водотокам. Когда же сток происходит в распластанном виде да еще по скатам долин, определение его посредственным путем является единственным способом для получения представления о его величине. Впрочем, если требуется меньшая степень точности, для определения как самой величины стока, так и распределения его во времени,—этот способ применим и для водотоков, так как он обладает преимуществом — не требует измерений расходов воды на месте, что стоит дорого и связано с затратой большого количества времени.

Однако, как то ниже будет показано, способы определения стока посредственным путем могут быть основаны только на эмпирических зависимостях, полученных в результате сравнительной обработки наблюдений над осадками, над уровнем воды и данных определений расходов воды.

Тот общий, установленный на опыте факт, что расход воды в каком-либо определенном поперечном профиле водотока связан зависимостью с уровнем воды в этом профиле, освобождает от необходимости производить определения расходов воды регулярно.

Можно ограничиться немногими определениями, проводимыми серийным порядком, причем их приходится время от времени повторять на случай изменчивости формы речного русла.

Подобным образом можно бы поступать и при установлении подземного стока — расхода воды в определенном профиле потока подземных вод. Но в то время как определение хода поверхностного стока находится в ведении почти всюду существующей единой организации, охватывающей собою всю водную сеть, определение подземного стока является до сих пор более редко встречающейся (единичной) операцией. Причина этого заключается, помимо трудностей подобных определений, в том обстоятельстве, что значение подземных вод, как водохозяйственного фактора, получило только постепенное признание, причем использование их отстает от использования поверхностных вод. Задачей будущего для инженерной гидрологии является

доведение измерений подземных вод до степени наблюдений постоянного характера.

Основой для решения всякого рода задач по стоку является, следовательно, определение расхода воды. Как следствие этого, отдельные способы установления величин поверхностного и подземного стока должны быть рассматриваемы в том разрезе, в каком эти способы показали себя практически применимыми.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЕЛИЧИНЫ ПОВЕРХНОСТНОГО СТОКА (ГИДРОМЕТРИЯ)

**Обозначение и определение величины поверхностного стока.** В отношении единиц измерения, величины стока принято выражать различно, в зависимости от того, дается ли описание стока с целого бассейна или же приводятся данные по стоку в одном каком-нибудь пункте реки. В первом случае является целесообразным аналогично высоте слоя осадков и модулю осадков  $q_N$  пользоваться понятиями высоты слоя стока  $h_A$  и модуля стока  $q_A$ , тогда как во втором случае явление лучше характеризуется понятиями расхода воды  $Q$  и суммарного стока (объема стока)  $F_A$ .

Под расходом воды  $Q$  понимают количество воды, протекающее через данный поперечный профиль в единицу времени или (по общепринятому) в одну секунду. Расход воды дают, сообразуясь с величиной его, в л/сек. или в  $m^3/сек$ .

Суммарный сток  $F_A$  есть то количество воды, которое протекло через данный поперечный профиль за определенный период времени. Если за такой период взят, положим, год, говорят о годовом суммарном стоке. Величину суммарного стока выражают в литрах и куб. метрах или (при величинах большого порядка) в млн. или млрд. куб. метров ( $10^6 m^3$  и  $10^9 m^3$ ).

Высота слоя стока  $A_d$  есть высота того слоя воды, который образовался бы при равномерном распределении стекающей воды по всей площади выпадения осадков, откуда последовал сток. Высоту слоя стока, соответствующую годовому суммарному стоку  $F_{A_{год}}$ , называют высотой слоя стока за год  $h_{A_{год}}$ . Высоту слоя стока выражают, как и высоту слоя осадков, в миллиметрах.

Модулем стока обозначают то количество воды, которое, в среднем, стекает с единицы площади бассейна в единицу времени. Модуль стока выражают в л/сек с га или в  $m^3/сек$  с  $km^2$ .

Если допустить, что сток со всего бассейна к отводящей его магистрали (Vorfluter) равномерно распределен во времени, тогда действительны следующие зависимости:

Суммарный сток = расход воды  $\times$  продолжительность стока.

$$\begin{aligned} \text{Модуль стока} &= \frac{\text{суммарный сток}}{\text{продолжительность стока} \times \text{площадь бассейна}} = \\ &= \frac{\text{расход воды}}{\text{площадь бассейна}}. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Высота слоя стока} &= \frac{\text{суммарный сток}}{\text{площадь бассейна}} = \\ &= \text{модуль стока} \times \text{продолжительность стока}. \end{aligned}$$

Учение об определении расходов воды — гидрометрия — в настоящее время выросла в обширную специальную область знания. <sup>1</sup> Не только преж-

<sup>1</sup> W. A. Liddell. Stream gaging. New York 1927; L. A. Ott. Instrumentenkunde der praktischen Hydrometrie. Kempten. Из советских специальных курсов: проф. Огиевский. Гидрометрия и производство гидрометрических работ. Полное издание 1934 г. и сокращенное 1937 г. (Прим. пер.)

ние способы измерения приобрели значительно большую степень точности, благодаря конструктивным усовершенствованиям измерительных приборов, но и целый ряд новых способов завоевал себе за последние годы прочное место.

Успехи в деле повышения надежности гидрометрических работ непосредственно сказались благоприятным образом в водохозяйственном отношении. Действительно, даже при самом тщательном проектировании гидро-технических предприятий реальность расчета их рентабельности берется под сомнение, если запрокинутые потребные количества воды, основанные на природных данных, определены неточно.

Способы определения расходов поверхностных вод получили развитие в нескольких направлениях. Для практического применения различных способов существует ряд инструкций.

Многочисленные способы определения величин поверхностного стока могут быть сгруппированы в четыре группы.

Способы первой группы предусматривают непосредственное измерение протекающего расхода воды. В способах второй группы непосредственно измеряются скорости отдельных струй воды, а отсюда уже путем вычислений получается расход воды. Третья группа состоит из способов, которыми непосредственно измеряется средняя скорость течения, откуда через перемножение средней скорости и живого сечения получается расход воды. Четвертая группа объединяет все те косвенные способы измерения, которыми расход воды определяется при помощи побочных факторов, как уровень воды, гидравлическое давление или степень насыщения какой-либо смеси. При этом пользуются зависимостями между расходом и этими факторами, установленными ранее теоретическим или эмпирическим путем.

Кроме того, внутри отдельных групп способы измерения подразделяются по применению измерительных приборов или измерительных устройств, помощью которых производится определение расходов.

Первая группа	{	1. Измерительные сосуды (мерные баки).
		2. Опрокидывающиеся сосуды.
		3. Гидрометрическая вертушка.
Вторая группа	{	4. Гидрометрическая (напорная) трубка.
		5. Нагретая проволока.
		6. Поплавки.
Третья группа	{	7. Подвижной экран.
		8. Плавущий соляной раствор (химический, скоростной способ).
		9. Увеличение напора.
Четвертая группа	{	10. Смешивание с соляным раствором (химический, объемный способ).
		11. Водослив.
		12. Данаиды.
		13. Подпорные водомеры.

### 1. Измерение расхода воды мерными баками

Количество воды, протекающее за определенный отрезок времени через живое сечение, измеряется путем наполнения этой водой мерного бака. Объем этого мерного бака устанавливается через наполнение его другими меньшего объема протарированными сосудами, посредством взвешивания или исходя из его геометрических размеров. Данный способ измерения не дает мгновенных величин, а только средние значения расхода воды за выбранные отрезки времени. Он дает, однако, своего рода абсолютные меры (Urmasse), помощью которых возможно проверить степень точности всех прочих способов измерения.

Данный способ, как самостоятельный в производственном смысле, идет в расчет только для малых расходов воды, например при определении дебита ключа, так как необходимость перевозки бака и его чувствительность к повреждениям позволяют придавать ему только малые размеры.

Для мерных баков малых размеров рекомендуется устройство типа, изображенного на рис. 49.

Положение уровня воды в баке измеряют мерной иглой, управление и нуль шкалы которой наглухо скреплены с сосудом. Доли объема предварительно протарированного бака нанесены на мерную иглу.

Мерному баку, изготовленному из листового железа и рассчитываемому на расход воды от 5 до 120 л/сек, придают цилиндрическую форму с диаметром от 0,5 м до 1,5 м, высотой от 0,7 м до 2,0 м и толщиной стенок от 3 до 15 мм. Дно должно быть выпуклым. При изготовлении сварка предпочтительнее склепки.

При более крупных измерениях, которые преимущественно служат для испытания других способов измерения, надо обращать внимание не только на точное определение объема бака, но заранее позаботиться о точном установлении в нем положения уровня и необходимых приспособлениях для быстрого обслуживания затворов входного отверстия.<sup>1</sup>

Необходимо также учесть изменение формы бака, равно как и потери на испарение и просачивание. Если все условия соблюдены, то точность способа измерения может быть доведена (даже для больших мерных баков) до 0,1%.

## 2 Измерение расхода воды при помощи опрокидывающихся сосудов

Непрерывное измерение расхода воды достигается применением нескольких сосудов, наполнение и опорожнение которых производится ручным способом или автоматическими опрокидывателями. При этом различают измерения, где количество воды определяется взвешиванием и где оно устанавливается через объем.<sup>2</sup>

У опрокидывающегося сосуда, изображенного на рис. 50, удовлетворяющего весьма высоким требованиям точности, сосуды *A* и *B* наполняются попеременно через главный желоб *H* и боковой желоб *N*. Поплавки *S* действуют так, что главный желоб еще до критического наполнения одного сосуда переключается на другой сосуд. Сифон обеспечивает продолжение опорожнения, даже если измерительный сосуд поднялся под действием противовеса. Ошибка этого измерительного устройства определяется в  $\pm 0,1\%$ .

Опрокидывающийся сосуд (рис. 51) устроен так, что вода после наполнения сосуда *A* до края *b* стекает в желоб *c*, вызывая этим перемещение центра тяжести и опрокидывание. Степень точности меньше, чем у описанного перед тем устройства.

## 3. Определение расхода воды при помощи гидрометрической вертушки

Вертушечные способы измерения основаны на применении гидрометрической вертушки, называемой просто вертушкой, как прибора регистрирующего скорости течения воды.

<sup>1</sup> F. Schaffernak Die Versuchsanstalt für Wasserbau in Wien. Allgemeine Bauzeitung, H. 3, 1915; O. Kirschmer und B. Esterer. Die Genauigkeit einiger Wassermessverfahren Z. d. Vereines deutscher Ingenieure, S. 1499 f., 1930.

<sup>2</sup> Handbuch der Experimentalphysik. IV Teil, S. 611 f.

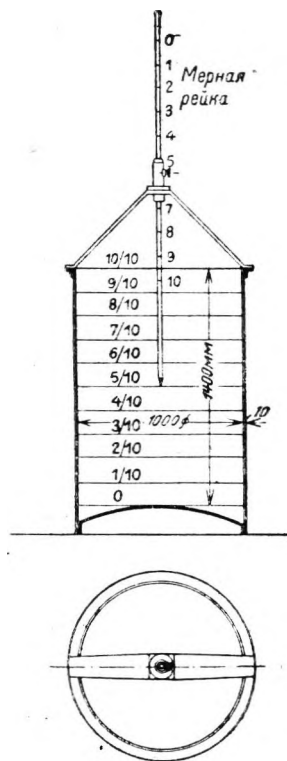


Рис. 49. Мерный бак для расхода воды до 30 л/сек.



Вертушка состоит из винтообразной формы лопастного колеса, укрепленного на легко вращающейся оси. Колесо приводится в движение течением воды, а число оборотов его в единицу времени определяется посредством

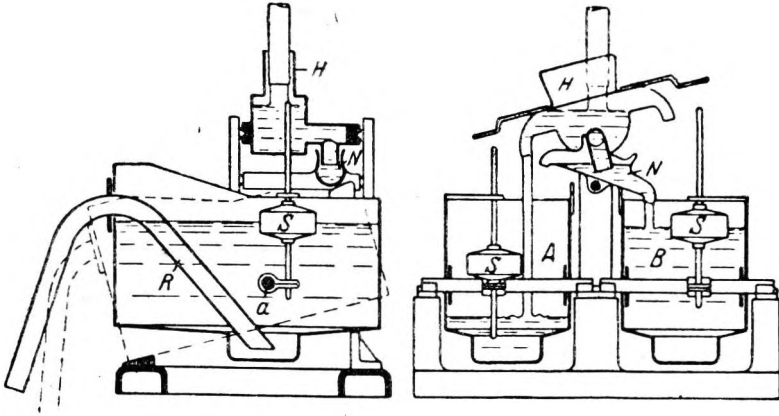


Рис. 50. Опрокидывающийся мерный сосуд для наполнений постоянного веса.

счетчика.<sup>1</sup> По этому числу оборотов можно заключить о скорости течения притекающей к лопастям воды.

Вертушки различаются по конструкции отдельных деталей, по способу погружения вертушки в воду, по типу вертушки в целом и по дополнительным приспособлениям, придаваемым вертушкам с целью производства специального рода измерений.

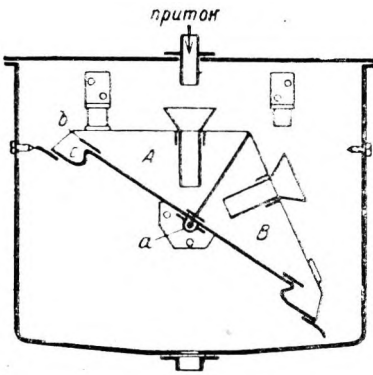


Рис. 51. Опрокидывающийся мерный сосуд для наполнений постоянного объема.

#### Конструкция вертушки в деталях.

Лопasti вертушки образованы по форме цилиндрической винтовой поверхности с вращением "направо" или "налево". В зависимости от изготовления, эта поверхность имеет различной величины подъемы винта. Лопасть вертушки изготавливается в виде двух или трех пластинок, причем не всегда сохраняются полные винтовые поверхности. Согласно этому различают разнообразные формы лопастей вертушки:

1. Полноцилиндрическую лопасть, которая по обоим ребрам ограничена плоскими поверхностями, а по бокам—цилиндрической поверхностью (рис. 52).
2. Двухкрыльчатую штопорообразную лопасть, образовавшуюся в результате пересечения цилиндрической винтовой поверхности конической поверхностью (рис. 53).
3. Скошенную лопасть с двумя пластинками; форма, у которой скошенность винтовой поверхности несколько возрастает к переднему ребру (рис. 54).
4. Спицевую лопасть, которая обычно конструируется с тремя пластинками. Вследствие большой вырезки в ней сохранились только небольшие части винтовой поверхности (рис. 55).

<sup>1</sup> Вольтман еще в 1790 г. применял гидрометрические вертушки с плоскими лопастями. Тревиранус в 1820 г. предложил вместо плоской лопасти винтообразную и дал обоснование ее преимуществ.

К приборам измеряющим скорость, которые, в общем и целом, основаны на принципе измерения числа оборотов тела, приводимого во вращение

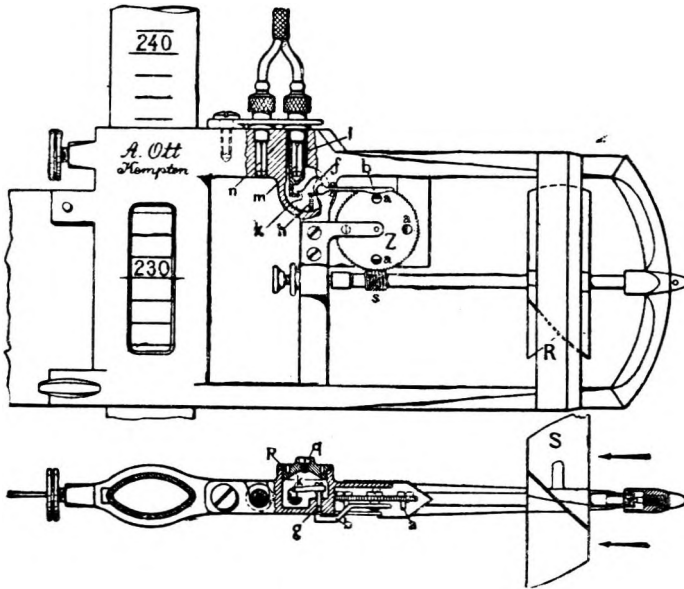


Рис. 52. Штанговая вертушка с цилиндрической лопастью, коническими подшипниками, открытым, мокрым контактом и защитным кольцом системы Отта.

движением жидкости, должны быть причислены еще чашечная вертушка и водомерное колесо.

Чашечная вертушка всюду получила применение как прибор для измерения ветра, тогда как для измерений в воде она применяется редко. Она вводится в воду на вертикальной оси (рис. 56).

У водомерного колеса в текучую воду погружаются радиальные пластинки, нанесенные по окружности колеса, притекающая к ним вода приводит колесо в движение. Если все до сих пор указанные вращающиеся измерительные приборы применимы и на глубоких местах, водомерное колесо пригодно только для измерения скорости течения поверхностных струй в открытом водотоке или скорости водяного тока. Конструкция водомерного колеса, применяемая для водопроводных труб, изображена на рис. 57.

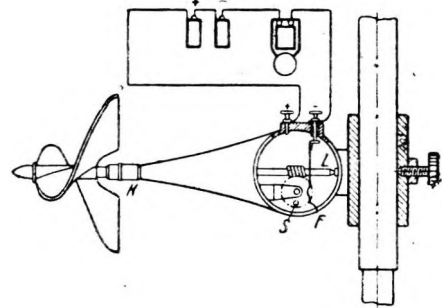


Рис. 53. Штанговая вертушка со штопорообразной лопастью, коническим и шариковым подшипниками и закрытым мокрым контактом системы Ганзен (Вена).

Система подшипников, применяемых для оси вертушки, играет существенную роль для величины внутреннего коэффициента трения, тем самым и для величины начальной скорости вертушки, почему этой детали уделялось большое внимание. Род опоры для оси — на шариках или на остриях, и материал для этих частей выбирался отдельными конструкторами по-разному. В общем, оба типа подшипников в чистой воде равноценны. В воде, несущей песок, рекомендуются конические подшипники (с остриями), шариковые подшипники с защитой от песка и, особенно, полностью защищенные от доступа воды.

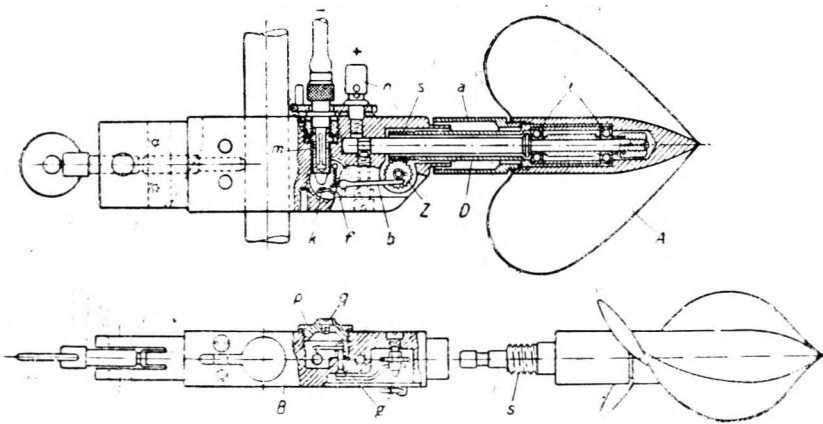


Рис. 54. Штанговая вертушка со скошенной лопастью, неподвижной осью, прецизионным шариковым подшипником и масляным контактом системы Отта (1/35 нат. вел.).

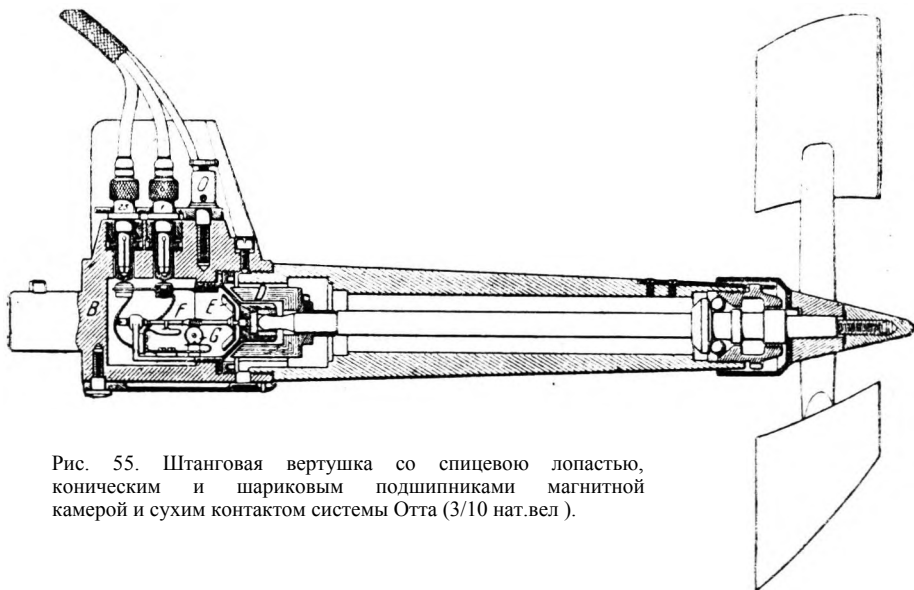


Рис. 55. Штанговая вертушка со спицевою лопастью, коническим и шариковым подшипниками магнитной камерой и сухим контактом системы Отта (3/10 нат.вел.).

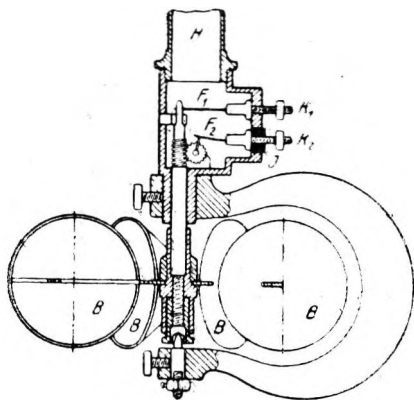


Рис. 56. Чашечная вертушка системы Пайса.

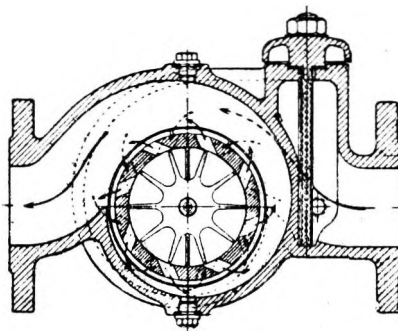


Рис. 57. Водомерное колесо.

Тип конического подшипника изображен на рис. 52. Ось вращается между остриями из закаленной стали в агатовых подпятниках. Оба подшипника имеют такую форму, что влекаемые песчинки должны скользить мимо них. Вертушка типа, изображенного на рис. 53, имеет спереди шариковый подшипник и сзади подпятник. Первый защищен от попадания песка конической крышкой.

Конструкция с совершенной защитой от попадания загрязняющих веществ изображена на рис. 54. Ось этой вертушки неподвижна, а лопасть *A* покоится на переднем конце оси на двух прецизионных шариковых подшипниках *t* из закаленной стали. Оба подшипника помещаются в муфте лопасти. Муфта переходит в длинную трубку *D*, которая тесно охватывает неподвижную ось, не касаясь ее. Перед употреблением вертушки муфта лопасти наполняется жидким маслом. Вследствие влияния капиллярности в длинной цилиндрической щели масло не может утечь из муфты и закрывает воде доступ к подшипникам.

Счетчики для определения числа оборотов лопасти могут быть механические или электрические. Механические счетчики представляют собой более старый тип. В настоящее время применяются счетчики, которые в состоянии регистрировать очень большое число оборотов, и редко употребляются такие, которые нужно включать дерганьем за шнур и для производства отсчета каждый раз поднимать из воды.

Электрические счетчики работают или от слабых токов или от осветительного переменного тока. Счетчики, работающие слабым током, состоят из контактного устройства, которое после определенного числа оборотов лопастей вызывает замыкание тока и тем самым приводит в действие приспособление для сигнализации или счета.<sup>1</sup>

Также употребительны контактные устройства с переменной интервалов контактов. Этим способом, пользуясь одной вертушкой, избегают слишком продолжительных наблюдений при малых скоростях, а при больших скоростях — излишней частоты сигналов. Это удобное устройство достигается простым путем (см. рис. 52).

Вращение лопастей вертушки *S* при посредстве бесконечного винта *s* на заднем конце оси вертушки передается зубчатому контактному колесу *Z*. На это колесо насажены четыре цилиндрических штифта *a*, которые могут быть повернуты вокруг своей оси. Они имеют продольные вырезы в половину толщины цилиндра. В зависимости от того, повернут ли штифт своей несрезанной половиной в сторону оси зубчатого колеса или в сторону его окружности, он при вращении колеса проходит мимо рычага *b*, не задевая его, или же вызывает контакт. Таким образом различной установкой штифтов *a* можно вызывать качания рычага *b* через каждый полный оборот, через пол-оборота или через четверть оборота контактного колеса и получать сигналы для различного числа оборотов лопастей вертушки.

Такое простое мокрое контактное устройство применимо только в речной воде, которая обладает незначительной электропроводностью, то есть не содержит солей кислот и оснований и обнаруживает лишь ничтожное содержание извести. Замыкание тока, которое вызывают подобные примеси, приводит к окислению контактных поверхностей, к прекращению сигналов и к многообразным ненормальностям у включенных электрических счетных приспособлений. Кроме того, мокрые контакты зимою терпят от обледенения, отчего, в свою очередь, могут наблюдаться искажения в сигнализации. Вследствие этого с вертушками с мокрым контактом следует работать при возможно меньшем напряжении и, во всяком случае, наряду со звонком предусматривать про запас телефонное устройство, подверженное куда мень-

<sup>1</sup> Здесь заслуживает упоминания в качестве первой улучшенной конструкции электрического счетчика конструкция Харлаха 1872 г.

шему воздействию вредных влияний. Помимо всего, является целесообразным чаще смазывать контакты маслом и время от времени удалять с них острым соскабливанием известковые налеты.

Действительную во всех случаях защиту против указанных вредных факторов дает только водоупорный, так называемый масляный контакт, или абсолютно водонепроницаемое контактное устройство.

Масляным контактом снабжена вертушка типа, изображенного на рис. 54. Ось  $g$  рычага  $b$ , плотно притертая к отверстию, проходит через него внутрь контактной камеры и имеет там второй рычаг  $f$ , воспроизводящий движения рычага  $b$ . В этой камере помещается также защищенное от воды гнездо штепселя  $m$ , изолированное от рамы вертушки муфтой из жесткой резины. Рама вертушки и рычажок  $f$  соединены с неизолированным штепселем  $n$ . При

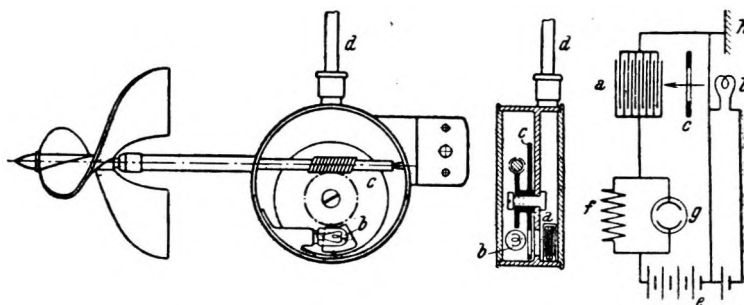


Рис. 58. Фотоэлектрическая вертушка с селеновым элементом.

качании  $b$  и  $f$  в точке  $k$  происходит замыкание и размыкание электрической цепи. Для надежной защиты контакта от воды контактная камера заполняется подходящим минеральным маслом. При хорошей водонепроницаемости разлитое масло держится годами.

Совершенно водонепроницаемое контактное устройство может быть достигнуто при помощи магнитной индукции.

На рис. 55 изображена магнитная вертушка. Контактный механизм помещается внутри металлической коробки  $B$ , герметически закрытой при помощи круглой металлической крышки, и приводится в действие извне магнитной индукцией при помощи колоколообразного магнита  $D$  и якоря  $E$ . Этот якорь следует магниту при его вращении, вызванном вращением вертушки и прикосновение пальца  $F$  тонкой оси якоря к контактной пружине вызывает замыкание тока. Ось якоря и зубчатое колесико  $G$  не изолированы от камеры и через зажим  $O$  и провод кабеля соединены с одним из полюсов батареи. Как показывает опыт, нечего опасаться ни бездействия ни запаздывания магнитной индукции даже при самом большом из встречающихся числе оборотов.

Регулирование посредством осветительного тока также дает возможность отводить усиления тока (происходящие при вращении вертушки) таким образом, что в той части конструкции, откуда подаются сигналы, исключается вредное влияние от проникающей туда воды. Оно приводит, следовательно, к тому же конечному результату, что и совершенно водонепроницаемое контактное устройство, и обладает всеми его техническими преимуществами. В частности, его действие основывается на применении фотоэлемента или селенового элемента  $a$ , который, в зависимости от числа оборотов вертушки, подвергается при помощи маленькой лампочки накаливания  $b$  более или менее частому освещению через щель вращающейся вместе с вертушкой металлической диафрагмы  $c$ . В силу этого параллельно возникают электрические возбуждения, которые позволяют через соответствующие сигнализационные и счетные приспособления определять число оборотов (рис. 58).

Сигнализация может быть осуществлена при помощи обыкновенного электрического звонка, вибратора или телефона. Во избежание нарушений в сигнализации, которые могут быть вызваны повреждениями провода, может быть осуществлена беспроводная передача контактовых сигналов через громкоговоритель.<sup>1</sup>

Отрезок времени  $\Delta t$  между каждыми двумя сигналами, которому соответствуют  $N$  оборотов, определяется при помощи часов с секундной стрелкой или лучше при помощи секундомера, и отсюда вычисляется число оборотов

лопастей вертушки в единицу времени:  $n = \frac{N}{\Delta t}$ .  $N$  выбирают равным

25, 50 и 100.

Если секундомер соединен с обыкновенными карманными часами, им следует пользоваться с большой осторожностью. Время от времени следует

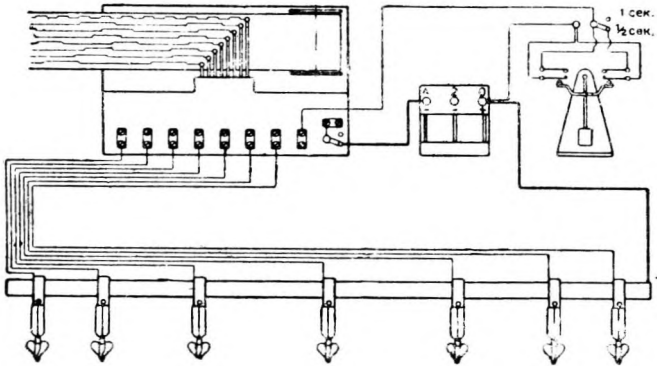


Рис. 59. Схема электрического соединения серии вертушек с ленточным хронографом.

Справа переключатель для установки на контакт через 1 сек. или 1/2 сек.

проверять ход и у нормальных секундомеров, сравнивая его с часами с маятником. В этом отношении более надежны карманные часы с хорошим ходом. Существуют также секундомеры с двумя стрелками, чтобы иметь возможность отсчитывать промежуточные интервалы времени.

При обширных и опасных гидрометрических работах применение автоматических счетчиков облегчает работу. Счетчик оборотов соединяют с секундомером так, чтобы можно было одним движением включать и выключать как секундомер, так и счетчик. Можно, наконец, сделать счетные устройства в такой мере независимыми, чтобы присоединять самописцы в виде ленточных хронографов, которые при помощи отдельных перьев наносят на ленте время по секундам и отрезки проходимого лентой пути по выбранному числу оборотов вертушки. Подобные ленточные хронографы (при использовании в качестве источника энергии электричества) могут быть изготовлены для любого числа одновременно работающих вертушек и дают при этом в хронограмме наглядную картину всех явлений (рис. 59).

Существуют также указатели скорости течения воды, которые, будучи включены в электрическую цепь вертушки, непосредственно дают численные значения скорости течения. Эти устройства обладают, однако, тем недостатком, что для каждой вертушки должен быть изготовлен отдельный циферблат соответственно ее тарировочной кривой. Так как тарировочные коэффициенты находящихся в работе вертушек могут, как известно из опыта, изменяться, то и индикатор скорости не получил на практике распространения.

<sup>1</sup> F. Rosenauer. Eine neue Zeichengebung für hydrometrische Flügel mit Tonfrequenzströmen, Die Wasserwirtschaft № 3 u. 4, Wien 1932.

**Опускание гидрометрической вертушки в воду.** Оно может производиться, равно как и установка вертушки, в определенных точках живого сечения различными способами.

1. При помощи упирающейся в дно штанги, упорной штанги, причем; вертушка может быть передвигаема по штанге, смотря по надобности.
2. При помощи штанги, свободно подвешенной к гидрометрическому мостику, или подвесной штанги, на нижнем конце которой укреплена вертушка, передвигаемая вместе со штангой в вертикальном направлении.
3. При помощи троса или кабеля, на котором вертушка в свободно подвешенном состоянии под действием собственного веса и при посредстве лебедки опускается в воду и переставляется по высоте.

4. При помощи плавающего тела. Вертушка прикрепляется к его дну и остается все время в одном положении по высоте.

5. При помощи опор, к которым вертушка прикрепляется и длительное время удерживается в одинаковом! положении.

По роду указанных приспособлений для погружения в воду вертушка носит названия в случаях 1 и 2 — штанговой вертушки, в случае 3 — тросовой вертушки, в случае 4 — вертушки на буксире и в случае 5 — вертушки-водомера или вертушки для непрерывного учета скорости.

**Штанговая вертушка.** У штанговой вертушки упорная штанга изготовляется обыкновенно из цельнотянутых стальных труб круглого, остроовального или обтекаемой формы сечения (сплющенного поперечного сечения — *stromlinienförmige*). Обтекаемая форма сечения должна быть особо рекомендована, так как (при равной величине скорости течения) штанга подобной формы испытывает, примерно, одну пятую того давления потока, что приходится на круглое сечение равной ширины.

Верхний предел для работы с упорной штангой, примерно, 10 м глубины при скорости течения в 3 м/сек.

При больших скоростях упорные штанги, начиная, примерно, с 6 м их длины, закрепляют при помощи троса, натягиваемого в направлении вверх; по течению.<sup>1</sup> При меньших глубинах и скоростях (в целях уменьшения веса оборудования) употребляются также алюминиевые штанги.

Установка вертушки в требуемое положение при измерениях на малых глубинах производится посредством полой передвижной трубы *h*, которая наглухо соединена с вертушкой *f* (рис. 60). На основной штанге *c* нанесена сантиметровая шкала делений *s*; по ней (при помощи метки на передвижной трубке) устанавливается положение вертушки.

При больших глубинах для установки вертушки попутно служит кабель *K*, вместе с тем являющийся электропроводом, к которому прикреплена вертушка с муфтой *A* (рис. 61). Если применяется полая штанга, кабель прокладывается внутри ее и затем, проходя через ролик на верхнем конце вертушки, направляется к счетчику глубин.

Счетчик глубин имеет счетный диск *Z* с сантиметровой шкалой делений по окружности. Кабель прижат к диску при помощи рычага *B*, так что движению кабеля в том или другом направлении должно следовать вращение диска. По последнему можно затем отсчитать пройденное кабелем расстояние.

<sup>1</sup> Как на исключительный случай, надо указать на применение на Рейне удлиненной до 18 м штанги, сечением 278 X 148 мм и весом в рабочем состоянии 1300 кг. Ее употребляют с судна при помощи крана, высотой в 13 м. При измерениях бывают заняты (в зависимости от высоты уровня воды) от 8 до 16 человек.

60

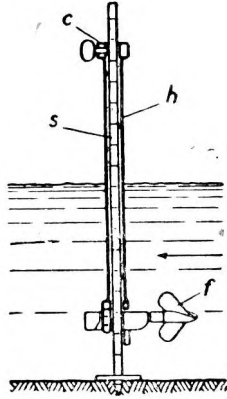


Рис. 60. Штанговая вертушка с полой трубкой для передвижения вертушки.

Закрепление вертушки на точке достигается при помощи зажимного клапана. Штанга снабжена на нижнем конце башмаком  $G$  с острием во избежание погружения в мягкий грунт русла.

Если вертушка на упорной штанге должна служить для измерений в напорном трубопроводе, можно использовать устройство, изображенное на рис. 62.

Плоская железная стойка  $a$  заделывается в трубопровод по диаметру трубы через проделанное в ней отверстие. По штанге скользит корпус вертушки  $b$  с собственно вертушкой  $c$ . Передвижение производится ведущей штангой  $d$ , в которой заключены электрические провода и которая проходит стенку трубы через сальник с кожаной набивкой. Для управления передвижением вертушки служит рукоятка  $g$ .

Вертушка на подвесной штанге передвигается в вертикальном направлении в раме с подставкой.

Штангу и в этом случае лучше всего брать с обтекаемой формой сечения, так как подобное сечение имеет преимущество при одностороннем изгибающем давлении на штангу.

Опыт показал, что указанной формы сечение, размером  $54 \times 27$  мм, при длине штанги  $8$  м и глубине погружения до  $5$  м, достаточно при скорости около  $2,5$  м/сек.

Установка подвесной вертушки в требуемом положении по высоте происходит при помощи штангодержателя, который изготовляется двух типов — с рычажным тормазом и с лебедкой.

Штангодержатель с рычажным тормазом (рис. 63) состоит из охватывающего штангу  $a$  продолговатого футляра  $b$ . Через опускание педали  $d$ , которая удерживает вертушку в футляре на любой высоте, вертушка освобождается и может быть по желанию поднята или опущена.

Штанга снабжена отверстиями через сантиметр по всей своей длине и шкалой делений с нулем на верхнем конце.

Ряду отверстий в штанге в футляре соответствует прорез  $e$ , вдоль которого также нанесены деления.

Шкала делений на штанге служит для установления положения вертушки над воображаемой нулевой плоскостью, тогда как прорез в футляре допускает быстрое изменение высотного положения вертушки.<sup>1</sup>

У штангодержателя с лебедкой (рис. 64) верхняя часть рамы снабжена лебедкой, допускающей приме-

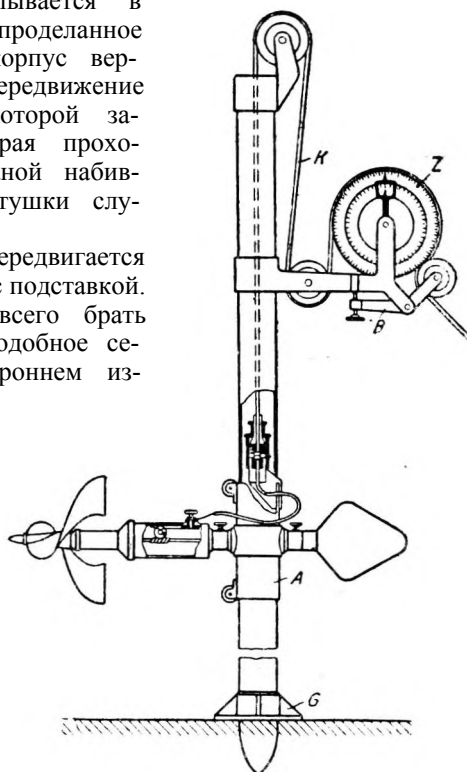


Рис. 61. Штанговая вертушка, передвигаемая по штанге при помощи кабеля.

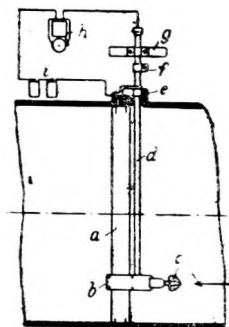


Рис. 62. Вертушка для измерений скоростей течения в трубах.

<sup>1</sup> Для этого, против деления штангодержателя  $f_1$ , соответствующего требуемой величине передвижения вертушки, вставляется сквозь штангу штифт, затем штангу поднимают до положения  $f_2$ , в котором штифт упрется в отмеченный нулем конец щели. (Прим. пер.)



нение тяжелых штанг. От лебедки к нижнему концу штанги идет трос. Полный оборот рукоятки  $c$  соответствует изменению высоты на 20 см. Штанга имеет через каждые 5 см сквозное поперечное отверстие. Ее вставляют при помощи задвижек  $d_1$  и  $d_2$  в два (расположенных одно над другим) гнезда штангодержателя и закрепляют в требуемом по высоте положении

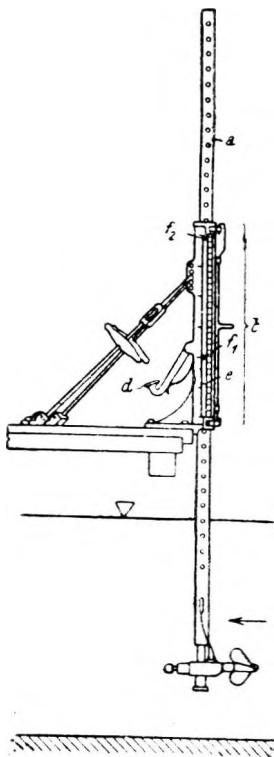


Рис. 63. Вертушка и штангодержатель с рычажным тормазом.

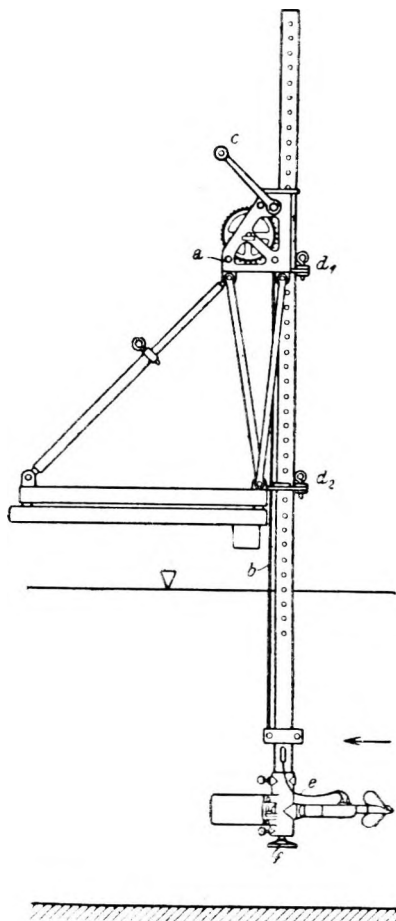


Рис. 64. Вертушка и штангодержатель с лебедкой.

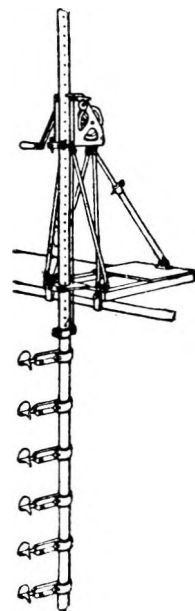


Рис. 65. Вертикальная цепь вертушек на передвижной подвешной штанге.

сквозными штифтами. Электропровода пропускают внутри полой штанги. Это устройство снабжается обычно донным контактом  $f$  для независимого установления момента достижения штангой дна водотока.

На упорные, равно как и на подвесные штанги может быть одновременно насажено по несколько вертушек. Благодаря этому, при одновременной записи на ленточных хронографах данных наблюдений всех вертушек, можно значительно сократить время наблюдений. Подобные спаренные вертушки или цепи вертушек, в зависимости от характера измерений и формы профиля, могут быть расположены вертикально (рис. 65), горизонтально (рис. 66) или радиально (рис. 67) и быть неподвижно закрепленными или подвижными.

Когда вертушка на подвесной штанге применяется для измерений в напорном трубопроводе, для введения ее в трубу и передвижения в ней требуются специальные устройства.

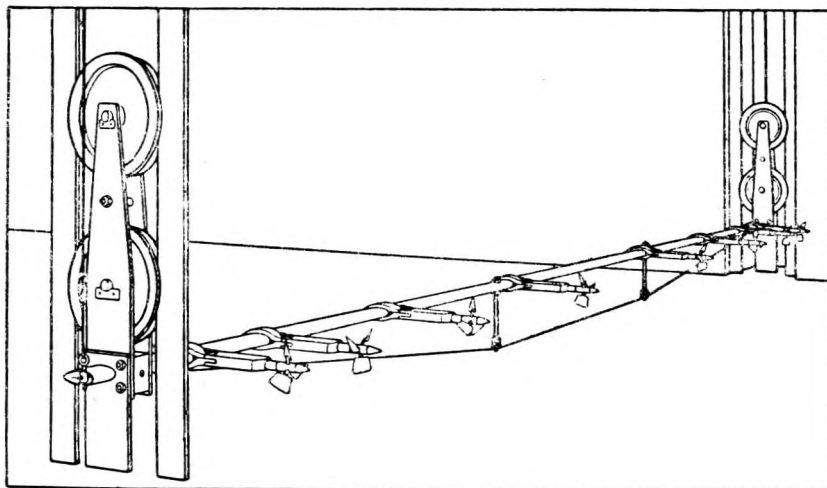


Рис. 66. Горизонтальная цепь вертушек на передвижной тележке.

В конструкции, изображенной на рис. 68, штанга *a* с обтекаемой формы сечением вводится в напорную трубу через сальник *b*. Штангодержатель седлом *d* опирается на трубу и в точке *e* имеет приспособление для переме-

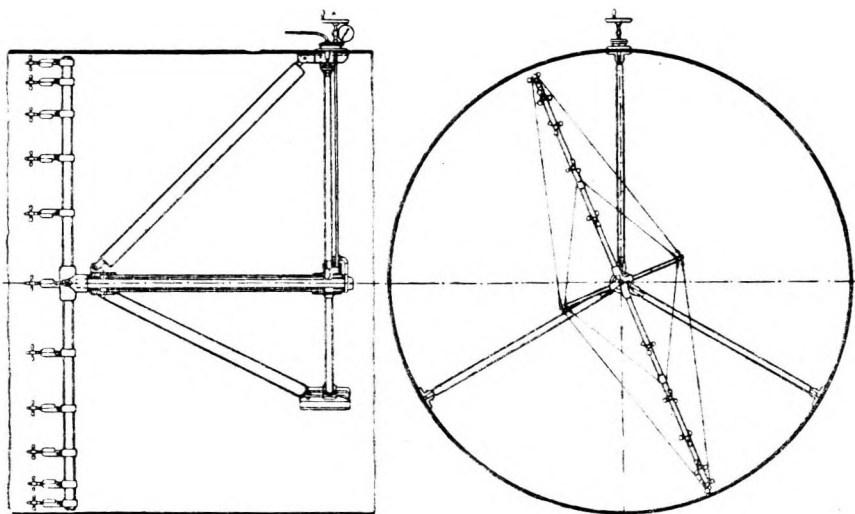


Рис. 67. Радиальная цепь вертушек, поворачиваемая при помощи ручного маховика.

щения и закрепления штанги. Червячная лебедка *f* тянет трос и штангу. Такая конструкция пригодна для самого высокого напора.

Устройство на рис. 69 сконструировано таким образом, что представляется возможность как продольного передвижения штанги, так и отклонения ее в сторону. На крышке *A* устроен сегмент *C*, по которому штанга перемещается и закрепляется в отдельных рабочих положениях. Это устройство применимо для напоров, примерно, до 3 атмосфер.

Устройство на рис. 70 допускает введение и изъятие вертушки из трубопровода во время его эксплуатации, тогда как две предыдущих конструкции требовали для этого предварительного выпуска воды. В трубопроводе

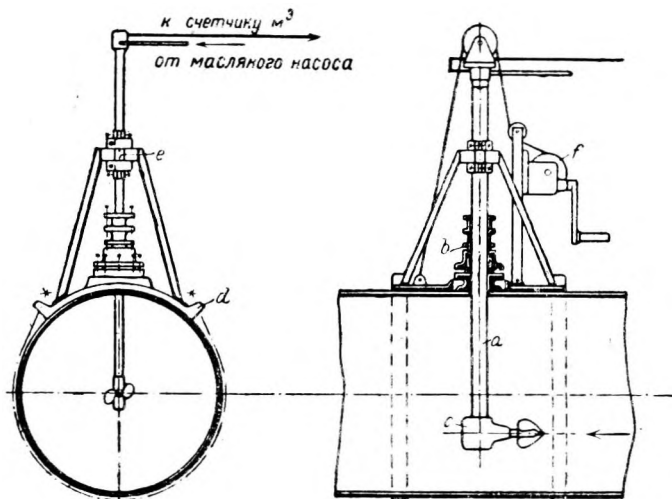


Рис. 68. Конструкция для опускания вертушки в напорный трубопровод.

(в месте измерения) делается продольный вырез, на который при помощи соединительного фланца *B* насаживается затвор *A* отверстием в свету в 300 мм. Для производства измерений затвор накрывается крышкой *C*,

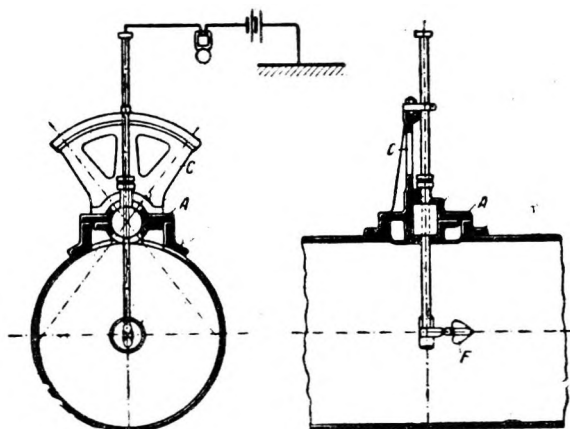


Рис. 69. Конструкция для опускания вертушки в напорный трубопровод системы Синдби.

через которую проходит штанга *G* вертушки. Вначале штанга *G* поднята, так что вертушка *F* вместе с крышкой *D* помещаются внутри шлюзной камеры, образуемой шляпкой и задвижкой. По открытии задвижки вертушка вдвигается в напорную трубу, и крышка *D* нажимом штанги *E* сажается на свое место. Указанное устройство оправдало себя при давлениях до 5 атмосфер

Тросовая вертушка. В очень глубоких и быстрых потоках штанговая вертушка становится трудно применимой, а при исключительно больших глубинах совершенно не применимой. Тогда наступает необходимость приме-

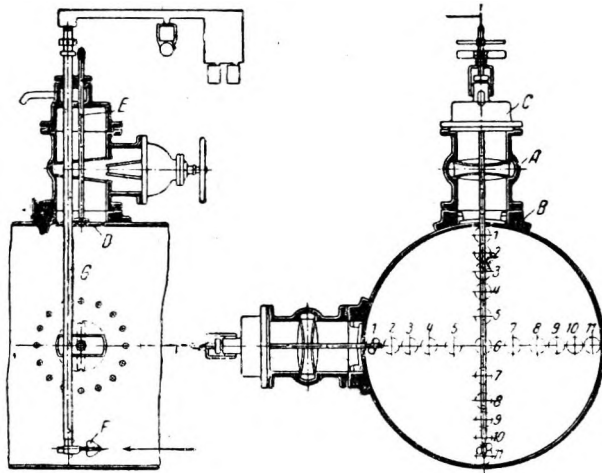


Рис. 70. Конструкция по опусканию вертушки в напорный трубопровод без выпуска из него воды системы Дюфор (Лозанна).

нения тросовой вертушки, перемещение которой по высоте осуществляется сравнительно легко.

Тросовая вертушка устанавливается на точки наблюдения при помощи лебедки с тросом, помещаемой на мосту, на воде или на берегу.

При измерениях с моста переносный кранообразный или передвижной колесный подъемник прилагается к перилам моста таким образом, что блоки *S*, служащие направляющими для троса, оказываются над перилами, и управление барабаном для троса *M* может производиться с полотна моста (рис. 71).

При работе тросовой вертушкой с лодки, судна, то есть с воды, вертушки более легких типов опускаются с носа или с широкой части лодки при помощи платформы *N* и лебедки *A* через вынос *M* (рис. 72).

Для вертушек тяжелых конструкций употребляют (в качестве платформы) помост, соединяющий вместе два судна, или понтоны. Если на гидрометрических створах, по своим размерам потребовавших столь значительных устройств, производятся постоянные измерения, то служащее для измерений судно защищают от непогоды.

Для створов, где нет мостов и работать с воды нецелесообразно, встает вопрос о применении канатной системы.

При канатной системе передвижение вертушки вдоль створа и погружение ее производится с берега помощью двойной лебедки *H* и барабанов

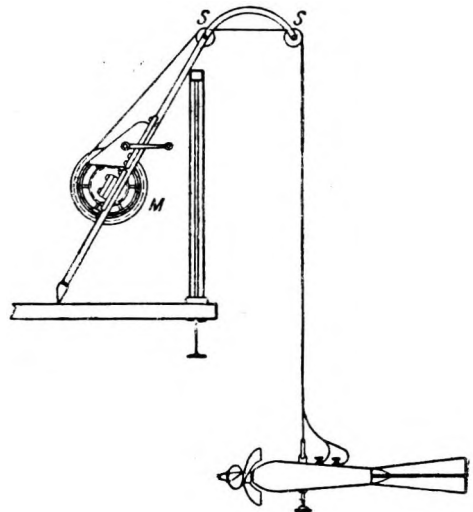


Рис. 71. Переносный кран для подвесной вертушки системы Ганзера (Вена).

с тросом  $T$  и  $B$  (рис. 73). Канат  $W$ , поддерживающий подвижной блок  $D$ , проведен через столбы  $Q$  и  $R$ . При прикосновении вертушки ко дну тягловый трос  $V$  ослабляется, и рычаг направляющего ролика  $N$ , освобожденный

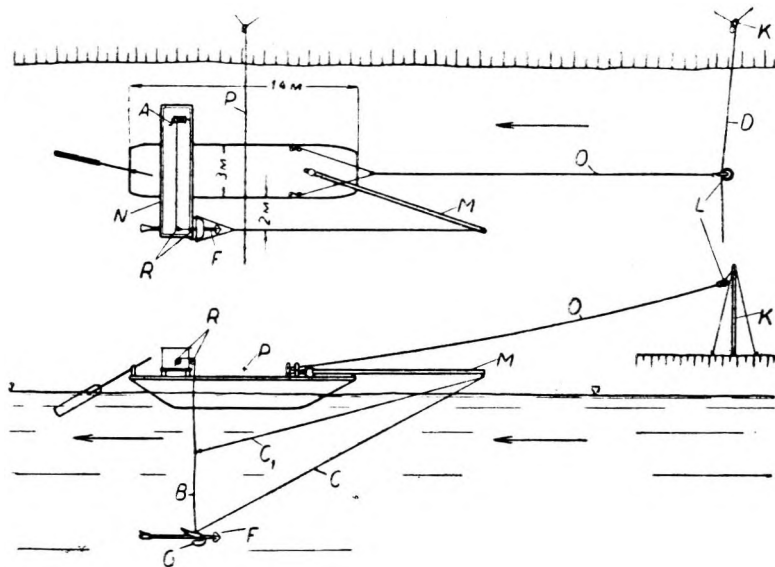


Рис. 72. Работа подвешенной вертушки с судна.

$A$ —лебедка;  $K, D, L, O$ —канатно-блоковая передача для передвижения судна;  $P$ —створный трос;  $M$ —вынос;  $CC_1$ —тросы для закрепления вертушки;  $F, B$ —трос-провод;  $G$ —поддон.

и отогнутый назад под действием сильной пружины  $O$ , замыкает звонковый контакт в точке  $P$ .

Употребляются также, хотя и реже, канатные системы с люлькой, откуда опускание вертушки производится самим наблюдателем.

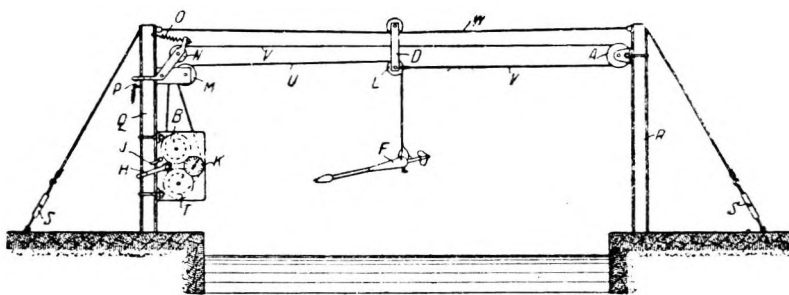


Рис. 73. Канатная система для подвешенных вертушек по системе Отта.

По сравнению с измерениями со штанги, измерения с троса имеют два недостатка. Тросовая вертушка, вследствие своей способности поворачиваться во все стороны, устанавливается по направлению течения воды и измеряет поэтому действительную скорость течения, а не составляющую ее, нормальную к створу. Вследствие этого в случаях, где течение направлено под острым углом к створу, при известных условиях могут получиться преувеличенные значения расходов воды. Кроме того при сносе в направлении течения, вертушка отходит от створа и этим вносится элемент ненадежности в определение положения ее по глубине.

Чтобы, по возможности, ослабить или исключить оба эти недостатка существуют вспомогательные приспособления.<sup>1</sup>

Для удержания вертушки в отдельных скоростных точках прибегают к установке ее на привязи. Если этого не сделано, тогда положение вертушки по глубине должно быть установлено измерением или вычислением.

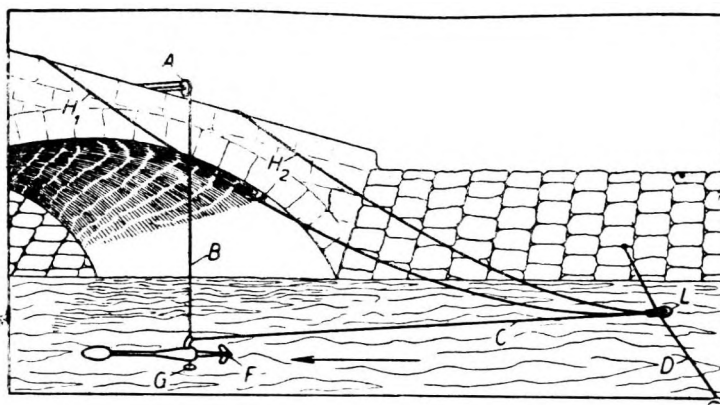


Рис. 74. Работа с моста вертушкой на привязи по системе Альбрехта.

В первом случае сносу вертушки препятствует вертикально натягиваемый якорным грузом трос, на котором вертушка ходит, как на упорной штанге. Закрепление вертушки может еще производиться при помощи троса, натягиваемого выше по течению, поперек реки. По тросу *D* ходит подвижный блок *L*, и от блока протягивается к вертушке *F* другой трос *C* (рис. 74).

Путем измерения глубина погружения вертушки может быть определена (рис. 75) из уравнения:  $H = a \cos \alpha - b$ , где *a*—длина проволоки *M* натянута по хорде изогнутого троса вертушки, и  $\alpha$  — угол ее отклонения. В качестве проволоки, натягиваемой грузом *G*, выбирают очень тонкую, толщиной, примерно, 0,5 мм, стальную проволоку, чтобы, по возможности, уменьшить ее прогиб.

Путем вычислений глубина *H* может быть определена при следующей, большей частью допустимой предпосылке, что скорость течения воды *u* горизонтальна и постоянна в пределах *H*. На рис. 76. имеем: *b*—высота тросового барабана (отсчетный нуль) над поверхностью воды; *l*<sub>1</sub> — длина части троса, находящейся над водой; *U*—длина части троса.

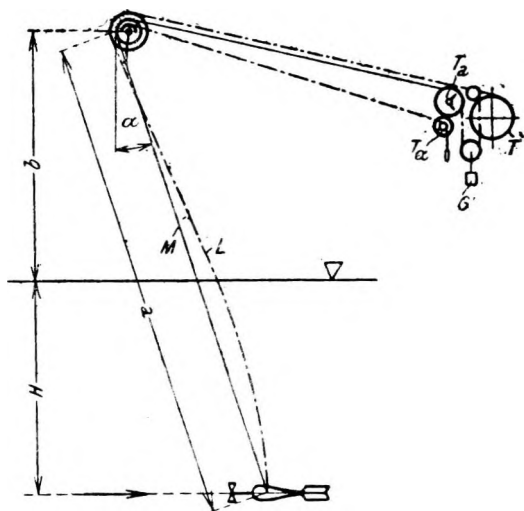


Рис. 75. Приспособление для точного определения положения подвешной вертушки.

<sup>1</sup> Поправки, которые необходимо вводить при обработке данных вертушечных измерений на неправильное положение вертушки относительно створа, будут разобраны несколько ниже.

находящейся под водой;  $\varphi_0$ —угол отклонения верхнего конца троса;  $\varphi_m$ —угол отклонения дуги троса под водой;  $P$ —вес вертушки;  $p$ —вес 1 м троса;  $W$ —давление воды на вертушку;  $w$ —давление воды на 1 м отвесно висящего троса.

Длина отпущенного конца троса  $l = l_1 + l_2$  отсчитывается по счетчику глубин, конец, измеряется обычным путем. Если  $l_1$

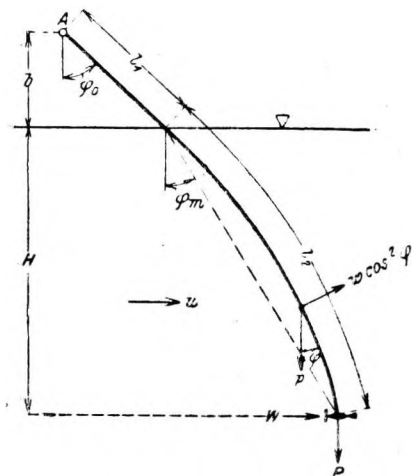


Рис. 76. Определение глубины погружения свободно подвешенной вертушки способом вычислений.

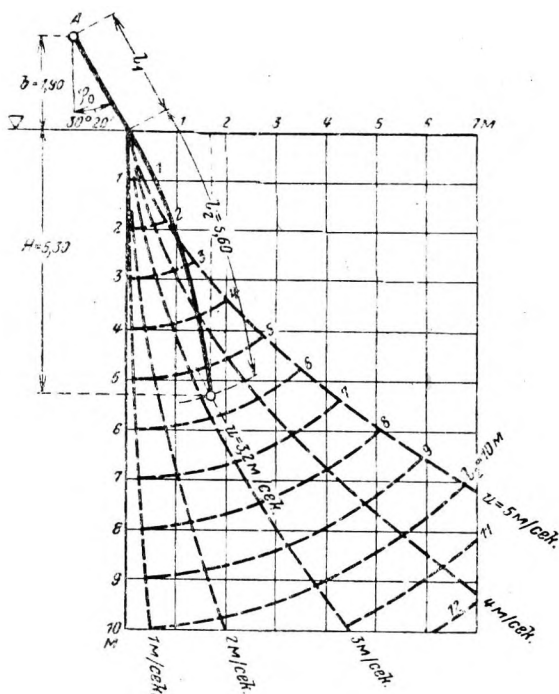


Рис. 77. График для определения глубины погружения свободно подвешенной вертушки.

велико, тогда проще измерить  $b$  и  $\varphi_0$  и получить  $l_1$  из выражения  $l_1 = b/\cos\varphi_0$ .

Для дальнейшего решения, конец троса, находящийся под водой, принимается по форме за параболу, и угол отклонения  $\varphi_m$  хорды дуги параболы получается приближенно из выражения (рис. 76):

$$\operatorname{tg} \varphi_m = \frac{W + \frac{1}{2} w l_2 \cos \varphi_m}{P + \frac{1}{2} p l_2} \quad (1)$$

Глубина погружения составляет:

$$H = \frac{l_2 \cos \varphi_m}{1 + \frac{1}{24} \frac{(w \cos \varphi_m - p \operatorname{tg} \varphi_m)^2 \cos^4 \varphi_m l_2^2}{P^2}} \quad (2)$$

Для давления воды на вертушку действительно выражение:

$$W = c_1 u^2,$$

а для давления на 1 м троса:  $w = c_2 \frac{\gamma}{g} d \frac{u^2}{2}$ , где  $d$ —диаметр рабочего троса;

<sup>1</sup> Вертушку погружают в воду так, чтобы вода едва покрывала ее, а давление воды на трос было практически равным нулю; измеряют затем угол отклонения  $\alpha$ , скорость течения воды  $u$  и вычисляют  $c_1$  из выражения  $c_1 = \frac{P \operatorname{tg} \alpha}{u^2}$ .

$c_1$  определяется эмпирическим путем,<sup>1</sup>  $c_2$  на основании опыта можно принимать равным, примерно, 1,1.

Для вертушки с определенной величины постоянными рекомендуется результаты вычислений по уравнениям (1) и (2) изображать в виде таблицы или графика.

На рис. 77 изображен подобный график, который дает возможность установить также и снос вертушки. Он построен при следующих основных данных:

$$P = 50 \text{ кг}, \rho = 0,1 \text{ кг/м}, W = 0,5 \text{ м}^2 \text{ в кг} \text{ и } w = 1,1 \cdot 0,0375 \cdot 1000/9,81 \cdot \text{м}^2/2 = 0,4 \text{ м}^2 \text{ в кг}.$$

Если, например, измерение дает  $l = 7,80 \text{ м}$ ,  $b = 1,90 \text{ м}$ ,  $\varphi_0 = 30^\circ 20'$  и  $u = 3,20 \text{ м/сек}$ , то вычислением получается  $l_1 = 1,90/0,863 = 2,20 \text{ м}$ ,  $l_2 = 7,80 - 2,20 = 5,60 \text{ м}$ .

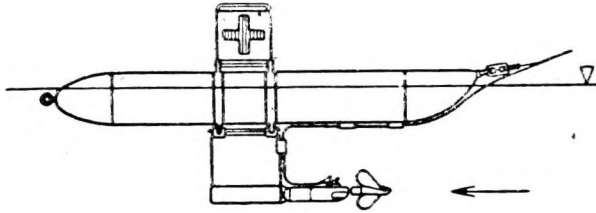


Рис. 78. Вертушка на буйке.

Положение вертушки может быть теперь изображено на графике в координатной системе  $l_2$ ,  $u$ , причем глубина погружения определится равной  $H = 5,30 \text{ м}$  и снос  $= 1,90 \text{ tg } \varphi_0 + 1,70 = 2,80 \text{ м}$ .

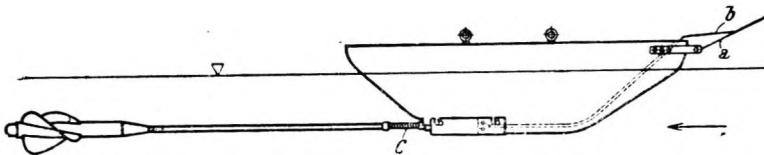


Рис. 79. Лаг на буйке.

$a$ —закрепляющий трос;  $b$ —сигнальный провод;  $c$ —гибкий вал.

Вертушка на буйке. Поплавок, соединенный с корпусом вертушки, удерживается в намеченных для наблюдений точках гидromетрического створа проводом, служащим одновременно электрическим проводником (рис. 78). Чтобы, по возможности, уменьшить колебания прибора при сильном течении, привязывают к его заднему концу пловучий канат или пучок хвороста.

Особый тип вертушки на буйке представляет лаг на буйке, применение которого целесообразно тогда, когда лопасти вертушки могут быть повреждены плавающими предметами. Закрепление корпуса лага подобно таковому у обыкновенной вертушки на буйке (рис. 79).

Вертушка для непрерывного учета скорости. Она требует легких опор, возможно меньше стесняющих своими поперечными размерами течение.<sup>1</sup> Где это возможно, стремятся обеспечить контроль над действием вертушки, поднимая ее на поверхность. Приспособления для этого

<sup>1</sup> L. A. Ott, Instrumentenkunde der praktischen Hydrometrie, Kempten.



в открытых водотоках устроить легко (рис. 80); в закрытых каналах они возможны при устройстве колодцев. Для напорных трубопроводов целесообразно устройство, изображенное на рис. 81.

К вертушкам для непрерывного учета скорости следует причислить также те устройства, где вертушка занимает собою не малую часть площади

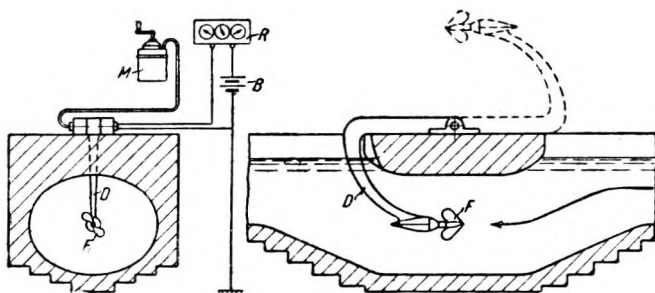


Рис. 80. Вертушка длительного действия для открытых водотоков с приспособлением для периодического подъема на поверхность.

F—вертушка; D—плечо; M—масляный напорный бак; R—счетчик; B—батарея.

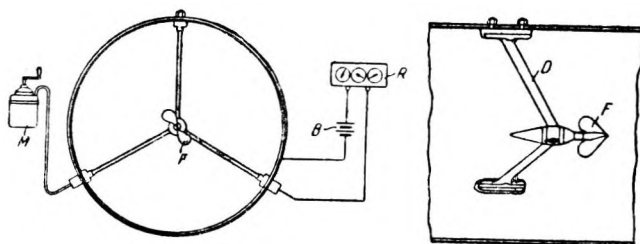


Рис. 81. Вертушка длительного действия для напорных трубопроводов с закреплением наглухо.

F—вертушка; D—неподвижное плечо; M—масляный напорный бак; R—счетчик; B—батарея.

живого сечения, как во всех предыдущих случаях, а заполняет своими лопастями всю площадь живого сечения. Подобные устройства применяются для определения расходов воды, преимущественно, в водопроводных трубах

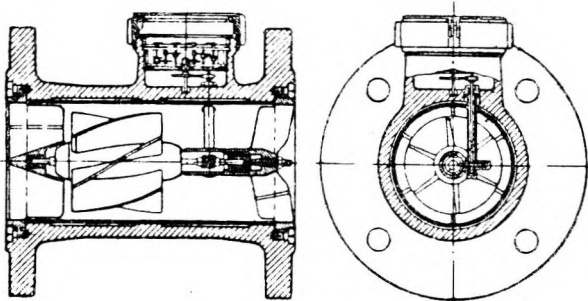


Рис. 82. Водомер Вольмана.

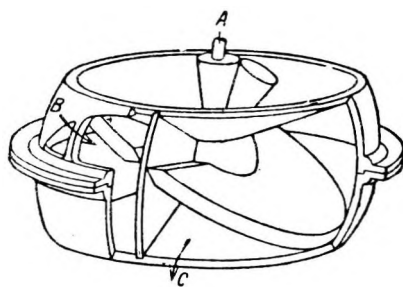


Рис. 83. Дисковый водомер.

A—привод к счетчику; B—вход для воды; C—выход воды.

диаметром до 300 мм и носят название водомеров Вольмана. Как видно из рис. 82, эти водомеры имеют счетные приспособления, по которым может

быть непосредственно определено количество воды, протекшее по трубопроводу до момента отсчета

Видоизменение водомера Вольмана представляет дисковый водомер, в котором диск, заключенный в шарообразной измерительной коробке, совершает колебательное движение, передаваемое счетному устройству (рис. 83).

**Конструирование гидрометрической вертушки в делом.** При конструировании вертушки следует, по возможности, придавать ей такого рода форму, которая наилучше соответствовала бы форме потока, следовательно, имела

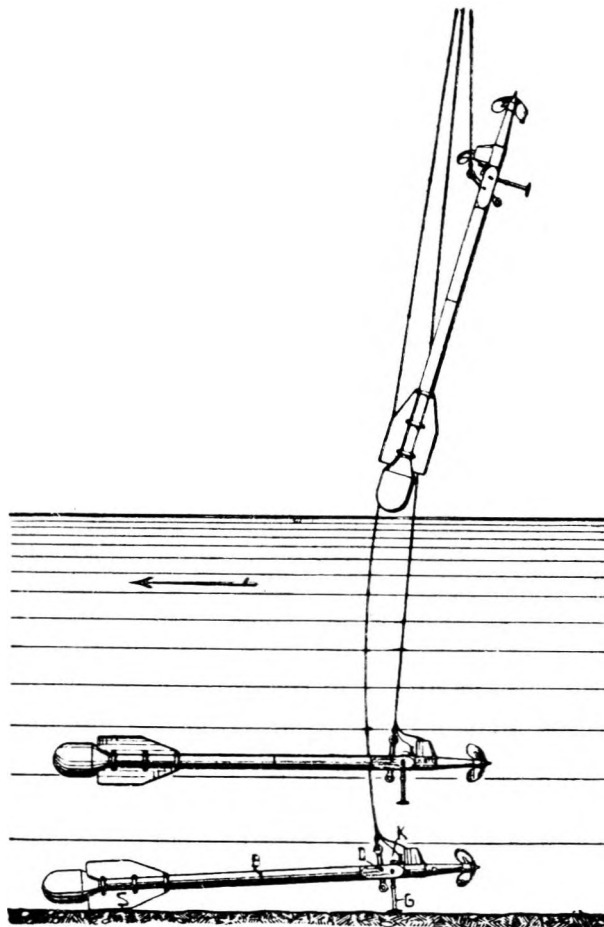


Рис. 84. Гросовая вертушка с рулем равновесия.

*D*—универсальный шарнир; *G, K*—поддон; руль равновесия.

бы возможно меньше ребер и резких переходов. Конечно конструирование должно производиться так, чтобы полностью обеспечивалась производственная надежность прибора.

У штанговой вертушки удастся достичь обтекаемой формы только в некоторой степени. Так как у вертушек этого рода размеры лопастей превосходят все остальные, то конструкция лопастей является определяющей для величины пространства вокруг вертушки, где сказывается ее вредное влияние. Конструкция лопастей является решающей и для производственной надежности прибора, поскольку на последней не сказываются несомые водой твердые вещества.

Рулевое приспособление у штанговых вертушек может отсутствовать, так как установка вертушки в нужном направлении производится по штанге. Тем не менее некоторые типы вертушек имеют устройства, подобные рулевым; однако они преследуют другие цели.

Лопастей у вертушки (типа изображенного на рис. 52) снабжены защитным кольцом, которое предотвращает наматывание на лопасти несомых водорослей, травы и пр. и защищает лопасти от толчков об дно реки. Точность наблюдений от этого не уменьшается, а при направлении течения под острым углом скорее возрастает. Собственно корпуса вертушки здесь нет, и механический счетчик совершенно открыт. Вертушки этого типа имеют пластинчатый хвост, который должен облегчать установку вертушки в направлении, перпендикулярном живому сечению, и защищать ее от толчков об стены и дно водотока. Этот тип вертушки, благодаря своим малым размерам, пригоден для измерений в самых малых водотоках и особенно удобен при работе, связанной с разрезами.

Вертушка, изображенная на рис. 53, имеет лопасти штопорообразной формы, которые весьма удобны для самостоятельного отгона несомого водосора. Корпус вертушки имеет форму патрона и содержит слаботоковый

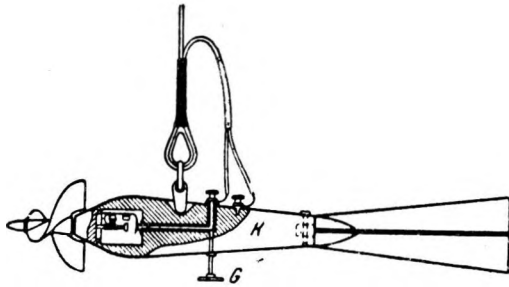


Рис. 85. Тросовая вертушка системы Ганзера.  
К—корпус вертушки; G—поддон.

электрический счетчик. Рулевого устройства нет. Размеры таковы, что и эта вертушка находит применение как портативный разрезной инструмент.

Форма вертушек, предназначенных для измерений с троса, должна быть сконструирована с большей тщательностью, чем для штанговых вертушек. Вертушка должна быть сконструирована не только с учетом малейших нарушений течения, но иметь еще такое распределение материала и размеров

ров, чтобы после погружения ее в воду наступило равновесие и она обладала при этом достаточной устойчивостью и способностью устанавливаться горизонтально. Она должна быть устойчива даже при бурном течении, образующем сильные водовороты. Этим условиям удовлетворяет конструкция, изображенная на рис. 84.

Эта тросовая вертушка подвешена при помощи универсального шарнира *D* таким образом, что руль *S* обеспечивает прибору горизонтальное положение даже при стремительном течении. Общий вес составляет 14 кг. Три положения вертушки, показанные на рисунке, отображают процесс ее опускания в воду. Из рисунка видно, что при этой конструкции вертушка предохранена от повреждений при ударе об дно водотока.

Более старые конструкции тросовых вертушек состояли просто из штанговых вертушек, которым придавали более или менее крупных размеров руль и подвешивали груз.<sup>1</sup> Подобные устройства находят применение и по-сейчас в качестве компромиссного решения, когда хотят иметь так называемую универсальную вертушку, которая бы служила для измерений со штанги и для измерений с троса. Новейшие конструкции переходят, однако, исключительно на продолговатые формы, придают корпусу вертушки обтекаемую форму при большом собственном весе и применяют направляющий руль (рис. 85).<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Груз подвешивается к нижнему концу стержня, называемого вертлюгом, который вставляют в отверстие в корпусе вертушки, служащее для надевания ее на штангу. За кольцо на верхнем конце вертлюга вертушка прикрепляется к тросу. (Прим. пер.).

<sup>2</sup> Такого рода вертушка, своей формой напоминающая торпеду, носит еще название вертушки-торпеды.

Чтобы погрузить вертушку быстро и точно без применения специального груза, может быть употреблен собственный руль погружения (глубинный руль), подобно тому как у самолетов или управляемых аэростатов (рис. 86). Для тросовых вертушек весьма желательно применение поддонов, так как установить момент достижения ими дна бывает особенно затруднительно.

Вертушки на буксире состоят из цилиндрического поплавка с приподнятым носом. К нему подвешена собственно вертушка по рис. 78, как обыкновенная вертушка на буксире, или по рис. 79, как лаг на буксире. У лага поплавок имеет камеру с контактным устройством. Три винтообразных лопасти вертушки присоединяются к корпусу лага алюминиевой трубкой с включением в промежуток гибкого вала С.

Измерения лагом показывают точность, почти одинаковую с обычной вертушкой. Напряжение, испытываемое тросом *a* при скорости течения воды в 4 м/сек, составляет всего 6 кг. Вертушки на буксире, а равно и лаги снабжаются, обычно, сигнальными флажками для указания положения их в створе в данный момент времени.

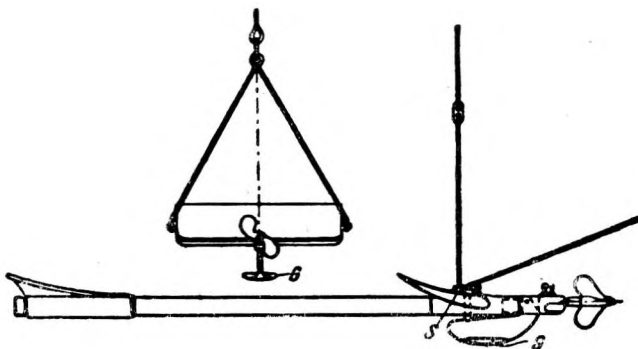


Рис. 86. Тросовая вертушка с рулем погружения системы Отта.  
G—поддон; S—руль глубины.

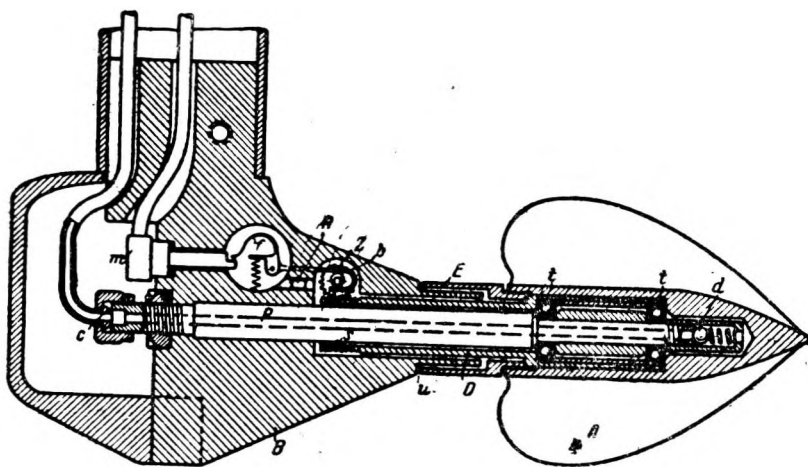


Рис. 87. Вертушка длительного действия системы Отта.  
с—вводные отверстия для масла; d—вентиль; D—втулка; Z—контактное колесо; u—выход для масла; t—шариковый подшипник; S—червячная передача; P—неподвижная ось вертушки.

Для непрерывного учета расходов воды применяются только те типы вертушек, у которых специальная (особой сопротивляемости) конструкция осевых опор удовлетворяет требованию производства продолжительных измерений (рис. 87). Из подшипников могут применяться только шариковые подшипники, защищенные от доступа воды при помощи изолирующей жидкости, в качестве которой применяют охотнее всего масло, вследствие его одновременного смазывающего действия. Так как, вследствие образования эмульсии, на границе между маслом и водой наблюдаются потери масла, масло обновляется при помощи маленького масляного насоса, который может преодолеть любое из наблюдающихся здесь противодавлений (рис. 88).

По узким медным трубам масло под напором доходит в с до заднего конца пустотелой неподвижной оси вертушки *P* и через пружинный клапан *d*, помещающийся у переднего конца оси, попадает в переднюю камеру подшипника, а оттуда в длинную капиллярно непроницаемую цилиндрическую щель между осью и втулкой *D*. В конце концов масло вытекает через щель *и* в воду. Расход масла ничтожен: примерно,  $10 \text{ см}^3$  в день.

Несколько рядом расположенных вертушек могут быть питаемы маслом от одного общего насоса. Применяемое масло должно оставаться совершенно

жидким даже при температуре  $-20^\circ$ . Тарировка подобных вертушек с подачей масла под напором может производиться лишь тогда, когда все водонепроницаемые и масляные камеры надежно наполнены смазочным маслом.

Усилия сконструировать портативные измерительные приборы привели к самым различным решениям. Производству требуются приборы, по точности, может быть, и не отвечающие самым строгим требованиям, но настолько

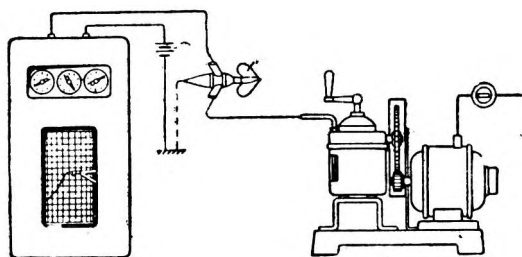


Рис. 88. Автоматический масляный насос и счетчик к вертушке длительного действия.

малых размеров по весу и объему, чтобы их удобно было брать с собой при разъездах. Такие вертушки, с малыми размерами обладать еще прочной конструкцией и быть, по возможности, приспособлены для быстрых измерений.

Из многочисленных конструкций подобного рода следует выделить вертушку с механическим счетчиком, которая удовлетворяет вышеуказанным условиям и при этом уместается в ящичке, размером  $20 \times 12 \times 5 \text{ см}$ , даже при применении лопастей с диаметром в  $10 \text{ см}$  (рис. 89). Счет оборотов производится здесь чисто механическим путем при помощи механического счетчика с весьма небольшим внутренним трением. Это устройство находит применение при интеграционном способе измерения, где приходится регистрировать очень большое число оборотов.

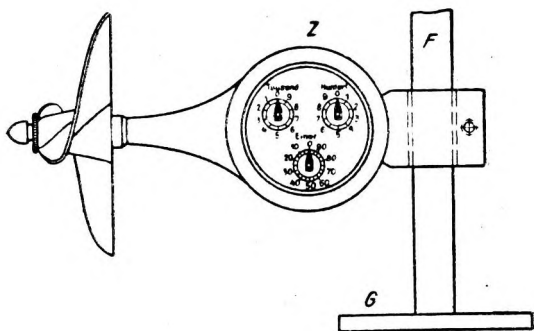


Рис. 89. Карманная вертушка с механическим счетчиком по Шаффернаку.

*F*—штанга; *G*—поддон; *Z*—счетчик.

#### Дополнительные части оборудования гидрометрической вертушки.

Дополнительные части в конструкции вертушек применяются с целью сигнализации или регистрации обратных течений воды, для измерения направлений оси вертушки и для увеличения чувствительности вертушек.

Обратные течения воды могут иметь место не только вдоль боковых границ водотока, но и у дна его, где они устанавливаются только при помощи специальных указателей. Если при оценке измерений не учитывать такие ненормальные течения, то при известных обстоятельствах точность измерений может снизиться. Приспособления этого рода, указывающие направление вращения лопастей вертушки, конструируются по различным принципам.

Наиболее простым является специальное приспособление контакта в счетном механизме вертушки. Контактный сигнал при нормальном направ-

лении вращения выражается точкой и чертой, вместо одной черты, при обратном направлении вращения—чертой и точкой.<sup>1</sup>

Другой способ основывается на применении маятника, помещаемого в хвосте вертушки (рис. 90). При обратном течении воды маятник *P* надавливает на контакт *K* и вызывает этим особый электрический сигнал.

Измерение направления имеет целью, в первую очередь, указание направления струи воды в горизонтальной плоскости, следовательно установление угла, образуемого осью свободно вращающейся тросовой вертушки с магнитным меридианом. Для этого применяют пловучий компас, который (вместе с необходимым электрическим контактным устройством) помещается в корпусе тросовой вертушки. Положение компасной стрелки передается затем автоматически на помещенный в подходящем месте циферблат или на помещенную в корпусе вертушки ленту-пленку.

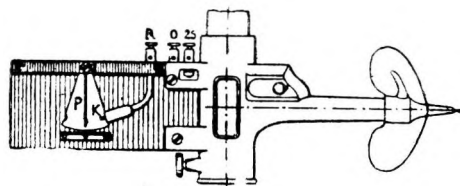


Рис. 90. Маятник-указатель обратных течений в водотоке системы Эппера.

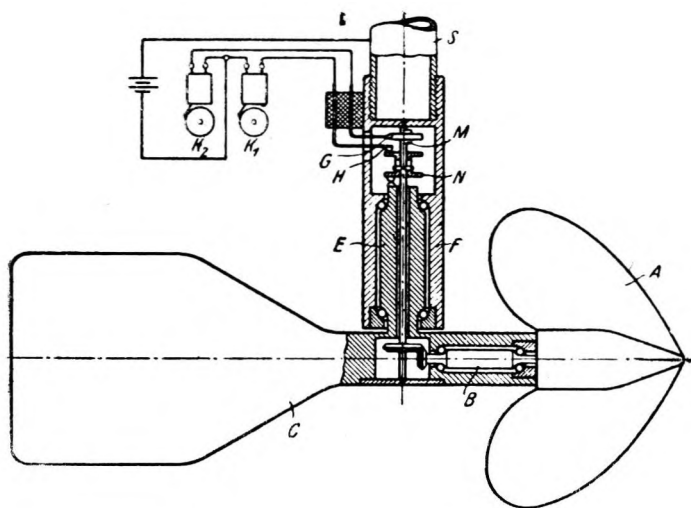


Рис. 91. Вертушка для измерения направления течения системы Отта.

Это устройство достаточно для измерения морских течений или для приближенных измерений течений в речном потоке, которые по направлению являются, собственно, пространственными, а не плоскостными.

При точном исследовании процессов течения в водотоках производится измерение направления течения как в горизонтальной, так и в вертикальной плоскостях. Для этого существуют типы вертушек, при помощи которых можно получить и автоматически регистрировать одновременно со скоростью течения и углы, которые образует направление течения с вертикальной и неподвижной горизонтальной прямыми.

Подобное устройство воспроизводит рис. 91. Ось *B* вертушки *A* устанавливается по направлению течения при помощи руля *C*, который может

<sup>1</sup> При звонковой сигнализации в первом случае вначале следует отрывистый звонок, затем затяжной звонок, а во втором случае вначале затяжной звонок и затем отрывистый. Достигается это установкой на зубчатке контактного устройства пары штифтов разной толщины вместо одного. (Прим. пер.)

быть устроен в виде горизонтального или высотного руля. Смещение фаз, после которого контактные устройства  $G-H$  и  $M-N$  прерывают и замыкают две электрические цепи, возмещается при помощи звонков  $K_1$  и  $K_2$  или заменяющего их пишущего механизма. Это смещение фаз, пересчитанное на угловые меры, дает величину угла смещения между корпусом подшипника  $F$ , скрепленным со штангой вертушки  $S$ , и вращаемой пустотелой цапфой  $E$ , и тем самым — величину угла, образуемого направлением водяных струй.

Вышеописанное устройство применимо только там, где кривизна водяных струй не слишком велика, так как иначе руль выведет ось вертушки из направления линий потока. Поэтому при определениях расходов воды в сильно расходящихся или сходящихся каналах, которые встречаются у средне-напорных гидроустановок, необходимо отдельно проводить измерения направления и вертушечные измерения. Вначале определяют при помощи пластинчатого маятника отклонение  $a$  водяных струй относительно нормали к живому сечению, затем ставят вертушку в живом сечении по направлению водяных струй и определяют скорость  $u$ . При обработке измерения следует учитывать нормальную к выбранному живому сечению составляющую скорости течения воды  $u \cos \alpha$ .<sup>1</sup>

Чтобы измерять очень малые скорости течения,—меньше начальных скоростей для употребительных типов вертушек,—которые встречаются в опытных лотках или в оросительных каналах, увеличивают искусственным образом момент кручения лопастей вертушки. При помощи намотанной на ось вертушки нити с грузом на конце вертушка получает дополнительную скорость, которая выбирается такой величины, чтобы с помощью подобного устройства можно было получать удовлетворительные результаты вплоть до нулевых скоростей.<sup>2</sup> При этом надо помнить, что грузы следует брать только такой величины, чтобы компенсировать осевое трение. Если их выбирать большего веса, чем это допустимо, то появляются аномалии (в зависимости между числом оборотов вертушки и скоростью течения воды), выражающиеся в том, что для одного и того же числа оборотов получаются два различных значения скорости.

**Теоретические основы измерений гидрометрической вертушкой.** Конструкция гидрометрической вертушки как в целом, так и в деталях является результатом, в первую очередь, долголетнего опыта, накопленного при многочисленных измерениях в самых разнообразных природных условиях и при различных предпосылках. Но, кроме того, были сделаны попытки осветить на основе лабораторных испытаний и теоретических исследований все вопросы, связанные с конструкцией самой вертушки и с методикой измерения, чтобы одновременно получить представление об их влиянии на достижимую точность результатов измерений.

Применимость гидрометрической вертушки в качестве измерительного прибора основывается, как уже указывалось, на возможности выразить число оборотов вертушки в секунду в функции от скорости притекающих водяных струй. К установлению этой зависимости приходят, в общем, эмпирическим путем, через тарировку вертушки. Однако пробовали итти и чисто аналитическим путем. Если до настоящего времени и не удалось теоретически притти к бесспорным выводам, то все же объединение опыта с теорией принесло много полезного и дало установки, на основе которых тарировки вертушек могут подвергаться глубокому анализу. По этой причине описанию процесса тарировки должно быть предпослано теоретическое рассмотрение характера действия гидрометрической вертушки.

<sup>1</sup> C. F. Streiff u. H. Gerber. Eine neue Anwendung des Flügelmessverfahrens bei Abnahmeversuchen Limmat—Kraftwerk Wettingen. Schweizerische Bauzeitung, Bd. 103, H. 3, 1934.

<sup>2</sup> H. W a d e. Report on investigation into the improvement of river discharge measurement: Part II, III, 1922, and part V, 1924, Cairo, Governement, A. S t a u s s. Die hydraulischen Einrichtungen des Maschinenbaulaboratoriums in Esslingen, Berlin 1925.

Ось вертушки параллельна направлению течения. Частицы воды, текущие параллельно оси вертушки, встречают на своем пути отдельные плоские элементы винтовой поверхности лопастей и приводят их во вращение таким образом, что, если предположить наличие идеального, лишенного трения движения (как воды, так и лопастей), то водяные струи должны продолжать свое движение, не отклоняясь от прежнего направления. Если скорость текущей воды  $u$ , шаг винта  $k$  (рис. 92) и число оборотов вертушки в единицу времени  $n_i$ , тогда, при направлении течения воды, параллельном оси вертушки, имеет место зависимость:

$$u = kn_i \quad (3)$$

так называемое идеальное уравнение вертушки. В нем  $n_i$  может быть названо идеальным числом оборотов,  $k$  является тангенсом угла, образуемого идеальной тарировочной кривой вертушки с осью  $n$ . Следовательно  $k = \operatorname{tg} \alpha$ . Однако сопротивления движению (гидравлического, а также механического характера) являются причиной того, что движение лопастей, для которого заимствуется энергия текущей воды, несколько отстает от движения струек водного потока. Практически наблюдаемое число оборотов  $n$  поэтому меньше, чем идеальное число оборотов  $n_i$ .

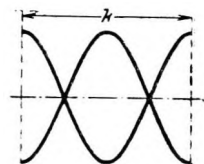


Рис. 92.

Гидравлические сопротивления вызываются трением жидкости о плоскости лопастей, завихрениями по краям их и подпором, создаваемым корпусом вертушки и приспособлениями по ее закреплению. Механические сопротивления обуславливаются трением в подшипниках и в зубчатках и в электрических частях контактного устройства. Смотря по тому, в какой аналитической формулировке даются выражения для упомянутых сил, или для их моментов вращения, получаются различные уравнения для зависимости между практическим числом оборотов  $n$  и скоростью  $u$ , следовательно различные формы практического уравнения вертушки.<sup>1</sup>

Вращающий момент, создаваемый давлением жидкости на лопасти, может быть приближенно выражен в виде  $Au(u - kn)$ , в то время как вращающий момент сил гидравлических сопротивлений выражается через  $Bu + Cu^2$ , а момент сил механических сопротивлений — через  $D \frac{u}{u - a' - b'n}$ ; при этом  $A, B,$

$C$  и  $D$  являются постоянными величинами.

Из условия равновесия вращающих моментов, действующих на вертушку, вытекает, наконец, практическое уравнение вертушки в виде:

$$(u - a - bn)(u - a' - b'n) = c^2, \quad (4)$$

где  $a, b, a', b'$  и  $c$  представляют собой пять независимых параметров вертушки. До сих пор не удалось вычислить эти параметры непосредственно теоретическим путем и только тарировка вертушки позволяет их определить. Можно это уравнение вертушки, которое обозначает гиперболу, использовать для того, чтобы по его графическому изображению, по тарировочной кривой, определить также графическим путем параметры  $a, b, a', b'$  и  $c$ . Равенства  $u = a + bn$  и  $u = a' + b'n$  выражают уравнения асимптот гиперболы. На рис. 93 изображена только та ее ветвь, которая имеет физический смысл. Асимптоты отсекают на оси  $u$  отрезки  $a$  и  $a'$  и наклонены относительно оси  $n$  под углами  $a = \operatorname{arctg} b$  и  $a' = \operatorname{arctg} b'$ . Коэффициент  $c$  является действительным радиусом гиперболы, параллельным оси  $u$ . При  $n = 0$  скорость  $u = u_0$ , то есть теоретической начальной скорости. Значение последней служит для

<sup>1</sup> L. A. Ott. Theorie und Konstantenbestimmung des hydrometrischen Flügels. Berlin 1925.



оценки чувствительности вертушки, так как малые начальные скорости расширяют пределы действия, а вместе с тем и применимость вертушки.

Непосредственное применение приведенных зависимостей для определения параметров уравнения вертушки практически невозможно по следующим причинам.

Нанесение асимптот на чертеж наталкивается на трудности, так как тарировка устанавливает только небольшую часть ветви гиперболы и так

как даже при известных асимптотах определение точки пересечения  $P$  и установление величины  $c$  было бы связано с большими неточностями. Эти трудности обходятся, нанося данные тарировки так, что ординаты выражают не значения наблюдаемых скоростей  $u$ , а значения  $\Delta = u - b_1 n$ , где  $b_1$  — принятый коэффициент, возможно мало отличающийся от тангенциального коэффициента  $k$  идеальной тарировочной кривой.

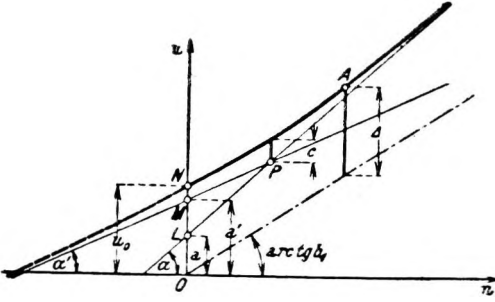


Рис. 93.

Линия  $\Delta = f_2(n)$ , получающаяся в результате уравнивания разбросанных тарировочных данных, является опять-таки гиперболой, так как она вытекает из уравнения  $u = f_1(n)$  через линейное преобразование системы координат. Она обладает, однако, большим преимуществом в том, что гораздо резче обнаруживает рассеяние тарировочных точек, имеет большую кривизну и представляет лучшее основание для графического определения параметров  $a, b, a', b'$  и  $c$ . Дальнейшее аналитическое исследование намечает следующий путь для определения постоянных величин из уравнения  $\Delta = f_2(n)$ .

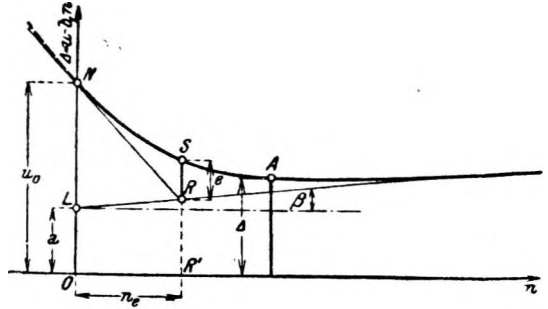


Рис. 94.

Прежде всего проводят две касательные к линии  $\Delta f_2(n)$ , а именно — одну в точке пересечения  $N$  с осью  $\Delta$ , а другую — в области наибольших значений  $n$ . Последнюю касательную можно с достаточно большим приближением считать за асимптоту. Отсюда отрезок, отсекаемый ею на оси  $\Delta$ , равняется  $a$ . Для определения остальных четырех постоянных прибегают к помощи четырех вспомогательных коэффициентов —  $b_2, u_0, e$  и  $n_e$ , которые берутся с кривой  $\Delta = f_2(n)$  (на рис. 94) следующим образом:  $b_2 = \text{tg } \beta$ ,

$u_0 = \overline{ON}$ ,  $e = \overline{RS}$  и  $n_e = \overline{OR'}$ .

Теперь можно доказать, что

$$\left. \begin{aligned} b &= b_1 + b_2, \\ a' &= u_0 - \frac{e^2}{u_0 - a - 2e}, \\ c &= \sqrt{(u_0 - a)(u_0 - a')}, \\ b' &= b - \frac{2u_0 - a' - a}{n_e}. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Эти выражения вместе с непосредственно взятым с чертежа значением коэффициента  $a$  надо ввести в практическое уравнение вертушки, переписанное в более понятной форме:

$$u = \frac{a+a'}{2} + \frac{b+b'}{2}n + \sqrt{\left(\frac{a+a'}{2} + \frac{b+b'}{2}n\right)^2 + c^2}. \quad (6)$$

На рис. 95 дано несколько примеров графического уравнения, чтобы по ним можно было сделать заключение о допустимости этого метода.

При условии известных допущений, общий вид уравнения вертушки упрощается и благодаря этому становится более удобным для практического применения. Эти допущения позволительны, однако, только в том случае, если получаемое в результате уравнение вертушки не обнаруживает слишком большого отклонения от тарифовочных данных.

Если принять  $c = 0$ , гипербола превращается в две пересекающиеся прямые с уравнениями:

$$\left. \begin{aligned} u &= a + bn, \\ u &= a' + b'n. \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

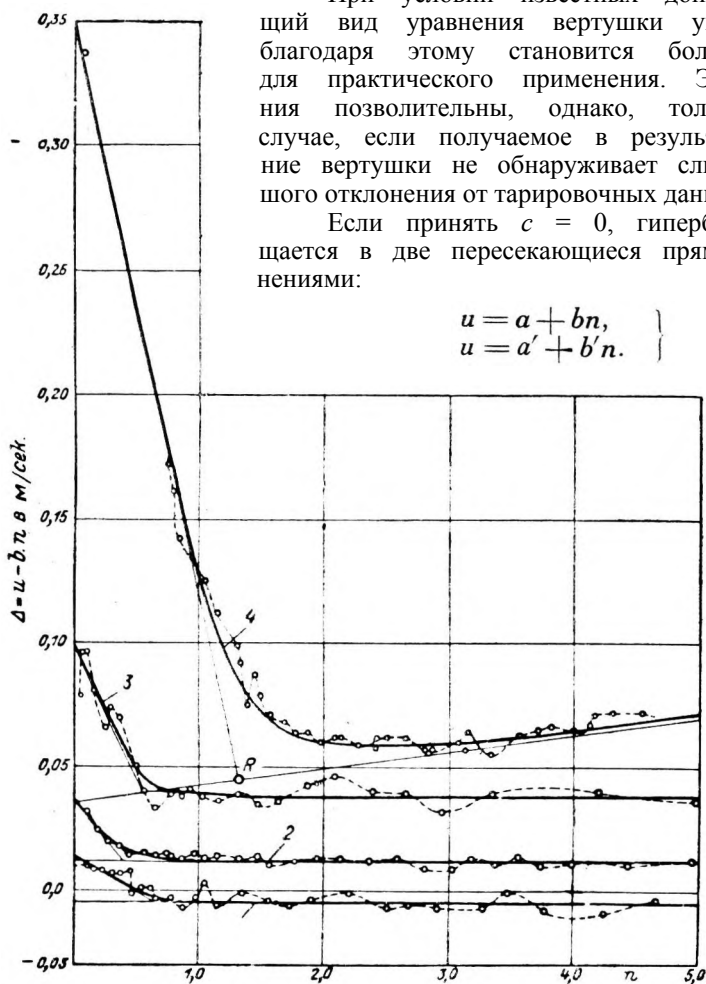


Рис. 95.

Для  $a' > a$  обе прямые имеют физический смысл.

В настоящее время почти общепринято допускать замену гиперболы двумя пересекающимися прямыми, причем одна действительна для меньших чисел оборотов, а другая для больших чисел оборотов. У некоторых типов вертушек обе кривые сливаются, и уравнение вертушки принимает простой вид (рис. 96):

$$u = a + bn. \quad (8)$$

Чтобы не ввести в последующее исследование недопустимых ошибок, вычисленные значения  $n$  не должны выходить за пределы значений  $n$ , освещенных тарифовкой.

Уравнение заменяющей прямой, если оно образуется как в приведенном выше примере, определяется лучше всего способом постепенного прибли-

жения по выбранным характерным точкам. Только при заметном рассеянии наблюдаемых точек применяется способ наименьших квадратов.

Если в уравнении (4) принять  $a' = 0$  и  $b' = 0$ , тогда получается <sup>1</sup>

$$u = a + bn + \frac{c^2}{u},$$

и так как  $c = \sqrt{(u_0 - a) u_0}$  по уравнениям (5) и (6), то

$$u = \frac{a + bn}{2} + \sqrt{\frac{a + bn}{2} + u_0(u_0 - a)}. \quad (9)$$

Если принято в уравнении (4) и в уравнении (6)  $a = 0$ ,  $a' = 0$  и

$$\frac{b - b'}{2b} = m,$$

то это приводит к следующему виду уравнения вертушки: <sup>2</sup>

$$u = (1 - m) bn + \sqrt{m^2 b^2 n^2 - u_0^2}.$$

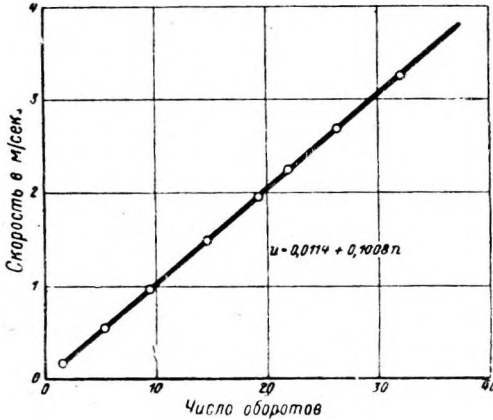


Рис. 96. Тарировочная кривая вертушки.

Другим путем следуют для получения численного выражения тарировочной кривой нормы Швейцарского союза инженеров и архитекторов.

Без особого обоснования механических процессов уравнение вертушки пишется в виде:

$$\frac{n}{u} = \delta \left[ 1 - \left( \frac{u_0}{u} \right)^\alpha \right], \quad (11)$$

где  $\alpha$  — постоянная величина.

Тарировка должна производиться таким образом, чтобы значения  $u_0$  и  $\delta$ , то есть предельное число оборотов вертушки на 1 м ее передвижения при больших

скоростях, могли быть получены экстраполяцией по наблюдаемым значениям  $n$  и  $n/u$ .

Как показывает рис. 97, при  $u = u_0$ ,  $n/u = 0$  и при  $u = \infty$ ,  $n/u = \delta$ . Значения  $\alpha$  получают как арифметическую среднюю:

$$\alpha = \frac{\lg \frac{\delta - \frac{n}{u}}{\delta}}{\lg \frac{u_0}{n}}. \quad (12)$$

Если  $u_0$  и  $\delta$  не могут быть определены с достаточной точностью, следует заменить тарировочную кривую несколькими прямыми.

Ось вертушки под острым углом к направлению течения. До сих пор рассматривался только тот случай, когда направление течения и направление оси вертушки совпадали. Однако при известных условиях должно учитываться и влияние косого течения.

<sup>1</sup> A. R a t e a u. Experiences et théories sur le tube de Pitot et le moulinet de Woltman. Annales des Mines, 1898.

<sup>2</sup> M. S c h m i e d t. Die Gleichung des Woltmanschen Flügels in neuer Form und die Ermittlung ihrer Koeffizienten auf graphisch-analytischem Wege. Z. d. Vereines Deutscher Ingenieure, S. 917, 1895. Новейшие исследования, произведенные Отгом, не подтвердили правильности предположки:  $a' = 0$  и  $b' = 0$ .

Ось вертушки, как правило, должна располагаться нормально к живому сечению (рис. 98).

Если это по какой-либо причине не имеет места, и ось вертушки наклонена под углом  $\alpha$  к направлению течения, тогда при подсчете расхода воды необходимо, учитывая выбранное поперечное сечение, вводить в расчет только составляющую течения  $u \cos \alpha$ .

Случаи, когда косое течение создается намеренно или вследствие ко- сого расположения створа или из-за установки вертушки под острым углом к створу, — редки.

В каждом случае турбулентного движения проявляются, однако, косые течения, переменные по величине и по направлению. Поэтому придется счита- ться с переменным ко- сым течением, направле- ние и величина которого неизвестны, даже если

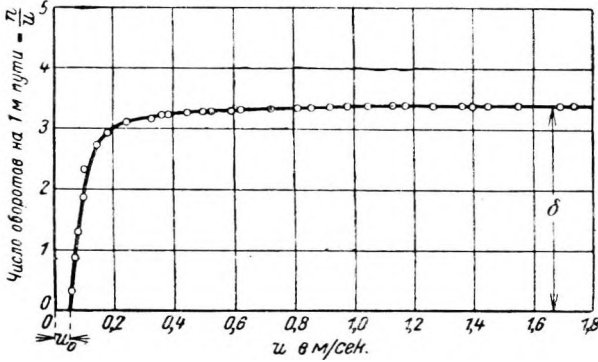


Рис. 97. Тарировочная кривая вертушки по образцу, принятому в Швейцарии.

таться с переменным ко- сым течением, направле- ние и величина которого неизвестны, даже если



Рис. 98. Направление течения под острым углом к оси вертушки. Угол  $\alpha$ .

створ расположен нормально к основному на- правлению течения и вертушка установлена парал- лельно течению. По этой причине лучшие результаты будут давать конструк- ции вертушек, у которых число оборотов  $n$  зависит только от  $u \cos \alpha$ , то есть от скоростной составляющей относительно оси вертушки, и не зависит от боковых составляющих.

Так как  $u \cos \alpha$  также изменяется во времени вследствие того, что течение воды, как свидетельствует опыт, никогда не находится в состоянии совершенно установившегося движения, то приходится для определения рас- хода воды брать среднее значение  $u \cos \alpha$  за достаточно продолжительные отрезки времени, следовательно подсчитывать расход воды из выражения:

$$Q = \int_0^F u \cos \alpha dF,$$

где  $dF$  — элемент площади живого сечения  $F$ , а  $u \cos \alpha$  — средняя (за некото- рый отрезок времени) составляющая скорости течения на нормаль к этому живому сечению. Это уравнение дает, однако, верные результаты только тогда, когда число оборотов  $n$  пропорционально скорости течения при лю- бой величине угла  $\alpha$ .

Вертушка по своей конструкции может в том случае считаться "компо- нент-вертушкой", <sup>1</sup> то есть тогда допустимо по наблюденному числу оборо- тов брать с тарировочной кривой значения  $u \cos \alpha$  и иметь право принимать среднее значение  $u \cos \alpha$  для подсчета указанным выше способом рас- хода воды, когда вертушка гарантирует при любой величине угла  $\alpha$  как измерение составляющей в горизонтальном и вертикальном направлениях, так и сохранение линейной зависимости между числом оборотов и скоростью.

<sup>1</sup> "Компонент-вертушка", то есть вертушка, измеряющая составляющую скорости тече- ния относительно ее оси.

До сих пор не удалось еще сконструировать вертушку, которая удовлетворяла бы правилу составляющей для любого положения оси в пределах

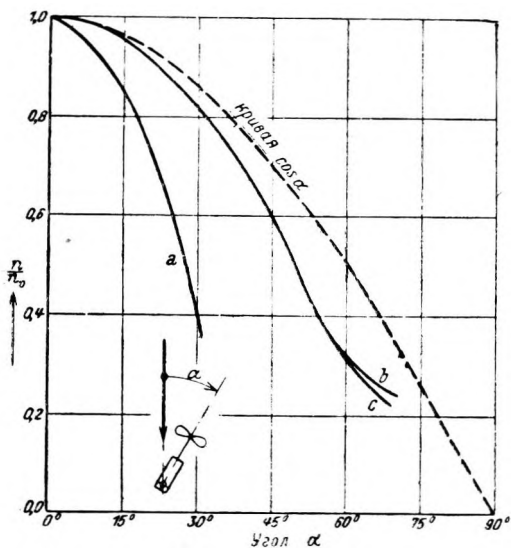


Рис. 99. Зависимость между  $n/n_0$  и горизонтальным углом  $\alpha$ , образуемым направлением течения с осью вертушки, для вертушек различных конструкций.

$n$  — число оборотов при косом направлении течения;  $n_0$  — число оборотов при параллельном оси направлении течения;  $a$  — вертушка Отта со скошенными лопастями при  $u = 1,0$  м/сек;  $b$  — вертушка Отта со спицевыми лопастями при  $u = 0,3-0,6$  м/сек;  $c$  — вертушка Отта со спицевыми лопастями при  $u = 1,2-1,5$  м/сек.

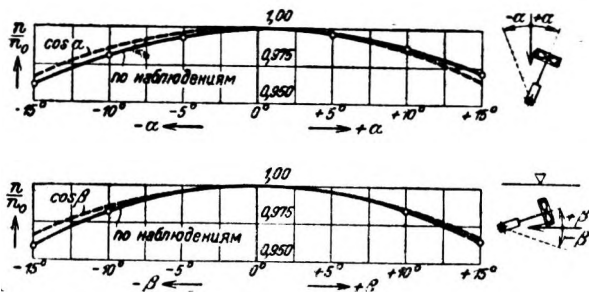


Рис. 100. Зависимость между горизонтальным углом  $\alpha$  и соответственно вертикальным углом  $\beta$ , образуемыми направлением течения с осью вертушки, для вертушки Отта с защитным кольцом при  $u = 1,0$  м/сек.

$n$  — число оборотов при направлении течения под острым углом к оси;  $n_0$  — число оборотов при параллельном оси направлении течения.

что этот прибор обнаруживает значительные различия в тарировочных данных при лево- и правостороннем, а также направленных сверху и снизу течениях.

горизонтального угла скоса от  $0$  до  $90^\circ$  (рис. 99). Однако уже оказывается возможным (путем специального конструирования вертушки и прежде всего ее лопастей) достичь того, что это правило будет приближенно верно для горизонтальных углов скоса  $\alpha$  в пределах от  $0$  до  $15^\circ$  и почти совершенно верно для вертикальных углов скоса  $\beta$  (рис. 100).

Уже имеются вертушки, для которых тарировочные кривые получаются почти прямыми для горизонтальных углов скоса от  $0$  до  $15^\circ$  (рис. 101).

Подробные исследования показали, что вертушки со спицевыми лопастями больше всего приближаются к условиям компонентной вертушки и что конструкции вертушек с защитными кольцами, хотя они при положениях слева и справа от направления течения дают несимметричное распределение величин  $u \cos \alpha$ , обнаруживают более точные результаты, чем вертушки со скошенными лопастями. В общем следует заметить, что открытые конструкции вертушек дают значения расходов воды большие, а конструкции с защитным кольцом — меньше, чем по абсолютно точному методу измерения.

Направление течения и работа чашечных вертушек (вертушки Прайса). Существенно различную картину обнаруживают данные тарировок, полученные для вертушки Прайса.

Чашечная вертушка много и подробно исследовалась в США,<sup>1</sup> где она господствует по настоящее время в виде конструкции, разработанной Прайсом (W. G. Price). Рис. 102 позволяет установить то важное для оценки применения ее на практике обстоятельство,

<sup>1</sup> W. A. Liddell. Stream Gaging. New York 1927.

Это обуславливает положительные и отрицательные отклонения от кривой косинуса. Вертушка Прайса не регистрирует также, как это часто утверждают, скорости, наибольшей в данный момент времени, но показание ее зависит от величины угла скоса течения, однако не так, чтобы этот прибор можно было, хотя приближенно, характеризовать как компонент-вертушку. По этой причине вертушка Прайса может давать верные данные только тогда, когда имеет место идеальный (почти никогда не наблюдающийся при измерениях) случай параллельного стенкам водотока течения и когда боковыми течениями при турбулентном движении можно пренебрегать. Этим самым не только с достаточной ясностью характеризуется преимущество лопастной вертушки перед чашечной,<sup>1</sup> но и становится понятным отрицательное отношение, которое встретила последняя в Европе.

### Тарировка гидрометрической вертушки.

Гидрометрическая вертушка может быть протарирована тремя способами.

1. Вертушку передвигают с заданной скоростью течения  $u$  в стоячей воде и, после того как движение передвигного устройства примет установившийся характер, определяют получающееся число оборотов  $n$ . Таким путем получают ряд значений  $n$  при различных заданных скоростях  $u$  и, в конце концов, приходят графическим или аналитическим путем к зависимости  $u = f_1(n)$ , то есть к тарировочной кривой.

2. Измеряют в определенной точке поперечного сечения водотока скорость течения посредством ранее где-либо протарированной вертушки, затем помещают в ту же точку подлежащую тарировке вертушку и получают таким образом (с помощью тарировочной кривой первой вертушки) тарировочную кривую  $u = f_1(n)$  для испытываемой вертушки.

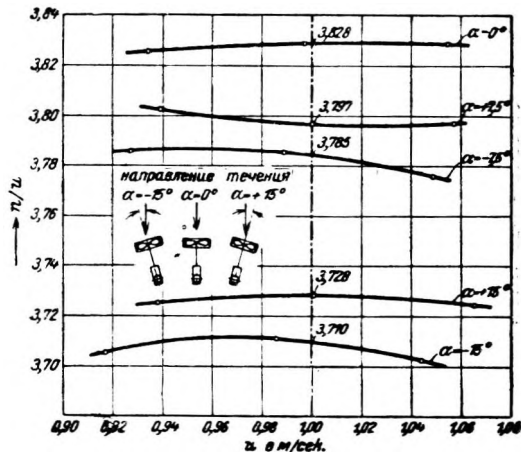


Рис. 101. Зависимости между  $u$  и  $n/n_0$  — для разной величины горизонтальных углов  $\alpha$ , образуемых направлением течения с осью вертушки, для вертушки Отта с защитным кольцом.

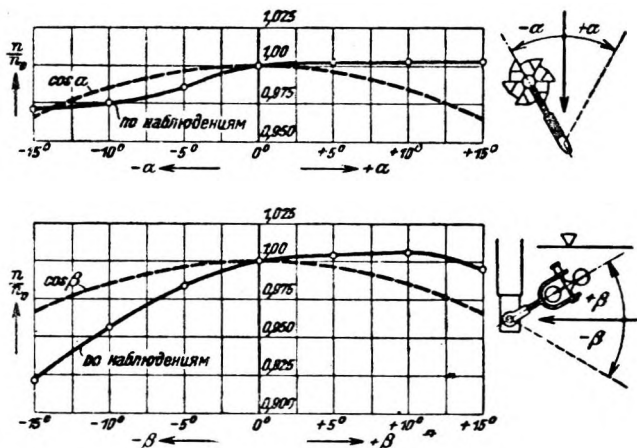


Рис. 102. Зависимости между  $u$  и горизонтальным углом  $\alpha$  и соответственно вертикальным углом  $\beta$ , образуемыми направлением течения с осью вертушки, для чашечной вертушки (вертушки Прайса) при  $u = 1,0$  м/сек.

$n$  — число оборотов при направлении течения под острым углом к оси;  
 $n_0$  — число оборотов при параллельном оси направлении течения.

<sup>1</sup> I. R. G r u n. A study of the fundamental principles of current meters. Theses for the degree of Master of Science of the University of California. Berdley. 1922.

3. Определяют в возможно большем числе точек живого сечения водотока число оборотов тарируемой вертушки, измеряют посредством какого-либо другого способа, лучше всего—объемного, соответствующие расходы воды, и на основе данных этих измерений устанавливают коэффициенты уравнения вертушки.

Тарировка вертушки в стоячей воде. Этот способ в настоящее время применяется почти повсеместно. Несмотря на кажущуюся про-

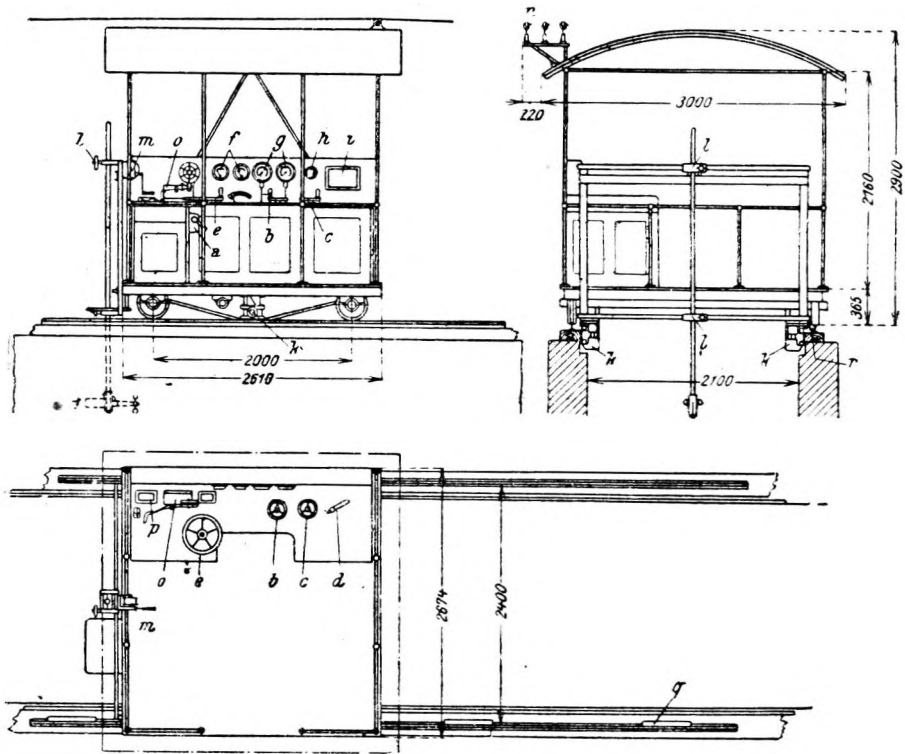


Рис. 103. Тарировочная тележка с собственным двигателем.

*a*—пусковое приспособление для электродвигателя; *b*—ручка управления для изменения направления движения; *c*—ручка управления по регулированию скорости; *d*—рычаг, включающий передаточный привод к колесам; *e*—ручка расторможения колесных тормозов; *k*, *f*—электрические измерительные приборы; *g*—манометр; *h*—сигнальная лампочка; *l*—паспорт Тележки; *k*—автоматические колесные тормоза; *g*—манометр; *h*—сигнальная лампочка; *l*—паспорт Тележки; *k*—автоматические колесные тормоза; *l*—зажимы для штанги вертушки; *m*—лебедка для тросовой вертушки; *n*—контакты к проводам переменного тока; *o*—ленточный хронограф для регистрации пути, времени и числа оборотов вертушки; *p*—часы с секундомером; *q*—метки через каждые 2 м пути.

стоту тарировочного процесса, он требует во избежание недопустимых погрешностей, хорошо продуманной лаборатории как в отношении строительном, так и со стороны оборудования ее измерительными приборами и устройствами.

Для передвижения вертушки надо иметь тарировочный лоток достаточных размеров, который был бы снабжен рельсовым путем для движения тарировочной тележки и приспособлениями для автоматической регистрации пройденного отрезка пути и потребовавшегося для этого времени.

Длина тарировочного лотка устанавливается по наибольшей скорости движения, так как от нее зависят длины участков разбега и торможения тележки. Если применяют тележки с собственным двигателем (рис. 103), то тарировочные лотки следует делать длиной от 100 до 200 м, так как достижимое ускорение тележки ограничено сцеплением колес с рельсами. Для тележек, приводимых в движение канатной передачей (рис. 104), достаточна

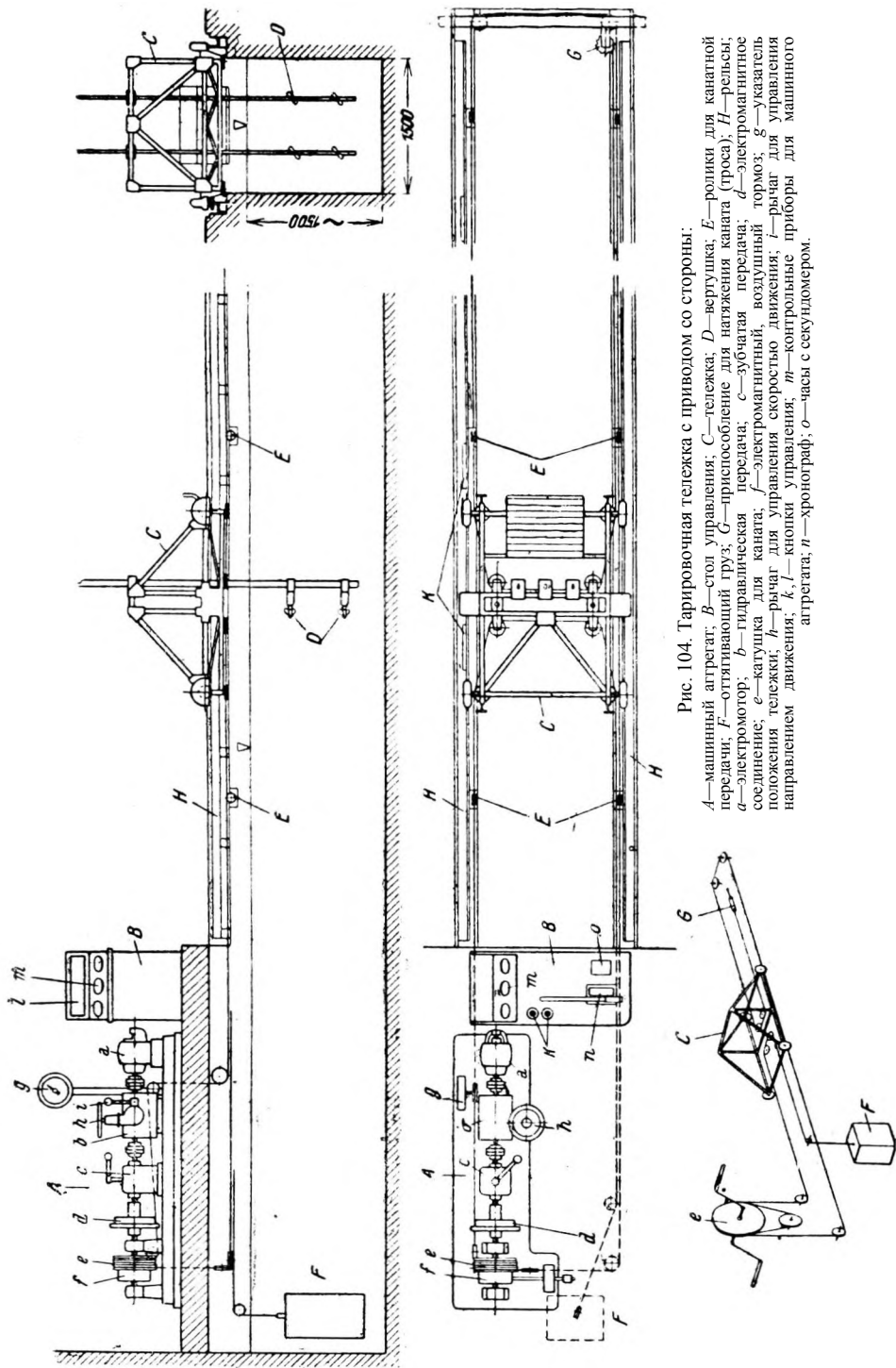


Рис. 104. Тарировочная тележка с приводом со стороны.

А—машинный агрегат; В—стол управления; С—тележка; D—вертушка; E—ролики для канатной передачи; F—оттягивающий груз; G—приспособление для натяжения каната (троса); H—рельсы; а—электродвигатель; б—гидравлическая передача; с—зубчатая передача; d—электромагнитное соединение; e—катушка для каната; f—электромагнитный, воздушный тормоз; g—указатель положения тележки; h—рычаг для управления скоростью движения; i—рычаг для управления направлением движения; k, l—кнопки управления; m—контрольные приборы для машинного агрегата; n—хронограф; o—часы с секундомером.



длина лотка от 30 до 50 м, смотря по величине заданной скорости передвижения.<sup>1</sup>

Ширина и глубина тарировочных лотков также играет существенную роль, так как ею определяется приложимость данных тарировок к определениям расходов воды в природе. Однако, прежде рассмотрения этих влияний, следует осветить основной вопрос: одинаково ли действие вертушки, влекаемой в стоячей воде, и вертушки, погруженной в текучую воду, если относительные скорости в обоих случаях равны по величине?

Этот вопрос непосредственно до сих пор не решался. Косвенным путем он решен в положительном смысле, причем пределы точности вертушечных

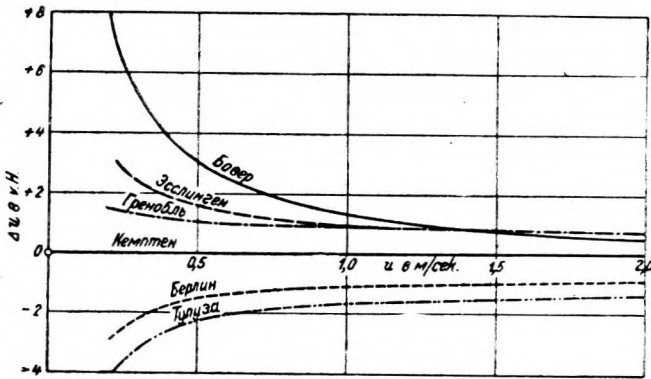


Рис. 105. Расхождения тарировочных данных для одной и той же вертушки в тарировочных бассейнах Бовера, Эсслингена, Гренобля, Кемптена, Берлина и Тулузы:

измерений исследовались через сравнение с объемными измерениями. Параллельные измерения дали доли процента расхождения в величинах измеренных обоими способами расходов, так что можно заключить о допустимости тарировки вертушек в стоячей воде. Кроме того, для проверки тарировали вертушку в проточной воде при малых скоростях (порядка нескольких сантиметров) путем заездов вверх и вниз по

течению. Эти заезды дали тарировочные кривые, которые в пределах измерений легли почти параллельно и в равных расстояниях от тарировочной кривой в стоячей воде,—также признак того, что существенных расхождений здесь не имеется.

Результаты тарировок в одном и том же лотке разнятся между собою весьма мало, если вертушка при всех заездах сохраняет свое положение в поперечном сечении канала. Средняя погрешность хороших тарировок может быть понижена до  $\pm 0,001$  м/сек.

Однако получаются и большие ошибки, когда вертушка помещается ближе к стенкам, к дну и к поверхности воды. Исследования, произведенные в канале, шириной в 1,5 м и глубиной в 0,9 м, показали, что ошибка в показаниях вертушки с защитным кольцом поблизости от стенок или непосредственно под поверхностью воды составляет в среднем 3%, а непосредственно над дном 1%. Несколько меньшие погрешности дают вертушки со скошенными лопастями и еще меньшие, примерно в 1% или 0,8%,—вертушки с трехпластинчатыми спицевыми лопастями. Это установленное на опыте обстоятельство должно быть учтено при точных измерениях, так как обычно вертушка, протарированная в середине тарировочного лотка при измерении скоростей поблизости от стенок, от дна или от поверхности воды, вращается медленнее и показывает преуменьшенную скорость течения.

Если сравнить результаты тарировок одной и той же вертушки в различных тарировочных лабораториях, можно установить расхождения, которые могут достигнуть нескольких процентов (рис. 105). Причина подобных рас-

<sup>1</sup> Чтобы уменьшить строительные расходы, в некоторых местах, например в Гренобле, Падуе, Беркели и форте Коллинс, вместо прямолинейных лотков были устроены круглые. Вследствие этого, правда, потребная кубатура для зданий сильно сократилась, но результаты тарировок являются неудовлетворительными, почему подобное устройство не может быть рекомендовано.

хождений лежит, помимо различий в производстве тарировок, также в поперечных размерах тарировочных лотков.<sup>1</sup>

Различие в производстве тарировок может заключаться в способе крепления вертушки и в образце штанги, которой пользуются при заездах. Далее, надежная тарировка может быть осуществлена только в том случае, если между двумя заездами наступило совершенное успокоение воды, для чего (при больших скоростях передвижения) может потребоваться, смотря по длине тарировочного лотка, 15 мин и более. Поэтому экономия во времени при тарировках не может быть достигнута путем сокращения пауз между заездами, но единственно путем одновременного передвижения нескольких вертушек.

Если сравнить тарировочные кривые в ограниченном стенками поперечном сечении, а также тарировочные кривые в неограниченном по размерам поперечном сечении с идеальной тарировочной кривой, то в результате получаются кривые, изображенные на рис. 106.

Идеальная тарировочная кривая, изображенная пунктиром черточка с точкой, отвечает уравнению  $u'' = kn$ , где  $k$  обозначает шаг винта вертушки.

Тарировочная кривая для неограниченного стенками поперечного сечения, изображенная сплошной линией, может быть, судя по опыту, представлена с большим приближением к действительности в виде прямой  $u = a + bn$ . Тарировочная кривая для ограниченного стенками поперечного сечения  $u' = f(n)$  проходит выше рассмотренных прямых, а при скоростях движения вертушки, которые, примерно, соответствуют критической скорости  $\omega = \sqrt{gh}$ , дает выпуклость, величина которой зависит от размеров живого сечения, следовательно от глубины воды  $h$  и ширины  $B$ .

Ввиду того, что при применении вертушек речь идет об определении относительной скорости, скорость движения в стоячей воде следует считать равной скорости течения. Наблюдаемому при измерении числу оборотов соответствует поэтому скорость течения  $u'$  в ограниченном стенками поперечном сечении, которая больше вычисляемой идеальной скорости  $u''$ . Разница составляет при некотором значении числа оборотов  $n$ :  $\Delta u = u' - u'' = u' - kn$ .

На основе тарировок в лотках различной ширины и глубины может быть установлена эмпирическим путем зависимость  $\Delta u$  и  $u$  от указанных факторов. Примеры этого изображены на рис. 107.<sup>2</sup>

На основании их можно заключить, что  $\Delta u$  зависит главным образом от ширины  $B$  поперечного сечения и в меньшей степени от глубины воды  $h$ . Крайний предел влияния ширины находится, примерно, около 3,0 м и глубины — около 0,3 м.

Наибольшее значение  $\Delta u$ , обусловленное стеснением по ширине, имеет место при скорости движения вертушки, которая, примерно, равна крити-

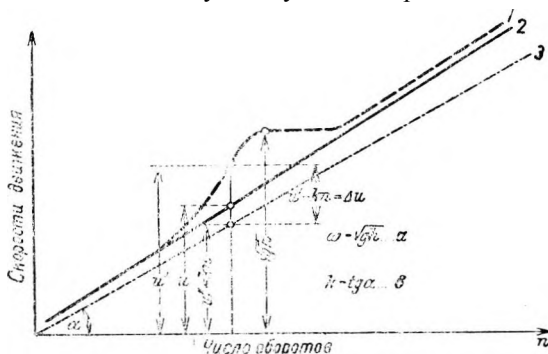


Рис. 106. Схематическое изображение тарировочных кривых при ограниченном и неограниченном стенками сечении.

- 1—тарировочная кривая в ограниченном стенками сечении;  
2—тарировочная кривая в неограниченном стенками сечении  $u = a + bn$ ; 3—идеальная тарировочная кривая  $u'' = kn$ .  
 $a$ —критическая скорость при глубине воды  $h$ ;  $b$ —шаг лопастей вертушки.

<sup>1</sup> C. R o h w e r. The rating and use of current meters. Colorado Agricultural College in Colorado U. S. A. Technical Bulletin, № 3, 1933, и критический отзыв Отта в журнале Wasserwirtschaft. Н. 1, 1934.

<sup>2</sup> R. S e i f e r t и L i e b s. Zur Frage der Uebertragbarkeit der Flüßeichungen auf Wassermessungen Wasserkraft u. Wasserwirtschaft, Н. 23, München, 1931.

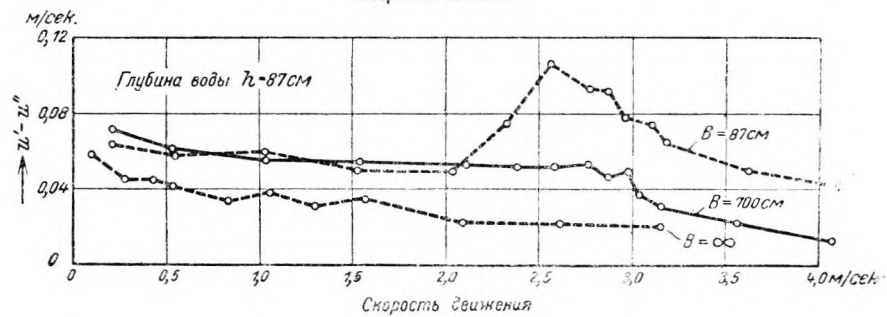
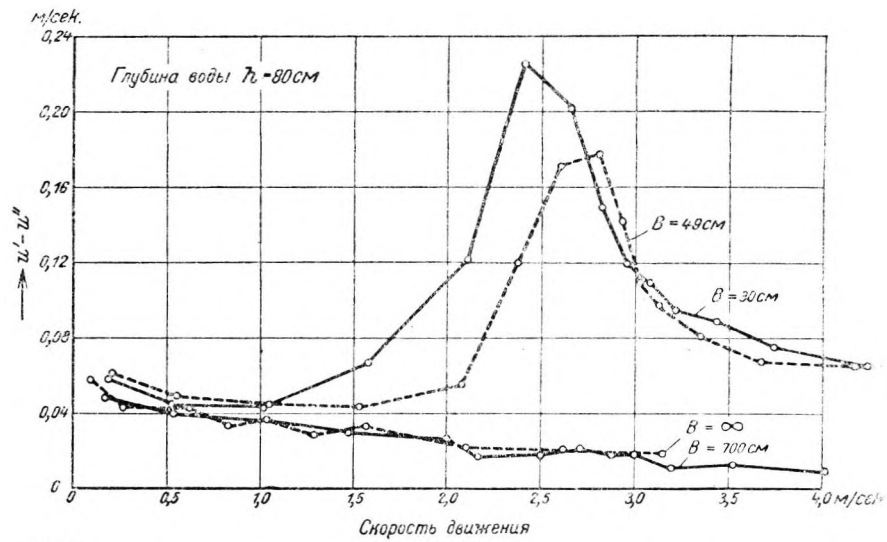
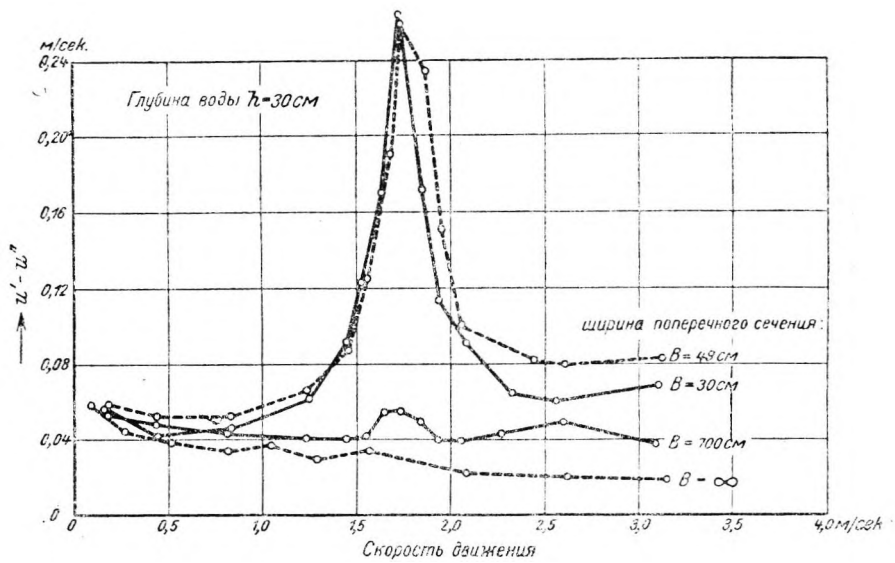


Рис. 107. Влияние поперечных сечений лотка на данные тарировки (по Зейферту и Либсу).

ческой скорости  $\omega = \sqrt{gh}$ . В остальном большие значения  $\Delta u$  наблюдаются только в известных пределах скоростей, а именно: для  $B = 0,5 \text{ м}$  — между  $0,5 \sqrt{gh}$  и  $1,4 \sqrt{gh}$ , а для  $B = 0,9 \text{ м}$  — между  $0,7 \sqrt{gh}$  и  $1,3 \sqrt{gh}$ .

Поэтому, если надлежит производить точные определения расходов воды в стесненных руслах вертушками, тарированными в условиях практически неограниченного стенками поперечного сечения, или производить измерения в широких речных руслах вертушками, которые тарировались в маленьких тарировочных лотках — тогда следует учитывать вышеприведенные данные.

Вследствие этого результаты полевых измерений можно принимать без изменений, если измеренные скорости меньше по величине, чем критическая скорость в данном живом сечении. При  $B$  равном от 0,3 до 0,5 м эта граница проходит при  $u < 0,45\text{—}0,50 \sqrt{gh}$ , при  $B$  равном 0,9 м — при  $u < 0,65\text{—}0,70 \sqrt{gh}$ . Если измеренная скорость  $u$  выше предельной скорости, следует вводить поправки в каждом отдельном случае. Для еще более точных измерений следовало бы принимать во внимание влияние близости стенки, опускание вертушки на штанге или на тросе, а также форму и размеры закрепляющих приспособлений.

Обычно при пользовании данными тарировки имеет место случай, что вертушка тарировалась в лотке, более или менее ограниченном в своем поперечном сечении, а измерение производится в сечении практически неограниченном стенками. В этом случае можно допустить упрощение, заключающееся в том, что выпуклость тарировочной кривой в зоне измерений, где скорость передвижения вертушки  $u$ , примерно, равна критической скорости  $\omega = \sqrt{gh}$ , не принимается во внимание, и в качестве тарировочной кривой для неограниченных стенками поперечных сечений рассматривается линия, плотно прилегающая к верхней и нижней прямолинейным ветвям тарировочной кривой (см. рис. 106). Однако и здесь необходимо (при работе вертушкой и при ее тарировке) применять одинаковые приспособления для ее укрепления.

Работа вертушкой влечет за собой, вследствие износа, изменения во внутренних силах трения, также повреждения, вертушки, как то: искривление лопасти или оси или отсутствие хотя бы одного шарика в подшипнике изменяют, в конце концов, величины коэффициентов в уравнении вертушки. Узнать это можно только путем повторных тарировок, после чего на основе их следует внести исправления в тарировочные кривые.

Тщательно выполненные конструкции вертушек при хорошем хранении и бережном обращении не обнаруживают как свидетельствует опыт, изменений в тарировочной кривой даже при пользовании ими в течение ряда лет.

Чтобы предупредить ошибки от искривления лопасти, последняя изготавливается из легкого металла большой сопротивляемости или из такого хрупкого сплава, у которого прежде искривления наступает излом.<sup>1</sup>

Кроме того, принято проверять неизменность формы лопастей, вкладывая их в заранее изготовленный гипсовый футляр.

Для производства тарировок вертушек в стоячей воде большое значение имеет правильная конструкция тележки и ее автоматических приспособлений для записей. Пример технически целесообразно оборудованной тележки с собственным двигателем дает рис. 103. Эта тележка сравнительно больших размеров и тяжелого веса, так как наряду с двигателем она загружена всеми приспособлениями для измерений. Тележки, приводимые в движение канатной передачей, легче. Они приводятся в движение вручную или лучше мотором. Так как приспособления для измерения находятся вне

<sup>1</sup> Судя по опыту, коэффициенты уравнения вертушки при скоростях свыше 0,5 м сек. зависят почти исключительно от формы лопастей, так как при больших скоростях влияние трения отступает на задний план.

тележки, тележка имеет малые размеры и обладает большой способностью разбега (см. рис. 104).

Тарировка вертушки в текучей воде. Тарировка вертушки в стоячей воде обладает наряду с большими преимуществами тем недостатком, что требует больших продольных размеров тарировочного лотка. Тарировка в текучей воде исключает этот недостаток, требует одного точного определения расхода воды в водотоке, где производится тарировка. Если приспособления для подобного определения имеются налицо, как, например, в гидротехнических лабораториях, тогда встает вопрос о тарировке с применением точной (протарированной ранее) вертушки или о рассмотренной ниже непосредственной тарировке.

Относительно тарировки с помощью другой вертушки следует еще указать, что если обе вертушки по типу несколько различны, то, по крайней мере, надо обеспечить чтобы диаметры лопастей и приспособления для укрепления вертушек были одинаковы.

Непосредственная тарировка вертушки в текучей воде основана на предположении, что общий вид тарировочной кривой, однако без коэффициентов ее, известен и что, кроме того, расход воды поддается точному определению другим способом. Так как большинство вертушек, применяемых в настоящее время, имеют прямолинейный характер тарировочных кривых, этот способ рассмотрен ниже для подобного рода случаев.

Расход воды составляет:

$$Q = \int_0^F u dF = \int_0^F (a + bn) dF = \int_0^F a dF + \int_0^F b n dF = aF + b \int_0^F n dF.$$

Если  $n$  является средним значением числа оборотов для всего поперечного сечения, то

$$\int_0^F n dF = \bar{n}F$$

и вместе с тем

$$Q = aF + b\bar{n}F = F(a + b\bar{n}).$$

Из двукратного определения  $Q$  и  $n$

$$Q_1 = (a + b\bar{n}_1) F,$$

$$Q_2 = (a + b\bar{n}_2) F,$$

следует

$$\left. \begin{aligned} a &= \frac{Q_2 \bar{n}_1 - Q_1 \bar{n}_2}{(\bar{n}_1 - \bar{n}_2) F}, \\ b &= \frac{Q_1 - Q_2}{(\bar{n}_1 - \bar{n}_2) F}. \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

Повторяя измерения несколько раз, получают лишние пары величин и возможность вычислить вероятнейшие значения  $a$  и  $b$  по способу наименьших квадратов.

**Коэффициент полезного действия вертушки.** Результаты тарировки в соединении с наблюдениями над работой вертушки в природных условиях позволяют произвести оценку ее коэффициента полезного действия. В общем, в качестве важнейших признаков целесообразной конструкции вертушки надо отметить: высокую чувствительность, малую начальную скорость при малом диаметре лопастей, умеренный разброс тарировочных точек, равно как и ничтожное отклонение практического числа оборотов от идеального, применимость в качестве компонент-вертушки, в возможно широких пределах при

непараллельном оси течения, простую и прочную конструкцию в целом (включая счетный механизм) и незначительную подверженность воздействиям со стороны несомого водою сора и мелкого песка.

Чувствительность вертушки, при прочих равных условиях, тем больше, чем меньше значение  $b$  в уравнении  $u = a + bn$ , то есть чем меньше размер шага лопастей.

Малая начальная скорость и малый диаметр лопастей — условия противоречивые. Вертушки новейших конструкций начинают вращаться уже при скорости в 2 см/сек. Однако в зоне малых скоростей, примерно до 8 см/сек, наблюдаются перебои во вращении, которым до сих пор еще не найдено объяснения.<sup>1</sup>

Малые диаметры лопастей отличаются преимуществом, так как позволяют производить измерения в непосредственной близости от стенок водотока. Кроме того, осреднение скоростей течения, производимое малыми лопастями, происходит для весьма небольших площадок в водотоке, благодаря чему удается производить точные измерения даже при больших изменениях скорости по ширине и глубине водотока. Диаметры в 4 см надо рассматривать как предельные для измерений в полевой обстановке.

Чтобы резче выявить разброс тарировочных точек, следует применять упомянутый выше способ нанесения их по значениям  $\Delta = u - kn$ . При этом часто наблюдается, что кривая измеренных точек имеет характер синусоиды; повидимому это зависит в большей степени не от вертушки, а от характера процесса движения в тарировочном бассейне. Во всяком случае незначительность колебаний тарировочной кривой является показателем хорошего качества тарировки (см. рис. 95).

Незначительный сдвиг практической тарировочной линии относительно идеальной является свидетельством ничтожных внутренних сопротивлений конструкции.

Спрос на компонент-вертушку с возможно большими пределами действия имеет особое значение не только вследствие изменения направления водяных струй, наблюдающегося при турбулентном движении, но и для описанного ниже интеграционного способа измерения.

Имеющиеся в настоящее время типы вертушек представляют из себя самые различные конструкции, отвечающие требованиям различного применения в полевых условиях. Вместе с тем отдается должное и потребности в особо точных измерениях, которые, как известно, производятся в гидротехнических лабораториях. Имеются вертушки от простейшего и грубого прибора до гидрометрической вертушки, изготовленной на основании точных правил механики.

Во многих случаях, где можно производить измерения в благоприятных условиях, чувствительность прибора играет меньшую роль; напротив неблагоприятные погодные условия и трудные местные условия могут свести на нет преимущества более точно работающих вертушек. Чтобы сделать правильный выбор в таких условиях — требуется большой опыт.

Что касается до реакции отдельных конструкций вертушек на плывущие по воде листья, траву, древесный мусор и пр., то это имеет большое значение в смысле влияния на результаты измерения. Вертушки с защитными кольцами в этом отношении блестяще себя оправдали; напротив, вертушки со спицевыми лопастями не могут быть рекомендованы для измерений в водотоках, несущих много сора. Против мелкого песка отличную защиту представляют подшипники, заполненные маслом; однако хорошо зарекомендовала себя и обыкновенная крышка.

**Методы полного вертушечного измерения.** Эти методы заключаются в том, что определяется число оборотов вертушки в большом числе точек

<sup>1</sup> L. A. Ott . Theorie und Konstantenbestimmung des hydrometrischen Flügels. 1925.

живого сечения, причем ось вертушки надлежит устанавливать перпендикулярно к плоскости живого сечения створа.

Если точки наблюдения распределяются по всему живому сечению, говорят о точечном методе измерения. Если для измерения служит одновременно несколько вертушек, причем их располагают в виде прямого ряда, то этот прием можно назвать многовертушечным методом измерения. Если точки измерения следуют одна за другой с бесконечно малыми интервалами, располагаясь по линии движения вертушки, и если счетный механизм вертушки суммирует числа оборотов по мере передвижения вертушки, — то такой метод измерения называется интеграционным.

Точечный и многовертушечный методы измерения. Число и распределение точек влияют как на количество затрачиваемого труда, так и на точность результатов измерения.

В искусственных водотоках, а именно в водотоках с прямоугольным и круглым сечением, можно произвести распределение точек по определенным

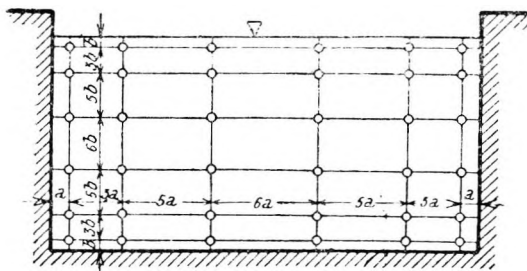


Рис. 103. Распределение скоростных точек в живом сечении по швейцарским нормам.

правилам таким образом, чтобы при возможно меньшем числе их обеспечить успех работы. Продолжительность измерения значительно сокращается с применением нескольких вертушек. Подобные сокращенные по времени способы имеют особое практическое значение при приемных испытаниях гидроустановок, именно при тех из них, которые служат для определения коэффициента полезного действия машинного оборудования.<sup>1</sup>

В этом отношении в настоящее время шагнули настолько вперед, что предусматривают в проекте гидроустановки подходящие места для будущих гидростворов.

Число точек наблюдения  $A$  в искусственном профиле следует вычислять из выражения:<sup>2</sup>

$$14 \sqrt{F} \leq A \leq 25 \sqrt{F}. \quad (14)$$

Точки следует располагать гуще в местах с большим изменением скорости. Их следует намечать настолько близко от стенок и дна, насколько это позволяет диаметр вертушки.

Для прямоугольных сечений точки могут располагаться совершенно равномерно по живому сечению или согласно схеме на рис. 108.

В круглых сечениях напорных трубопроводов, вследствие симметричного в радиальном направлении распределения скоростей, достаточно произвести измерения вдоль одного диаметра трубы. Только при предположительно несимметричном распределении скоростей измерения производят вдоль двух взаимно перпендикулярных диаметров. Створ должен располагаться на прямых участках трубопровода и быть удаленным от вставок (вроде колена или задвижки) на расстояние равное, по крайней мере, 20-кратному диаметру трубы. Здесь является целесообразным применение многовертушечного метода, так как тогда достаточны самые небольшие перемещения штанги с вертушками для достижения любой нужной точки диаметра.

<sup>1</sup> Regeln für die Abnahmeversuche an Wasserkraftmaschinen, Z. d. V. D. I., Berlin 1930; Standard test code for hydraulic power plants. Issued by authority of the Councils of the Institution of Civil Engineers and the Institution of Mech. Engineers, London 1924.

<sup>2</sup> Нормы Швейцарского союза архитекторов и инженеров. Площадь живого сечения  $F$  следует подставлять в формулу в квадратных метрах. (Прим. пер.)

При измерениях в естественных речных руслах целесообразное распределение точек играет еще большую роль, так как в этом случае приходится считаться с очень неправильной формы сечениями и вследствие этого с большей продолжительностью измерения. При распределении точек в естественном профиле поступают следующим образом (рис. 109).

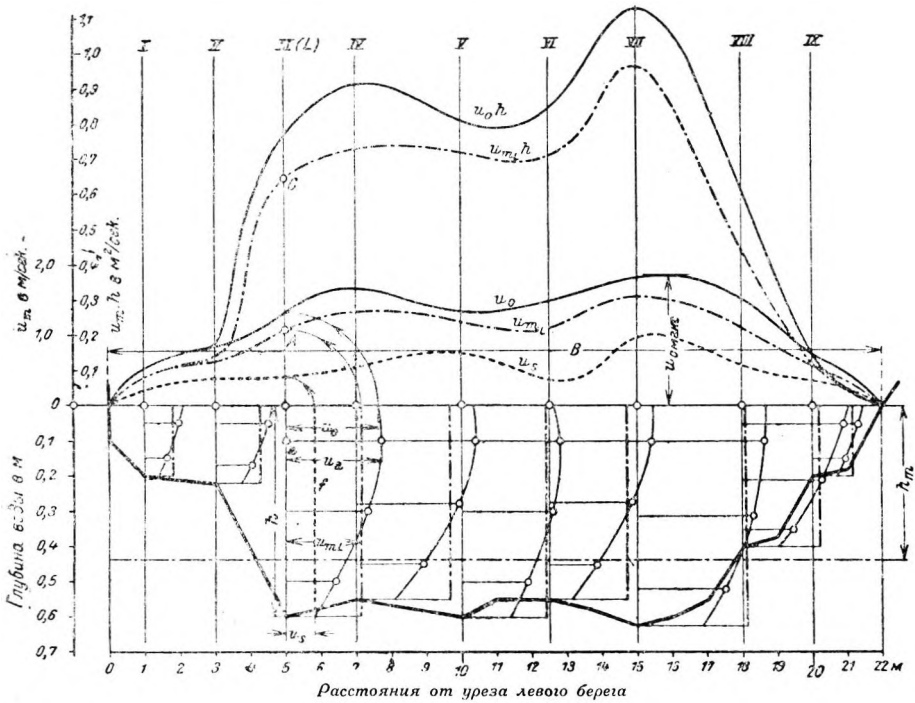


Рис. 109. Обработка расхода воды графическим путем при точечном методе измерения в открытых водотоках.

Рабочие вертикали II, III, ... VII, VIII, назначают в тех местах сечения где можно ожидать больших изменений скорости, следовательно в местах перелома поперечного профиля, добавляют поблизости от уреза левого и правого берега вертикали I и IX и вставляют дополнительные вертикали между уже намеченными, если расстояния между ними еще слишком велики для осуществления достаточно точного измерения. Насколько далеко следует идти в подобном дроблении, — является делом опыта.

На каждой вертикали верхняя и нижняя точки назначаются на таком расстоянии от поверхности воды и соответственно от дна, которое несколько больше полудиаметра лопастей или корпуса вертушки. Эти крайние положения возможны в том случае, если им не препятствуют плавающие на поверхности предметы или лед, а у дна — движение наносов. Остальное расстояние по вертикали подразделяют одной или несколькими точками, причем не должны встречаться промежутки большие 1,0 м и меньшие длины диаметра вертушки. Стремятся иметь на каждой вертикали, по крайней мере, три точки, исходя из какого-либо условия намечено и крайнее положение вертикалей, располагаемых у урезом воды.

При измерениях в естественных водотоках в тех случаях, когда удовлетворяются меньшей степенью точности, можно производить работу по сокращенному способу, который все же сохраняет характер полного вертушечного измерения. Вместо многих точек намечают, например, только две или даже одну точку на каждой вертикали.



При двухточечном способе измеряют скорости  $u_{1/6}$  и  $u_{5/6}$  на 1/6 и 5/6 или  $u_{0,2}$  и  $u_{0,8}$  на 0,2 и 0,8 от глубины воды на вертикали. Среднюю скорость на любой вертикали  $L$  вычисляют из выражения:

$$\text{или} \quad \left. \begin{aligned} u_{m,L} &= 0,5 (u_{\frac{1}{6}} + u_{\frac{5}{6}}) \\ u_{m,L} &= 0,5 (u_{0,2} + u_{0,8}) \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

При однотоочечном способе ограничиваются одним измерением на каждой вертикали и выбирают для этого точку на 0,6 глубины. При этом получают значение скорости, которое по данным опыта, примерно, равно средней скорости на вертикали.<sup>1</sup>

Обработка расхода воды может быть произведена аналитическим или графическим путем.

Аналитический способ целесообразно применять тогда, когда распределение точек производилось по специальной схеме.

Если распределение произведено равномерно по всему живому сечению  $F$ , что допустимо только при мало изменяющихся скоростях, тогда расход воды вычисляется из выражения  $Q = Fu_m$ , где  $u_m$  представляет собой арифметическую среднюю всех измеренных значений  $u$ .

При распределении точек по швейцарским нормам (см. рис. 108) получают среднюю скорость на вертикали  $L$  из выражения:

$$\begin{aligned} u_{m,L} &= \frac{2bu_1 + 4bu_2 + 6bu_3 + 6bu_4 + 4bu_5 + 2bu_6}{24b} = \\ &= \frac{u_1 + 2u_2 + 3u_3 + 3u_4 + 2u_5 + u_6}{12}, \end{aligned} \quad (16)$$

причем  $u_1, u_2, \dots, u_6$  обозначают скорости в отдельных точках вертикали  $L$ . Средняя скорость по всему живому сечению получается из выражения:

$$u_m = \frac{u_{m,I} + 2u_{m,II} + 3u_{m,III} + 3u_{m,IV} + 2u_{m,V} + u_{m,VI}}{12}, \quad (17)$$

где римские цифры обозначают отдельные вертикали.

Расход воды получается из выражения:

$$Q = Fu_m. \quad (18)$$

Погрешность аналитического способа может, судя по опыту, составлять до 0,8%.

Графический способ обработки, введенный Гарлахером (A. R. Naglacher), обнаружил свое превосходство перед аналитическим в отношении точности, применимости и наглядности. Ход обработки по нему следующий.

В бланк расхода воды вносятся значения скоростей, вычисленные из данных наблюдений и уравнения вертушки. При вычерчивании поперечного профиля масштаб глубин следует брать искаженный, такой, чтобы все детали обозначались с достаточной определенностью (см. рис. 109).

Для каждой отдельной вертикали  $L$ , глубиной  $h$ , наносят в каждой наблюдаемой точке соответствующую ей измеренную скорость  $u_a$  и получают таким образом распределение скоростей по вертикали. Определение путем планиметрирования площади эпюры скоростей  $f$  приводит к величине

$u_m, L = f/h$  - средней скорости по вертикали  $L$ .

<sup>1</sup> Относительно обоснования одно- и двухточечного методов измерения см. L. A. Ott, Instrumentenkunde der praktischen Hydrometrie и S. K o l u p a i l a, Uber die Verteilung der Geschwindigkeiten auf der Lotrechten des Stromes. Труды III Гидрологической конференции Балтийских стран.



а отсюда полный расход воды в створе:

$$Q = \sum_0^B \Delta Q = \sum_0^B (u_{m,L} h \Delta B). \quad (19)$$

Если на каждой вертикали нанести в каком-либо масштабе от линии поверхности воды значения  $u_{m,L} \cdot h$ , тогда линия, соединяющая точки С, кривая  $u_{m,L} \cdot h$ , замыкает вместе с линией поверхности воды площадь которая дает в соответствующем масштабе величину полного расхода воды  $Q$ .

Из выражения  $Q/F = u_m$  получается, наконец, средняя скорость в живом сечении  $F$ , величина по самому способу своего вычисления представляющая только числовое значение. Также вычисляют  $F/B = h_m$  — среднюю глубину в живом сечении.

Принято (при графическом изображении) наносить, помимо кривой распределения или эпюры скоростей  $u_{m,L}$ , также эпюру поверхностных скоростей  $u_o$  и эпюру донных скоростей  $u_s$ . Значения  $u_o$  и  $u_s$  получают экстраполяцией "на-глаз" эпюр скоростей на отдельных вертикалях до пересечения их с линией поверхности воды и, соответственно, с дном.<sup>1</sup>

Наконец, определяют величину  $\sum_0^B (u_o h \Delta B)$ , подобную  $\sum_0^B (u_{m,L} h \Delta B)$  и получают из отношения:

$$\frac{\sum_0^B (u_{m,L} h \Delta B)}{\sum_0^B (u_o h \Delta B)} = \frac{Q}{Q'} = \alpha, \quad (20)$$

коэффициент, применение которого будет описано ниже.

В бланке расхода воды приводят еще значения:

$$u_{o,m} = \frac{\sum_0^B (u_o \Delta B)}{B} \quad (21)$$

и  $u_{o, \text{макс}}$  — среднюю и наибольшую поверхностные скорости воды.

Каждый измеренный расход воды соответствует некоторому уровню воды. Если на одном створе измеряется некоторое число расходов, то можно установить зависимость между расходом и уровнем воды. Зависимость эта находит выражение в кривой расходов воды или в петле расходов воды<sup>2</sup>.

Для поперечных сечений, имеющих форму круга, с симметричным распределением скорости в радиальном направлении, обработка по графическому способу принимает следующий вид.

<sup>1</sup> Фактически донная скорость, вследствие прилипания воды к дну, равняется нулю. Изображенное на чертеже  $u_s$  представляет значение пригодное только для сравнительных целей.

<sup>2</sup> См. ниже: гл. 2, пар. 2.

Из рис. 110, который изображает распределение скоростей вдоль диаметра трубы  $D$ , видно, что

$$dQ = 2r\pi u dr$$

и

$$Q = 2\pi \int_0^{\frac{D}{2}} ur dr. \quad (22)$$

Суммирование производят таким образом, что для каждого  $r$  наносят соответствующее ему значение  $ur$  и планиметрируют затем образованную таким путем площадь  $F$ , отмеченную на рис. 110 штриховкой.

Расход воды  $Q$  получают умножением суммы на  $2\pi$

и вычисляют  $u_m = \frac{Q}{D^2\pi} \cdot 4$  — среднюю скорость в сечении трубы.

**Интеграционный метод измерения.** При этом способе особую роль играет выбор траектории движения вертушки по живому сечению, так как необходимо стремиться к возможно равномерному распределению точек по живому сечению. Далее, скорость передвижения вертушки должна поддерживаться постоянной и не должна превышать определенного предела. Этот предел может быть связан со скоростью течения, руководством для чего являются следующие основные соображения (рис. 111).

Благодаря скорости передвижения  $v$ , на вертушку действует боковая составляющая скорости, равная  $v$ , но по направлению противоположная передвижению вертушки. Она образует со скоростью течения  $u$  равнодействующую  $u_R$ , угол которой с направлением оси вертушки определяет степень скоса течения.

Так как у распространенных типов вертушек, судя по опыту, непараллельность течения в горизонтальной плоскости является наиболее неблагоприятным фактором в отношении действия вертушки как компонент-прибора, то скорость передвижения вертушки в горизонтальной плоскости является определяющей для дальнейшей оценки. Лучшие конструкции вертушек, по данным опыта, работают как компонент-вертушки, примерно, только до  $15^\circ$  скоса течения в горизонтальной плоскости, так что максимальный угол скоса  $\alpha_{\text{макс}}$  может быть равен самое большее  $15^\circ$ . Если  $\text{tg } \alpha = v/u$  должен быть  $\leq \text{tg } 15^\circ$ , то

отсюда следует наибольшее допустимое отношение

Согласно этому, при горизонтальном передвижении даже компонент-вертушки, скорость передвижения вертушки может составлять самое большее одну четвертую часть от величины скорости течения; эту скорость следует еще уменьшать, если в створе наблюдается сильно турбулентное течение.

Второй вопрос, подлежащий правильному освещению, — это вопрос об определении средней и местных скоростей течения вдоль траектории движения.

Для средней скорости действительно следующее рассуждение, которое здесь приводится, простоты ради, в применении к вертикальному передви-

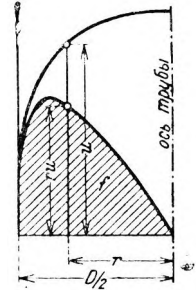


Рис. 110. Обработка расхода воды графическим путем при точечном методе измерения в круглых сечениях при симметричном в радиальном направлении распределении скоростей.

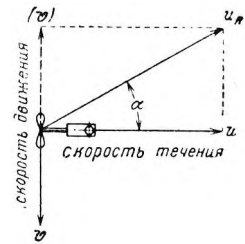


Рис. 111. Течение под острым углом к оси вертушки, вызванное боковым движением вертушки.

жению вертушки (рис. 112). Средняя скорость по вертикальнй прямой имеет выражение:

$$u_{m,L} = \frac{1}{H} \int_0^H u dh,$$

и так как  $u = a + bn$  и  $dh = v dt$  (при скорости передвижения  $v$ ), то отсюда следует, что

$$u_{m,L} = \frac{1}{H} \int_0^T (a + bn) v dt = \frac{v}{H} \int_0^T (a + bn) dt$$

и далее, поскольку  $H = vT$ , где  $T$  — время полного передвижения,

$$u_{m,L} = \frac{1}{T} \int_0^T (a + bn) dt = \frac{1}{T} \left[ \int_0^T a dt + \int_0^T b n dt \right] = a + \frac{b}{T} \int_0^T n dt.$$

Если  $N$  есть суммарное число оборотов за время передвижения  $T$ , тогда

$$\int_0^T n dt = N,$$

а следовательно

$$u_{m,L} = a + b \frac{N}{T}. \quad (23)$$

Из уравнения (23) следует, что при интеграционном методе измерения с вертикальным передвижением среднюю скорость на вертикали получают

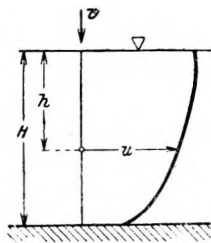


Рис. 112.

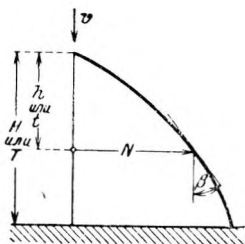


Рис. 113.

подставляя в уравнение вертушки  $u = a + bn$  для  $n$  — среднее число оборотов за время полного передвижения.

В виду того, что такие же соображения можно привести для любого направления передвижения вертушки, отсюда следует, что для определения средней скорости в живом сечении при интеграционном способе измерения достаточно подставить в уравнение

вертушки для  $n$  среднее в единицу времени значение числа оборотов, получившегося в результате объезда вертушкой с равномерной скоростью всего живого сечения.

Для вычисления местной скорости в какой-либо определенной точке траектории движения вертушки, надо поступать следующим образом.

Обратимся вновь к простому случаю вертикального передвижения. С помощью промежуточных отсчетов  $N_1, N_2 \dots$  числа оборотов и соответствующих промежуточных отрезков времени  $t_1, t_2 \dots$  можно вычертить суммарную кривую числа оборотов.

Выбирая (рис. 113) масштаб времени и масштаб глубин так, что для  $T$  и для  $H$  получатся равной длины отрезки, можно написать, что

$$dt = dh,$$

и так как

$$dN = n dt,$$

то

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{dN}{dh} = \frac{ndt}{dt} = n, \quad (24)$$

и скорость в намеченной точке получается из уравнения:

$$u = a + b \operatorname{tg} \beta. \quad (25)$$

Если интеграционным способом пользуются только для определения средней скорости и, в дальнейшем, для вычисления расхода воды, то является достаточным установление продолжительности движения вертушки  $T$ , соответствующей суммарному числу оборотов  $N$ . Отмечать время можно с достаточной точностью при помощи карманных часов. Так как в известных случаях приходится регистрировать большие числа оборотов, надо при применении механических счетчиков учитывать это таким образом, как это сделано в конструкциях вертушек с механическим счетчиком.

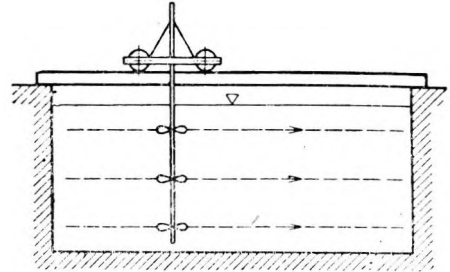


Рис. 114. Передвижение трех вертушек в горизонтальном направлении.

Но если интеграционный способ должен, кроме того, служить для получения скоростей в отдельных точках, то для записи времени и числа оборотов необходимо применять хронограф, чтобы можно было по нему получать промежуточные значения числа оборотов. В дальнейшем обработка может производиться, как и при точечном способе. Такое развитие обыкновенного интеграционного метода называют детальным методом.<sup>1</sup>

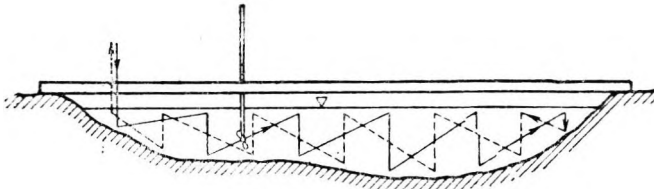


Рис. 115. Зигзагообразное перемещение вертушки. Способ Шаффернака.

Вертушка передвигается по живому сечению в горизонтальном, вертикальном или зигзагообразном направлении.

При вертикальном передвижении отдельных передвижений должно быть столько, сколько намечено вертикалей, тогда как при горизонтальном передвижении можно, применяя несколько вертушек, ограничиться одним заездом (рис. 114).

При зигзагообразном передвижении, которым очерчивается все живое сечение, получают из одного единственного заезда среднюю скорость для всего живого сечения (рис. 115).

**Метод сокращенного вертушечного измерения.** Для сокращения расхода средств и времени стремятся уменьшить как можно больше число точек наблюдений и при правильных искусственных сечениях ограничиваются одной единственной точкой для всего живого сечения.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> S. H a j ó s. Jaugeages et son ontillage. Annales de ponts et chaussées. 1898.

<sup>2</sup> L. S c h m i d t. Einrichtungen zum registrierenden Messen von Wasserstand und Wassermenge in geregeltten Gerinnen. Z. d. österr. Ing. - u. Arch.-Vereines, H. 4, 5, 1921.

Сделать заключение о величине расхода воды по отдельным скоростным измерениям возможно, однако, только тогда, когда известна связь между измеренными скоростями в выбранных отдельных точках и расходом воды.

Эта связь может быть установлена на основе полных вертушечных измерений, которые произведены в том же самом живом сечении; она может быть, по крайней мере приближенно, установлена с помощью эмпирических формул, полученных, в свою очередь, на основании полных вертушечных измерений на морфологически однородных водных участках или же она устанавливается, например для способа непрерывного измерения, посредством параллельных измерений расходов каким-либо из употребительных способов измерения.

Для открытых естественных водотоков получают по произведенным ранее полным вертушечным измерениям коэффициент  $\alpha$  из уравнения (20) и, если известно распределение поверхностных скоростей по ширине реки, вычисляют искомый расход воды из формулы:

$$Q = \alpha \sum_0^B (u_0 h \Delta B). \quad (26)$$

Указанное распределение скоростей можно установить при помощи вертушки и притом, лучше всего, применяя вертушку на буксире или лаг на буксире.

Как свидетельствует опыт, подобные сокращенные вертушечные измерения приводят к очень удовлетворительным результатам в тех случаях, когда на основе ряда параллельных измерений известна зависимость значений  $\alpha$  от расхода воды  $Q$  и ко времени измерения поверхностных скоростей измерены глубины на отдельных вертикалях.

**Производство вертушечного измерения.** Створ должен быть выбран правильно и таким образом приспособлен для измерений, чтобы приборы устанавливались технически правильно, без опасности для участвующих в измерениях лиц и, по возможности, не мешая движению судов и плотов.

Произвести целесообразный выбор створов при искусственных сечениях сравнительно легко, но для рек такой выбор требует тщательного обдумывания и взвешивания всех обстоятельств. Не говоря уже об учете доступности створа, его следует выбирать на прямом участке, не подверженном влиянию подпора и ветровых нагонов, свободном от водоворотов, от смешивания с воздухом и от зарастания травой, с возможно спокойной поверхностью воды. Створ должен обладать правильной формой, без резких изменений, по возможности, до наивысшего горизонта воды, и быть мало подверженным размывам и намывам. Если в силу каких-либо причин, створ должен быть открыт на месте, которое не отвечает условиям равномерного распределения скорости, тогда улучшение достигается устройством струнаправляющих стенок.

Створы охотнее всего намечают у мостов и мостиков, если только течение не очень стеснено опорами. При отсутствии подобных устойчивых объектов или невозможности их использовать, применяют специальные допускающие быстрюю сборку гидрометрические мостики, одиночные или сдвоенные суда, устроенные наподобие парома, или канатные системы. На очень мелких реках можно, в конце концов, не ставить мостика, а пройти по створу вброд.

К полному оборудованию створа принадлежат еще вспомогательное водомерное устройство и размеченный трос.

Трос, размеченный через метр, протягивают по мосту или по гидрометрическому мостику или, как при судовых промерах, свободно натягивают поперек реки. Провес троса следует, по возможности, уменьшать, туго натягивая его при помощи двух натяжных барабанов, устанавливаемых на берегу

у уреза воды. На очень широкой реке трос, шириной от 5 до 7 мм, должен опираться на несколько промежуточных опор, устанавливаемых в закоренных лодках. Для пропуска судов и плотов трос опускают. В канатных системах трос заменяется тяговым канатом  $V$ , горизонтальное передвижение которого отсчитывается по счетному механизму  $N$  (см. рис. 73).

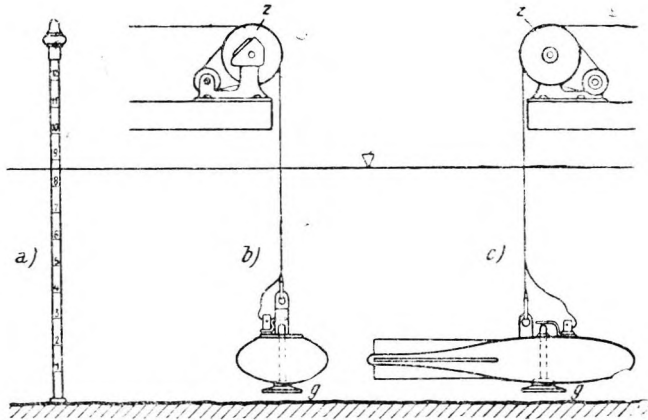


Рис. 116. Приспособление для измерения глубин.  
 $z$  — счетчик глубин;  $g$  — поддон.

Промеры по створу производятся в водотоках, глубиной, примерно, до 5 м, при помощи наметки, а в очень глубоких потоках — особым приспособлением с лотом.

Промеры могут отпасть, если форма русла на створе может быть восстановлена по планам реки. Для съемок русла рек, которые производятся в гидротехнических целях, применяют специальные способы, допускающие съемку больших речных участков (иногда помощью самопишущих глубиномеров) в сравнительно короткие промежутки времени.

Наметка, изготавливаемая из дерева или легких пловучих стальных труб, имеет отчетливые деления через дециметр и снабжена башмаком, предотвращающим проникновение ее при слабом грунте в дно (рис. 116, а). Наметку опускают в воду, несколько заносая в направлении против течения и быстро ставя на дно в вертикальном положении. При движении наносов и при каменистом ложе промеры наметкой могут быть весьма неточны.

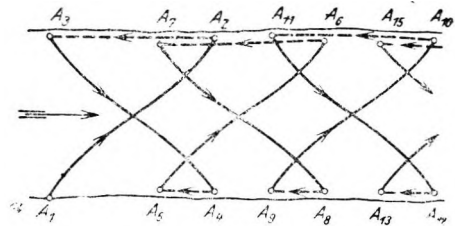


Рис. 117. Промер глубин по косым галсам.

Приспособления с лотом состоят из свинцовых грузов в форме линз (рис. 116, б) или лучше, обтекаемой формы (рис. 116, в), которым можно придавать поддон с электрическим контактовым устройством. Их опускают на тонком проволочном тросе, проходящем через счетчик глубин. При применении подобных приспособлений в отношении относительности их течением действительно все сказанное по поводу тросовых вертушек.

Для съемок дна реки (помощью одного из описанных ниже приборов) направляют лодку, с которой производятся промеры, в косом направлении от одного берега из точки  $A_1$  к другому в точку  $A_2$ , чтобы затем опять вернуться к первому берегу в точку  $A_4$ , после чего может быть начат новый заезд (рис. 117). Это петлеобразное покрытие речного дна промерами носит название промера косыми галсами.



Тахиграф для промеров системы Рейх и Ганзер, изображенный на рис. 118, состоит, в основном, из соединения маленькой мензулы, на которой ориентировочно нанесен план речного участка, с универсальным инструментом, служащим в качестве дальномера и снабженным устройством для повторительных наблюдений.<sup>1</sup> Инструмент имеет главную зрительную трубу для нивелирования и трубу-дальномер, а у приборов нового типа—только одну зрительную трубу, причем она может с помощью эксцентрика быстро переводиться из наклонного положения в горизонтальное.

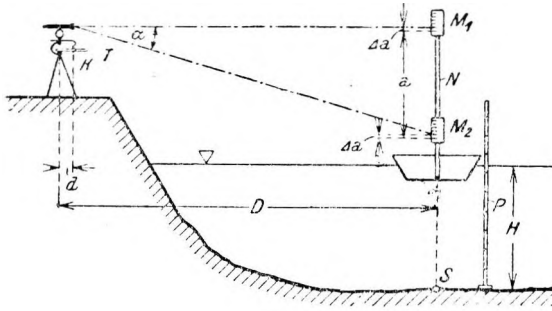


Рис. 118. Способ тахиграфометрической съемки по Рейху и Ганзеру.

Тахиграфом работают по способу нивелирования с постоянным расстоянием по рейке. На нивелирной рейке нанесены две визирных таблицы с расстоянием  $a$  между нулями. Сначала по установленной горизонтально нивелирной трубе берут отсчет  $M_1$  по верхней таблице, следовательно отрезок  $\Delta a$ . Затем опускают трубу-дальномер настолько вниз, чтобы прочесть по нижней таблице деление  $M_2$ , удаленное от деления  $M_1$  на расстояние  $a$ . Этим движением в плоскости

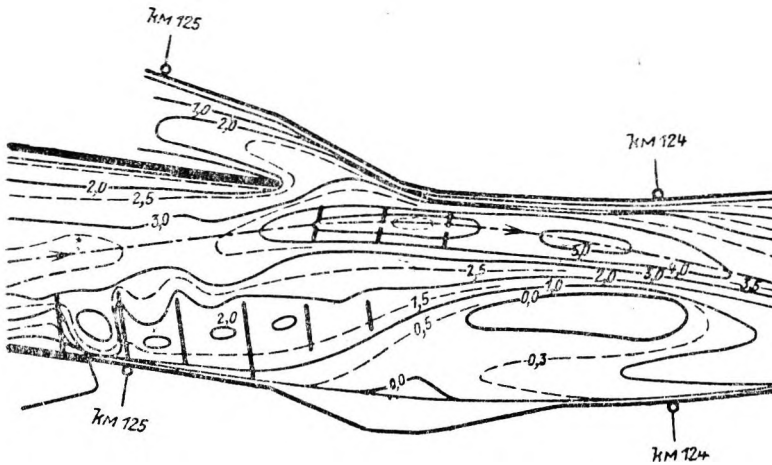


Рис. 119. План речного участка в линиях равных глубин—изобатах.

визирования труб переставляется штифт  $K$  на расстояние  $d$ , в масштабе отвечающее действительному расстоянию  $D$ . Одновременно с установлением местоположения лодки, измеряется наметкой  $P$  глубина воды  $H$ , так что с положением лодки определяется и высота точки  $S$  дна реки. Подобное измерение повторяется при промерах косыми галсами по сигналам, откуда и получается желаемая густота промерных точек. По данным съемки путем приведения промеров к плоскости зеркала воды может быть составлен план глубин, на котором вычерчиваются линии равных глубин, изобаты, и который дает наглядное представление о форме речного русла (рис. 119).

<sup>1</sup> K. Levasseur, Stromgrundaufnahme auf tachymetrischem Wege. Die Wasserwirtschaft, Wien, 1931, Nr. 11, 17, 18, 21.

Гидростатический профилограф Хайоса (рис. 120) построен по принципу прибора, регистрирующего давление, и не требует никаких вспомогательных геодезических работ. Каток  $W$ , внутри которого работает регистрирующий аппарат, заключенный в водонепроницаемую коробку, передвигается при помощи промерного судна  $S$ . Путь катка по дну реки наносится самопишущим аппаратом на ленту и тем самым, при прямолинейном ходе судна, определяется на данный момент положение точек дна, так как начальная и конечная точки заезда нанесены на плане речного участка. Глубины воды наносит на ту же ленту перо, соединенное с манометром, измеряющим давление водяного столба в каждой данной точке дна. Профилограф дает без всяких вычислений изменение по пути судна глубин, приведенных к поверхности воды, откуда опять-таки может быть получен план дна реки в изобатах.

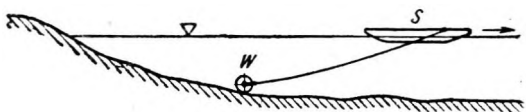


Рис. 120. Гидростатический профилограф по Хайосу.

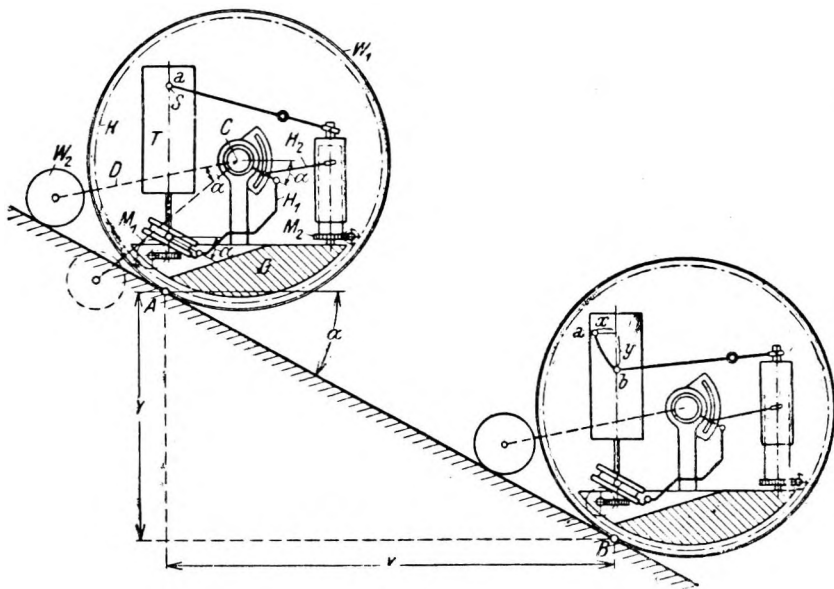


Рис. 121. Профилограф Клоднера.

Профилограф Клоднера, согласно рис. 121, состоит из цилиндрического тела  $W_1$ , которое медленно влечут по реке при помощи канатов. Внутри цилиндра на оси  $C$  подвешен тяжелый маятник  $G$  с механизмами и  $M_2$  для нанесения горизонтальной и вертикальной проекций  $X$  и  $Y$ . При качении  $W_1$  на участке  $AB$  речного дна, наклоненного под углом  $\alpha$  к горизонтали, эти механизмы приводятся в движение внутренним зубчатым ободом, независимо один от другого. В свою очередь,  $M_1$  приводит в движение регистрирующий барабан  $T$ , в то время как  $M_2$  передвигает в вертикальном направлении рычаг  $S$ . Придаточный цилиндр  $W_2$  переставляет помощью хомута  $D$  через ось  $C$  на угол падения дна  $\alpha$  управляющие рычаги  $H_1$  и  $H_2$  и механизмы  $M_1$  и  $M_2$ . Это вызывает поворот барабана  $T$  на величину  $x$ , пропорциональную  $X$ . Передвижение механизма  $M_2$  вызывает передвижение пера  $S$  в вертикальном направлении на величину  $y$ , пропорциональную  $Y$ . Таким образом на пишущем барабане появляется изображение речного русла в уменьшенном масштабе.

Нанесение результатов промеров дает отправные моменты для целесообразного распределения вертикалей. Когда все готово, производят измерение скоростей с возможной быстротой, учитывая изменение в состоянии погоды и уровня воды. На каждой вертикали обычно начинают измерение с точки, ближайшей ко дну. Продолжительность измерения в отдельных точках при спокойном течении составляет примерно одну минуту. Однако это время приходится увеличивать, если промежуточные отсчеты покажут значительные колебания числа оборотов вертушки, вызванные пульсацией. Если неравномерность числа оборотов особенно велика, надо осмотреть вертушку, не повреждена ли она или не мешает ли ей работать плывущая трава. В реках, несущих много наносов, надо проверять по штанге „на слух“, находится ли вертушка вне потока наносов. Возможные повреждения надо устанавливать во-время, для учета впоследствии отдельно скоростей, измеренных поврежденной вертушкой.

Отсчеты по водомерному посту на гидростворе надо производить во время измерения через столь короткие промежутки времени, чтобы ход изменения уровня был установлен достаточно точно. По постоянному посту за время измерения также необходимо взять хотя бы несколько отсчетов. Погоду, ветер, характер ледовых явлений и вообще все другие явления надо наблюдать и отмечать.

**Точность определения расхода воды при помощи гидрометрической вертушки.** Вертушка в настоящее время занимает в гидрометрии первое место среди прочих приборов, благодаря своей приспособляемости к различным условиям, встречающимся на практике, и своему высокому коэффициенту полезного действия.

Коэффициент полезного действия зависит, как и во всех способах измерения, не только от точности измерительного прибора, но и от величины тех неизбежных систематически повторяющихся ошибок, которые происходят из-за створа, из-за характера производства измерения и его обработки, а также при съемке створа и при отсчетах времени.<sup>1</sup>

При соблюдении приведенных выше условий и указаний о выборе створа и его оборудовании, об обращении с вертушкой, о выборе ее типа (в зависимости от условий измерения) и о правильной обработке расхода воды аналитическим или графическим способами, при благоприятных обстоятельствах и при современном состоянии техники дела,—среднее отклонение точечного метода измерения от абсолютно точного измерения составляет —0,4%, причем надо считаться с наибольшими отклонениями данных измерений до  $\pm 1,3\%$ . Таким образом неточность отдельного измерения по отношению к абсолютно точному измерению может колебаться между +0,9 и —1,7%.<sup>2</sup>

Непосредственное доказательство этого вывода могут дать только сравнения с объемными измерениями. Такие сравнительные измерения предпринимались редко, однако исключительная тщательность, с которой они проводились (в частности описанные ниже испытания), дает известное право на обобщение их результатов. На рис. 122 показаны результаты сравнительных измерений вертушками Отта, произведенные в 1930 г. в Вальхензе Исследовательским институтом гидротехники и гидроэнергетики.<sup>3</sup>

<sup>1</sup> A. S t a u s s. Der Genauigkeitsgrad von Flügelmessungen. Berlin 1926.

<sup>2</sup> При получении указанных данных исходили из среднего отклонения от объемного измерения или, практически, от истинной величины. При помощи максимальной отклоняемости данных устанавливают неточность (ненадежность) измерения, которая дает возможные крайние значения измерения. Которое из возможных значений—наибольшее или наименьшее—представляет интерес в том или ином неблагоприятном случае, зависит от того, как ставится вопрос.

<sup>3</sup> O. K i r s c h m e r u. B. E s t e r e r. Die Genauigkeit einiger Wassermessverfahren. Z. d. V. D. I., № 44, 1930. Заслуживает внимания список литературы по гидрометрии, приведенный в указанной статье.

Так как объемное измерение дает почти абсолютно точные значения,<sup>1</sup> то показанные на рисунке отклонения представляют абсолютные ошибки вертушечных измерений.

Интеграционный метод требует гораздо меньшего времени для измерения и обработки, что имеет решающее значение для работ в половодье на широких и глубоких реках.

По этой причине указанный метод нашел частое применение при работе как с тросовыми, так и со штанговыми вертушками.

Начиная с Богемии, где Гарлахером были осуществлены первые подобные измерения, в настоящее время по усовершенствованному Хайсом способу—детальному методу—работают в Венгрии на Дунае и на Тиссе, в Аргентине на Парана и в Германии на Рейне.

При учете указанных выше условий для скорости передвижения вертушки (при средних глубинах выше 5 м и вертикальном ее перемещении) детальный метод дает точность измерения, которая, как свидетельствует табл. 3, в среднем, мало отличается от точности, достигаемой при точечном методе. Наибольшие отклонения точек, определенных детальным методом,

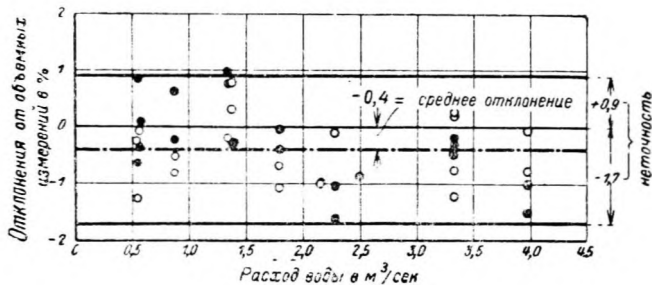


Рис. 122. Результаты сравнения полных вертушечных измерений с объемными измерениями.

○ — спицевые лопасти (вертушка Отта); • — скошенные лопасти (вертушка Отта).

Таблица 3

Результаты различных методов измерения вертушкой

Река	Место измерения	Дата	Уровень воды, в см	Изменение уровня воды, в см	Средняя глубина, в м	Расход воды, в м³/сек, определенный методом:			Отклонение в %		Среднее отклонений, в %	Наибольшие отклонения
						точечным	детальным	интеграционным	Q <sub>т</sub> от Q <sub>т</sub>	Q <sub>т</sub> от Q <sub>т</sub>		
Дунай		29 V 1931	310	0,2	5,33	2966	3075	—	3,7	—	—	—
Тисса	—	22 VI 1931	8	—0,7	4,30	259,2	250,2	—	—3,5	—	—	—
		26 VI 1931	—23	0,0	3,98	229	231	—	1,1	—	±0,1	±3,6
		28 VIII 1922	—140	—0,1	1,82	151,1	154,1	—	2,2	—	—	—
		24 IX 1921	—96	0,2	3,36	120,4	118,8	—	—1,3	—	—	—
		25 VII 1921	—104	—0,2	1,68	135,5	133,0	—	—1,8	—	—	—
Дунай	Будапешт	6 VI 1932	356	—1,6	6,74	—	3688	3724	—	1,0	—	—
		5 VI 1932	378	—1,0	6,93	—	3883	3918	—	1,0	—	—
		8 III 1932	51	0,0	4,62	—	992	1011	—	1,9	—	—
		22 III 1932	131	0,2	5,36	—	1558	1571	—	1,0	±1,0	±1,2
		16 V 1932	271	—0,4	6,76	—	2358	2410	—	2,2	—	—
Тисса	Сегедин	15 IV 1932	923	0,0	8,92	—	3994	3982	—	—0,2	—	—
		19 IV 1932	901	0,0	8,80	—	4119	4133	—	0,3	—	—

1 См. III, 1, 2.

от точек, определенных точечным методом, выражаются величиной  $\pm 3,6\%$ , так что точность детального метода в отношении единичного измерения может быть определена, правда, только на основе немногих сравнительных измерений, пределами от  $+4,5\%$  до  $-5,3\%$ .

Если пользоваться обыкновенным интеграционным измерением с вертикальным перемещением вертушки, то среднее отклонение, как то видно из табл. 3, на  $+1\%$  больше, и неточность единичного измерения может возрасти до пределов от  $+6,8\%$  до  $-5,4\%$ .<sup>1</sup>

При зигзагообразном передвижении вертушки результаты получаются еще более неточными.<sup>2</sup> Некоторые сравнительные измерения, проведенные на малых водотоках, показали, что среднее отклонение относительно полных

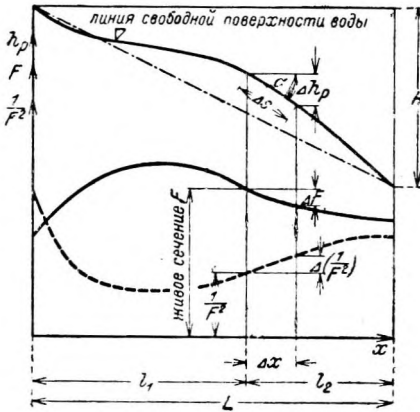


Рис. 123.

уклонов поверхности воды требуется для сравнительной обработки расходов воды в практических и, главным образом, в научных целях. Поверхность воды не является плоскостью, но поверхностью самой разнообразной формы. Для установления этой последней, с достаточной в практическом отношении точностью, определяют продольный профиль поверхности воды, в зависимости от требуемой степени точности, только вдоль левого берега, только вдоль правого берега, по стрежню реки или сразу в нескольких из указанных направлениях. При этом съемка каждого из этих продольных профилей может быть произведена посредством столь густой нивелировки точек поверхности воды, что линия поверхности воды изобразится в виде непрерывной линии. Сокращая число точек, можно дойти до определения двух точек, соединение которых даст только грубое приближение к действительной форме продольного профиля.

Пусть изображенный на рис. 123 продольный профиль поверхности воды получен как средний из трех профилей: у левого берега, у правого берега и на стрежне реки. Тогда

$$J_w = \frac{\text{абсолютное падение}}{\text{длина струйки потока}} = \frac{\Delta h_p}{\Delta s} = \sin \alpha \quad (27)$$

следует рассматривать как значение относительного уклона поверхности воды, практически самое точное из возможных.<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Значения, помещенные в табл. 3, взяты из отчета секции Гидротехники и водного хозяйства Венгерского министерства земледелия.

<sup>2</sup> Этот метод можно применять только при малых живых сечениях.

<sup>3</sup> Численное выражение для относительного уклона поверхности воды дается либо в виде относительного числа  $\frac{\Delta h_p}{\Delta s}$ , либо для длины  $\Delta s = 1000$  м указывается абсолютное паде-

В большинстве случаев для вычисления  $\sin \alpha$  приходится ограничиваться средними значениями из наблюдаемых данных для левого и правого берегов, если только вообще данные не ограничиваются одним из берегов.

Если  $J_w$  — уклон свободной поверхности воды,  $J_r$  — пьезометрический уклон и  $J_b$  — скоростной уклон, то для установившегося движения воды действительно с достаточной точностью выражение:

$$J_w = J_r + J_b, \tag{28}$$

а так как

$$J_b = \frac{\Delta \left( \frac{u^2}{2g} \right)}{\Delta s} = \frac{\Delta \left( \frac{Q}{F} \right)^2}{2g \Delta s} = \frac{Q^2}{2g} \frac{\Delta \left( \frac{1}{F^2} \right)}{\Delta s}, \tag{29}$$

то отсюда

$$J_r = \frac{\Delta h_p}{\Delta s} - \frac{Q^2}{2g} \frac{\Delta \left( \frac{1}{F^2} \right)}{\Delta s}. \tag{30}$$

$J_r$  может быть вычислен из данных наблюдений, которые должны состоять (наряду с данными об уклонах поверхности воды) еще из промерных данных по поперечникам выше и ниже створа. Лишь знание  $J_r$  дает возможность сравнивать между собою результаты скоростных измерений в различных створах.

При приближенных исследованиях может быть принято

$$J_r = J_w = \operatorname{tg} \alpha = \frac{\Delta h_p}{\Delta x} \tag{31}$$

и наконец, может быть сделано еще большее допущение, заключающееся в том, что  $\frac{\Delta h_p}{\Delta x}$  приравнивается среднему значению  $H/L$  для участка

значительной длины  $L$ .<sup>1</sup>

Для нивелировок уклонов воды применяют или сваи или уклонные нивелировочные рейки различных образцов.

Сваи забиваются вдоль левого или правого берега в пределах уреза воды, а их головки нивелируются. Высота уровня воды определяется затем в одно и то же время отмером от головок свай. Время измерения должно быть столь коротким, чтобы можно было пренебрегать происходящими при этом колебаниями уровня.

Встречаются упорные и пловучие уклонные нивелирные рейки. У упорных реек (рис. 124) собственно рейка может перемещаться по размеченной штанге. Из отсчета по рейке  $a$ , отсчета глубины воды  $s$  по штанге и разности нулей рейки и штанги  $b$  получается положение уровня воды относительно горизонта визирования.

Если разность уровней очень невелика, тогда, вследствие постоянного наличия периодических небольших колебаний уровня воды, необходимо при-

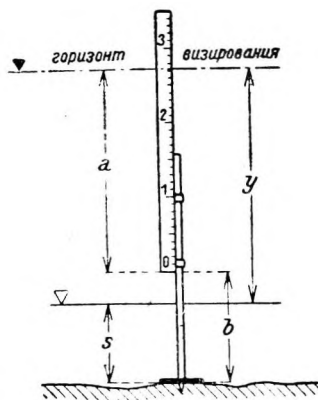


Рис. 124. Образец упорной, уклонной нивелирной рейки.

ние  $\Delta h_p$  в м, то есть уклон выражается в тысячных долях. Например, если

$$\frac{\Delta h_p}{\Delta s} = 0,0035, \text{ то}$$

это соответствует относительному уклону в 3,5 тысячных.

<sup>1</sup> По Зидеке (Siedek), правильнее принимать  $L = l_1 + l_2$ , выбирая  $l_1 = 2B$  и  $l_2 = B$  или  $l_1 = l_2 = B$ , где  $B$  — ширина реки по поверхности воды.

менить для повышения точности отсчетов устройство, подобное описанной выше гидрометрической нивелирной рейке. Ее применяют в соединении с обыкновенной нивелирной рейкой, причем устанавливают обе на такую глубину, чтобы успокоитель был смочен водой (рис. 125).

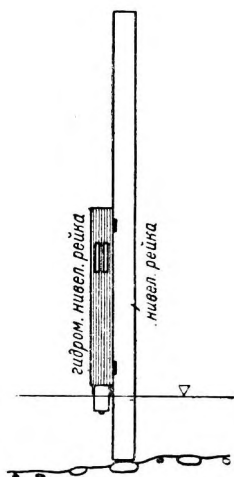


Рис. 125. Гидрометрическая нивелирная рейка в соединении с обыкновенной нивелирной рейкой.

При пловучей установке нивелирная рейка доставляется к пунктам наблюдения при помощи лодки или собственной пловучей опоры.

Съемка дна реки помощью тахиграфа дает в каждой точке и высоту поверхности воды и, тем самым, общую картину высотного положения всей поверхности воды. Съемки подобного рода, правда, утомительны, но, с другой стороны, как нивелировки по плоскости они дают наилучшее представление о распределении уклона по поверхности воды.

Другой способ, испытанный на Дунае в Баварии, служит для измерения уровня поверхности воды на стрежне реки, а следовательно и для построения продольного профиля поверхности воды по динамической оси потока.<sup>1</sup>

При этом способе применяют своего рода плот, состоящий из двух неподвижно соединенных между собой брусьев, длиной по 12 м (рис. 126). По середине брусьев помещается система железных стержней, несущая нивелирную рейку, подвешенную по картезианскому способу на двух осях. Этой рейке придана вверху коническая форма, чтобы сделать деления ее видимыми со всех сторон. Рейка поддерживается в вертикальном положении при помощи противовеса

на нижнем конце. Нивелировка производится с берега, когда рейка проходит определенные, заранее провизированные и провешенные поперечники. Положение поверхности воды определялось таким способом с точностью до нескольких миллиметров.

Вычисление среднего уровня воды. В тех случаях, когда во время определения расхода воды уровень был подвержен значительным колебаниям, к обработке расхода воды следует присоединять вычисление среднего уровня воды.

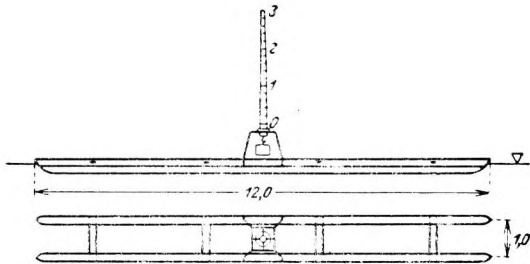


Рис. 126. Пловучая нивелирная рейка системы Крейцера.

Если колебание уровня воды за время вертушечного наблюдения составляло не более 5 см, тогда расход воды следует относить к среднему уровню из наивысшего и наименьшего наблюдаемого.

При колебаниях свыше 5 см необходимо помощью специальных аналитических или графических методов пересчитать частные расходы воды, получающиеся из непосредственных измерений на вертикалях при различных уровнях воды, на расходы при одном уровне воды.

По более старым методам последний уровень определяют так: рассматривают действительно измеренные на отдельных вертикалях частные рас-

<sup>1</sup> K r e u z e r . Etwas über Wasserspiegelfixierungen. Wasserkraft u. Wasserwirtschaft, H. 6, 1924.

ходы воды  $q_I, q_{II}, \dots$  в качестве весов для соответственно наблюдаемых уровней  $h_{p, I}, h_{p, II}, \dots$  и вычисляют

$$h_{p,m} = \frac{q_I h_{p,I} + q_{II} h_{p,II} + \dots}{q_I + q_{II} + \dots} = \frac{\sum q h_p}{Q}. \quad (32)$$

Отсюда вытекает, что необходимо пересчитать и полученные на отдельных вертикалях средние скорости  $u'_{m,I}, u'_{m,II}$  на скорости  $u'_{m,p}, u'_{m,p'}$  соответствующие осредненному уровню воды  $h_{p,m}$ . Для пересчета применяется уравнение:

$$\frac{u_m}{u'_{m'}} = \left( \frac{h}{h'} \right)^n, \quad (33)$$

где  $h$  и  $h'$  означают глубины воды на вертикалях, соответствующие наблюдаемому и вычисленному уровню воды  $h_{p,m}$  и  $n$  — эмпирический коэффициент, определяемый на основе ряда скоростных измерений, произведенных на данном створе при различных уровнях стояния воды.

Этот способ при пересчете на осредненный уровень воды дает расход воды, не совпадающий по величине с фактически измеренным расходом, в силу чего он лишен основания. Можно было бы с равным правом вычислить суммарный расход воды, соответствующий любой проведенной осредненной линии; но нельзя сказать заранее, что пересчету на полученный выше уровень воды  $h_{p,m}$  принадлежит преимущество.

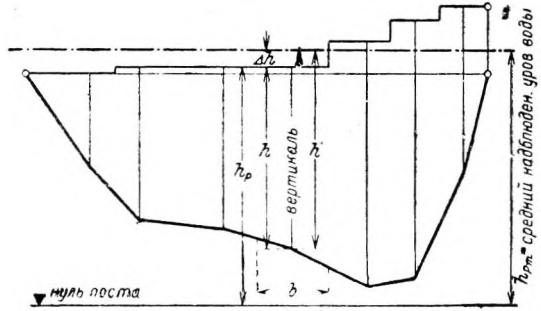


Рис. 127. Определение среднего из наблюдаемых уровня воды.

Правильнее определять средний уровень, соответствующий измеренному расходу воды, так, чтобы сумма частных расходов воды, пересчитанных на этот средний уровень, равнялась сумме измеренных частных расходов. Этот уровень воды называют средним наблюдаемым уровнем воды.<sup>1</sup>

Предпосылкой для применимости всех аналитических методов является условие, чтобы колебание уровня воды во время измерения происходило в относительно узких пределах. Обозначая данные измерений при меняющемся уровне (согласно рис. 127): среднюю скорость на вертикали через  $u_m$ , ширину отсека воды, относящуюся к вертикали, через  $b$ , глубину через  $h$  и частный расход воды через  $q = u_m b h$ , а после пересчета на средний уровень через  $u'_{m'}$ ,  $b'$ ,  $h'$  и  $q' = u'_{m'} b' h'$  применяем зависимость (33) и имеем, что

$$\frac{q}{q'} = \frac{u_m h}{u'_{m'} h'} = \left( \frac{h}{h'} \right)^{1+n}.$$

Заменяя

$$q' - q = \Delta q \quad \text{и} \quad h' - h = \Delta h,$$

получаем иной вид уравнения:

$$1 + \frac{\Delta q}{q} = \left( 1 + \frac{\Delta h}{h} \right)^{1+n},$$

<sup>1</sup> F. V ö g e r i. Wassermessung bei veränderlichem Pegelstande. Die Wasserwirtschaft, № 25. Wien 1929.



или разлагая в ряд и пренебрегая членами ряда высшего порядка получаем, что

$$\frac{\Delta q}{q} = (1 + n) \frac{\Delta h}{h}. \quad (34)$$

Так как, согласно предварительному условию, живое сечение при измерении и при осредненном уровне должно пропускать одинаковый расход воды, то

$$\Sigma q = \Sigma q'$$

или

$$\Sigma (q' - q) = \Sigma (\Delta q) = 0$$

и, следовательно,

$$\Sigma \left[ q (1 + n) \frac{\Delta h}{h} \right] = (1 + n) \Sigma q \frac{\Delta h}{h} = 0$$

и

$$\Sigma \left( q \frac{\Delta h}{h} \right) = 0.$$

Обозначая уровни, соответствующие отдельным вертикалям, через  $h_p$ , имеем для каждой вертикали

$$\Delta h = h' - h = h_{p,m} - h_p.$$

По подстановке этого выражения в уравнение выше, получается, что

$$\Sigma \left( q \frac{h_{p,m} - h_p}{h} \right) = 0$$

и далее, так как  $\frac{q}{b} = u_m h$ ,

$$\Sigma b u_m (h_{p,m} - h_p) = 0$$

или

$$h_{p,m} \Sigma (b u_m) - \Sigma (b u_m h_p) = 0.$$

Отсюда, в конце концов, следует

$$h_{p,m} = \frac{\Sigma (b u_m h_p)}{b u_m}. \quad (35)$$

Средний наблюдаемый уровень воды получается, следовательно, как средняя взвешенная величина из уровней на отдельных вертикалях, причем в качестве весов следует брать произведения  $b u_m$ , получаемые делением измеренных частных расходов воды  $q$  на глубину воды  $h$ . Можно доказать, что ошибка, допускаемая при разложении в ряд отбрасыванием членов высшего порядка даже при изменении уровня, примерно, в две десятых от средней глубины в живом сечении не достигает 1%.

Геодезическая съемка участка реки у створа. Наряду с рассмотренными выше съемками продольных и поперечных профилей, должен быть также снят план створного участка.

На продольном профиле надлежит указывать: использованные при уклонных наблюдениях репера и водомерные пункты по высоте и в плане, линию дна реки по стрежню и линии поверхности воды, снятые при характерных горизонтах.

На план надлежит наносить: положение створа, береговые линии, линии уреза воды для характерных горизонтов, нанесенных на продольный профиль, линию стрежня реки, необходимые точки визирования и водомерные пункты и поверхность дна реки в линиях равных глубин.

#### 4. Определение расходов воды при помощи напорной трубки

Этот способ измерения основан на мысли определять скорость течения воды по измеренному в напорной трубке гидродинамическому давлению или напору.

Напорная трубка в своем первоначальном виде, называемая по имени своего изобретателя трубкой Пито, представляет собою загнутую трубку, обращенную своим устьевым отверстием навстречу течению.<sup>1</sup> Прибор подвергся ряду усовершенствований как в отношении формы, так и приспособлений для отсчета напора.

**Основы способа измерения и тарировка напорной трубки.** Любое тело, помещенное в текучую жидкость, препятствует процессу течения и нарушает тем самым первоначальное положение струек жидкости (рис. 128).

Струйки подпираются в точке *A* перед препятствием, разделяются и обтекают его. Прилегание струй будет, в зависимости от формы препятствия, совершенным при телах плавной, обтекаемой формы, или струи отделятся от тела в точке *B*, а крайние из них сомкнутся лишь в точке *C*, обойдя область завихрений *D*.

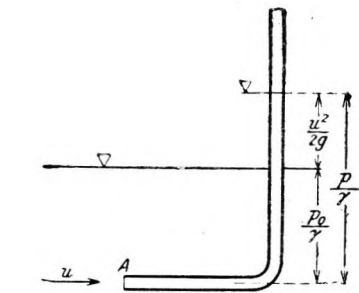


Рис. 129. Схематическое изображение обыкновенной напорной трубки.

В области подпора скорость струек уменьшается, а в точке подпора *A* движение вовсе замирает. Применяя закон Бернулли, который дает описание давлений вдоль струйки жидкости, можно получить давление *p* в точке *A* аналитическим путем, если предварительно представить себе замену фактического турбулентного движения движением лишенной трения жидкости.

Если *u*—скорость, *p*<sub>0</sub>—гидростатическое давление для струйки в области с ненарушенным течением, а *p*—гидростатическое давление в точке подпора и  $\gamma$ —удельный вес воды, то, так как скорость в точке подпора падает до нуля, можно написать:

$$\frac{p_0}{\gamma} + \frac{u^2}{2g} = \frac{p}{\gamma} + 0; \quad (36)$$

следовательно напор, выраженный высотой водяного столба будет равен:

$$\frac{p - p_0}{\gamma} = \frac{u^2}{2g}. \quad (37)$$

Разность давлений  $p - p_0 = \gamma \frac{u^2}{2g}$  носит название подпора, скоростного напора (или также динамического давления), давление *p*<sub>0</sub> называется гидростатическим давлением и *p*—полным гидростатическим давлением.<sup>2</sup>

Если тело помещено в жидкость и имеет отверстие в направлении течения, то давление *p* распространится внутрь тела, в частности внутрь трубы, и может быть для измерения направлено к измерительному прибору (рис. 129).

Чтобы определить скорость из выражения  $p - p_0 = \gamma \frac{u^2}{2g}$ , надо, помимо *p*, знать еще и *p*<sub>0</sub>. Установление последней величины может быть связано

<sup>1</sup> Н. P i t o t . Description d'une machine pour mesurer la vitesse des eaux courantes. Mémoires de l'academie roy. des sciences, 1732.

<sup>2</sup> L. P r a n d t l . Abriss der Strömungslehre. Braunschweig 1931.

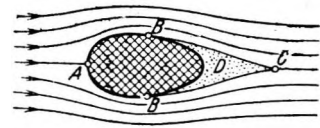


Рис. 128. Течение вокруг тела.  
*A*—подпор; *B*—точка отрыва струи от тела; *D*—область завихрений.

с трудностями, так как пьезометр—прибор, которым измеряют гидростатическое давление, мешает движению воды в том месте, где надлежит произвести измерение. Пьезометр надо делать такой формы, чтобы нарушения

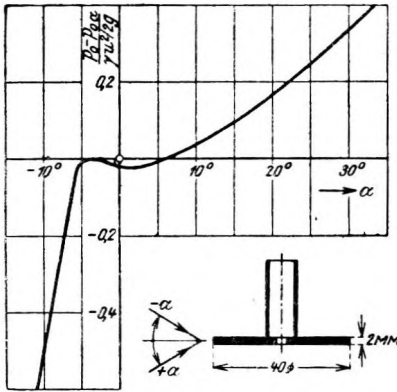


Рис. 130. Пьезометр дисковой формы.

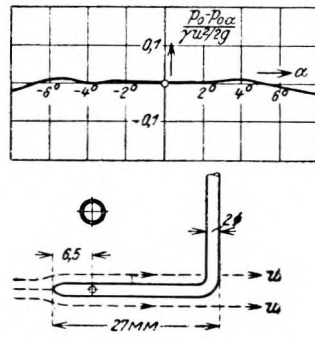


Рис. 131. Пьезометр в виде трубки.

поверхности давления оставались возможно малыми и чтобы он не попадал в зону течения, существенно нарушенную подпорной трубкой. Далее, должно быть соблюдено условие, чтобы отверстие пьезометра своим сечением приходилось точно в направлении ненарушенного течения. Кроме того, надо особенное внимание обращать на то, чтобы входное отверстие было плавной формы, без ребер и заострений.

Пьезометры делают в форме диска (рис. 130), или трубки (рис. 131). Оба типа должны быть изготовлены таким образом, чтобы погрешность  $\frac{p - p_0}{\gamma \frac{u^2}{2g}}$  при направлении течения

под углом  $\alpha$ , выраженная в долях скоростного напора  $\gamma \frac{u^2}{2g}$  была возможно малой.

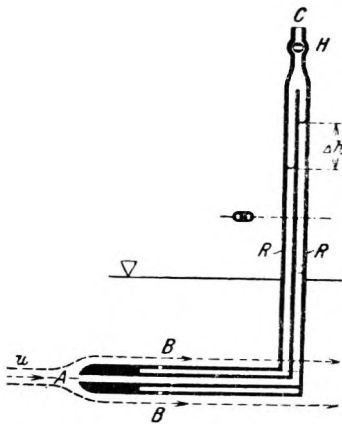


Рис. 132. Пьезометр системы Прандтля.

ную Дарси, выводя отсчетные трубки  $R$  высоко над поверхностью воды в водотоке, с засасыванием в них водяных столбов (рис. 132). Закрывая краном  $H$  отсасывающий клапан трубок, можно продолжительное время держать отсчетные уровни на удобной для отсчета высоте, причем разность их высот  $\Delta h$  равняется

$$\Delta h = \frac{p - p_0}{\gamma} = \frac{u^2}{2g}. \quad (38)$$

Это уравнение действительно только для движения невязкой жидкости, так как оно выведено пользуясь законом Бернулли. Для турбулентного движения выражение:

$$\Delta h \neq \frac{u^2}{2g}$$

и следует принимать равенство:

$$\Delta h = \xi \frac{u^2}{2g}, \quad (39)$$

откуда

$$u = \left[ \frac{2g\Delta h}{\xi} \right]^{\frac{1}{2}}. \quad (40)$$

Коэффициент  $\xi$  для турбулентного движения не поддается определению аналитическим путем, но определяется посредством тарировки подобно тому, как у гидрометрической вертушки. Его наибольшее значение может приближаться к единице, если пьезометр действительно измеряет гидростатическое давление. Так как у некоторых типов напорных трубок отверстие пьезометра оказывается в зоне с пониженным давлением, то иногда при испытаниях получались значения  $\xi$  больше единицы.

Знание характера и степени влияния косо́го течения имеет для напорных трубок такое же значение, как и для вертушек, так как и в данном случае оценка качества прибора зависит от этого.

Непараллельность течения относительно оси в напорных трубках можно учитывать двояким образом:

1. при помощи такого рода конструкций трубок, которые учитывают влияние непараллельности течения я струи относительно оси напорной трубки, и, следовательно, относительно нормали к живому сечению в самом отсчете разности давлений

$$\Delta h = \frac{p - p_0}{\gamma}, \text{ так что для них } \Delta h = \xi \frac{u^2}{2g} \cos^2 \alpha.$$

Прибор дает, следовательно, непосредственно составляющую скорости, нормальную к живому сечению;

2. при помощи такого рода конструкций трубок, посредством которых является возможным определять не только величину скорости, но и направление струи, то есть скоростной вектор. В этом случае нормальную составляющую к живому сечению приходится вычислять.

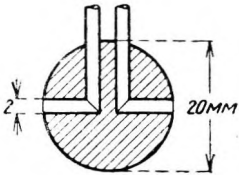


Рис. 134. Напорная трубка с шарообразной головкой.

Напорные трубки первой группы позволяют определять расход воды так же просто, как и компонент-вертушки. В какой мере напорная трубка удовлетворяет условию  $\Delta h = \xi \frac{u^2}{2g} \cos^2 \alpha$ , может определить только тарировка. В общем, данные тарировок напорных трубок, учитывая разнообразие их конструкций, обнаруживают очень большую разницу между собою (рис. 133).

Напорные трубки, у которых головке придана шарообразная или дисковая форма, имеют значения  $\xi$ , нарастающие до  $\xi = 1,4$ , причем следует констатировать некоторое приближение к закону косинуса, примерно, до пределов  $\alpha = 15^\circ$  (рис. 134).

Напорные трубки с головкой в виде насадки наподобие старой формы, предложенной Дарси, дают при непараллельном оси течения, вплоть до  $\alpha = 30^\circ$ , почти одни и те же значения  $\xi$  (рис. 135). Они, следовательно, нечувствительны к изменениям направления течения, не требуют поэтому точной

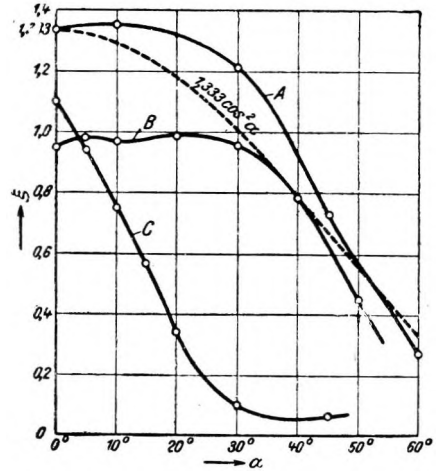


Рис. 133. Коэффициенты  $\xi$  различных напорных трубок в зависимости от угла, образуемого течением с осью трубки.

A—напорные трубки с шарообразной головкой; B—напорные трубки системы Дарси; C—напорные трубки системы Бейерхауза.

установки перпендикулярно к створу, почему не рекомендуются при сильна турбулентном движении.

Напорные трубки с двойным входным отверстием очень чувствительны к косому течению, но не удовлетворяют закону косинуса и не годятся в качестве измерителей скорости, зато вполне пригодны как указатели направления течения (рис. 136).

Из большого числа имеющихся конструкций трубок, которые могут применяться, следует выбирать те симметрично сконструированные напорные

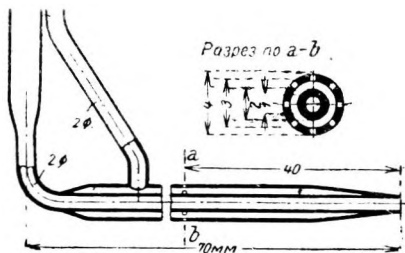


Рис. 135. Напорная трубка в виде насадки по Дарси.

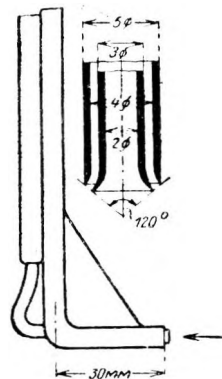


Рис. 136. Напорная трубка с двойным входом.

трубки, у которых  $\xi$  достигает возможно большей величины, мало изменяется с величиной скорости и для колебаний направления течения в пределах до  $+ 20^\circ$  близко следует закону косинуса (см. рис. 133).

Вторая группа напорных трубок, которая позволяет измерять угол направления течения, находится еще в стадии развития. Этого рода приборы предназначаются, в первую очередь, для исследований в гидротехнических и кораблестроительных лабораториях; однако имеются перспективы для их применения и в гидрометрии, после того как будет разрешен вопрос о приборе для отсчета показаний.



Рис. 137. Цилиндрическая напорная трубка, чувствительная к изменениям направления течения, системы Гутче.

Эти напорные трубки, чувствительные к угловым течениям, представляют собой самый общий тип конструкции напорной трубки, так как у них отверстие для передачи давления в ту часть трубки, которая служит для отсчетов, может быть сделано не только в подпорной точке, то есть там, где скорость равна нулю, но в любом месте по краям трубки, разумеется, за исключением тех мест, где струя воды уже отделилась от трубки.

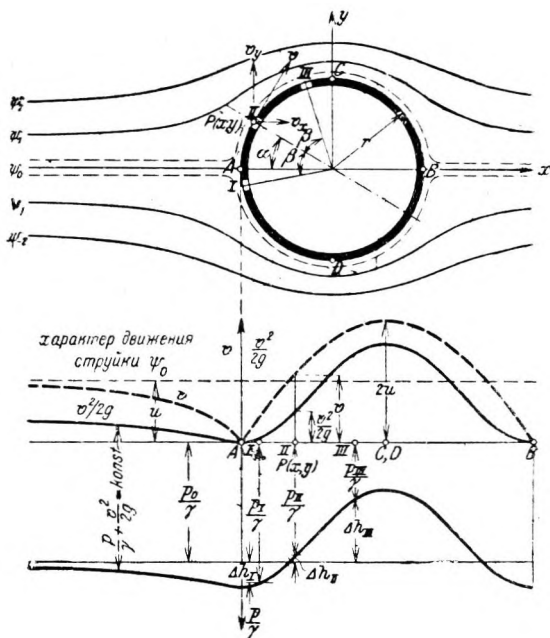


Рис. 138. Характер течения вокруг цилиндрической напорной трубки.

Анализ, в предположении невязкой свободной от вихреобразных движений жидкости, вскрывает происходящие здесь процессы с качественной стороны. Если трубка имеет круглую цилиндрическую форму и погружается в течение в вертикальном положении (рис. 137), тогда при плоском движении (свободном от трения и завихрений) потенциал скорости выражается в виде уравнения:

$$\Phi = ux \left( 1 + \frac{r^2}{x^2 + y^2} \right), \quad (41)$$

где  $u$  обозначает равномерную скорость воды в области с ненарушенным процессом течения, следовательно в бесконечности (рис. 138).

Компоненты скорости выражаются в общем виде:

$$\left. \begin{aligned} v_x &= \frac{\partial \Phi}{\partial x} = u \left[ 1 + \frac{r^2 (y^2 - x^2)}{(x^2 + y^2)^2} \right], \\ v_y &= \frac{\partial \Phi}{\partial y} = - \frac{2ur^2 xy}{(x^2 + y^2)^2}. \end{aligned} \right\} \quad (42)$$

Для струйки, бесконечно близко прилегающей к трубке, при введении полярных координат  $x = r \cos \alpha$  и  $y = r \sin \alpha$  (для точки  $P(x, y)$ ) получается:

$$\left. \begin{aligned} v_x &= 2u \sin^2 \alpha, \\ v_y &= 2u \sin \alpha \cos \alpha. \end{aligned} \right\} \quad (43)$$

Отсюда следует равенство:

$$v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2} = 2u \sin \alpha. \quad (44)$$

Согласно этому, для  $\alpha=0^\circ$  или  $180^\circ$ ,  $v = 0$ , то есть точки  $A$  и  $B$  являются подпорными точками. Для  $\alpha = \pm 90^\circ$ ,  $v = 2u$ .

Из закона Бернулли выводится условие равенства полного давления в области с ненарушенным и с нарушенным течением:

$$\frac{p_0}{\gamma} + \frac{u^2}{2g} = \frac{p}{\gamma} + \frac{v^2}{2g}.$$

Разность давления  $p$  в точке  $P(x, y)$  против давления  $p_0$  в бесконечно удаленной точке или, что является одним и тем же, против давления в точке измерения при ненарушенном состоянии, составляет:

$$p - p_0 = \gamma \frac{u^2 - v^2}{2g} = \gamma \frac{u^2}{2g} \left[ 1 - \left( \frac{v}{u} \right)^2 \right] = (1 - 4 \sin^2 \alpha) \gamma \frac{u^2}{2g} = \xi \gamma \frac{u^2}{2g}. \quad (45)$$

Повышению давления соответствует разность положений уровня в напорной трубке

$$\Delta h = \frac{p - p_0}{\gamma} = \xi \frac{u^2}{2g}.$$

$\Delta h$  практически является разностью уровней в двух вертикальных трубках, из которых одна ведет к точке  $P(x, y)$ , в то время как другая, называемая базисной, должна указывать давление  $p_0$  в зоне с ненарушенным течением. При этом базисная трубка в форме пьезометра приделывается на таком расстоянии от напорной трубки, чтобы последняя не оказывала влияния на первую.

Если цилиндрическая напорная трубка снабжается тремя отверстиями  $I, II, III$ , расположенными симметрично под углом  $\beta$  (см. рис. 137), тогда,

если  $p_I$ ,  $p_{II}$  и  $p_{III}$  означают давления у этих отверстий, получаются следующие непосредственно измеряемые разности уровней в напорной трубке:

$$\left. \begin{aligned} \Delta h_I &= \frac{p_I - p_0}{\gamma} = \left[ 1 - 4 \sin^2 (\alpha + \beta) \right] \frac{u^2}{2g} = \xi_I \frac{u^2}{2g}, \\ \Delta h_{II} &= \frac{p_{II} - p_0}{\gamma} = \left[ 1 - 4 \sin^2 \alpha \right] \frac{u^2}{2g} = \xi_{II} \frac{u^2}{2g}, \\ \Delta h_{III} &= \frac{p_{III} - p_0}{\gamma} = \left[ 1 - 4 \sin^2 (\beta - \alpha) \right] \frac{u^2}{2g} = \xi_{III} \frac{u^2}{2g}. \end{aligned} \right\} \quad (46)$$

Так как в действительности преобладает турбулентное движение, и помимо того, отверстия  $I$ ,  $II$  и  $III$  имеют сравнительно большую величину, то определенные теоретическим путем значения не могут, как и в предыдущих случаях, совпадать с действительными значениями, и коэффициенты  $\xi_I$ ,  $\xi_{II}$  и  $\xi_{III}$  могут быть установлены только на основе тарировочных данных.

Из предыдущих уравнений следует:

$$\left. \begin{aligned} p_I &= p_0 + \xi_I \gamma \frac{u^2}{2g} = \gamma \Delta h_I + p_0, \\ p_{II} &= p_0 + \xi_{II} \gamma \frac{u^2}{2g} = \gamma \Delta h_{II} + p_0, \\ p_{III} &= p_0 + \xi_{III} \gamma \frac{u^2}{2g} = \gamma \Delta h_{III} + p_0, \end{aligned} \right\} \quad (47)$$

откуда получаются уравнения для определения  $u$ :

$$\begin{aligned} \frac{1}{\gamma} \left[ p_I - \frac{p_{II} + p_{III}}{2} \right] &= \left[ \xi_I - \frac{\xi_{II} + \xi_{III}}{2} \right] \frac{u^2}{2g} = \\ &= \Delta h_I - \frac{\Delta h_{II} + \Delta h_{III}}{2} = \frac{\Delta h_I - \Delta h_{II}}{2} + \frac{\Delta h_I - \Delta h_{III}}{2}, \end{aligned}$$

а в заключение:

$$u = \left[ \frac{2g \left( \frac{\Delta h_I - \Delta h_{II}}{2} + \frac{\Delta h_I - \Delta h_{III}}{2} \right)}{\xi_I - \frac{\xi_{II} + \xi_{III}}{2}} \right]^{1/2}. \quad (48)$$

Для вычисления  $\alpha$  может служить выражение:

$$f(\alpha) = \frac{p_{II} - p_{III}}{p_I - \frac{p_{II} + p_{III}}{2}} = \frac{\xi_{II} - \xi_{III}}{\xi_I - \frac{\xi_{II} + \xi_{III}}{2}} = \frac{\Delta h_{II} - \Delta h_{III}}{\frac{\Delta h_I - \Delta h_{II}}{2} + \frac{\Delta h_I - \Delta h_{III}}{2}}. \quad (49)$$

причем изменение  $\alpha$  следует устанавливать тарировкой.

Тарировки таких приборов, произведенные в стоячей воде, показали, что значения  $\xi$  в очень малой степени зависят от  $u$ , то есть являются для одних и тех же значений  $\alpha$  обычно постоянными (рис. 139).

Этот способ измерения получает свое развитие еще в том, что в шарообразной головке напорной трубки делается пять отверстий, с целью измерять процессы течения в пространстве.

**Приборы для отсчетов при измерениях напорными трубками.** Важную роль в напорных трубках играет прибор для отсчетов разностей давления. Привод к регистрирующему прибору, который обычно состоит из резиновых трубок, следует изготовлять непроницаемым. Необходимо многократными испытаниями убедиться в том, что в наполненных жидкостью трубках не содержится вовсе воздуха. Если в качестве жидкости применить воду, то

возникает ряд трудностей. Прежде всего, при скоростях притекающей к напорной трубке воды  $u < 0,2$  м/сек., разность уровней оказывается меньше 2 мм, а так как мениски в трубках значительно колеблются, вследствие наблюдающейся при турбулентном движении пульсации, то практический предел измерения определяется, примерно, скоростью  $u = 0,2$  м/сек. Капиллярность также играет роль, заключающуюся в том, что переменная высота

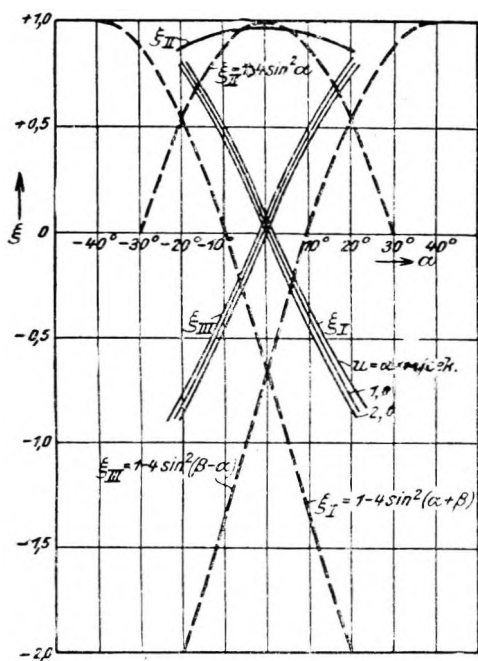


Рис. 139. Сравнение вычисленных и тарифовых данных для цилиндрической напорной трубки.

--- вычислено; — тарифовано.

рукавами  $G_1$  и  $G_2$ . Если разность давления составляет  $p_1 - p_2$ , то отделение, в котором уровень жидкости повышается, становится тяжелее, а другое легче. Если кольцевая трубка  $R$  устроена в виде весового рычага с осью вращения  $M$  и противовесом  $G$  и если резиновые трубки  $G_1$  и  $G_2$  обладают достаточной эластичностью, тогда отклонение подвижной шкалы  $S$ , является мерой разности давления

$$\Delta h = \frac{p_1 - p_2}{\gamma}$$

Этот прибор прост и может быть сконструирован в форме, обладающей достаточной сопротивляемостью. Чтобы повысить точность отсчетов для малых скоростей, были сделаны попытки искусственно увеличить разность отсчетных уровней. Этого достигают путем наклонной установки отсчетных трубок, а также при помощи специальных мерных и изолирующих жидкостей, наливаемых в отсчетные трубки. Применение наклонной установки трубок получило очень широкое развитие в чисто лабораторных целях, но в гидрометрию проникло в малой степени, так как этот способ связан с хлопотами, и прибор обнаружил слишком малую сопротивляемость для работ в природных условиях.

<sup>1</sup> А. В е т з . Mikromanometer. Handbuch der Experimentalphysik. Berlin 1931.

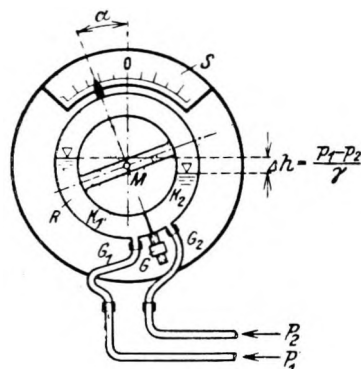


Рис. 140. Кольцевые весы для измерения разности давлений.

столба воды и загрязнение трубки, в частности чем-либо жирным, приводят к неправильным отсчетам.

Указанные препятствия почти исключены в кольцевых весах (рис. 140). При помощи их можно с большой точностью измерять также и очень малые разности уровней и тем самым весьма незначительные разности давлений.<sup>1</sup>

Изогнутая в виде круга трубка  $R$  разделена внутри на два отделения

$K_1$  и  $K_2$ , которые соединяются с точками измерения давления резиновыми рукавами  $G_1$  и  $G_2$ . Если разность давления составляет  $p_1 - p_2$ , то отделение, в котором уровень жидкости повышается, становится тяжелее, а другое легче.

Если кольцевая трубка  $R$  устроена в виде весового рычага с осью вращения  $M$  и противовесом  $G$  и если резиновые трубки  $G_1$  и  $G_2$  обладают достаточной эластичностью, тогда отклонение подвижной шкалы  $S$ , является мерой разности давления

Этот прибор прост и может быть сконструирован в форме, обладающей достаточной сопротивляемостью.

Чтобы повысить точность отсчетов для малых скоростей, были сделаны попытки искусственно увеличить разность отсчетных уровней. Этого достигают путем наклонной установки отсчетных трубок, а также при помощи специальных мерных и изолирующих жидкостей, наливаемых в отсчетные трубки. Применение наклонной установки трубок получило очень широкое развитие в чисто лабораторных целях, но в гидрометрию проникло в малой степени, так как этот способ связан с хлопотами, и прибор обнаружил слишком малую сопротивляемость для работ в природных условиях.



Применение мерных жидкостей зарекомендовало себя лучше. Хотя и этот способ имеет еще ряд недостатков, он все же применяется и для самых крупномасштабных определений расходов воды.<sup>1</sup> Основной принцип у этого способа следующий.

Если трубки передачи от собственно напорного прибора наполнены жидкостью *A* удельного веса  $\gamma$  и  $p_1$  и  $p_2$  являются передаваемыми давлениями,

тогда разность уровней по отсчетным трубкам будет.

$$\Delta h = \frac{p_2 - p_1}{\gamma}$$

В качестве жидкости для передачи давления берут обычно воду. Если теперь взять мерную жидкость *B* удельного веса  $\gamma_1$  тогда разность высот менисков мерной жидкости  $\Delta H$  будет больше  $\Delta h$ .

Если  $\gamma_1$  меньше единицы, то

$$p_2 - p_1 = \gamma \Delta H - \gamma_1 \Delta H,$$

следовательно

$$\gamma \Delta h = \gamma \Delta H - \gamma_1 \Delta H$$

и увеличение разности отсчетов

$$a = \frac{\Delta H}{\Delta h} = \frac{\gamma}{\gamma - \gamma_1}.$$

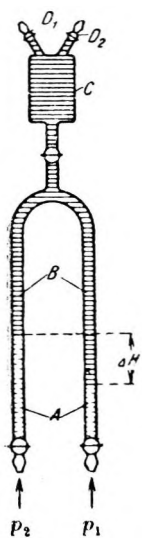


Рис. 141. Отсчетная трубка для показаний разности уровней в увеличенном масштабе.

*A*—вода (уд. вес  $\gamma$ ); *B* — мерная жидкость  
*C*—резервуар;  
*D*<sub>1</sub>—кран для наполнения трубки мерной жидкостью; *D*<sub>2</sub>—края для выхода воздуха

$$\Delta H = \frac{p_2 - p_1}{\gamma - \gamma_1}$$

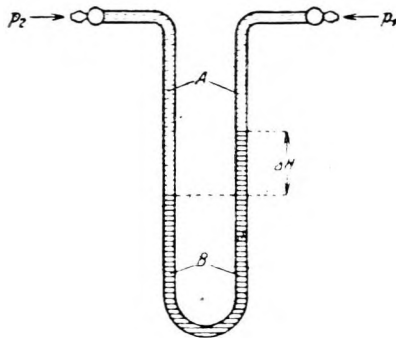


Рис. 142. Отсчетная трубка для показаний разности уровней в увеличенном масштабе.

*A*—вода (уд. вес  $\gamma$ ); *B*—мерная жидкость

$$(\gamma_1 > \gamma); \Delta H = \frac{p_2 - p_1}{\gamma_1 - \gamma}$$

В этом случае измерение может производиться только при помощи обратной U-образной трубки (рис. 141). При этом мерная жидкость заполняет общий соединительный патрубок и маленький резервуар поверх трубки. Разность уровня увеличивается тем больше, чем меньше отличаются друг от друга удельные веса  $\gamma$  и  $\gamma_1$ .

Если  $\gamma_1 > 1$  (рис. 142), то

$$\gamma \Delta h = \gamma_1 \Delta H - \gamma \Delta H, \text{ и увеличение разности отсчетов}$$

$$a = \frac{\Delta H}{\Delta h} = \frac{\gamma}{\gamma_1 - \gamma}.$$

В этом случае надо измерять при помощи прямой трубки U-образной формы, в которой жидкость *A*, передающая давление, перекрывает мерную жидкость (рис. 142). И здесь *a* будет тем больше, чем меньше разница между  $\gamma$  и  $\gamma_1$ .

Трудности при подобного рода измерениях заключаются в возможности изменения (в некоторых случаях) удельного веса, в неблагоприятной форме менисков, в возможности смешения соприкасающихся жидкостей и в увеличении сроков успокоения столбов жидкости в отсчетных трубках.

Детальные исследования качества жидкостей, служащих для отсчетов, показали, что число хотя бы в некоторой степени пригодных жидкостей весьма незначительно.<sup>2</sup> Эти жидкости могут быть охарактеризованы следующим образом.

<sup>1</sup> Общество „British Pitometer Co“ применяет для своих приборов в качестве мерной жидкости перхлорэтан.

<sup>2</sup> R. W i n k e l. Stauröhren zur Messung des Druckes und der Geschwindigkeit im fließenden Wasser. Z. d. V. D. I., Bd. 67, № 23, 1923.

Эфир,  $\gamma_1 = 0,74$ ,  $a = 3,85$ , хороший мениск в месте соприкосновения с водой, однако при соприкосновении с водой постепенно несколько изменяет свой удельный вес.

Бензол,  $\gamma_1 = 0,884$ ,  $a = 8,6$ , требует подкраски иодом, хороший мениск, однако образует после продолжительного соприкосновения с водой в плоскости раздела пленку. Резиновые трубки подвергаются сильной порче.

Толуол,  $\gamma_1 = 0,872$ ,  $a = 7,8$ , хороший мениск, не изменяется даже при продолжающемся целый месяц соприкосновении с водой, не требует подкраски, так как обладает большой лучепреломляющей способностью, то есть является весьма подходящей жидкостью.

Сероуглерод,  $\gamma_1 = 1,29$ ,  $a = 3,45$ , жидкий, не пристает к стеклу и неизменен, неприятен по запаху, очень огнеопасен и взрывчат, в остальном должен быть признан пригодным.

Применяя эти жидкости, удастся увеличить предел измерения, примерно, до скорости 0,1 м/сек. Для меньших скоростей показания приборов становятся ненадежными, так как силы сцепления и трения о стенки в трубках приобретают такие значения, что передаваемые давления уже не преодолевают их или преодолевают только при отдельных толчках.

Третий способ увеличения малых разностей давления основан на применении специальной изолирующей жидкости, которая помещается между передающей и измеряющей давление жидкостью (рис. 143).

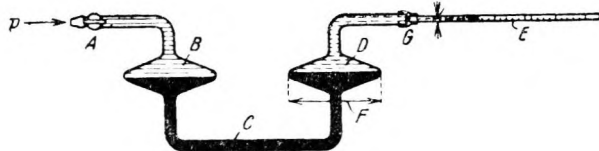


Рис. 143. Измерение давления посредством капиллярной трубки по Гутче.

В U-образную трубку с резервуарами, сечением  $F$ , наливается в качестве изолирующей жидкости  $C$ , например ртуть. В точке  $A$  прибор присоединяется к передаче от места измерения, причем передача давления  $p$  происходит при помощи передаточной жидкости  $B$ , которую может быть вода. В точке  $G$  присоединяется капиллярная измерительная трубка  $E$ , сечением  $f$ , заполненная мерной жидкостью  $D$  в виде, положим, алкоголя. Колебания уровня в трубке, сечением  $f$ , и в пространстве, сечением  $F$ , будут относиться,

как  $F/f$ . Так как величину отношения  $F/f$ , можно выбрать по желанию, то

применение даже тяжелой изолирующей жидкости, как, например, ртути, не играет при отсчете существенной роли. Без затруднений удастся достичь таких увеличений разности отсчетов, какие необходимы в каждом данном случае.<sup>1</sup>

**Производство измерений посредством напорных трубок и степень точности этих измерений.** Для измерений напорными трубками применим только точечный метод наблюдения.<sup>2</sup> Применение напорной трубки для определений расходов воды в естественных условиях производилось до настоящего времени в более значительных размерах только в США. В Европе оно попрежнему ограничивается немногими случаями.<sup>3</sup> Напротив, гидротехнические, кораблестроительные, а также гидравлические и аэродинамические лаборатории пользуются этим прибором с большим успехом.

Сравнительные измерения другими способами, на основании которых можно бы сделать заключение о точности и, вместе с тем, о применимости

<sup>1</sup> Способ действителен только при давлениях, близких к атмосферному.

<sup>2</sup> Делались многочисленные попытки, путем устройства в напорной трубке нескольких отверстий одно над другим, определять непосредственно среднюю скорость на вертикали, но подобные приборы оказались несостоятельными.

<sup>3</sup> M. V. B r a n . Report of Water Supply of New York. 1904.

этого способа, в больших водотоках производились редко. Из немногочисленных данных об измерениях напорной трубкой в естественных условиях получается, что при скоростях течения до 2 м/сек. относительное среднее

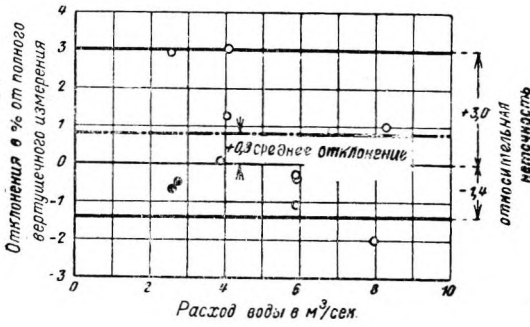


Рис. 144. Сравнение данных измерений напорной трубкой и вертушкой.  
○ — измерения напорной трубкой; ● — измерения по увеличению напора.

отклонение от полных вертушечных измерений составляет +0,8%, а относительная неточность, примерно, от +3,0 до -1,4% (рис. 144). Хотя оборудование для измерений напорными трубками так же просто, как и дешево, однако, помимо того, что этот способ более неточен, он требует еще при отсчетах дополнительного времени на правильное установление среднего положения колеблющегося уровня жидкости в отсчетных трубках, что является еще одним его недостатком по сравнению с вертушкой.

Однако, как только речь заходит о точных измерениях в опытных

лабораториях, напорная трубка выступает серьезнейшим конкурентом вертушки. Здесь малые размеры прибора являются решающим фактором, а заметный при измерениях в природных условиях недостаток, заключающийся в капризности и сложности отсчетного прибора, почти не имеет значения.

## 5. Определение расхода воды при помощи нагретой проволоки

Если вода или вообще какая-либо жидкость обтекает нагретую электричеством платиновую проволоку, то вызванное этим изменение температуры проволоки служит мерой для скорости течения. С изменением температуры проволоки связано изменение ее электропроводности.

Изменение электропроводности поддается, в свою очередь, весьма точному установлению при помощи мостика Уитстона, к которому присоединяют проволоку (рис. 145). Наконец, путем тарировки, подобной тарировке вертушки, можно установить связь между отклонениями милливольтметра *b* мостика *a* и скоростью течения. Охлаждение платиновой проволоки зависит также от ее положения относительно направления течения. Потому этим прибором можно определять также и направление течения.

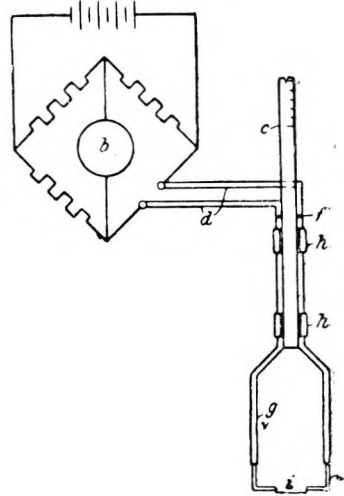


Рис. 145 Нагретая проволока системы Гангадарана.

Собственно измерительный прибор, погружаемый в текучую воду, состоит из платиновой проволоки, длиной около 10 мм и толщиной 0,1 мм, покрытой с целью изоляции лаком или эмалью и заключенной в стеклянный фугляр. От платиновой проволоки идут провода из изолированной серебряной проволоки *e* и медной проволоки *d*, служащие одновременно для ее поддержания на весу.

Применение указанного способа для определения расходов воды находится в начале своего развития.<sup>1</sup> Для измерения скоростей движения газов

<sup>1</sup> G. G a n g a d h a r a n. Ein neues Instrument für Geschwindigkeitsmessungen in turbulentem Wasser. Mitteilungen d. Hydraul. Inst. d. T. H., H. 4, München 1931.

он употребляется с 1912 г. Учитывая незначительное влияние инерции и чувствительность прибора к непараллельным оси направления течения, надо полагать, что ему обеспечена будущность по меньшей мере в области лабораторных работ. Относительно точности этого способа интересных в практическом отношении данных пока не имеется.

## 6. Определение расхода воды при помощи поплавков

В открытых водотоках могут применяться поверхностные или глубинные поплавки. Поверхностными поплавками служат деревянные шары или, лучше, плоские деревянные кружки с сигнальными флажками; в качестве глубинных поплавков—деревянные шесты с грузом на нижнем конце или бутылки, уравновешенные при помощи свинцовой дроби.

В то время как поверхностными поплавками можно установить только скорость поверхностной струи воды,— по скоростям, получаемым для различных глубин с помощью поплавков-шестов, можно приблизительно определять среднюю скорость на вертикали. Надо только иметь в виду, что каждое поплавокное измерение может дать только среднее значение скорости на известном расстоянии, пробегаемом поплавком, и, следовательно, никогда не дает значения скорости в какой-либо точке поперечного сечения.

Поплавковые измерения никогда не должны предприниматься при ветре и при других условиях, воздействующих на естественное движение верхних слоев воды. Они не точны и могут рассматриваться только в качестве крайнего средства, когда применение других способов по каким-либо причинам исключено.

Для проведения поплавокного измерения выбирают прямой, правильной формы участок реки, длиной равный, примерно, двойной или тройной ширине реки. На участке русло должно быть свободно от всяких стеснений и уклон, по возможности, одинаков на всем протяжении. По середине участка разбивается главный створ, промеряемый при помощи лота или наметки. Выше и ниже главного створа, примерно, на расстоянии ширины реки в каждую сторону, разбиваются второй и третий поперечные профили, по которым также производятся промеры.

Выше верхнего створа через реку протягивается причальный и мерный трос, по которому устанавливается лодка на определенных расстояниях от уреза воды. С лодки на воду спускаются поплавки, причем расстояния выбираются у стрежня реки меньше, чем поблизости от берегов.

Рекомендуется с каждой стоянки лодки пускать по несколько поплавков один за другим через определенные промежутки времени, чтобы таким образом получать надежные средние значения поверхностных скоростей.

Проход поплавков через все три створа следует отмечать по времени и по положению. Время отмечается при помощи немых или звуковых сигналов, которые трое наблюдателей, по одному в каждом створе, подают при проходе поплавка через соответственный створ четвертому наблюдателю, вооруженному секундомером.

Положение поплавка в момент прохода через створ должно устанавливаться при помощи угломерного инструмента, ориентированного относительно створов.

Когда все величины, длина пробега  $l$ , время пробега  $\Delta t$  и положение поплавка при проходе через створы определены, тогда получают из выраже-

ния  $\frac{l}{\Delta t}$  поверхностную скорость, относимую к той или иной точке главного

створа. В результате может быть определен расход воды тем же способом, как было указано для неполного вертушечного измерения.

## 7. Определение расхода воды при помощи подвижного экрана

Измерение посредством экрана является дальнейшим развитием мысли, легкой в основу способа измерения поплавками-шестами. В то время, как шест дает только среднюю скорость течения на вертикали и даже, как указывалось выше, лишь приближенно, экран, прикрепленный к легкой вагонетке и заполняющий собою сечение канала правильной формы, почти полностью (с малыми зазорами вдоль стенок) измеряет среднюю скорость течения воды в живом сечении.

Введенный в гидрометрию Андерсоном подвижной экран являлся первоначально чисто поплавковым экраном, который в Германии был усовершенствован в том отношении, что экран был перенесен на рельсовый путь, продолженный вне пределов поперечного сечения канала (рис. 146). Экран, ко-

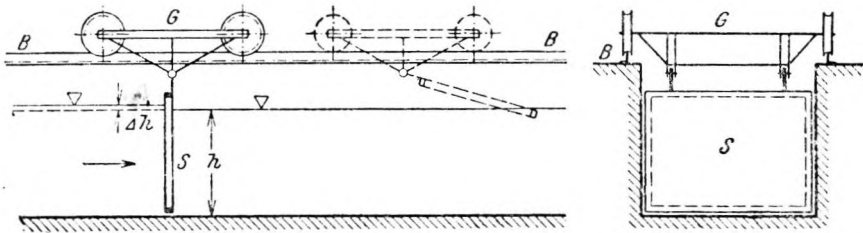


Рис. 146. Подвижной экран.

S—собственно экран; B—рельсовый путь; G—подвесное устройство.

торый может быть плоским или изогнутым, подвешивался к четырехколесной вагонетке, причем колеса ее двигались по рельсам, которые были уложены с некоторым уклоном, чтобы уменьшить напор (разность уровней)  $\Delta h$ , потребный для приведения в движение всего экранного устройства, примерно до 1 мм.

Из конструктивных соображений до сих пор придерживались скорости движения, примерно около 1 м/сек, причем требовался участок для разбега, длиною приблизительно в  $7\sqrt{F}$  м, где  $F$  означает живое сечение, и участок собственно для измерения, длиною примерно в 10 м. Такой сравнительно длинный и прямой участок не всегда можно найти у гидростанций, где в остальном данный способ измерения зарекомендовал себя как вполне целесообразный. Поэтому в настоящее время усилия направлены к такому видоизменению экранного способа, чтобы и участок разбега мог быть использован для измерений.

Если измерение производится только на участке с постоянного характера движением, то есть если живое сечение  $F$  выше экрана за промежуток времени  $\Delta t$ , в который вагонетка передвигается на расстояние  $l$ , можно считать с достаточной степенью точности неизменным,—тогда  $lF = V$  есть тот объем, на который увеличилось количество воды позади экрана за счет притока  $Q$  в отрезок времени  $\Delta t$ . Отсюда расход воды получается из выражения:

$$Q = \frac{V}{\Delta t} = \frac{lF}{\Delta t}. \quad (50)$$

Это уравнение вполне справедливо только тогда, когда экран является своего рода совершенно водонепроницаемым затвором. Однако, чтобы, по возможности, уменьшить сопротивления, возникающие при движении всего измерительного устройства в целом, приходится выполнять экран с известным отступом от стенок канала, оставляя между ним и стенками некоторый зазор. Это вызывает потери воды, так как напор воды с верхней стороны экрана

обуславливает поступление более или менее значительных количеств воды через зазор из верхней части канала в нижнюю. Потери воды могут иметь влияние на точность измерения. Между прочим было установлено, что в зазоре образуются течения воды в разных направлениях (рис. 147). От степени их уравновешивания зависит, в какой мере передвижение вагонетки отмечает суммарный расход воды.

Величина сопротивлений, возникающих при движении, также имеет значение для точности результатов измерения. Экран, шириною  $b$ , придет в движение только тогда, когда действующая на него сила горизонтального давления воды  $W = \gamma b h \Delta h$  превысит силы сопротивления движению (см. рис. 146). Сопротивление движению, в особенности, обусловлено установкой и формой колес вагонетки, формой рельсов, размерами экрана и уклоном пути. Так как большее сопротивление движению требует большей затраты времени на ускорение и, тем самым, более длинного участка на разгон, то при постоянной длине канала длина участка для собственно измерений соответственно сокращается, вследствие чего понижается точность измерений.

Подробные исследования, которые охватили обою влияние распределения скорости в измерительном канале при ненарушенном режиме, а также влияния сопротивления движению и величины зазора, показали, что эти факторы допускают разнообразные комбинации, которые не только исключают всякое аналитическое объяснение их, но свидетельствуют еще о том, что нечего ожидать какого-либо единого, устойчивого коэффициента полезного действия для измерения, производимого при помощи экрана. Строго говоря, при помощи каждой данной экранной установки является возможным измерить совершенно точно один определенный расход воды. Несмотря на это, удастся при помощи измерительного экрана получать результаты, точность которых равняется точности хороших вертушечных измерений, если умножить вычисленные величины расходов воды  $Q = IF/\Delta t$  на коэффициент, зависящий от величины сопротивлении движению.<sup>1</sup> Если подобной поправки не вводится, измерение с помощью экрана может достигнуть точности только около + 2,0%.

При скоростях течения меньше 0,1 м/сек. показания могут иметь еще гораздо большую ошибку. Поэтому, если данный способ потребовалось бы применить для точных измерений, необходимо произвести тарировку, о чем в данном случае практически едва ли может идти речь, поскольку перенести измерительное устройство в условия для тарировки является делом почти немислимым.<sup>2</sup>

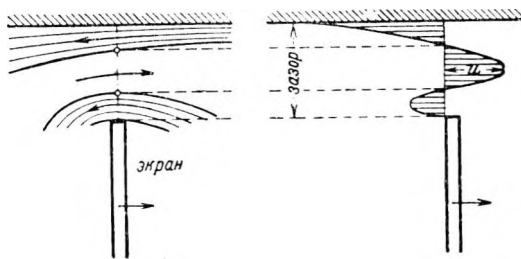


Рис. 147. Направление водяных струй и распределение относительной скорости течения в зазоре между подвижным экраном и стенкой канала.

<sup>1</sup> M a n n . Beitrag zur Kenntnis der Wassermessung mittels Messschirmes. München 1920. Согласно Манну фактический расход воды составляет

$$Q = \frac{IF}{\Delta t} \left[ 1 + \alpha \left\{ \frac{0,0792}{u_m} + \frac{l}{\Delta t} + 0,1412 \right\} (P - 0,548) \right],$$

где  $\alpha$  означает отношение площади зазоров к площади живого сечения и  $P$ —сопротивление движению в кг.

<sup>2</sup> A. S t a u s s . Die hydraulischen Einrichtungen des Maschinenbaulaboratoriums in Esslingen. Berlin 1925.

Условием для данного способа измерения являлось то, чтобы во время движения экрана движение воды находилось в установившемся состоянии. В действительности это не имеет места, так как при погружении экрана в воду и во время его движения установившийся режим течения нарушается, а в потоке наступает состояние неустановившегося движения (рис. 148).

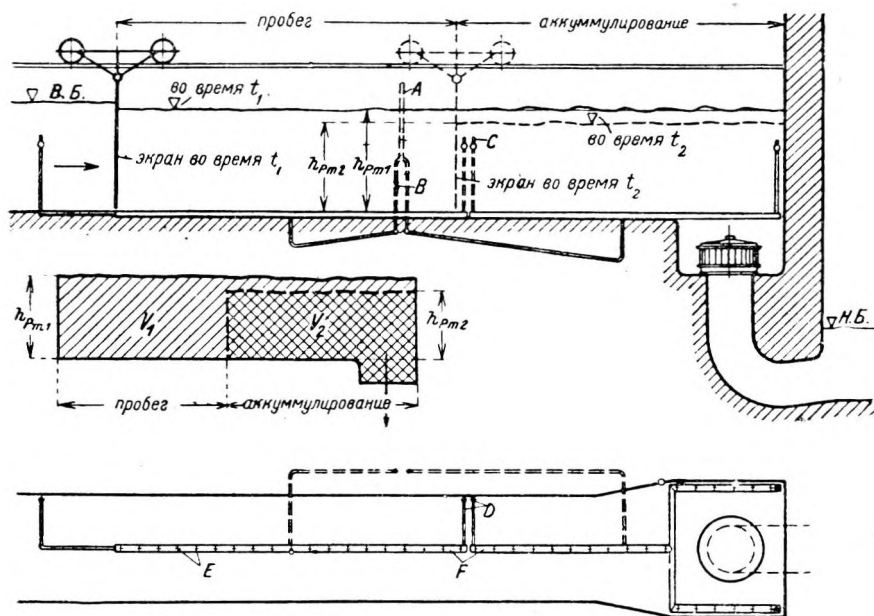


Рис. 143. Схема усовершенствованного устройства с подвижным экраном (по Вагенбаху и Краузе).

*A*—стояк с медной иглой; *B*—кран; *C* и *D*—воздушные клапаны; *E*—трубки-щупальцы; *F*—трубки-гасители колебаний.

Поэтому является недостаточным установить по уравнению (50) изменение объема воды позади экрана. Необходимо установить изменение объема воды между экраном и турбиной. Пусть  $Q_a$  — расход воды, стекающий через турбину, и  $Q_s$  — расход, теряемый через зазоры, тогда уравнение объемных величин имеет вид.

$$(Q_a - Q_s) (t_2 - t_1) = V_1 - V_2, \quad (51)$$

где  $V_1$  — объем воды между экраном и турбиной в момент  $t_1$  и  $V_2$  — в момент  $t_2$ .

$V_1$  и  $V_2$  принято выражать как объемы воды в водотоке при данных его размерах и в функции от уровня воды  $h_p$ . Пусть уровень воды между экраном и турбиной в момент  $t_1$  составляет  $h_{p,m,1}$  и в момент  $t_2$  —  $h_{p,m,2}$ , тогда

$$Q_a - Q_s = \frac{V_1 - V_2}{t_2 - t_1} = \frac{f(h_{p,m,1}) - f(h_{p,m,2})}{\Delta t}. \quad (52)$$

Так как при этом способе сопротивление движению не оказывает влияния на точность измерения, можно при помощи резиновой прокладки почти полностью исключить потери через зазоры  $Q_s$ , считать  $Q_s = 0$  и

$$Q_a = \frac{f(h_{p,m,1}) - f(h_{p,m,2})}{\Delta t}. \quad (53)$$

Коэффициент полезного действия этого способа зависит прежде всего от определения  $h_{p,m}$ . Уровень  $h_{p,m}$  может быть определен достаточно точно только как средний на участке пробега и соответственно на участке аккумуля-

лирования (Speicherstrecke), включая аванкамеру турбины, помощью сети труб—гасителей колебаний, снабженных капиллярными трубками—щупальцами или щелями. Гасители соединяются с широкими стойками, в которых и производится измерение уровня  $h_{p,m}$  при помощи мерных игл.

Экранные устройства, которые пользуются подобным способом точного установления положения уровня поверхности воды и дают очень незначительные потери воды через зазоры (меньше  $0,2$  л/сек), могут повысить точность измерения по сравнению с описанной выше обыкновенной установкой на  $\pm 0,2\%$ .

## 8. Определение расхода воды при помощи плавущего соляного- раствора

Определение расхода воды при помощи плавущего соляного раствора, или химический скоростной способ, основано на наблюдении, что соляной раствор, введенный в трубопровод или в открытый водоток в виде своего

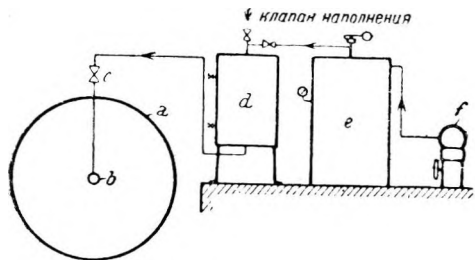


Рис. 149. Схема оборудования для химического скоростного способа.

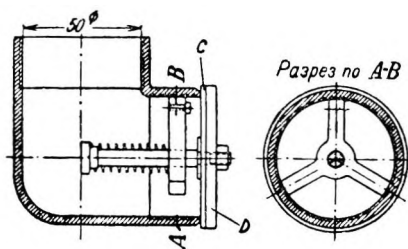


Рис. 150. Впускной клапан для соляного раствора.

C—резиновая прокладка; D—металлическая пластинка.

рода соляного облака, принимает, подобно поплавку, скорость течения водной струи и движется со средней скоростью течения воды, если соляное облако, подобно описанному выше подвижному экрану, распространяется на все живое сечение.

При этом для измерения используется то обстоятельство, что электрическая проводимость соляных растворов больше электрической проводимости воды. Прохождение соляного облака регистрируется при помощи погружаемых в воду электродов; на основании этих данных и определяется средняя скорость течения. Этот способ был развит Алленом и Тэйлором в 1923 г. и вскоре проник в Европу.<sup>1</sup> Он был применяем вначале только для измерений скоростей в трубопроводах, однако ничто не стоит на пути его применения и в открытых водотоках.

Данный способ требует для своего проведения довольно больших приспособлений, которые с технической стороны должны быть выполнены безукоризненно, так как только тогда можно получить достаточно точные результаты.<sup>2</sup>

Устройства для впуска соляного раствора в воду состоят (рис. 149) из компрессора  $f$ , который, при посредстве включенного в промежутке резервуара с сжатым воздухом  $e$ , выбрасывает соляной раствор из резервуара  $d$  через впускной клапан  $b$  в напорный трубопровод  $a$  или в открытый водоток. Впуск раствора производится отдельными залпами примерно по  $30$  л в каждом, при продолжительности впуска в  $1-2$  сек. Этот процесс регулируется посредством быстродействующей задвижки  $c$  и впускного клапана. Впускной клапан представляет собой плоский тарельчатый клапан на пружине (рис. 150), имеющий назначение осуществлять равномерное распре-

<sup>1</sup> C. M. Allen and E. A. Taylor. The salt velocity method of water measurement. Transactions of the American Society of Mechanical Engineers, 1923.

<sup>2</sup> O. Kirschmer. Vergleichs-Wassermessungen am Walchenseewerk. Z. d. V. d. I., № 44, 1930.



ление соляного раствора по всему живому сечению. При очень больших поперечных сечениях должны употребляться несколько впускных клапанов.

Электроды состоят из коротких медных листов, изолированных друг от друга прокладками из вулканита (рис. 151) или же им придают форму грей-

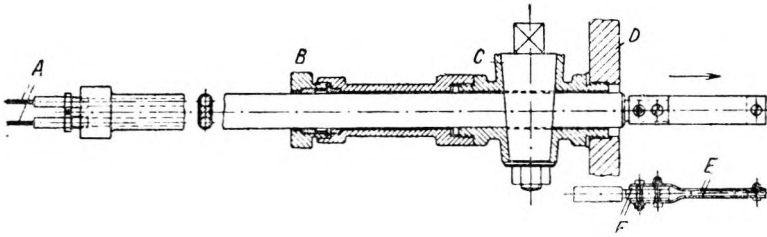


Рис. 151. Электроды.

*A*—контакты; *B*—сальник с краном; *C*—кран с винтовой нарезкой; *D*—стенки водопровода; *E*—медные пластинки; *F*—полоски вулканита.

фера, чтобы иметь возможность охватить большую часть живого сечения. В трубопровод они вводятся через специально просверленные отверстия: (рис. 152, *a*), а в открытых водотоках просто погружаются в воду.

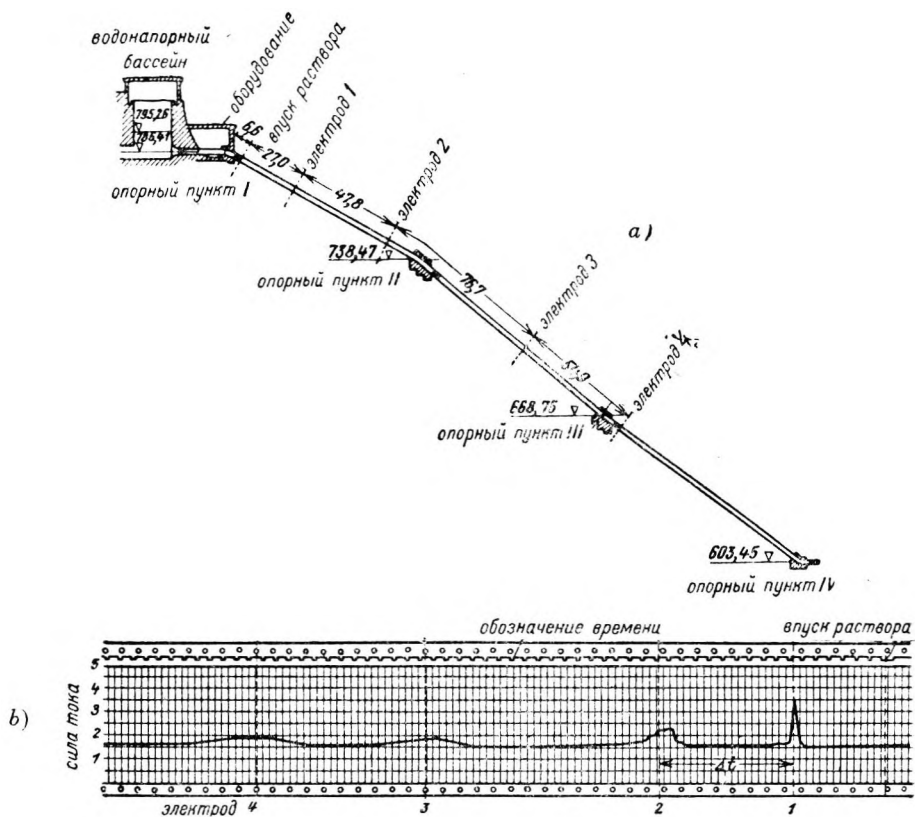


Рис. 152. Определение расхода воды с помощью соляного раствора.

*a*—участок измерения; *b*—изменение во времени силы тока на участке электродов 1—4.

Отдельные пары электродов питаются электрическим током; изменения силы тока при прохождении соляного облака регистрируются самопишущим амперметром.

Данные одной такой записи (рис. 152, *b*) позволяют судить, что характер изменения электропроводности в нескольких последовательно располо-

женных По длине водотока пунктах выражается графически колебаниями, обнаруживающими убывание по высоте и расплывание во времени. По этой причине время пробега, в течение которого соляное облако доходит от верхней пары электродов до нижней, определяется по горизонтальному расстоянию  $\Delta l$  между центрами тяжести выпуклостей на графике (рис. 152, б).<sup>1</sup> Если объем воды в водотоке на участке между двумя электродами составляет  $V$ , то расход воды выражается через  $Q = V/\Delta t$ .

Согласно тем немногим данным, которые до сих пор получены, для достижения хороших результатов измерения необходимо применять измерение электродами в нескольких пунктах и при обработке исключать участки, оказывающиеся неудовлетворительными. Место выпуска раствора следует устраивать возможно дальше от первого пункта измерения. Надо особенно тщательно подходить к определению объема трубы  $V$  и учитывать разницу в размерах отдельных звеньев.

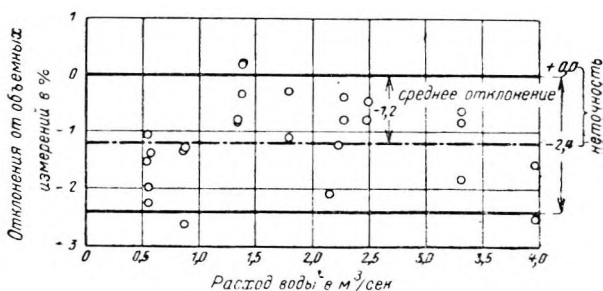


Рис. 153. Сравнение измерений по химическому скоростному способу с объемными.

Как на недостаток

этого способа надо указать на потребность в большом оборудовании и в многочисленном обслуживающем персонале. За то преимуществами его являются широкая применимость и то, что он не вызывает потерь в напоре или уклоне и не требует тарировки.

Для оценки точности измерений, достигаемой при этом способе, на рис. 153 изображены результаты измерений, проведенных в Исследовательском институте гидротехники и гидроэнергетики в Валхензе в 1930 г. Эти измерения контролировались измерениями объемным способом. На основании этих данных получается среднее отклонение в  $-1,2\%$  при наибольших отклонениях от среднего в  $+1,2\%$ , так что следует считаться с возможной неточностью измерений в пределах от  $+0,0\%$  до  $-2,4\%$ .

## 9. Определение расхода воды по увеличению напора

Этот способ впервые применен Гибсоном в 1921 г.<sup>2</sup> В трубопроводе во время закрытия какого-либо затвора, например направляющего аппарата турбины, вследствие заторможения движущейся массы воды происходит возрастание напора, по величине которого можно судить о величине расхода воды, протекавшей по трубопроводу перед закрытием затвора. На этом основан способ Гибсона. Повышение напора регистрируется специальным самописцем, который для достижения большей точности должен работать при наименьшем возможном трении и быть весьма чувствительным.<sup>3</sup>

По напорному трубопроводу, примерно, одинакового по длине его диаметра  $D$ , присоединяемому к больших размеров резервуару, протекает вода

<sup>1</sup> P. de Haller. Considerations théoriques sur la mesure des débits d'eau par la méthode d'Allen. Helvetica Physica Acta, Basel 1930; E. Müller. Die Salzgeschwindigkeitsmethode von Allen zur Wassermessung in Rohrleitungen. Schweizerische Bauzeitung, № 4, 1926.

<sup>2</sup> N. R. Gibson. The Gibson method and apparatus for measuring the flow of water in closed conduits. Trans. Am. Soc. Mech. Eng., 1923.

<sup>3</sup> D. Thoma. Über den Genauigkeitsgrad dez Gibsonschen Messverfahrens. Mitteilungen des Hydr. Inst. der Techn. Hochschule München, H. 1. 1926.

при установившемся движении со средней скоростью  $u_{m,0}$  (рис. 154). После торможения турбины скорость падает до  $u_m$ , а по закрытии ее, соответственно потерям на утечку в направляющем аппарате турбины, до  $u_{m,1}$ . Во время процесса измерения напор в створном сечении  $C$  составляет  $p_C$  перед входом в  $A$ ,  $p_A$  и непосредственно за входом в  $B$ ,  $p_B$ . В расчете, приво-

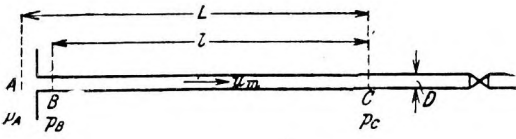


Рис. 154.

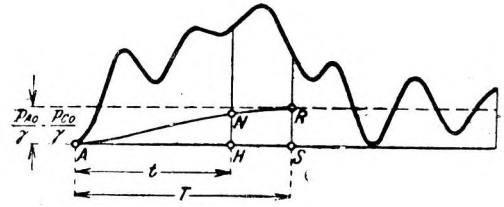


Рис. 155.

димом ниже, пренебрегается действием силы тяжести и упругости, а также трением.

Тогда, учитывая превышения ускорения, вследствие перемещения частиц между  $A$  и  $B$ , можно написать:

$$p_A - p_B = \gamma \frac{u_m^2}{2g}. \quad (54)$$

Применение основного закона динамики дает для участка  $B-C$  выражение:

$$\frac{D^2\pi}{4} (p_B - p_C) = \gamma l \frac{D^2\pi}{4g} \cdot \frac{du_m}{dt}. \quad (55)$$

Следует учесть то обстоятельство, что на участке  $A-B$  изменение расхода воды все же оказывает некоторое влияние, увеличивая расчетную длину  $l$  до  $L$ .

Совместное рассмотрение уравнений (54) и (55) приводит к выражению:

$$\frac{p_A - p_B}{\gamma} - \frac{u_m^2}{2g} = \frac{L}{g} \cdot \frac{du_m}{dt}$$

и

$$\left( \frac{p_A - p_C}{\gamma} - \frac{u_m^2}{2g} \right) dt = \frac{L}{g} du_m. \quad (56)$$

Из этого уравнения, принимая во внимание графическое изображение изменения напора на рис. 155, можно наметить следующий путь графического интегрирования.

По истечении времени закрытия  $T$  колебания напора становятся затухающими, и изображенная линия напора после окончательного затухания колебаний приходит в положение гидростатического напора. Согласно этому

$\overline{RS} = \frac{p_{A,0} - p_{C,0}}{\gamma}$ , то есть разности давления в точках  $A$  и  $C$  при установившемся состоянии движения.

Для любого момента времени  $t$ , в который в трубопроводе имеет место скорость  $u_m$ ,  $\frac{p_A - p_C}{\gamma} - \frac{u_m^2}{2g} = h$  принимает значение, получающееся из уравнения (56). Необходимо, следовательно, на графике напора провести линию  $ANR$  таким образом, чтобы ордината  $HN$  точки  $N$  удовлетворяла следующему уравнению:

$$\frac{\overline{RS}}{HN} = \frac{\frac{u_{m,0}^2}{2g}}{\frac{u_{m,0}^2}{2g} - \frac{u_m^2}{2g}} = \frac{u_{m,0}^2}{u_{m,0}^2 - u_m^2}. \quad (57)$$

Так как

$$\int_0^t \left( \frac{P_A - P_C}{\gamma} - \frac{u_m^2}{2g} \right) dt = \int_0^t h dt = \frac{L}{g} (u_{m,0} - u_m),$$

то, если обозначить

$$\int_0^t h dt = F_t \text{ и } \int_0^T h dt = F_T, \quad (58)$$

получается

$$\frac{F_t}{F_T} = \frac{u_{m,0} - u_m}{u_{m,0}}$$

и окончательно:

$$\overline{HN} = \overline{RS} \left( 1 - \frac{u_m^2}{u_{m,0}^2} \right) = \overline{RS} \left[ 1 - \left( 1 - \frac{F_t}{F_T} \right)^2 \right]. \quad (59)$$

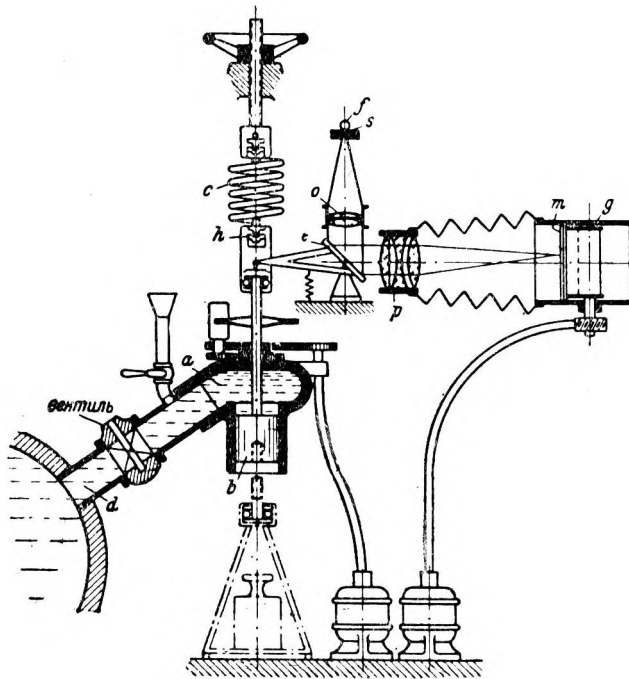


Рис. 156. Самопишущий прибор для регистрации напоров по Тома.

Построение кривой торможения или дроссельной кривой  $ANR$  может производиться только путем постепенного приближения. Когда она установлена с достаточной определенностью, получают, что

$$Q = \frac{\pi D^2}{4} u_{m,0} = \frac{\pi D^2}{4} \cdot \frac{g F_T}{L}. \quad (60)$$

Тома (D. Thoma) производил точные исследования, которые охватили влияние боковых течений в том виде, как они наблюдаются при турбулентных движениях, неправильную оценку трения, а также конструкцию само-

пишущего прибора для записи давления. Исследования Тома показали, что боковые течения могут вызывать ошибки порядка +1 % и трение — ошибки порядка — 1%.

Что касается прибора для записи давления, то Тома дал конструкцию его (рис. 156), которая по точности превосходит аппарат Гибсона, работающий по принципу ртутного манометра.<sup>1</sup> Небольшие передвижения измерительного поршня *b*, вызываемые колебаниями напора, передаются чувствительным рычагом на вращающееся зеркало *e*. Чтобы свести трение поршня к минимуму, он во время измерения вращается. Движения вращающегося зеркала *e* переносятся отраженными лучами на экран *g*, где получается соответствующий график (см. рис. 155).

Способ Гибсона часто применяется в Америке, а именно при приемочных испытаниях на гидростанциях. Сравнительные измерения с другими способами показали, что точность его почти равна точности вертушечных измерений, произведенных вертушками хорошего качества.

## 10. Определение расхода воды при помощи смешения с соляным раствором

Определение расхода воды при помощи смешения с соляным раствором относится к группе способов смешения, согласно которым о величине расхода воды заключают по степени насыщения смеси текучей жидкости непрерывно подводимым к ней в известном неизменном количестве раствором какого-либо химического вещества. Здесь отпадает, следовательно, надобность в измерении поперечного сечения, а также является несущественным и косое направление течения. Таким образом исключаются два немаловажных источника ошибок.

Этот способ, называемый также химическим или способом титрования, в первый раз упоминается еще в 1863 г. Для измерений в речных руслах он получил распространение после работ Буше и Мелле.<sup>2</sup>

Отрицательное отношение к этому способу вначале находило себе объяснение в том, что благодаря наблюдавшемуся возрастанию точности вертушечных измерений, не было потребности во введении новых неизвестных способов. Однако, в виду того что при сильно турбулентном движении точность определения расхода воды способом смешения возрастает (в противоположность вертушечному измерению), этот способ в настоящее время рассматривается как целесообразный и дополняющий вертушечный способ. В частности, он часто применяется для определения расходов воды в бурных потоках.<sup>3</sup>

**Основы способа смешения.** В текучую воду вводят легко растворимые соли, выбираемые с таким расчетом, чтобы степень насыщения ими воды определялась простым способом.<sup>4</sup> Для определения расходов воды больше всего подходит поваренная соль. Степень насыщения *c* устанавливается по числу граммов поваренной соли в 1 м<sup>3</sup> воды.

Если вода в потоке (в естественном состоянии) содержит соль со степенью насыщения *c*<sub>0</sub>, в поток вводится соляной раствор со степенью насыщения *c*<sub>1</sub> и после окончательного смешения степень насыщения равняется *c*<sub>2</sub>,

<sup>1</sup> H. F. C a n a n. Wassermessungen bei Grosskraftanlagen. München 1930.

<sup>2</sup> A. B o u c h e r e t R. M e l l e t. Jaugeages par titrations. Bull. techn. de la Suisse romane, № 11, 1910.

<sup>3</sup> Практические указания к этому способу дает O. K i r s c h m e r. Das Salzverdünnungsverfahren für Wassermessungen. Wasserkraft u. Wasserwirtschaft, H. 18, München 1931.

<sup>4</sup> Наряду с поваренной солью употребляются дитионовокислый натрий и хлористый магний. Вместо соли можно бы прибавлять красящие вещества, как флуоресцин или эозин, и определять концентрацию их с помощью флуороскопа или колориметра.

то так как вес введенной в поток соли в месте впуска должен быть равен весу соли в потоке в месте взятия проб, является справедливым выражение:

$$Qc_0 + qc_1 = (Q + q)c_2$$

и

$$Q = q \frac{c_1 - c_2}{c_2 - c_0}, \quad (61)$$

где  $Q$  — расход воды и  $q$  — секундный расход раствора, вводимого в поток.

Так как  $c_2$  по сравнению с  $c_1$  обычно весьма невелико, а  $c_0$  по сравнению с  $c_2$  можно пренебречь, получается приближенная зависимость:

$$Q = q \frac{c_1}{c_2}. \quad (62)$$

Однако при сильном разбавлении раствора пренебрегать  $c_0$  нельзя.  $c_2$ , как правило, получается как средняя арифметическая степеней насыщения отдельных проб. Замечено, что при отклонениях отдельных значений степеней насыщения от их средней величины даже до 20% ошибка в расходе воды получается меньше 1%.

Если является желательным учесть неравномерность перемешивания в живом сечении в месте взятия проб, следует разбить живое сечение на отдельные отсеки и брать пробы по середине отсеков. Если в подобном отсеке, величиною  $\Delta F$  степень насыщения равняется  $c_F$  и средняя скорость течения, измеренная вертушкой,  $u_F$ , тогда для всего живого сечения  $A$  является действительным:

$$\Sigma (c_F u_F \Delta F) = (Q + q)c_2,$$

и так как

$$Q + q = \Sigma (u_F \Delta F),$$

то получается, что

$$\Sigma (c_F u_F \Delta F) = c_2 \Sigma (u_F \Delta F),$$

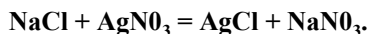
а отсюда

$$c_2 = \frac{\Sigma (c_F u_F \Delta F)}{\Sigma (u_F \Delta F)}. \quad (63)$$

Если выбрать отсеки  $\Delta F$  одинаковыми по величине, то получится, что

$$c_2 = \frac{\Sigma c_F u_F}{\Sigma u_F}. \quad (64)$$

Для вычисления  $Q$  необходимо знать степени насыщения  $c_0$ ,  $c_1$  и  $c_2$  или их отношения. Степени насыщения определяются из взятых из потока проб воды в естественном и смешанном состоянии и из проб вводимого в поток раствора. Пробы подвергают обработке по способу титрования Мора (Mohr). При этом узнают содержание  $\text{NaCl}$  в соляном растворе, выделяя  $\text{Cl}$  путем прибавления  $\text{AgNO}_3$  — азотнокислого серебра в качестве титра по формуле:



Для точности всего способа является существенным уметь определять момент, когда в испытываемом соляном растворе не остается больше  $\text{NaCl}$ . Такое определение производится при помощи добавления  $\text{K}_2\text{CrO}_4$  — двуххромокислого калия в качестве индикатора.

Образовавшееся  $\text{AgCl}$ —хлористое серебро представляет собой белый, нерастворимый в воде осадок, тогда как возникающее после выделения  $\text{NaCl}$ ,  $\text{Ag}_2\text{CrO}_4$ —хромокислое серебро, образующееся в результате реакции  $2\text{AgNO}_3 + \text{K}_2\text{CrO}_4 = \text{Ag}_2\text{CrO}_4 + 2\text{KNO}_3$ , окрашивает раствор в красный цвет, так что окончание реакции можно установить по красновато-желтой окраске, которую называют изменением цвета. Наступление изменения цвета может определяться при некотором навыке с достаточной точностью и почти независимо от субъективного восприятия производящего опыт лица.

При определении концентрации раствора разбавляют пробу вводимого в поток соляного раствора известным количеством дистиллированной воды; наоборот, пробу, взятую из потока после перемешивания, выпаривают настолько, чтобы степень насыщения обоих растворов была приблизительно одинакова. Затем титруют, прибавляя раствор  $\text{AgNO}_3$  в количестве 2 г на 1 л воды. Работают всегда с равными объемами, лучше всего по 5 см<sup>3</sup> разбавленного и выпаренного растворов. В качестве индикатора употребляют 5 капель насыщенного раствора  $\text{K}_2\text{CrO}_4$ .

Если взятые пробы содержат взвешенные наносы и вследствие этого отличаются мутностью, можно профильтровать их перед выпариванием, так как иначе изменение цвета будет неясным.

Так как расход воды  $Q$  вычисляется из уравнения, которое содержит только отношение степеней насыщения, достаточно установить в кубических сантиметрах расход титра, который необходим до наступления изменения цвета проб. Это можно сделать при помощи градуированной трубки для измерения жидкостей, так называемой бюреты.

Вместо способа Мора можно применять способ Волхарда (Volhard), который представляет то преимущество, что допускает при излишнем титровании обратное титрование. Обратное титрование производится при помощи  $\text{NH}_4\text{CNS}$ —роданистого аммония. В качестве индикатора в этом случае следует применять  $\text{FeNH}_4(\text{SO}_4)_2$ —ферро-аммониевые квасцы, обуславливающие своим присутствием изменение цвета с желтовато-зеленого на красный.

Чтобы освободиться от наблюдения за изменением цвета, можно применять для определения содержания соли также электрометрический метод или метод потенциала. По этому способу конец титрования определяется прыжком потенциала, тем более резко выраженным, чем крепче растворы.

Вообще говоря, возможны также способы, основанные на электропроводимости или же чисто оптические, предполагающие сравнительное определение коэффициентов преломления. Однако применимость на практике ни для одного из этих способов еще не доказана.

**Производство определения расхода воды способом смешения.** Раствор постоянной степени насыщения должен вводиться в открытый поток или в напорный трубопровод гидроустановки выше такого места, где обеспечено хорошее перемешивание; в ручьях, следовательно, выше участков с бурным, вихревым движением, а у гидроустановок—выше расположения турбин. Надо строго следить за тем, чтобы на участке потока между местом впуска и взятия проб не образовывались, как следствие водоворотов или ледовых образований, мертвые пространства, так как последние оказывают влияние на степень концентрации проб. Чтобы поддерживать количество вводимого в поток раствора постоянным, пользуются специальными устройствами.

При измерениях на бурных потоках с этой целью применяют легко переносимый впускной аппарат, основанный на принципе бутылки Мариотта (der Mariotteschen Flasche), объемом от 100 до 200 л, которому придается несколько различных насадок, чтобы иметь возможность регулировать в известных пределах выпускаемый расход воды (рис. 157). Расход воды из аппарата определяется формулой:

$$Q = \mu \sqrt{2gh} \frac{d^2\pi}{4}, \quad (65)$$

где  $\eta$ —коэффициент расхода для примененной насадки и  $h$ —расстояние нижнего конца воздушной трубки от насадки. Расход постояен, пока не меняется положение воздушной трубки. Коэффициент расхода надо устанавливать в условиях, когда аппарат наполнен раствором.

Для измерений при приемочных испытаниях гидроустановок применяют для введения раствора устройство, изображенное на рис. 158.

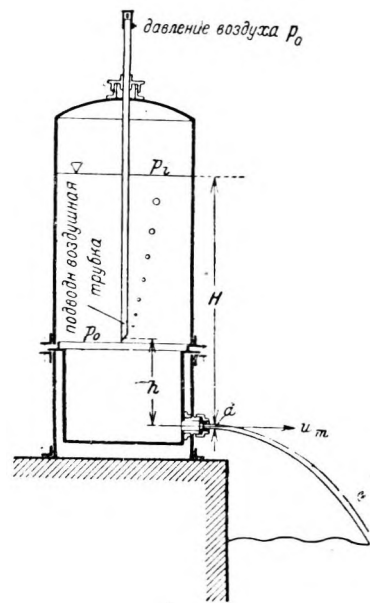


Рис. 157. Переносный аппарат, применяемый при способе смешения, по Киршмеру.

резервуар. Употребляемый для измерения раствор направляется в измеряемый поток через трубку в дне переливного сосуда. На конце трубки находится насадка. Раствор вытекает свободной струей или поступает в поток через трубчатый распределитель с многочисленными отверстиями. При поступлении раствора в распределитель не должно образовываться пены; это достигается закладкой частых сит в воронку входного отверстия. Количество введенного раствора регулируется при помощи насадок с различной величины отверстиями.

Место взятия проб следует выбирать таким образом, чтобы перемешивание было гарантировано. Это устанавливается посредством простых опытов с окрашиванием. У гидроустановок пробы следует брать в нижнем бьефе. Пробы следует брать либо в нескольких местах по живому сечению стеклянными бутылками или бутылками из алюминиевой жести, захватывая не менее чем по 0,5 л в каждом месте, либо несколько раз проводя бутылками по живому сечению. Бутылки перед взятием проб следует хорошенько выполоскать водою из исследуемого водотока, смешанной с раствором.

**Точность определения расхода способом смешения.** Для оценки точности способа смешения имеются сравнительные измерения, произведенные объемным способом, а также вертушечные измерения. Первые измерения

Раствор, приготовленный в смеси с водою из исследуемого потока, течет из запасного резервуара в переливной сосуд, одетый в узкий кожух. Переливающаяся жидкость направляется в собирательный резервуар, откуда она может быть вновь перекачена в запасный

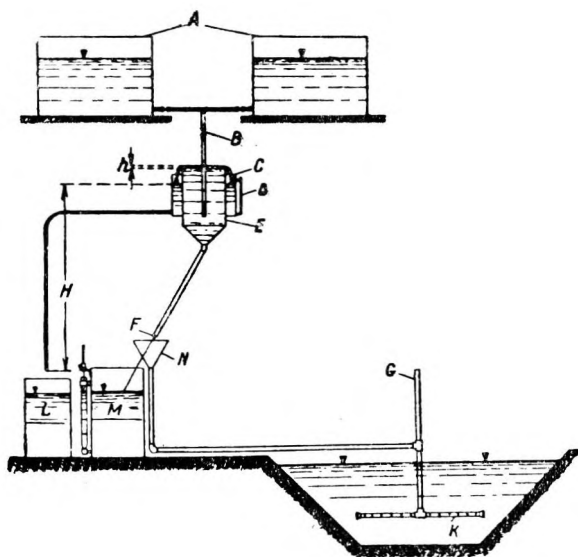


Рис. 158. Оборудование для измерения и выпуска соляного раствора, по Киршмеру.

*A*—запасный резервуар; *B*—регулирующий клапан; *C*—кожух; *D*—вертикальный сосуд; *E*—переливной сосуд; *F*—измерительная насадка; *G*—воздушная трубка; *K*—распределитель; *L*—собирательный сосуд; *M*—тарировочный сосуд; *N*—поворачивающаяся воронка.



были произведены у гидроустановки в Амстеге в 1922 г.<sup>1</sup> и в Исследовательском институте гидротехники и гидроэнергетики на Валхензе; последние на различных гидроустановках и, в частности, на горных потоках в области Таурских гор.

Непосредственные сопоставления с данными объемных измерений позволяют установить, что для способа смешения (при благоприятных условиях измерения) следует считаться со средней ошибкой +0,1% при крайних отклонениях от средней ошибки +1,3%, следовательно с погрешностью в пределах +1,4% и -1,2% (рис. 159).

Сравнения с вертушечными измерениями обнаруживают настолько хорошее совпадение, что способ смешения является, по меньшей мере, равно-

ценным вертушечному, точечному методу наблюдений, если даже не превосходит его. Однако надо добавить, что область применения способа смешения ограничена, так как при более значительных расходах воды, следовательно для крупных потоков, равномерное перемешивание в живом сечении вряд ли достижимо. Но вообще это уже и не так существенно, поскольку для больших расходов

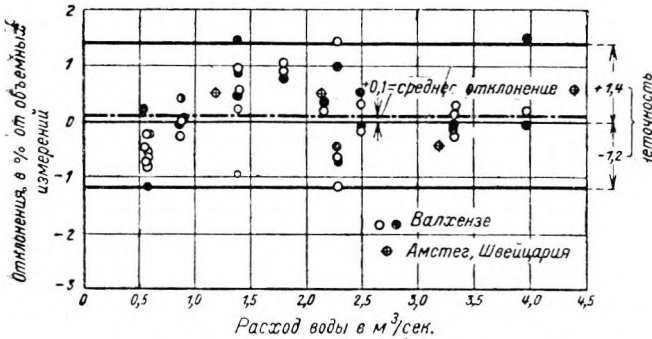


Рис. 159. Сравнение способа смешения с объемным способом.

воды вертушечные измерения представляют самый целесообразный способ определения расхода воды и, следовательно, при правильном применении обоих способов—способа смешения и вертушечного способа—можно удовлетворять почти всем встречающимся на практике запросам.

## 11. Определение расхода воды при помощи водослива

Высота переливающегося слоя служит мерой переливающегося расхода воды.<sup>2</sup> Водосливы строятся в открытых потоках поперек течения. Для точных измерений идут в расчет только незатопленные водосливы (с полным перепадом), так как при затоплении струи низовой уровень влияет на верховой, что вызывает колебания поверхности воды в верхнем бьефе и сказывается на точности измерений. Кроме того, должен быть обеспечен подвод воздуха под струю, то есть повсюду струя должна находиться под равным давлением воздуха, чтобы колебания избыточного давления не изменяли переливающегося расхода воды и этим не вызывались ошибки при измерении.

Водослив, при большой точности выполнения, должен быть сооружением, которое можно построить простейшим образом. Вместе с тем должна быть предусмотрена возможность его дальнейшего усовершенствования. В естественных условиях он должен применяться при тех же предпосылках, при каких тарировался. В этом отношении особое внимание следует обращать на подвод воздуха под струю, на встречающийся в отдельных случаях намыв каменистых частиц перед сооружением и на поддержание постоянной ширины потока в верхнем бьефе.

Этим условиям, как свидетельствует многолетний опыт, лучше всего отвечают водосливы с острым ребром, с вертикальной тонкой стенкой,

<sup>1</sup> F. K u n t s c h e n . Essais comperatifs dans les canaux de fuite de l'usine d'Amsteg. Mitteilungen des Amtes für Wasserwirtschaft, № 18, Bern 1926.

<sup>2</sup> G. P o l e n i . De motu aquae mixto. Padua 1717.

в которой вырез для перелива струи имеет простую геометрическую форму. Делались предложения применять водосливы косые с острым ребром или с закругленным по окружности гребнем, однако водосливы подобных форм пока не получили распространения.

Для измерений второстепенного характера, при которых можно удовлетвориться меньшей точностью, может применяться любая форма (как сооружения в целом, так и гребня), надо только помнить, что при этом обычно отсутствует тарировка формы и поэтому должна бы производиться тарировка в естественных условиях при помощи вертушки.<sup>1</sup>

**Основы способа измерения при помощи водослива.** Расход воды  $Q$  через водослив, ширину  $b$  при высоте слоя переливающейся воды (напоре

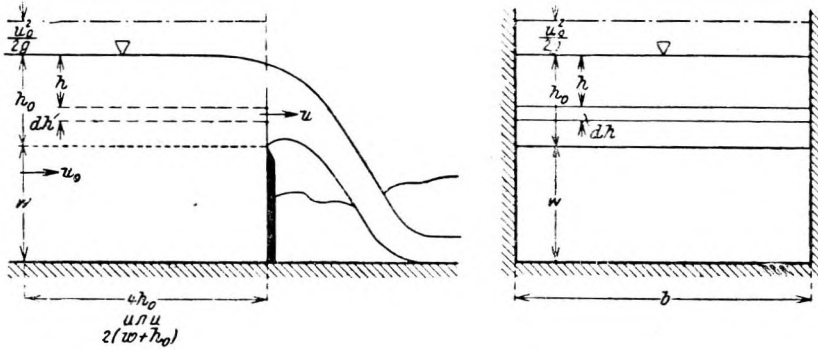


Рис 160. Водослив Ребока. Полный перепад (незаопленный, с подводом воздуха под струю), без бокового сжатия; прямоугольная, вертикальная тонкая стенка с острым ребром.

на водосливе)  $h_0$  и скорости подхода воды  $u_0$ , в общем случае выражается формулой (рис. 160):

$$Q = \int_0^{h_0} dQ,$$

и так как

$$dQ = \mu_0 b dh \sqrt{2g \left( h + \frac{u_0^2}{2g} \right)},$$

то далее получается, что

$$Q = \mu_0 b \sqrt{2g} \int_0^{h_0} \sqrt{h + \frac{u_0^2}{2g}} dh = \frac{2}{3} \mu_0 b \sqrt{2g} \left[ \left( h_0 + \frac{u_0^2}{2g} \right)^{\frac{3}{2}} - \left( \frac{u_0^2}{2g} \right)^{\frac{3}{2}} \right]. \quad (66)$$

Это уравнение для практических целей может быть упрощено. Для этого пренебрегают скоростным напором  $u_0^2/2g$  в скобках и исправляют коэффициент расхода  $\mu_0$  на  $\mu$ .

Тогда получается, что <sup>2</sup>

$$Q = \frac{2}{3} \mu b \sqrt{2g} h_0^{\frac{3}{2}} = 2,953 \mu b h_0^{\frac{3}{2}},$$

<sup>1</sup> Пробовали математически определять различные формы гребней различно расположенными эллипсами и затем устанавливали опытным путем коэффициенты перелива  $\mu$  подобных форм. См. Е. Крамер. Der Abfluss des Wassers über Wehre mit lotrechten Wandungen und halbkreisförmiger Krone. Dissertation, Karlsruhe 1914.

<sup>2</sup> D u b u a t. Principes d'hydrauliques et d'hydrodynamique. Paris 1779.

причем окончательное значение коэффициента расхода  $\mu$ , который зависит от формы выреза в стенке и от формы гребня водослива, а также от отношения ширины потока перед водосливом к ширине переливающегося слоя и от наклона и высоты сооружения,—должно быть определено посредством тарировки.

Высота переливающегося слоя  $h_0$  должна измеряться в том живом сечении, где еще наблюдается параллельно-струйное течение. Как свидетельствует опыт, это имеет место на расстоянии  $4h_0$  или  $2(w+h_0)$  от водослива.

Для ряда водосливных форм простых очертаний коэффициент расхода надежно установлен многократными контрольными тарировками, и для гидрометрических целей эти коэффициенты могут быть непосредственно использованы.

1. Полный перепад без бокового сжатия струи, прямоугольная, вертикальная, тонкая стенка и острое ребро, называемый также водосливом Ребока (рис. 160).

Если высота стенки водослива  $w$  и высота переливающегося слоя  $h_0$  в метрах, то получается:

1) По Фрезе <sup>1</sup>:

$$\mu = \left(0,615 + \frac{2,1}{1000h_0}\right) \left[1 + 0,55 \left(\frac{h_0}{h_0 + w}\right)^2\right], \quad (68)$$

действительный при  $0,1 \text{ м} < h < 0,6 \text{ м}$ .

2) Согласно норм Швейцарского союза инженеров и архитекторов: <sup>2</sup>

$$\mu = 0,615 \left(1 + \frac{1}{1000h_0 + 1,6}\right) \left[1 + 0,5 \left(\frac{h_0}{h_0 + w}\right)^2\right], \quad (69)$$

действительный при  $w \geq 0,3 \text{ м}$ ,  $\frac{h_0}{w} \leq 1$  и  $0,025 \text{ м} \leq h_0 \leq 0,8 \text{ м}$ .

3) По Ребоку: <sup>3</sup>

$$\mu = 0,605 + \frac{1}{1000h_0} + 0,08 \frac{h_0}{w}, \quad (70)$$

действительный для  $0,02 \text{ м} < h_0 < 0,3 \text{ м}$ .

Заменяя высоту переливающегося слоя  $h_0$  через  $h_e = h_0 + 0,0011 \text{ м}$ , каковую величину можно непосредственно отсчитывать по шкале делений в месте измерения при условии, что нуль шкалы будет расположен на  $1,1 \text{ мм}$  ниже ребра водослива, можно написать, что

$$\mu = 0,6035 + 0,0813 \frac{h_e}{w}, \quad (71)$$

и тогда основное уравнение водослива примет выражение:

$$Q = \frac{2}{3} \mu b \sqrt{2g} h_e^{\frac{3}{2}}. \quad (72)$$

Благодаря этому преобразованию достигается то, что  $\mu$  теряет свою размерность, превращаясь в коэффициент, а при графическом изображении для каждой данной высоты стенки водослива  $w$  имеет место прямолинейная связь между  $\mu$  и  $h_e$ , что не лишено значения при обработке наблюдений.

<sup>1</sup> F. F r e s e . Versuche über den Abfluss von Wassermengen mittels Überfällen ohne Seitenkontraktion. Z. d. V. d. I., 1890.

<sup>2</sup> Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, Normen für Wassermessungen, 1924.

<sup>3</sup> Th. R e h b o c k . Wassermessungen mit scharfkantigen Überfallwehren. Z. d. Vereines D. I., № 24, 1929.

2 Полный перепад с боковым сжатием струи и прямоугольным вырезом в стенке, вертикальная, тонкая стенка с острым ребром, называемый также водосливом Понселе (рис. 161).

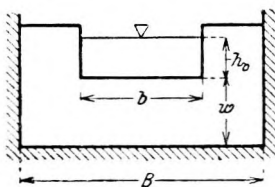


Рис. 161. Водослив Понселе.

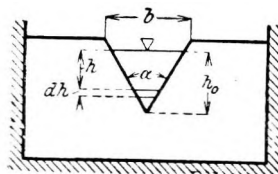


Рис. 162. Водослив Томсона.

Если  $w$  опять означает высоту стенки водослива,  $b$ —ширину переливающегося слоя,  $B$ —ширину потока в месте подхода к водосливу и  $h_0$ —высоту перелива в метрах, то имеем:

1) по Фрезе:

$$\mu = \left( 0,5755 + \frac{0,017}{h_0 + 0,18} - \frac{0,075}{b + 1,2} \right) \times \left\{ 1 + \left[ 0,25 \left( \frac{b}{B} \right)^2 + 0,25 + \frac{0,0375}{\left( \frac{h_0}{h_0 + w} \right)^2 + 0,02} \right] \left( \frac{h_0}{h_0 + w} \right)^2 \right\}. \quad (73)$$

2) по нормам Швейцарского союза инженеров и архитекторов:

$$\mu = \left\{ 0,578 + 0,037 \left( \frac{b}{B} \right)^2 + \frac{3,615 - 3 \left( \frac{b}{B} \right)^2}{1000 h_0 + 1,6} \right\} \left\{ 1 + 0,5 \left( \frac{b}{B} \right)^4 \left( \frac{h_0}{h_0 + w} \right)^2 \right\}, \quad (74)$$

действительное для  $w \geq 0,3$  м,  $\frac{25}{\left( \frac{b}{B} \right)} \leq h_0 \leq 0,8$  м,  $\frac{h}{w} \leq 1$ ,  $\frac{b}{B} > 0,3$ .

3. Полный перепад с боковым сжатием струи и трехугольной формы вырезом в стенке, вертикальная тонкая стенка с острым ребром, называемый также водосливом Томсона.

При малых напорах прямоугольные водосливы дают неточные данные, почему для малых расходов воды следует отдавать предпочтение трехугольным водосливам (рис. 162).<sup>1</sup> Для них справедливо следующее уравнение, в общем одноуровневое с полученным для прямоугольного водослива:

$$dQ = 2 \mu_0 (h_0 - h) \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} \left( h + \frac{u_0^2}{2g} \right)^{\frac{1}{2}} \sqrt{2g} dh.$$

Если и здесь учет влияния скорости подхода, а также размеров водослива, последует через замену коэффициента  $\mu_0$  коэффициентом  $\mu$ , то получается, что

$$Q = \frac{8}{15} \mu \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} \sqrt{2g} h_0^{\frac{5}{2}}. \quad (75)$$

Согласно Барру:<sup>2</sup>

$$\mu = 0,565 + 0,087 h_0^{-0,5}. \quad (76)$$

Влиянием ширины потока в месте подхода можно пренебрегать, если эта ширина больше восьмикратной высоты перелива.

<sup>1</sup> Предложены разного рода формы выреза в стенке водослива, а именно, составленные из дуг круга или из отрезков прямой и дуг круга и т. д. См. А. Stauss u. K. v. Sanden. Der kreisrunde Überfall u. seine Abarten. Das Gas- u. Wasserfach, 1926; А. Stauss. Der Beiwert kreisrunder Überfälle. Wasserkraft u. Wasserwirtschaft. H. 4. 1931.

<sup>2</sup> L. B a r r. Experiments upon the flow of water over triangular notches. Engineering, 1910.

**Производство определений расхода воды при помощи водослива и их точность.** Водосливы надлежит устраивать так, чтобы при наибольших встречающихся напорах имел место полный перепад, то есть водослив оставался незатопленным (рис. 163).<sup>1</sup>

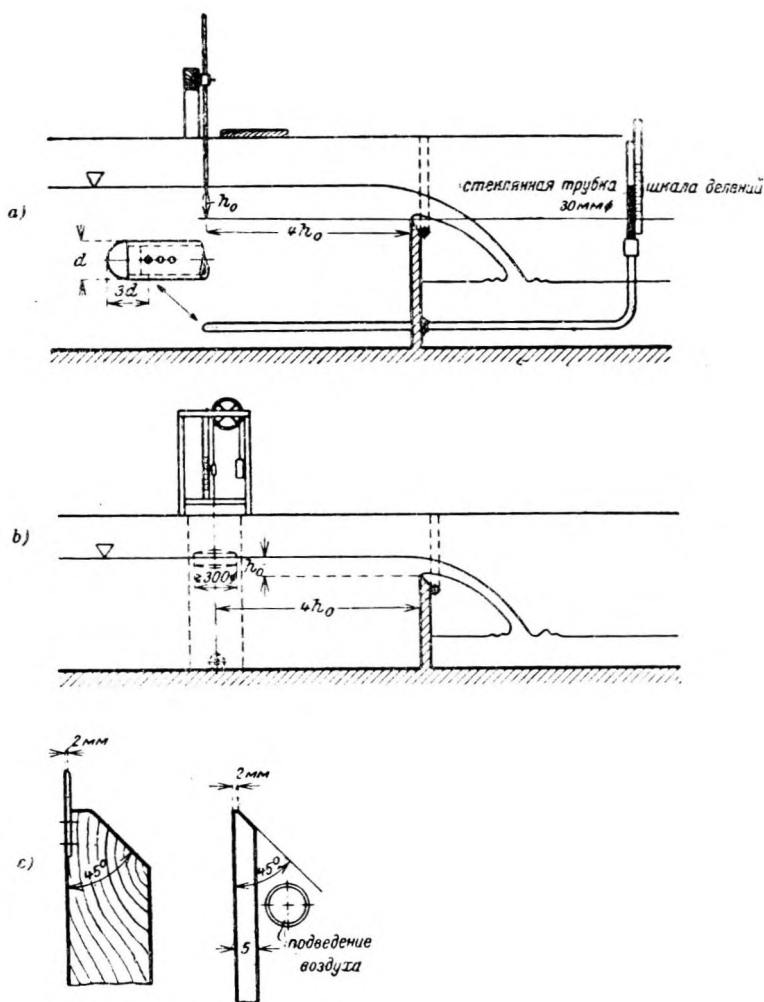


Рис. 163. Устройство мерных водосливов по швейцарским нормам.  
 а) измерение уровня мерной иглой и по мениску; б) измерение уровня поплавковым устройством; в) форма гребня водослива.

При переливах без бокового сжатия струи следует предусмотреть достаточный подвод воздуха в пространство под струю.

Водосливам с закругленными оголовками и плавно примыкающими к ним низовыми гранями следует придавать такие очертания, при которых не образовывалось бы отогнанного прыжка при сливе струи. Пример подобного водослива с удачными очертаниями граней дан на рис. 164.

Швейцарские нормы далее требуют, чтобы поток перед водосливом протекал совершенно прямолинейно на участке длиной, равной, по крайней мере, пятикратной величине наибольшего напора и, по крайней мере, полу-

<sup>1</sup> По нормам Швейцарского союза инженеров и архитекторов.

торной величине ширины переливающегося слоя. Стенки потока должны быть вертикальными, параллельными друг другу и располагаться в одной и той же плоскости до и после перепада.

Дно канала перед водосливом должно быть близким к горизонтальному на участке длиной, равной, по меньшей мере, четырехкратной величине наибольшего напора. Стенка перепада должна быть совершенно плоской и перпендикулярной к оси потока. У перепадов без бокового сжатия—стенки потока также должны быть совершенно плоскими. Ребро водослива должно отвечать форме, изображенной на рис. 163, с.

У перепадов с боковым сжатием середина прямоугольного выреза в стенке водослива должна совпадать с серединой потока. Перепад должен быть, следовательно, симметричным.

Перепады без бокового сжатия, вследствие более простых условий течения в них, во всех случаях предпочтительнее перепадов с боковым сжатием.

Подвод воды к руслу водослива должен производиться в осевом направлении; отступления от этого допустимы лишь тогда, когда устье подводящего русла расположено выше водослива, по меньшей мере, на десятикратную величину наибольшего напора и на четырехкратную величину ширины переливающегося слоя. Однако во всех таких случаях надо исследовать, движутся ли струйки воды перед перепадом параллельно друг другу и течет ли вода к водосливу, примерно, с одной и той же скоростью по всей ширине потока. Если это не имеет места, надо добиться установления равномерного течения посредством устройства успокоителей в виде решеток и сит, которые должны быть расположены на достаточно большом расстоянии выше водослива.

Для водосливов, у которых ширина переливающегося слоя не больше 2 м, является достаточным измерять напор в одной единственной точке, а именно—по середине потока. При большей ширине переливающегося слоя  $2 \text{ м} < b < 6 \text{ м}$ , напор должен измеряться в двух точках и, наконец, при совсем большой ширине  $b > 6 \text{ м}$  его надлежит измерять в трех точках. Точки измерения должны равномерно распределяться по ширине потока. При измерении в нескольких точках за величину напора принимается арифметическая средняя из отдельных отсчетов.

В качестве приспособлений для отсчетов применяются мерные иглы (см. рис. 163, а). Нулевое деление их следует помещать на высоте ребра водослива, чтобы отсчет по шкале непосредственно показывал величину напора. Положение нуля должно, если возможно, устанавливаться нивелировкой, исходя от ребра водослива. Если этот метод определения напора неприемлем, вследствие особенности местных условий, то величина напора может определяться посредством водомерного прибора с мениском (см. рис. 163, а) или водомерного устройства с поплавком (см. рис. 163, б), помещаемых в колодцах по сторонам канала. Нули менисковых и поплавковых устройств надлежит определять с учетом высоты капиллярного подъема и формы мениска.

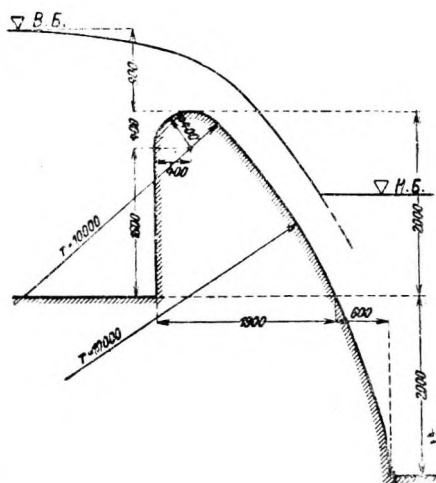


Рис. 164. Водослив с оголовком закругленной формы по Ребоку. Мугверк у Форбаха в Бадене.

Относительно точности приведенных выше коэффициентов не имеется еще единого мнения.<sup>1</sup> Ребоком недавно были произведены детальные исследования этого вопроса с использованием данных сотен тарировок, производившихся многочисленными исследователями в гидротехнических лабораториях. Согласно его исследованиям, водослив с острым ребром, подводом воздуха под струю и без бокового сжатия представляет собой, при применении значения  $\mu$  по уравнению (70), прибор, который, при наилучшем выполнении и обращении с ним, дает ошибку самое большее +0,5%.<sup>2</sup>

## 12. Определение расхода воды способом данаиды

При определении расхода воды способом данаиды, введенным Брауером, расход воды распределяется по нескольким отверстиям одинакового диаметра, которые в отношении вытекающего из них расхода должны быть друг от друга независимыми.<sup>3</sup> В силу этого каждое из отверстий

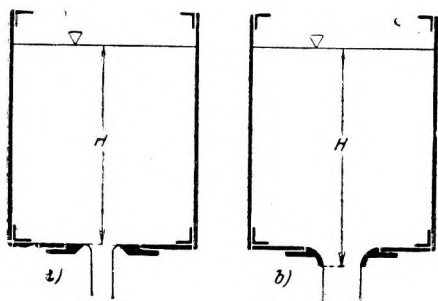


Рис. 165. Формы отверстий.  
а) простые отверстия (Messblech); б) насадки (Messdüsen).

можно тарировать в отдельности, получая при этом большую точность измерения, так как малые значения тарировуемых расходов допускают точное их определение.

Отверстия для истечения воды делают либо простые с острыми краями, либо конически закругленные, отвечающие своей формой вытекающей струе и действующие как насадка.

Для каждого из этих отверстий, шириною  $D$ , для величины вытекающего расхода воды действительно общее выражение:

$$Q = \mu \frac{\pi D^2}{4} \sqrt{2gH}, \quad (77)$$

причем  $H$  здесь означает напор, то есть вертикальное расстояние от свободной поверхности воды до сечения отверстия (рис. 165).

Если отверстия совершенно одинаковы и расстояния их друг от друга составляют, по крайней мере, от трехкратной до четырехкратной ширины в свету  $D$ , то в величинах расходов через отдельные отверстия наблюдается лишь очень небольшая разница порядка, примерно,  $\pm 0,2\%$ .

При тарировке следует держать закрытыми все отверстия за исключением того, для которого надлежит установить коэффициент расхода. Данные подобного рода тарировок, изображенные на рис. 166, показывают, что для простых отверстий коэффициент расхода с увеличением напора падает, примерно, до 0,64, тогда как для насадок он растет и уже при небольших напорах, примерно в 0,4 м, приближается к постоянному значению около 0,97.

**Производство определений расхода воды способом данаиды и их точность.** В целях возможно большего упрощения процессов тарировки и измерения, следует назначать размеры данаиды таким образом, чтобы на одно отверстие приблизительно приходился расход в 1 л/сек. Условием иметь

<sup>1</sup> O. Kirschmer. Untersuchungen der Überfallskoeffizienten und der Kolkbildung am Absturzbauwerk im Sempflutkanal der mittleren Isar. Mitteilungen des Forschungsinstitutes für Wasserbau und Wasserkraft, H. 1, München 1928; R. Haier. Fehlerquellen bei der Überfallmessung. Mitteilungen des Hydraulischen Institutes der Technischen Hochschule München. H. 2, 1928; H. Müller. Beeinflussung der Überfallmessung ohne Seiteneinschnürung durch ungleiche Geschwindigkeitsverteilung im Zulaufgerinne. Bayerische Wasserwirtschaft, 1928.

<sup>2</sup> Th. Rehbock. Die Stetigkeit des Abflusses bei scharfkantigen Wehren. Der Bauingenieur, H. 48, 1930.

<sup>3</sup> E. Brauer. Ein neues Verfahren zur Wassermessung, Z. d. Vereines deutscher Ingenieure, 1892.

расстояния между отверстиями, равными 3—4  $D$ , определяют необходимые размеры поверхности дна. Наибольший напор принимают  $H = 1,0—1,5$  м.

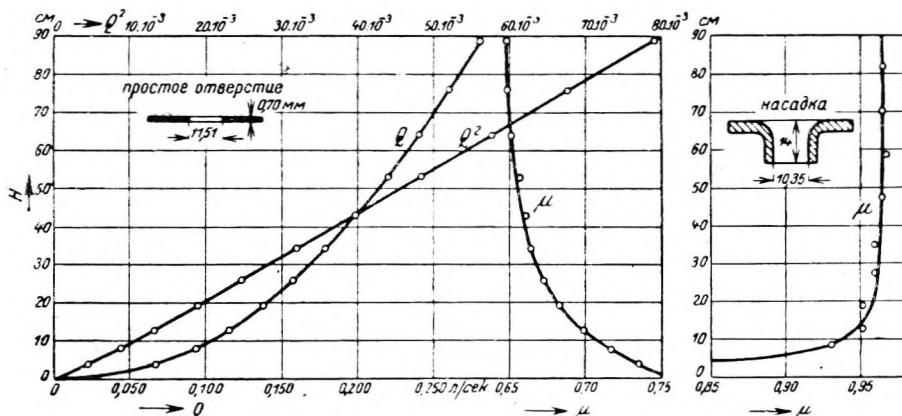


Рис. 166. Данные тарировки по определению коэффициента  $\mu$  для простых отверстий и насадок по Штраусу.

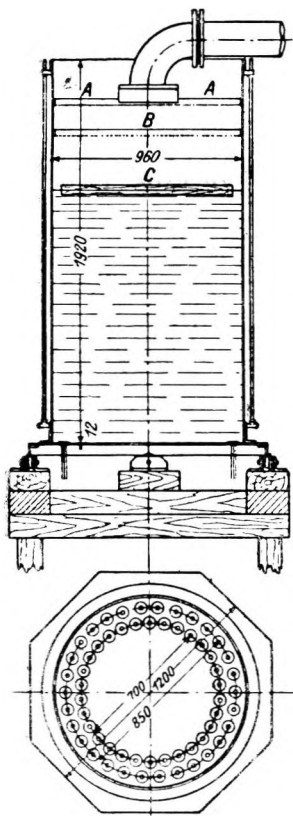


Рис. 167. Данаида в 60 отверстий.  
 А—мелкое проволочное сито;  
 В—сито из листовой жести;  
 С—щит-гаситель.

Изображенная на рис. 167 данаида с 60 отверстиями представляет собой в отношении порядка расположения отверстий обычную зарекомендовавшую себя на деле форму. Отверстия расположены симметрично. Для успокоения колебаний уровня поверхности воды в сосуде предусмотрены сита и плавучий щит. Напор  $H$  отсчитывается по водомерной трубке с мениском, ширина которой должна составлять, по меньшей мере, 30 мм.

Оправы для простых отверстий готовятся из нейзильбера или твердотянутой латуни, причем при просверливании их накладывают друг на друга, чтобы получить в точности совпадающие между собою отверстия (рис. 168). Изготовление просто и дешево. Оправы привинчивают к дну данаиды с уплотнением промасленной папки. Отверстия закрываются крышками на винтах или пробках.

Насадки высверливают из бронзовых отливок и придают им установленные формы, которые подобны формам подпорных насадок-водомеров, о которых говорится ниже (рис. 169). Их изготовление по строго установленной форме более трудно, чем изготовление оправ для простых отверстий.

Точность измерений способом данаиды может при тщательнейшей выделке отверстий доходить до  $\pm 0,2\%$ .

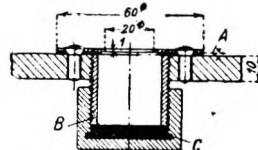


Рис. 168. Оправа для простого отверстия данаиды вместе с крышкой.  
 А—прокладка; В—нарезка;  
 С—свинец.

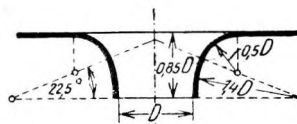


Рис. 169. Стандартная насадка для данаид,  $\mu = 0,97$ .



### 13. Определение расхода воды при помощи подпорных водомеров

Открытое Вентури в 1797 г. явление, что вода, протекающая по конически сужающейся и вновь расширяющейся трубе, может в самом узком

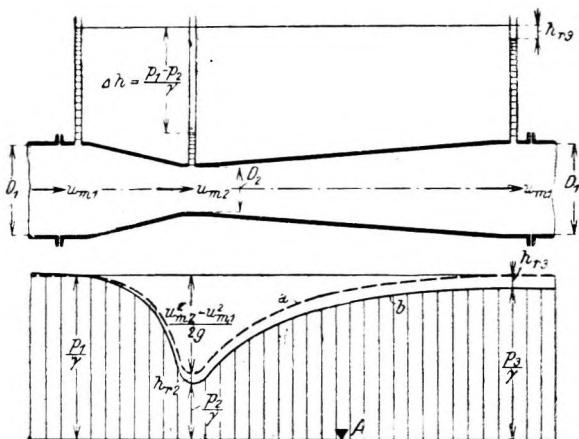


Рис. 170. Схематическое изображение водомера Вентури и кривых изменения напора—теоретической (a) и практической (b).

A—плоскость сравнения;  $h_{r,2}$  и  $h_{r,3}$  — потери напора на трение.

месте трубы оказывать засасывающее действие, было впервые использовано для целей измерения Гершелем в 1887 г.

Водомер Вентури, в своем первоначальном виде, примененном Гершелем (рис. 170), претерпел различные изменения, причем возник ряд подпорных водомеров, среди которых различают подпорный диск, подпорный фланец, подпорную насадку, трубу Вентури с подпорной насадкой и трубу Вентури с двойным конусом. Для всех этих устройств общим является стремление образовать сужение поперечного сечения, по возможности, самым простым способом.

В подпорном диске — простейшем измерительном приборе этого рода—поток жидкости направляется через круглое с острыми краями отверстие в диске из жести (рис. 171).

В устройстве с подпорным фланцем сужение образуется при помощи железного листа с закругленным отверстием, который так же, как и подпорный диск, закладывается между фланцами концов трубы (рис. 172).

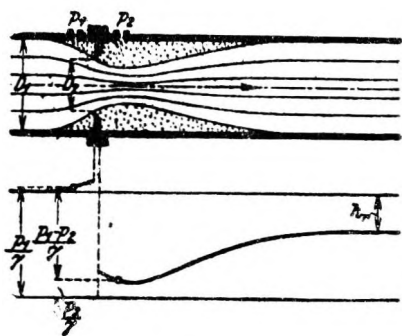


Рис. 171. Подпорный диск. Изменение напора вдоль стенки трубы.

$h_r$  — потеря напора на трение.

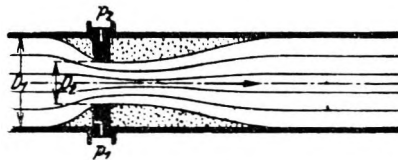


Рис. 172. Подпорный фланец.

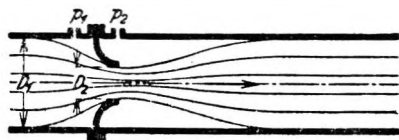


Рис. 173. Подпорная насадка.

В устройстве с подпорной насадкой жидкость направляется к самому узкому сечению, и по миновании сужения струя ее продолжает течь на некотором расстоянии, не касаясь стенок трубы (рис. 173).

Труба Вентури с подпорной насадкой представляет собой целесообразное соединение подпорной насадки с конически расширяющейся трубой. Благодаря такой конструкции движение жидкого потока искусственно направляется на всем его пути, вследствие чего затрудняется образование завихрений и водоворотов (рис. 174).

Трубы Вентури с двойным конусом (конструкция, наиболее приближающаяся к некогда примененной Гершелем) опять приобрели значение в последнее время, так как у стальных и железо-бетонных труб постепенное сужение к узкой горловине и такого же рода расширение за нею оказались на деле вполне целесообразным устройством.

**Теоретические основы данного способа измерения.** Если представить себе трубу Вентури в горизонтальном положении, а гидравлические напоры считать выраженными в виде высоты водяного столба, то по уравнению Бернулли для разности давлений во входном отверстии и в горловине трубы получается:

$$\Delta h = \frac{\rho_1 - \rho_2}{\gamma} = \frac{u_{m,2}^2 - u_{m,1}^2}{2g},$$

и так как

$$Q = u_{m,1} \frac{\pi D_1^2}{4} = u_{m,2} \frac{\pi D_2^2}{4},$$

то расход воды получится из выражения:

$$Q = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{D_2}{D_1}\right)^4}} \sqrt{2g\Delta h} \frac{\pi D_2^2}{4}. \quad (78)$$

Так как это выражение справедливо только для движения идеальной жидкости, то действительный расход воды будет меньше, а именно;

$$Q = \alpha \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{D_2}{D_1}\right)^4}} \cdot \sqrt{2g\Delta h} \cdot \frac{\pi D_2^2}{4} = \mu \sqrt{2g\Delta h} \cdot \frac{\pi D_2^2}{4}. \quad (79)$$

Употребляются оба выражения для  $Q$ , приведенные в уравнении (79), почему приводится или так называемый коэффициент Вентури  $\alpha$  или коэффициент расхода  $\mu$ , которыми учитываются различные влияния со стороны формы русла, характера поверхности и неравномерного распределения скорости, а для  $\mu$  еще и скорости подхода. Для измерений второстепенного характера может приниматься  $\alpha = 1,0$ . Для точных измерений  $\alpha$  и  $\mu$  следует устанавливать путем тарировки и, вследствие зависимости от числа Рейнольдса, в условиях того режима, при котором будет в дальнейшем работать данная конструкция.

Подобного рода тарировки производились много раз как для дисков, так и для насадок и трубок Вентури.<sup>1</sup> Они оказались для практических работ полезны, в первую очередь, тем, что показали для каких условий можно рекомендовать то или иное из указанных измерительных устройств.

Для применения в гидрометрии имеют значение не только изменяемость коэффициентов  $\alpha$  или  $\mu$  прибора и точность приборов, служащих для отсчетов, но и потери на трение, обусловленные стеснением потока, так как эти потери означают потери энергии.

Для устройств с диском и с фланцем коэффициент  $\alpha$  для одной и той же конструкции колеблется между значениями 0,60 и почти 1,0. Такие большие колебания коэффициента представляют недостаток этого рода кон-

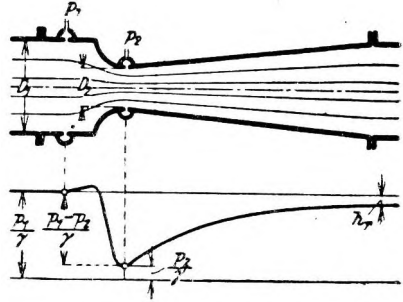


Рис. 174. Труба Вентури с подпорной насадкой. Изменение напора вдоль стенки трубы.

$h_f$ —потеря напора на трение.

<sup>1</sup> R. Witte. Durchflussbeiwerte der l. G.-Messmündungen für Wasser, Öl, Dampf und Gas. Z. d. V. d. I., S. 1493, 1928.

струкций и часто обуславливают ненадежность измерения. Поэтому здесь необходима тарировка. Потери на трение могут составлять, в зависимости от отношения от 30 до 100% от разности давлений  $\Delta A$ .

Для точности отсчета важны правильные наблюдения разности давлений и передача давлений  $p_1$  и  $p_2$ . Наблюдение величин давления производится обычно на небольшом расстоянии выше и ниже измерительного устройства.

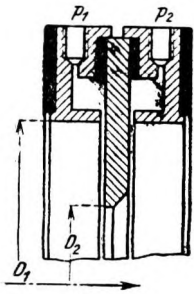


Рис. 175. Детали конструкции подпорного диска.

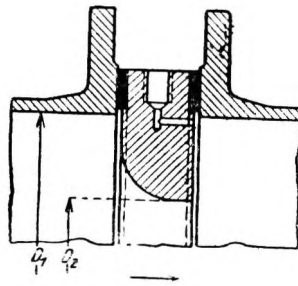


Рис. 176. Детали конструкции подпорного фланца.

Расстояния точек измерения давления от измерительного диска или фланца влияют на результаты измерения. На рис. 175 и 176 изображены в деталях измерительный диск и измерительный фланец. Оба образца обеспечивают легкую установку, быструю смену и чистку и требуют небольшой длины; однако пределы для измерения ими, вследствие больших потерь на трение, сравнительно незначительны.

Значительно более точные измерения удастся производить при помощи насадок параболической формы. Здесь для измерения давления труба соединяется с кольцеобразными камерами давления, которые в интересах надежности измерений снабжены несколькими отверстиями для наблюдения за давлением. Смотри по напору в трубе, насадка изготавливается из чугуна или из стальной отливки (рис. 177).

Значения коэффициента  $\alpha$  колеблются здесь в пределах всего от 0,97 почти до 1,00,<sup>1</sup> так как боковое сжатие у насадок совершенно отпадает (рис. 178). Начиная с величины скорости течения в горловине трубы в 1,0 м/сек значение коэффициента остается почти постоянным, весьма слабо возрастая по прямой, что оказывается особенно удобно для отсчетов. Насадки обладают, однако, тем же недостатком, что и диски, поскольку потери на трение и в них могут составлять до 100% разности давлений  $\Delta h$ .

Рис. 179 изображает формы насадок, для которых, при постоянной Рейнольдса, равной  $10^7$  и соответственно  $3 \times 10^5$ , значение  $\mu$  заключается между 0,961 и 0,967.

На рис. 180 изображена насадка, устанавливаемая в подводных трубах к турбинам, там, где уже само по себе имеется уменьшение поперечного сечения трубопровода. Как свидетельствует опыт, насадки подобной формы вызывают очень небольшие потери на трение, меньше даже тех, которые получились бы в случае присоединения конически расширяющейся трубы.

Трубки Вентури с подпорной насадкой, то есть трубки, у которых отсутствует коническая входная часть и полная длина которых поэтому меньше,

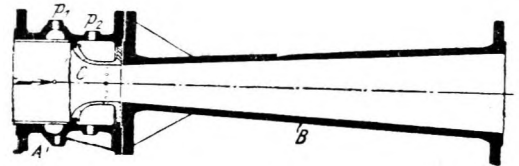


Рис. 177. Детали конструкции трубы Вентури с подпорной насадкой.

A—цилиндрическая входная часть; B—коническая выходная часть; C—насадка.

<sup>1</sup> Встречаются значения коэффициента  $\alpha$  больше 1,0 в пределах до 1,10. См. F. E n g e l. Abflussgleichungen für Venturikanäle. Deutsche Wasserwirtschaft H. 6, 1937. (Прим. пер.)

чем длина нормальных трубок Вентури с двойным конусом,—имеют сравнительно широкие пределы применения, в три—четыре раза превышающие пределы применения подпорного диска.

В качестве приборов для отсчетов при работах обычного порядка служат обыкновенно ртутные манометры. Для специальных целей изготавливаются

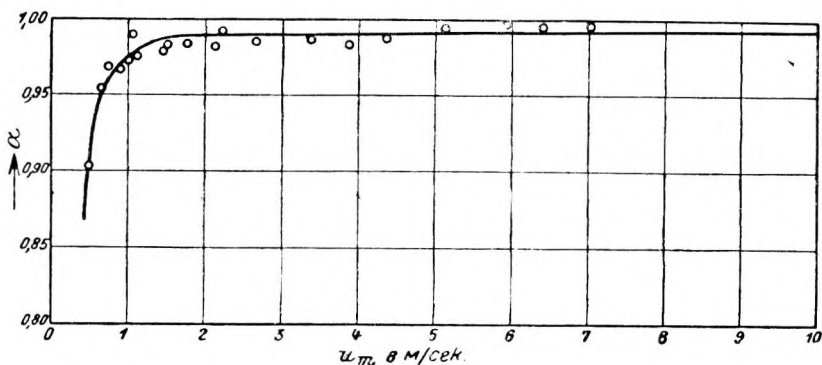


Рис. 178. Изменение коэффициента  $\alpha$  для трубы Вентури с подпорной насадкой.

приборы с циферблатом без счетчика и со счетчиком—для расходов воды, самопишущие приборы—для непосредственного вычерчивания графиков расходов воды и, наконец, устройства для передачи на расстояние данных измерений электрическим путем.

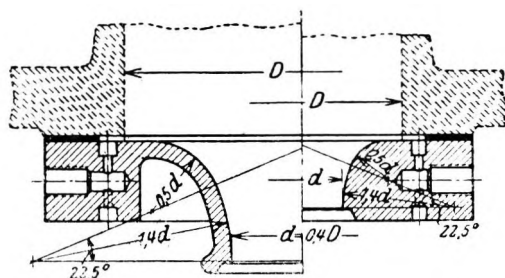


Рис. 179. Стандартные насадки для насадок водомеров при диаметрах труб больше или меньше 85 мм.

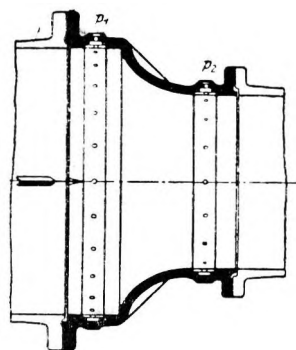


Рис. 180. Подпорная насадка для турбинного трубопровода.

Ртутный манометр (рис. 181) представляет собой простейший регистрирующий прибор и состоит из U-образной манометрической трубки с переставными указателями и шкалой, по квадратным делениям которой может быть непосредственно отсчитана величина расхода воды.

У прибора с циферблатом (рис. 182) и у самопишущего прибора подводящие трубки, идущие от напорных камер трубы Вентури, соединяются с двумя сосудами, наполненными ртутью, которые, в свою очередь, соединены между собою тонкою стальною трубкой. Сосуд  $G_1$ , на который действует большее давление от подпорного устройства, имеет параболическую вставную часть, чтобы тем самым сохранить для значений  $Q$  линейное выражение, так как благодаря этому выражение с корнем в уравнении (79) превращается в линейное. Второй сосуд  $G_2$ , на который действует меньшее давление, имеет цилиндрическую форму. В нем помещается поплавок  $S$  из твердой резины с зубчатой рейкой. Последняя соединяется с зубчатым колесом, кото-

рое передает колебания уровня ртути стрелке циферблата или самопишущему перу. Точность показаний подобного рода приборов с циферблатом или самописцев следует, время от времени, проверять путем сравнения их отсчетов с отсчетами по обыкновенному манометру.

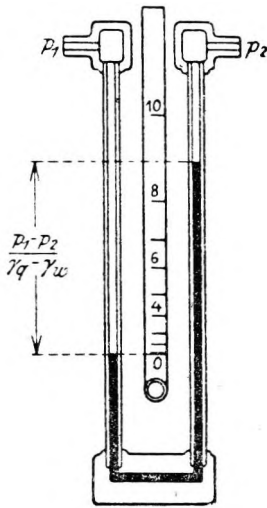


Рис. 181. Ртутный манометр для насадок-водомеров.

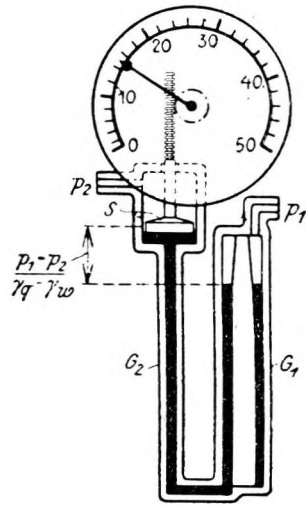


Рис. 182. Ртутный манометр с параболической вставной частью для насадок-водомеров.

**Производство определений расхода воды при помощи подпорных водомеров и их точность.** В прежнее время водомеры Вентури применялись главным образом для измерений расхода воды в водопроводных трубах. Однако, так как водомеры Вентури могут быть вполне целесообразно приспособлены также и для длительной работы, они теперь получают все большее и большее применение при контрольных измерениях на гидроустановках, тем более что, путем усовершенствования водомеров, удалось почти полностью исключить потерю напора на трение.<sup>1</sup>

Водомеры Вентури для больших гидроустановок изготовлялись с диаметром труб до 2,40 м, причем удавалось в весьма целесообразной форме применяться к различнейшим конструктивным и эксплуатационным условиям. Подобного рода устройства крупных размеров выполняются из чугуна, стальной отливки, ковкого железа со сменяемой или отлитой прямо в трубе насадкой или из бетона с чугунными напорными камерами, помещающимися в бетоне или в трубопроводах из ковкого железа.<sup>1</sup>

Отдельным устройствам придается форма нормальной трубки Вентури? с делителем (Teilwassermesser), трубки Вентури с пропуском воды в одном или в обоих направлениях, или с применением конического переходного звена или же переходного звена в виде насадки.

В качестве примера, на рис. 183 изображена нормальная трубка Вентури с двойным конусом из ковкого железа, которая, благодаря своему расположению поблизости от водонапорной башни силовой установки, может служить для одновременного производственного контроля над всеми присоединенными к напорному трубопроводу турбинами.

<sup>1</sup> M e s t e r . Messdüsen für Wasserkräftenlagen. Wasserkraft u. Wasserwirtschaft, H. 23 1927

<sup>2</sup> H. L o h m a n n . Grosswassermesser für einseitigen und beiderseitigen Durchfluss, Wasserkraft u. Wasserwirtschaft, H. 8, 1929.

Рис. 184 изображает специальное устройство, в котором водомер Вентури состоит из трех литых напорных камер, охватывающих трубу Вентури в форме колец. Труба Вентури, образованная из железных конических звеньев,

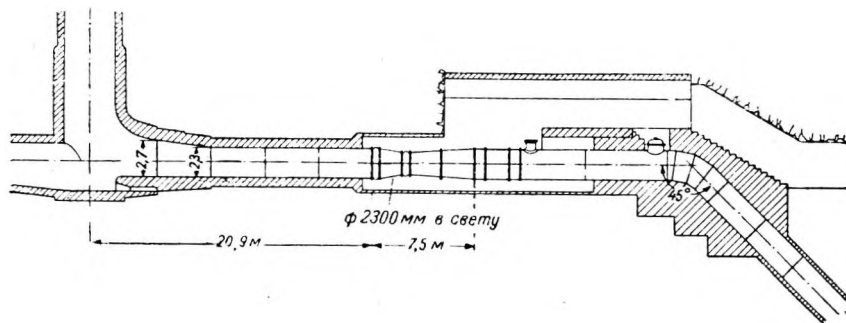


Рис. 183. Водомер Вентури, установленный в трубопроводе гидросиловой установки Ахензе в Тироле.

покрыта оболочкой из бетона. Этому устройству придан водомер-делитель. Последний расположен в обходном трубопроводе между двумя напорными камерами в виде небольшого водомера Вольмана. Разность напоров в трубе

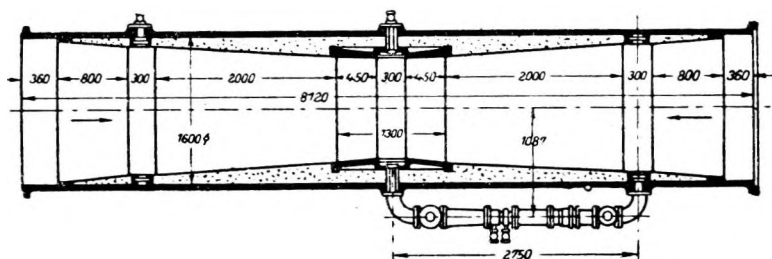


Рис. 184. Труба Вентури с тремя напорными камерами и водомер-делителем.

Вентури в течение продолжительного времени направляет определенную часть расхода воды в обходной трубопровод, причем указатель водомера делителя устроен таким образом, что по нему можно непосредственно отсчитать полный расход воды. Поскольку разность напоров в трубе Вентури возрастает с квадратом расхода воды, а расход воды в обходном трубопроводе пропорционален корню квадратному из разности напоров,—то в качестве параллельного водомера может употребляться только такой водомер, у которого потери напора растут в квадрате с возрастанием расхода воды. Для подобных условий может быть приспособлен водомер Вольмана.

В трубопроводах большого диаметра через обходный трубопровод идет только около 1% полного расхода воды или еще меньше; вследствие этого вода, протекающая через обходный трубопровод, мало влияет на течение в трубе Вентури.

У силовых установок, которые работают с перекачкой воды в водохранилище, суммирование расходов воды для производственного контроля должно производиться отдельно для поступательного потока при работе турбин и для обратного потока при работе насосов. Этого удается достичь при помощи автоматического переключения измерительных устройств, причем при работе турбин расход воды, направляющийся к турбинам, измеряется при помощи трубы Вентури, помещенной в главном трубопроводе, а при

действии насосов количество воды, текущее в водохранилище—посредством водомера-делителя в обходном трубопроводе.

На рис. 185 водомеры (в форме насадчатых переходных звеньев) поставлены в каждом отдельном трубопроводе непосредственно перед задвижками турбин. При этом устройстве коническая переходная труба может отпасть, так как сужение трубы в ответвлении может быть выбрано так, как того требует диаметр выхода измерительной насадки.

Точность измерения посредством водомеров находится в зависимости от того, в каком состоянии—тарифованном или нетарифованном применяются измерительные приборы.

Без тарифовки, то есть беря за основу только уравнение (78), полученное для движения идеальной жидкости, дисковые водомеры для сколько-

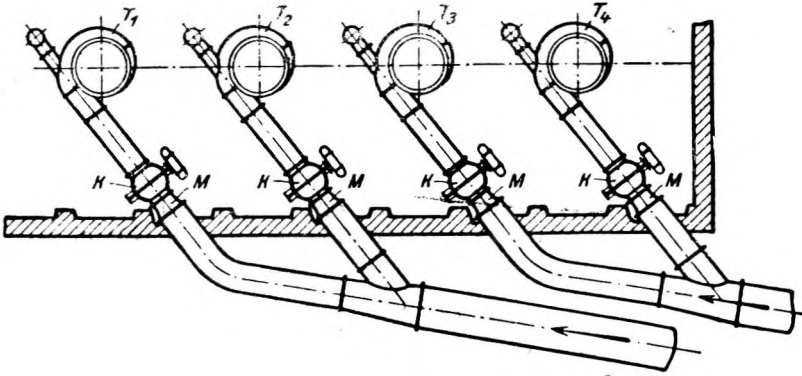


Рис. 185. Пример устройства водомеров-насадок (*M*) непосредственно перед задвижками турбин (*K*) в напорных трубопроводах гидроустановки Сибнен в Швейцарии.

$T_1 - T_4$  — турбины.

нибудь точных определений расходов не годятся. Для насадок с примыкающей конической трубой или без таковой следует считаться с ошибкой до  $\pm 2\%$ .

Для водомеров, тарифованных по объемным измерениям, можно, при пользовании ртутным манометром с достаточно совершенным удалением из него воздуха, достичь точности  $\pm 0,5\%$ . Это возможно при условии, что тарифовочная кривая используется только в той части, где для нее может быть бесспорно установлено прямолинейное направление и тогда, когда какие-либо присоединенные впереди коленчатые звенья не нарушают равномерного распределения скорости в подводящей трубе.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАСХОДА ВОДЫ ПОДЗЕМНЫХ (ГРУНТОВЫХ) ВОД

При определении расхода воды поверхностных водотоков, установление величины и формы живого сечения потока не встречает особых затруднений.

Напротив, для подземных (грунтовых) вод это является работой, которая в большинстве случаев вызывает такую же затрату времени и средств, как и определение скорости течения.

При определении площади сечения задача заключается не только в том, чтобы установить границы потока в поперечном направлении, очерчиваемые линией поверхности грунтовых вод и границей залегания водонепроницаемых слоев. Существенным является также дать описание размеров и распределения пустот путем указания границ залегания различных водонепроницаемых слоев, а также физических свойств, составляющих их грунтов. В этих целях собственно измерительная работа должна дополняться почвенногеологическими исследованиями, которыми (путем пробных бурений или шурфования)

полностью освещаются как процесс течения, так и свойства водоносного слоя.

Бурение при помощи обсадных труб происходит либо всухую, либо применяя способ промывки скважины. Оба способа могут только в той мере служить для освещения условий в грунте, что с их помощью можно установить границы водоносного слоя. Подробного представления об условиях залегания грунтов в естественных условиях они не дают. В последнем отношении могут служить—для несвязных сыпучих грунтов—только шурфование в вертикальных выемках и раз- работках, а для связных грун- тов—взятие образцов с нена- рушенной структурой.

Скважины позволяют уста- новить уровень подземных или грунтовых вод и направление течения их тогда, когда они распределяются таким образом, что с их помощью могут быть достаточно точно определены горизонтали уровня подземных вод. Наибольшее расстояние между скважинами выбирают, примерно, в 500 м и сокращают его там, где можно ожидать значительных изменений уклона поверхности грунтового потока.

Измерение уровня поверх- ности подземных или грунто- вых вод в отдельных скважинах производится совершенно таким же образом, как указано выше при описании измерения уровня подземных вод. Данные наблюдений наносятся на план местности и на основании их проводятся горизонтали поверхности грунтовых вод. Этим самым определяется и направ- ление течения, по крайней мере, направление верхних водяных струй, так как они движутся в направлении наибольшего уклона поверхности воды; водяные струи пересекают таким образом горизонтали под прямым углом.

Из полученных таким путем планов поверхности грунтовых вод или линий направления течения ее—можно увидеть характер движения грунтовых вод в естественных условиях. При горизонтальном положении уровня поверх- ности грунтовых вод они находятся в состоянии покоя в подземном водо- хранилище. При падении уровня зеркала грунтовых вод имеет место течение воды, поток грунтовых вод. Этот поток может относиться к протекающему над ним поверхностному речному потоку самым различным образом. Если горизонтали поверхности потока грунтовых вод проходят под речным пото- ком без отклонения или разрыва, то оба потока друг от друга независимы. Речной поток проходит в этом случае в породах такой плотности, что ни подпочвенные воды, ни верховодка не доходят до подземного потока. Если грунтовые воды фильтруют в реку, то это можно определить по расположе- нию горизонталей зеркала грунтовых вод, которые в этом случае бывают обращены вогнутостью в направлении вверх по реке. При отдаче же воды из реки в водоносный слой—горизонталю вогнутостью обращены вниз по реке. Такое различное расположение горизонталей, в зависимости от уровня воды в реке, показано на рис. 186 и 187 для подземного потока в пределах одного и того же участка реки.<sup>1</sup>

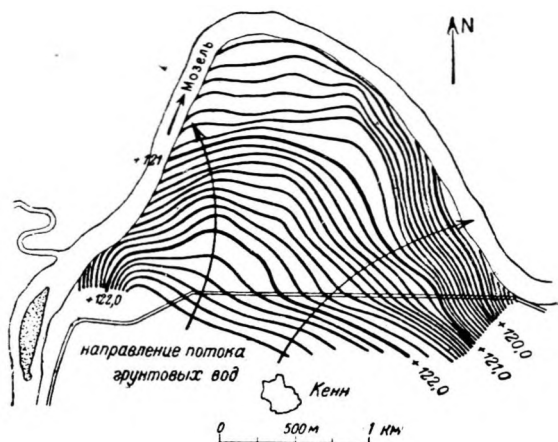


Рис. 186. Питание реки грунтовыми водами при низком стоянии уровня воды в реке.

<sup>1</sup> C. W a h l. Das Grundwasserwerk der Stadt Trier. Journal für Gasbeleuchtung und Wasserversorgung, München 1918.



На уровень грунтовых вод влияет не только протекающая в непосредственной близости река. Он обнаруживает колебания, происходящие от просачивания осадков, и, кроме того, установлены еще периодического характера ежедневные колебания его, не связанные ни с осадками ни с процессами инфильтрации из поверхностных потоков и водоемов. Причины этого рода колебаний не нашли себе до сих пор вполне удовлетворительного объяснения (рис. 188).<sup>1</sup>

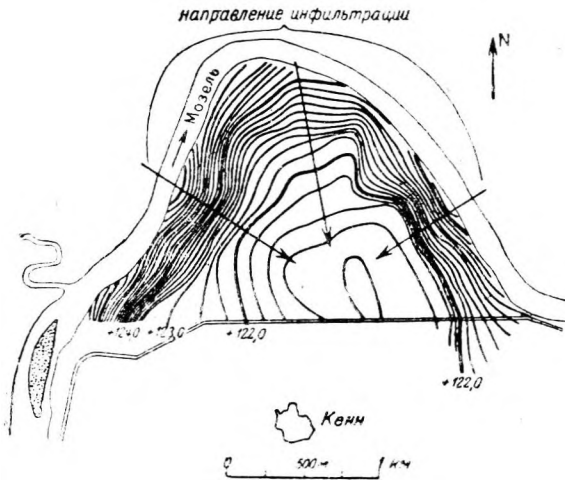


Рис. 187. Питание грунтовых вод инфильтрацией из реки при высоком стоянии уровня воды в реке.

Скорость течения грунтовых вод может быть определена непосредственным или косвенным путем. Расход воды  $Q$  в первом случае получается из выражения:

$$Q = u_w (\alpha F), \quad (80)$$

где  $u_w$ —действительная скорость течения,  $\alpha$ —коэффициент порозности данного грунта и  $F$ —полная площадь поперечного сечения, ограниченная поверхностью грунтовых вод и водонепроницаемым слоем.  $u_w$  представляет согласно этому ту скорость, которую частицы воды, в среднем, действительно обладают в незаполненной грунтом части поперечного сечения, то есть в сечении  $\alpha F$  пор грунта.

Во втором случае расход воды  $Q$  вычисляется из выражения:

$$Q = u_f F, \quad (81)$$

причем скорость фильтрации  $u_f$  отвечает расходу воды  $Q$  через полную площадь сечения  $F$ .

Действительная скорость и скорость фильтрации связаны следующим отношением:

$$u_w = \frac{u_f}{\alpha}. \quad (82)$$

Поскольку коэффициент порозности  $\alpha$  в водоносных грунтах, по данным опыта, колеблется в пределах от 0,25 до 0,5, скорость течения в самих

Упоминание об указанных явлениях в режиме грунтовых вод являлось необходимым потому, что эти явления должны учитываться при определениях расхода воды грунтовых вод и могут быть определяющими для способа производства измерений и для обработки данных измерений.

Скорость течения грунтовых вод может быть определена

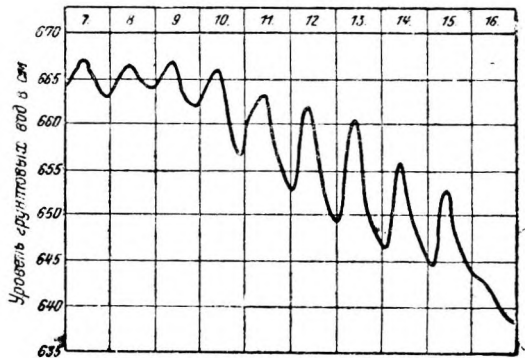


Рис. 188. Колебания уровня грунтовых вод в лесу близ Вангенинга в Голландии в июне 1931 г.

<sup>1</sup> J. K o z e n y . Das tägliche periodische Steigen und Fallen des Grundwasserspiegels. Die Wasserwirtschaft. № 31, Wien 1933.

порах составляет (по величине) от двухкратной до четырехкратной величины определяемой аналитически скорости фильтрации.

При измерении непосредственным путем необходимо, кроме  $u_w$ , определять еще и  $a$ , тогда как определение  $Q$  косвенным путем требует получения только величины  $u_f$ . При настоящем состоянии техники измерений определение  $Q$  косвенным путем приводит, в общем, к лучшим результатам, так как установление коэффициента порозности для сыпучих грунтов, встречающихся почти во всех случаях наличия грунтовых вод, сталкивается с трудностями.

## 1. Определение расхода воды посредством установления действительной скорости течения грунтовых вод

При измерении действительной скорости течения задача заключается в том, чтобы установить поступательное движение частиц воды, недоступное непосредственному наблюдению, путем применения какого-либо вспомогательного средства. Это может быть осуществлено путем введения в грунт вещества, которое мало изменяет качества грунтовой воды в отношении ее гидравлических свойств, но присутствие которого в воде может быть установлено простым способом. В качестве подобного рода веществ могут быть, строго рассуждая, применены как красящие вещества, так и соли и даже бактерии. Больше всего внедрилось в практику введение поваренной соли  $\text{NaCl}$  или нашатыря  $^1 \text{NH}_4\text{Cl}$ , так как их появление в каком-либо месте в водоносном слое может быть установлено химическим или электрическим путем, как то было подробно разобрано выше при описании определения расхода воды способом смешения и при помощи плавущего соляного раствора.

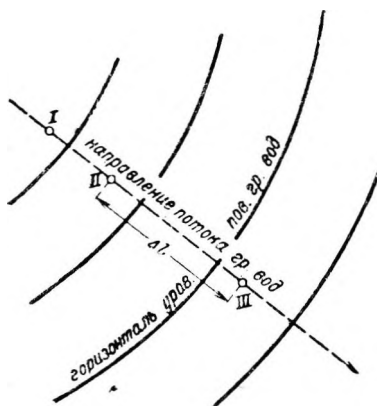


Рис. 189. Скважины при химическом скоростном способе.

Данные подобных измерений следует всегда подвергать самой строгой критической оценке. Необходимость этого следует подчеркнуть с самого начала. Действительно, в неоднородных грунтах имеют место явления интерференции при движении частиц воды и примешанных к ней веществ, которые могут затемнить картину изменения степени концентрации введенных примесей. Обнаружилось, что упомянутые способы дают слишком большие скорости течения грунтовых вод, то есть позволяют делать заключение о таких расходах воды, которых в действительности нет.

Для измерений грунтовых вод способ, согласно которому концентрация соляного раствора определяется по измерению электрической проводимости, зарекомендовал себя все же лучше, чем химический способ титрования. В районе измерений по линии направления течения подземных вод, которую можно наметить по ранее производившимся наблюдениям за уровнем, закладываются три скважины (рис. 189). В скважину I вводится раствор  $\text{NaCl}$  или  $\text{NH}_4\text{Cl}$ , а в скважинах II и III измеряется в известные промежутки вре-

<sup>1</sup> Ch. S. Slichter. Field measurement of the rate of movement of underground waters. Washington 1906.

мени электропроводность при помощи электродных пар (рис. 190) и присоединенного источника слабого тока. Изменения регистрируются миллиамперметром. Стенка обсадной трубы может служить в качестве электрода. Таким

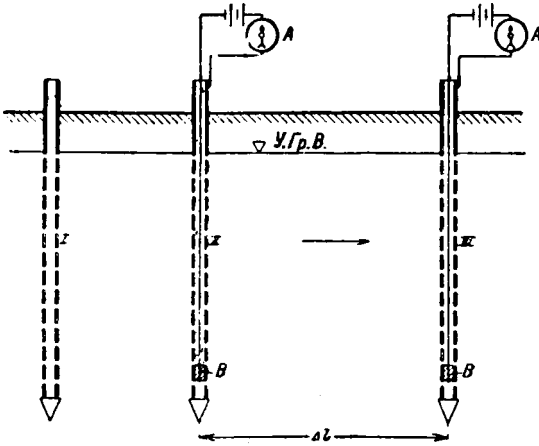


Рис. 190. Схема устройства для определения действительной скорости течения грунтовых вод посредством химического скоростного способа.

A—амперметр; B—изоляция.

путем, регистрируя время, получают ход изменения силы тока во времени в виде отдельных кривых для каждого из обоих пунктов измерения II и III (рис. 191). Таким же образом, как в способе с плывущим соляным раствором, и здесь, после нанесения линий центров тяжести, получается время пробега  $\Delta t$  и, наконец,

$$\Delta l / \Delta t = u_w^1$$

Установление коэффициента пористости  $\alpha$  при несвязных грунтах возможно только приближенно. Пробу грунта приводят в состояние возможно более близкое к естественному, уплотняя ее, пока она не уместится в такой же объем  $V_1$ , какой занимала в грунте, и затем по объему воды  $V_2$ , пошедшему на заполнение пор, вычисляют коэффициент пористости:<sup>2</sup>

$$\alpha = \frac{V_2}{V_1} \quad (83)$$

При связных грунтах и ненарушенной структуре пробы определение  $\alpha$  может при очень мелком составе частиц получиться неточным в той мере, в какой при наполнении пробы водой окажется затрудненным удаление воздуха из пор грунта.

Для определения расхода воды, протекающего по водоносному слою, состав которого с глубиной сильно изменяется, надо определить  $u_w$  и  $\alpha$  на различных глубинах, вычислить средние значения для полученных величин, а для вычисления частного расхода воды на участке, шириною  $\Delta L$ , принять  $q = u_{w,m} (\alpha_m H \Delta L) =$

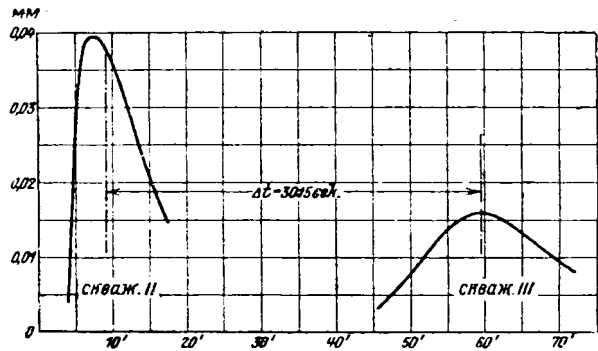


Рис. 191. Измерение действительной скорости течения грунтовых вод посредством химического скоростного способа. Результативный график.

<sup>1</sup>  $\Delta l / \Delta t$ . строго говоря, только тогда равна истинной скорости течения, если  $\Delta l$  является действительной длиной пробега частицы воды. Лабораторные исследования показали, что длина, получающаяся как расстояние между двумя скважинами, при мелкопористом грунте может быть приравнена к действительной длине пробега.

<sup>2</sup> Согласно положению Делесса (Delesse), в однородно залегающих сыпучих грунтах отношение пространства, занимаемого порами, ко всему поперечному сечению равно отношению объема пор ко всему объему сыпучего тела; следовательно объемная порозность равняется порозности в плоскости.

$= u_{w, m}(\alpha_m \Delta F)$ . Здесь  $\Delta F$  означает полную площадь поперечного сечения, ограниченную поверхностью грунтовых вод и водонепроницаемым слоем, залегающим на глубине  $H$  от поверхности воды.

Для определения расхода воды, который протекает через площадь сечения водоносного слоя по линии, проходящей под острым углом к направлению течения,—надо составить сумму частных расходов воды:

$$Q = \sum_A^B q = \sum_A^B u_{w, m}(\alpha_m \Delta F),$$

как то показано на рис. 192. При сильно изменяющейся водопроницаемости водоносного слоя установление  $u_{w, m}$  и  $\alpha_w$  потребуется на нескольких вертикалях смежного сечения между  $A$  и  $B$ .

## 2. Определение расхода воды через установление скорости фильтрации

При определении скорости фильтрации исходят из закона фильтрации Дарси (H. Darcy):

$$\frac{Q}{F} = u_f = kI. \quad (84)$$

По закону Дарси, скорость фильтрации в мелкозернистых грунтах зависит от коэффициента  $k$ , называемого коэффициентом фильтрации, и от относительного уклона  $I$  уровня грунтовых вод, если течение их носит, хотя бы приближенно, параллельно-струйный характер.

Этот способ обладает, правда, тем преимуществом, что не требует определения коэффициента порозности, однако за то предполагает наперед знание коэффициента фильтрации  $k$ .<sup>1</sup>

Для получения значения  $k$  существует несколько путей.  $k$  определяют:

- 1) по измерениям уровня воды, искусственно вызываемым в опытном колодце, заложенном в исследуемом районе, путем откачки или добавления в него воды;
- 2) при помощи лабораторных опытов, которые опираются на закон фильтрации Дарси или на закон капиллярного движения воды;
- 3) ориентировочно по эмпирическим формулам, полученным на основе многочисленных лабораторных опытов с грунтами самого различного состава.

**Опытный колодец с откачкой воды.**<sup>2</sup> При условии действительности закона Дарси, колодец с водопроницаемой одеждой, доходящей до водопроницаемого слоя, после того как в нем наступит состояние установившегося, движения, дает расход воды:

$$Q = 2k\pi xz \frac{dz}{dx}$$

или

$$Q = \pi k (z^2 - h^2) \frac{1}{\ln \frac{x}{r}}. \quad (85)$$

<sup>1</sup> Только один рассмотренный ниже приближенный способ Касагранда (Casagrande) требует, кроме того, и определения коэффициента порозности.

<sup>2</sup> Подробнее о рассматриваемом способе и о других способах для определения значений  $k$  см. Ph. F o r c h h e i m e r g. Hydraulik. Berlin 1931 (имеется в русском переводе).

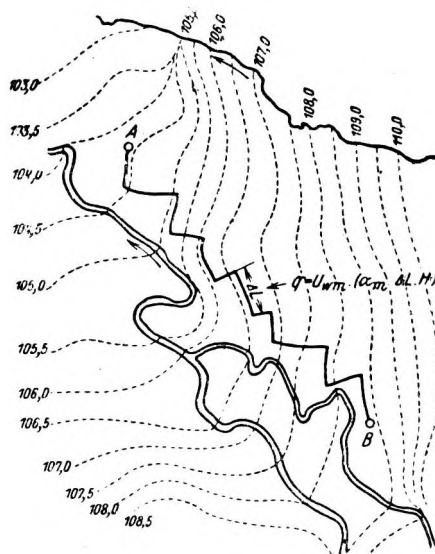


Рис. 192. Определение расхода грунтовых вод между  $A$  и  $B$ .

--- горизонтали уровня поверхности грунтовых вод.

$Q$ ,  $r$  и  $h$  могут быть измерены в колодце, в то время как  $z$  подлежит измерению в скважине, которая закладывается на расстоянии  $x$  от центра колодца (рис. 193). Зная эти данные, можно получить искомый коэффициент фильтрации:

$$k = \frac{Q}{\pi(z^2 - h^2)} \ln \frac{x}{r}. \quad (86)$$

Коэффициент  $k$  представляет среднее значение для всей зоны действия колодца. Поэтому для исследований, при которых требуется определить скорость фильтрации в отдельных узко-очерченных зонах или где, вследствие неоднородного залегания грунтов, коэффициент фильтрации зависит также от направления течения,—этот способ непригоден, тогда как для характеристики средних условий он может быть применяем с успехом.<sup>1</sup>

**Опытный колодец с подкачкой воды.** Подобного рода колодец целе-

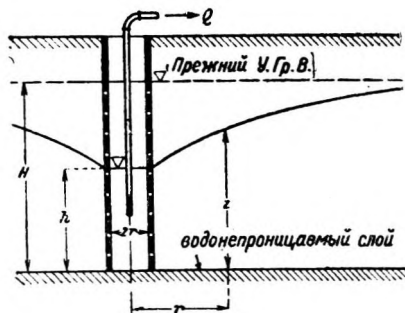


Рис. 193. Опытный колодец для определения коэффициента фильтрации.

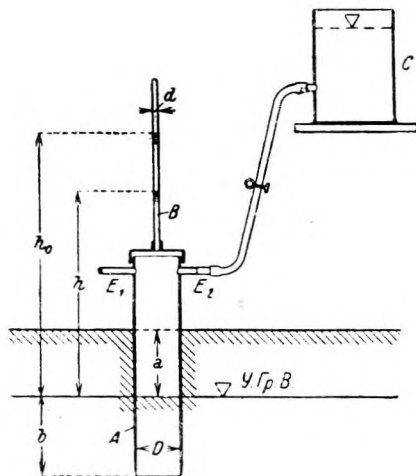


Рис. 194. Устройство для определения коэффициента фильтрации (по Кочени).

сообразнее всего устанавливать при помощи стальной трубы  $A$ , диаметром 10 см, которую осторожно забивают в водоносный слой на глубину в 30 см, при забивке все время удаляя грунт из промежутка  $a$  (рис. 194). Затем из резервуара  $C$  к колодцу подводится вода до тех пор, пока уровень в вертикальной трубке  $B$  не установится на высоте  $h_0$ , после чего измеряется отрезок времени  $\Delta t_1$ , потребный для падения уровня в трубке до высоты  $h$ . После этого труба  $A$  осаживается еще на 10 см глубже в грунт, без выемки грунта; вновь путем подачи воды из  $C$  уровень в вертикальной трубке доводится до высоты  $h_0$  и опять измеряется время  $\Delta t_2$ , необходимое для установления уровня на высоте  $h$ . Коэффициент фильтрации получается из выражения:

$$k = \frac{2l}{\Delta t_2 - \Delta t_1} \cdot \left(\frac{d}{D}\right)^2 \ln \frac{h_0}{h}. \quad (87)$$

Этот способ позволяет быстро, однако только приближенно, определять  $k$  для водоносного слоя небольшого протяжения.

Лабораторное исследование. При пробах связных грунтов с ненарушенной структурой, пробу, предназначенную для опыта, помещают в широкую

<sup>1</sup> R. D a c h l e r. Über Sickerwasserströmungen in geschichtetem Material. Die Wasserwirtschaft, № 2, Wien 1933.

<sup>2</sup> J. K o z e n y. Über Bodendurchlässigkeit. Die Wasserwirtschaft. № 33 u. 34, Wien 1931.

трубу и заливают промежутки между стенками трубы и пробой парафином<sup>1</sup> (рис. 195).

При производстве опыта, по пьезометрам  $St$  отсчитывается разность уровней  $\Delta h$ , соответствующая абсолютному падению при движении воды на длине  $\Delta l$ . Из  $J = \Delta h / \Delta l$  и из величины измеренного у выхода расхода воды  $Q$  затем следует:

$$\frac{Q}{F} = u_f$$

и

$$k = \frac{u_f}{J} = \frac{Q}{F} \cdot \frac{\Delta l}{\Delta h} \quad (88)$$

При пробах с нарушенной структурой, взятых в сыпучих грунтах, может быть применен тот же прибор. Чтобы, по возможности, приблизиться к естественным условиям залегания грунтов, и тем самым получить при опыте хотя бы грубо приближенное значение коэффициента фильтрации, уплотняют помещенную в прибор пробу настолько, чтобы было соблюдено условие равенства объемов пробы и составившей ее массы грунта в естественных условиях залегания. В остальном производство опыта и вычисление протекает так же, как и в предыдущем случае, причем заливка зазоров парафином отпадает. Данный способ позволяет приблизительно устанавливать зависимость значения  $k$  от направления течения (также при слоистых грунтах), так как при помещении пробы в прибор можно примерно воспроизвести расположение слоев.

Так как при грунтах неоднородного состава, для получения надежных средних значений коэффициента фильтрации, число исследуемых проб должно быть очень велико, то здесь играет роль время, потребное для лабораторных исследований. Существует способ, применение которого ограничивается грунтами с  $k = 0,5 \times 10^{-4}$  см/сек до  $k = 500 \times 10^{-4}$  см/сек, дающий несомненно менее точные результаты, но отличающийся быстротой. Он основан на измерении капиллярного смачивания пробы и использует закон движения воды в капиллярах почвы,<sup>2</sup> а именно зависимость:

$$x^2 = mt \quad (89)$$

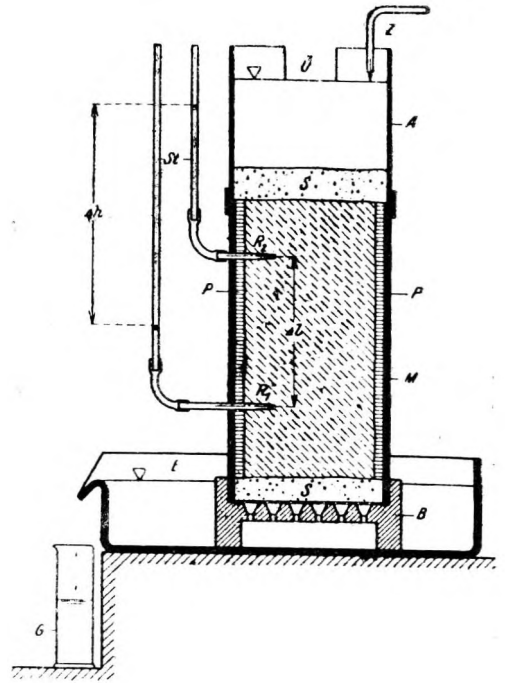


Рис. 195. Прибор для определения коэффициента фильтрации в пробах с нарушенной структурой (по Терзаги).

<sup>1</sup> K. Terzaghi. Sickerverluste aus Kanälen. Die Wasserwirtschaft, № 18 u. 19, Wien 1930.

<sup>2</sup> Теоретическое обоснование этого закона дают: J. Kozeny. Über den kapillaren Aufstieg im Boden. Der Kulturtechniker, S. 11, 1924, u. K. Terzaghi. Soil studies for the Granville Dam at Westfield. Massachusetts Journal New England, Waterworks Association, 1928. Усовершенствование способа принадлежит A. Casagrande. См. A. Casagrande. Research on the Atterberg limits of soils. Public roads, vol. 13, № 8, 1932.

Здесь  $x$  означает длину в сантиметрах, на которую распространилось в грунте (в горизонтальном направлении) капиллярное смачивание,  $t$ —соответствующее время в минутах и  $m$ —постоянную пробы. Коэффициент фильтрации получается из выражения:

$$k = \frac{m^2}{A} \cdot \frac{\alpha}{1 + \alpha}$$

где  $\alpha$  означает коэффициент порозности и  $A$ —коэффициент, в среднем, составляющий  $10 \times 10^{-4}$  см/сек.

Постоянная  $m$  определяется следующим образом. Стекланный цилиндр, длиной в 200 мм и с внутренним диаметром в 40 мм, заранее закрытый с нижнего конца медным ситом Б, набивается предварительно высушенной пробой (рис. 196).

После этого закрывают верхний конец цилиндра каучуковой пробкой а с отверстием, к которой присоединяется тонкая резиновая трубка с, помещают

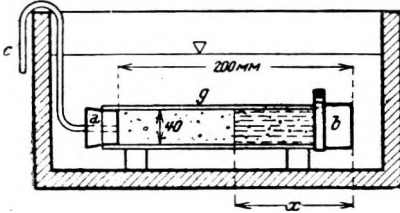


Рис. 196. Прибор для определения коэффициента фильтрации в пробах мелкозернистых грунтов с нарушенной структурой флю Терцаги и Касагранду).

заряженный цилиндр в водяную ванну и регистрируют по длине и времени капиллярное смачивание пробы, распространяющееся от нижнего конца цилиндра.

Из уравнения (89) следует, что

$$\ln m = \ln x^2 - \ln t. \quad (91)$$

Если теперь нанести на график значения  $\ln x^2$  в качестве абсцисс и  $\ln t$  в качестве ординат, для чего является целесообразным использовать логарифмическую бумагу, тогда  $\ln m$  определяется абсциссой той точки, которая соответствует значению  $t = 1$ .

Применение эмпирических формул. Эмпирические формулы служат для приближенного вычисления коэффициента фильтрации  $k$ . При этом следует предпочитать те формулы, в которых характеристика грунта дается в простой форме, но с достаточной полнотой. Такую характеристику пробовали дать, вводя понятие действующего (или эффективного) диаметра зерна и учитывая коэффициент порозности.

Под действующим диаметром зерна  $d_w$  понимается диаметр зерен такой величины, которые, если бы грунт состоял только из них, давали бы такую же скорость фильтрации, как и смесь зерен разной величины, в действительности составляющих водоносный слой. На основании опыта, действующий диаметр зерна можно определить как диаметр такого зерна, меньше которого в данной смеси содержится по весу 10% зерен.

По Хазену, коэффициент фильтрации в см/сек выражается формулой:

$$k = 116 (0,7 + 0,03 T) d_w^2, \quad (92)$$

где  $T$  означает температуру воды в градусах Цельсия. Слехтер предлагает определять коэффициент фильтрации при температуре воды в 10 по формуле:

$$k_w = m d_w^2, \quad (93)$$

где  $m$  принимает, в зависимости от величины коэффициента порозности, следующие значения:

$\alpha =$	0,26	0,28	0,30	0,32	0,34	0,36	0,38	0,40	0,42	0,44	0,46
$m =$	90	120	150	190	230	290	310	370	420	520	610

Для вычисления расхода вода из выражения  $Q = u_f F = k J F$  необходимо еще знать  $J$ . Значение уклона  $J$  берут с плана, на котором уровень грунтовых

вод выражен в горизонталях. Если уровень грунтовых вод не образует единой плоской поверхности, то при установлении величины расхода воды, протекающего под углом к плоскости сечения  $A - B$ , надо поступать подобно тому, как пояснено на рис. 196. Разница в данном случае заключается только в том, что теперь  $q = kJ\Delta F$ ) и полный расход воды, протекающий через сечение  $A - B$  под некоторым к нему углом, составляет

$$\sum_A^B q = \sum_A^B kJ\Delta F$$
, где  $J$  означает уклон поверхности грунтовых вод, соответствующий отдельным  $\Delta F$ .

#### IV. ПОТЕРИ СТОКА

Если распространить основное уравнение водного баланса замкнутого водосбора в его общем виде:

$$N = A_o + A_u + V + R_o + R_u$$

на более крупные водосборы, то обнаружится, что в большинстве случаев можно пренебречь стоком грунтовых вод  $A_u$ , вследствие его незначительности по сравнению с прочими слагаемыми. Что касается до поверхностного накопления  $R_o$ , то оно пока не будет учитываться в целях упрощения ниже следующего вывода.

При этих предположениях уравнение водного баланса принимает вид:

$$N = A_o + V + R_u . \quad (94)$$

Поверхностный сток  $A_o$  в тот или иной момент времени не равняется, следовательно, осадкам, но составляет величину меньшую или большую, чем они, смотря по тому, больше или меньше нуля сумма  $V + R_u$ . Так как в этом выражении слагаемое  $V$  может принимать только положительные значения, то испарение представляет для всего процесса в целом невозместимую и непрерывную потерю стока. Подземное накопление  $R_u$  может, напротив, менять свой знак в зависимости от того, является ли фильтрация в грунт больше или меньше количества воды, переходящего из области грунтовых вод к поверхностным водам. Кроме того, хотя фильтрация на время уменьшает поверхностный сток, просочившиеся в грунт осадки, повышая уровень грунтовых вод, затем будут способствовать вновь увеличению поверхностного стока в данном районе. По этой причине фильтрацию в грунт, хотя и следует рассматривать как потерю стока, но в противоположность испарению ее следует расценивать как потерю возместимую и только временную.

Согласно этому, если вновь возвратиться к общему виду уравнения водного баланса, то и поверхностное накопление  $R_o$  в те отрезки времени, когда фактически в озерах, в растительном или в снеговом покрове происходит накопление воды, представляет возместимую, временную потерю стока. Поэтому выражение потери стока будет в дальнейшем применяться как общее определение только в указанном выше понимании.

В отношении применения общепризнанного уравнения водного баланса прежде надлежит решить, за какой отрезок времени следует производить суммирование отдельных членов уравнения. Из практических соображений сравнение объема осадков и стока имеет смысл только тогда, когда, выражаясь образно, осадки уже превратились в расход воды, следовательно стекающая по поверхности вода достигла створа, замыкающего исследуемый водосбор. Время на пробег, которое требуется для осадков, обуславливает сдвиг в фазах осадков и стока относительно друг друга. По этой причине, так как, сверх того, процесс выпадения осадков не является непрерывным,—



сравниваемые величины, противопоставляемые друг другу в уравнении водного баланса, следует получать суммированием за столь продолжительные периоды времени, чтобы благодаря этому оба явления, по возможности, перекрывались.

Чтобы выразить в основном уравнении длину периода сравнения в вполне ясной форме, представляется целесообразным ввести значения высоты водяного слоя вместо значений расхода воды и суммарного расхода воды. Этот способ выражения не является новым, он уже был принят при установлении величин осадков и стока.

На основании определений, приведенных выше при рассмотрении стока, можно говорить также о высоте слоя потерь стока, понимая под этим высоту того слоя воды, который бы образовался при равномерном распределении суммарного объема потерь на весь водосбор. Отсюда следует:

высота слоя потерь стока = высоте слоя осадков — высота слоя стока.

Так как, с другой стороны, высота слоя потерь стока составляется из высоты слоя испарения  $h_V$  и из высоты слоя  $h_R$ , получающейся как результат различных процессов накопления, то уравнение водного баланса принимает упрощенный и более наглядный вид:

$$h_N = h_A + h_V + h_R, \quad (95)$$

причем  $h_N$ ,  $h_A$  и  $h_V$  могут иметь только положительный знак, тогда как  $h_R$  может иметь и отрицательный знак. Чтобы уравнение имело практическое значение, необходимо значения высот приводить за соответственные отрезки времени, т. е. за отдельные дни, месяцы или даже годы, снабжая члены уравнения соответствующими обозначениями. Например, уравнение (95) для годового периода примет при этом вид:

$$h_{N, \text{год}} = h_{A, \text{год}} + h_{V, \text{год}} + h_{R, \text{год}} \quad (96)$$

Планомерно проведенные наблюдения над осадками и стоком ведут в конечном результате к изображению их изменения во времени, то есть к построению хронологических графиков осадков и стока. Поэтому, для полного выражения уравнения баланса следует стремиться получить хронологические графики как испарения, так и накопления воды. На пути этой задачи встают, однако, трудности, так как до настоящего времени еще не имеется возможности измерить, хотя бы сколько-нибудь точно, величину накопления воды для более крупных водосборов. Поэтому гидрологические исследования могут быть пока направлены только на то, чтобы исследовать испарение, равно как и фильтрацию на отдельных процессах, и затем косвенным путем, пользуясь полученными единичными данными,—заключать о величине накопления воды.

## ИСПАРЕНИЕ

Испарение происходит со свободной водной поверхности, с сырой почвы: и со снегового или ледяного покрова.

Интенсивность испарения зависит от температуры воды и воздуха, от содержания влаги в воздухе, от движения воздуха, от характера почвы и от растительного покрова.

С увеличением температуры, испарение возрастает. Увеличение дефицита влажности воздуха, связанное с падением атмосферного давления, делает испарение более интенсивным. При безветренном состоянии оно сильно убывает, в то время как сухие воздушные течения обуславливают сильное его возрастание. Величина испарения зависит от того, происходит ли оно со свободной водной поверхности, с сырой неводеланной почвы или с почвы, покрытой растениями.

На свободной водной поверхности всегда имеется вода для испарения\* тогда как в почве вода, поскольку вообще имеются в достаточном количестве грунтовые воды, должна еще (под действием силы капиллярного подъема) быть поднята по капиллярам вверх. В общем, при равных условиях, насыщенная водой, покрытая растительностью почва испаряет немного меньше, чем свободная водная поверхность. Почва, лишенная растительности, испаряет еще меньше.

Испарение с больших водных поверхностей. Для измерения испарения с больших водных поверхностей может быть применен предложенный Вильдом пловучий испаритель—атмометр или эвапорометр (рис. 197).<sup>1</sup>

Этот испаритель опускается на воду в пловучем состоянии и закрепляется на месте при помощи двух проволочных тросов S. Он имеет испаряющую поверхность в 1000 см<sup>2</sup>. Для производства измерения кран e закрывается, и в чашку a наливается ровно 1 л воды.

В момент измерения берут отсчет по термометру g и вынимают полуку пробку b, так что остаток воды стекает в собирательный сосуд c. Вынув измерительный прибор, открывают кран e и дают воде слиться в измерительный стакан. Если в промежуток времени между отсчетами выпали осадки, измеряемые при помощи дождемера, плавающего рядом с испарителем, то осадки через отверстие, закрываемое пробкой b, также попадают в сосуд c, стекают вместе с остальной водой в измерительный стакан и измеряются в нем. Одно деление измерительного стакана соответствует изменению уровня в испарителе, а также и в дождемере в 0,05 мм (если поверхности испарителя и дождемера выбраны в целях упрощения равными по величине). Высота слоя испарения, выраженная в миллиметрах, получается равной:

$$h_v = 10 h_N - h_M, \quad (97)$$

где в правой части уравнения первый член соответствует толщине слоя воды в испарителе после его зарядки, второй член—слою выпавших осадков и последний член—слою воды в измерительном стакане, приведенному к поверхности испарителя (то есть умножая число покрытых водой делений стакана на коэффициент 0,05).

Для озер с небольшой поверхностью зеркала пробовали устанавливать величину испарения путем непосредственных измерений уровня при помощи мерной иглы, учитывая, разумеется, осадки. Препятствием для этого способа является влияние на результаты измерения колебаний уровня под действием ветра или изменения атмосферного давления.

Приближенный способ измерения испарения, хотя отчасти учитывающий условия свободной поверхности озер, представляет испаритель Фишера. Чашка, диаметром в 50 см и глубиной в 20 см, открыта солнечным лучам и осадкам. Последние должны учитываться и при этом способе измерения.

В тех же целях служат, основанные на иных принципах, пористые глиняные сосуды, примененные Ливингстоном. Полые, шарообразные глина-

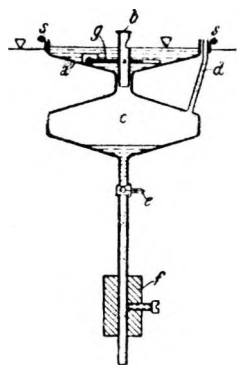


Рис. 197. Испаритель для открытых водных пространств по Вильду.

<sup>1</sup> Показания испарителей находятся в зависимости от их расположения, размеров испаряющей поверхности, нагревания солнцем и т. д. Они дают не истинную величину испарения, а так называемую испаряемость. Отношение величины истинного испарения к испаряемости называется редуцированным коэффициентом испарителя. Для его определения необходима тарировка испарителя, которая требует дорогих устройств. Поэтому в обычных условиях редуцированный коэффициент остается неизвестным. Об испарителях, применяемых в советской практике, см. Кедровливанский. Метеорологические приборы. Москва, 1937 г. (Прим. пер.).

ные или фарфоровые тела, диаметром около 4 см, с длинным горлом, наполняются дистиллированной водой, погружаются в перевернутом состоянии в наполненный водой измерительный стакан и свободно экспонируются на солнце и ветре. Вода, затрачиваемая на испарение, пополняется из измерительного стакана посредством капиллярного подъема, а убыль воды в стакане является предметом измерения.<sup>1</sup>

В самопишущих весах Касснера—Фюсса испарившаяся вода пополняется при помощи бутылки Мариотта. Весовая потеря воды в бутылке регистрируется в течение продолжительного времени.

Испарение в условиях суши. Для измерения испарения с влажной почвы употребляются приборы, более или менее воспроизводящие естественные условия или же закладываемые непосредственно в грунте.

В весовом испарителе Вильда — Фюсса, служащем для определения испарения с воды в условиях суши (рис. 198) и напоминающем почтовые пружинные веса, чашка испа-

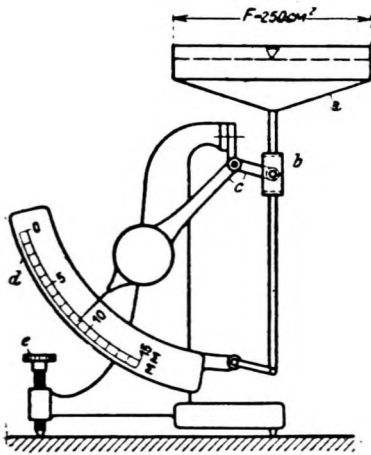


Рис. 198. Весовой испаритель по Вильду—Фюсеу.

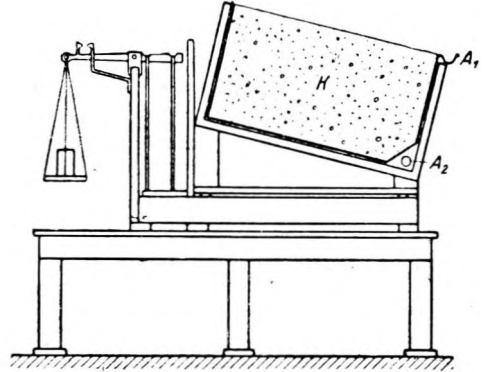


Рис. 199. Испаритель, применяемый Баварским гидрологическим управлением.

рителя *a* помещается на одном плече коленчатого рычага *c*, имеющего на другом плече противовес. Стрелка указывает на дуговой шкале делений высоту испарения  $h_v$  в миллиметрах соответственно убыли воды, первоначально налитой в чашку испарителя.

Весовой испаритель для защиты от солнца и дождя надо устанавливать на высоте 1,5 — 2,0 м от земли в доступной воздуху деревянной будке с жалюзийными стенками, наподобие той, что применяется для метеорологических приборов. Этот прибор, правда, в состоянии давать относительную высоту слоя испарения как по месту, так и по времени, но мало пригоден для определения абсолютных значений испарения.

Лучше следующее устройство, применяемое в Баварии. Ящик *K* из цинковой жести, размерами 0,5 X 1,0 X 1,0 м, снабженный отводами для поверхностного ( $A_1$ ) и грунтового ( $A_2$ ) стока, наполняется землей, покрытой дерном, и выставляется на воздух на весах в наклонном положении (рис. 199). Если уменьшение в весе с учетом выпавших осадков регистрируется по несколько раз в день, то отсюда может быть вычислена высота слоя испарения.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Finke. Meteorologisches Taschenbuch. 1931. Об основанном на том же принципе испарителе Галленкампа и результатах сравнительных измерений по нему и по чашечным-испарителям (сист. Фишера—Биндемманна) см. Н. Мгосе. Verdunstungsmessung auf freien Wasserflächen. Wasserkraft u. Wasserwirtschaft, Н. 21, 1937. (Прим. пер.).

<sup>2</sup> L. M a y r. Über die Ergebnisse der Verdunstungsversuche in München-Bogenhausen. Wasserkraft u. Wasserwirtschaft, Н. 7, 1928.

Меня в ящике состав почвы и растительности, можно исследовать влияние этих факторов на испарение.

Конструкцию, наиболее соответствующую естественным условиям испарения, представляет испаритель по Рыкачеву (рис. 200).

В почву закапываются три цинковых ящика—ящик-футляр *A* и оба рабочих ящика *B* и *C*. Ящик *C* имеет цельные стенки и дно и служит опорой для ящика *B*. У последнего дно представляет род сита с отверстиями, размером в 1 мм. Поверхность дна испарителя составляет 1000 см<sup>2</sup>.

При зарядке ящик *C* наполняется слоем воды в 50 мм и в него помещается термометр  $T_1$ . В верхний ящик на ситообразное дно *S* накладывается слой древесного угля *K*, толщиной в 10 мм, и поверх него естественный слой почвы в том же состоянии уплотнения, в каком он прежде находился.

В почву погружается до глубины в 10 см термометр  $T_2$ . В заключение, почва в ящике засеивается или засаживается той же растительностью, которой покрыта окружающая местность.

Испаритель описанной конструкции находится в тех же условиях, как и окружающая его естественная почва. Воздух в сосуде *C* постоянно насыщен водяными парами, которые поглощаются углем и заменяют растениям естественную влажность почвы. Осадки просачиваются в сосуд *C*, поскольку их не задерживает почва, заполняющая сосуд *B*.

Высота слоя испарения получается на основании остаточного слоя воды  $h_C$  в сосуде *C* и высоты слоя осадков  $h_N$  по расположенному поблизости дождемеру из выражения:

$$h_V = 50 + h_N - h_C. \quad (98)$$

**Испарение со снегового покрова.** Испарение со снегового покрова иногда вызывает ощутимые потери стока. Так, например, гидросиловые установки, водосборы которых большей своей частью расположены в высокогорных районах выше границы вечного снега, заметно теряют на испарении в своем рабочем расходе и, именно, в те периоды, когда их водосборы захватываются фенами. Сухость воздуха на больших высотах благоприятствует испарению снега и является причиной того, что даже лед глетчеров испаряется с большой быстротой.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> G. J. Finch. Der Kampf um den Everest. Leipzig 1925. В этой книге приводится следующее интересное наблюдение. Один из участников экспедиции на высоте 6000 м провалился сквозь лед озера, образовавшегося на глетчере. После того как его вытащили, его одежда превратилась в твердый ледяной панцирь, из которого его пришлось извлекать, как из скорлупы. Смерзшаяся одежда была, как доска, прислонена к каменной стене. Однако через короткое время ее твердость исчезла и она опустилась, так как совершенно высохла. Сухой разреженный горный воздух испарил лед так же быстро, как это делают солнечные лучи с водой на меньших высотах. Это природное явление находит яркое выражение в той бедности водою вытекающих из глетчеров водотоков, которая наблюдается в районе Эвереста.

А. Маас. Büsserschnee. Atlantis, N. 11, 1933. В ней приводятся наблюдения в высокогорных районах Южной и Средней Америки, Центральной Африки и Азии. Между прочим указывается следующее: "На больших высотах сухость воздуха так велика, что испарение выпавшего зимою снега протекает необычайно быстро. Некогда мягкий снег, под действием ежесуточной смены тепла и холода, превращается в стеклообразные льдины, а затем исключительно сухой ветер Кордильеров полирует и округляет их. В результате возникают редкой иглообразной формы фигуры, часто в рост человека, напоминающие белых пилигримов. Эти ледяные иглы здесь зовут Penitents."

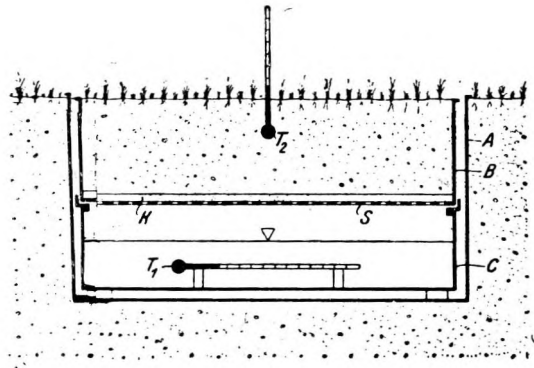


Рис. 200. Испаритель по Рыкачеву.

Величина испарения со снегового покрова устанавливается при помощи снегового испарителя, который может иметь, примерно, такую конструкцию, какая изображена на рис. 201.

В деревянном щите *a* со сторонами, длиною в 100 см, сделан вырез, площадью в 1000 см<sup>2</sup>, то есть с длиною сторон, кругло, по 32 см. Непосредственно под вырезом выкопана яма *e*, глубиною в 25 см, стенки которой защищены досками. В вырез вставлена решетка с из медных трубок, подвешенная к несущей конструкции *b*, высотой в 70 см. К решетке с присоединена жестяная воронка *d*. Стекающая между стержнями решетки талая вода собирается в сосуде *f*.

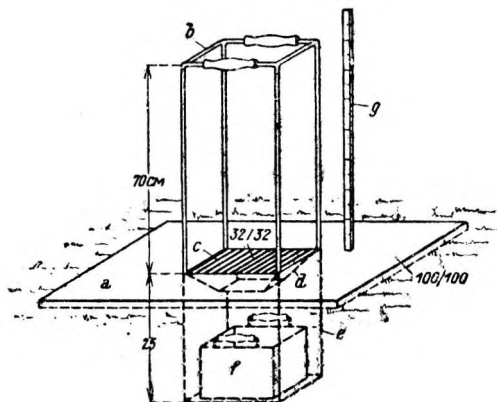


Рис. 201. Снеговой испаритель по Веинлендеру.

При измерении, снежный кубик, расположенный внутри стоек несущей конструкции, осторожно вырезается вдоль по сторонам помощью снабженного длинными ручками железного листа, шириною в 35 см, затем помощью конструкции он приподнимается и взвешивается вместе с частями прибора — *b*, *c* и *d*. Вычтя известный вес этих частей, получают вес  $G_S$  снежного кубика. Таким же образом определяют вес  $G_W$  талой воды, собранной в сосуде *f*. Далее, помощью установленного по близости дождемера, определяется вес  $G_N$  осадков, приходящихся на площадь в 1000 см<sup>2</sup>. Величина  $G_N - (G_S + G_W)$  будет весом воды, испарившейся со снегового покрова, площадью в 1000 см<sup>2</sup>. Если выразить вес в граммах, то высота испарившегося слоя воды составит в миллиметрах водяного столба:

$$h_{SV} = \frac{G_N - (G_S + G_W)}{1000}$$

По окончании измерения осторожно ставят сосуд *f* и снежный кубик на прежнее место. Измерения повторяются в определенные сроки, чаще всего по одному разу в сутки.

В табл. 4, в качестве примера, приведены данные, характеризующие ход снегового испарения в Мюнхене за время с 11 по 19 января 1934 г.

Таблица 4

Испарение со снегового покрова в Мюнхене в январе 1934 г.

Число	Часы	Толщина снегового покрова в мм	Плотность снегового покрова в мм водяного слоя	Высота слоя осадков в мм	Высота слоя таяния в мм	Испарение со снегового покрова в мм	Испарение с водной поверхности в мм
11	8	215	0,267	—	—	—	—
12	8	215	0,267	0,1	0,0	0,0	0,3
13	8	205	0,297	4,7	0,1	1,8	0,1
14	8	190	0,300	0,5	2,1	1,6	0,5
15	8	190	0,290	0,2	0,5	1,7	0,6
16	8	175	0,260	0,2	7,5	2,2	0,6
17	8	140	0,306	0,1	2,0	0,9	0,6
18	8	110	0,258	2,5	14,0	2,9	0,8
18	16	30	0,350	2,0	18,8	1,1	0,3
19	8	следы	—	0,8	10,5	0,3	0,8
Сумма . . . . .		—	—	11,1	55,5	12,5	5,6

Наблюдаемое одновременно при помощи пловучего испарителя испарение с водной поверхности свидетельствует, что при климатических условиях, имевших место при данных наблюдениях, испарение со снегового покрова превышает, примерно, в два раза испарение с водной поверхности.

## ФИЛЬТРАЦИЯ

Основное уравнение водного баланса замкнутого водосбора не дает оснований судить о ходе фильтрации. Слагаемые  $A_u$  и  $R_u$  зависят от величины фильтрации  $S$ , которая может быть меньше или больше суммы  $A_u + R_u$ , смотря по тому, имеет ли подземное накопление  $R_u$  положительное или отрицательное значение.

Можно сделать только общее заключение, что фильтрация зависит от хода осадков, от рода почвы и растительного покрова. Просачиваться будет тем больше воды, чем более крупнозерниста почва и чем более шероховата и плоска ее поверхность. Напротив, просачивание будет уменьшаться в вегетационный период, вследствие потребности в воде со стороны растений, при снеговом покрове или во время морозов. Эти установленные на опыте факты следует учитывать, чтобы сообщить измерительным приборам надлежащее устройство и правильно их расположить, а также правильно оценить данные наблюдений.

Иным путем придется идти, если потребуется ответить на вопрос о наибольшем объеме воды, который в состоянии просочиться в почву определенного состава и с определенным поверхностным покровом. При оценке фильтрации из рек, каналов или специально проведенных фильтрационных канав и водоемов, которые используются для образования грунтовых вод и в целях орошения, имеют значение данные измерений этого рода искусственного просачивания.

**Просачивание осадков.** Для измерения фильтрации пользуются лизиметрами.

Прибор, сконструированный по Волни<sup>1</sup> (рис. 202), состоит из квадратного цинкового ящика  $a$  с отверстиями в дне и присоединенной к дну воронкой, в свою очередь, соединяющейся с мензуркой  $c$ . Ящик  $a$ , равно как и деревянный ящик-футляр  $b$  заполняются подлежащей исследованию почвой и затем засеваются. Усовершенствование заключается в том, что цинковый ящик  $a$  вместе с мензуркой  $c$  помещают прямо в почву наподобие того, как в почвенном испарителе Рыкачева. Количество воды, скопившееся в мензурке  $c$ , поделенное на площадь фильтрующей поверхности прибора, дает высоту  $h_s$  просочившегося слоя воды.

**Искусственная фильтрация.** Измерение фильтрации простым, однако и весьма приближенным способом может быть осуществлено при помощи забиваемой в грунт трубы (рис. 203). Внутренность трубы до съемного сита  $S$  осторожно наполняется водою, после чего регистрируется промежуток времени  $t$ , потребный для просачивания слоя воды высотой  $h$ .<sup>2</sup> Отсюда получается  $h_s = \frac{h}{\Delta t}$ .

Этот простейший способ неприменим когда вода подводится водоемами или канавами разной формы сечений и тогда, когда уровень подземных вод влияет на движение воды. В таких случаях прибегают к испытаниям на модели или, при известных обстоятельствах, также к расчету на основе теории потенциала.

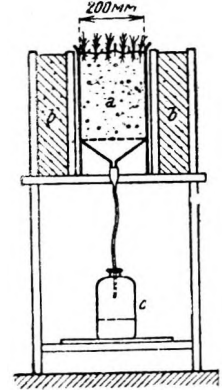


Рис. 202. Фильтромер по Волни.

<sup>1</sup> E. W o l l n y. Forschungen auf dem Gebiete der Agrikulturphysik. 1887.

<sup>2</sup> O. F a u s e r. Meliorationen Berlin. 1921.

Исследование на модели опирается на следующее соображение. Если водоносный слой настолько мелкозернист, что можно наперед принять для него действительность закона фильтрации Дарси  $u = kj$  и если для водоносного слоя на модели также справедлив этот закон, должно иметь место:

$$\frac{u_N}{u_M} = \frac{k_N J}{k_M J}. \quad (99)$$

откуда следует:

$$\frac{Q_N}{Q_M} = \frac{F_N u_N}{F_M u_M} = \frac{F_N k_N}{F_M k_M}, \quad (100)$$

где знаками  $N$  и  $M$  обозначены мгновенные величины расхода воды  $Q$ , живого сечения  $F$ , средней скорости течения  $u$  и коэффициента фильтрации  $k$ —для естественных условий и для модели.

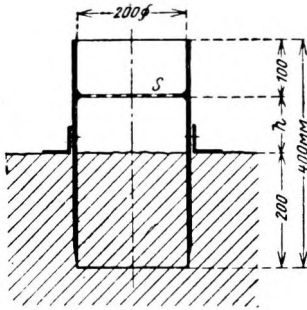


Рис. 203. Прибор для определения высоты слоя фильтрации по Фаузеру.

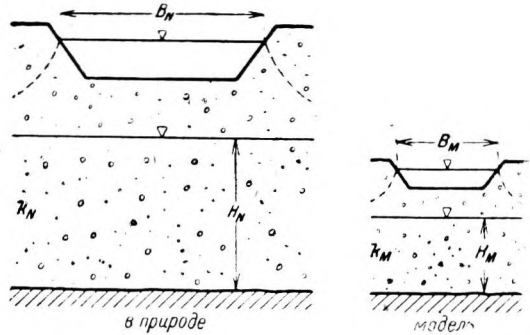


Рис. 204. Испытание на модели процесса фильтрации.

Если модель представляет линейное уменьшение реального предмета, в данном случае формы водоема или канавы, а также и водоносного слоя,

в отношении  $\frac{1}{n}$  (рис. 204), если, следовательно,  $\frac{B_M}{B_N} = \frac{H_M}{H_N} = \frac{1}{n}$ , тогда отно-

шение живых сечений будет равно  $\frac{F_M}{F_N} = \frac{1}{n^2}$

и отсюда:

$$Q_N = Q_M \frac{k_N}{k_M} n^2. \quad (101)$$

При исследовании на модели, наряду с расходом фильтрации на модели  $Q_M$ , надлежит еще одним из описанных выше способов определить коэффициенты фильтрации  $k_N$  и  $k_M$  и подставить полученные значения в уравнение (101), чтобы получить из него вероятную в естественных условиях величину расхода фильтрации  $Q_N$ . Этот способ отличается большой приспособляемостью к практическим потребностям, тем более что на модели можно работать с грунтом такой крупности, который наиболее отвечает условиям испытаний.<sup>1</sup>

В то время как при испытании на модели имеется возможность учитывать любые очертания контура основной формы поперечного сечения, при аналитическом решении приходится ограничиваться несколькими простыми

<sup>1</sup> Schaffernak und K. Dachler. Versuchstechnische Lösung von Grundwasserproblemen. Die Wasserwirtschaft, № 1 u. 3, Wien. 1931.

случаями. Для фильтрационной канавы трапециoidalного сечения, при замене трапециoidalного сечения подобным ему параболическим, оказывается возможным при помощи конформного изображения дать аналитическое выражение для уровня и расхода грунтовых вод.<sup>1</sup> Соответствующее аналитическому выражению изображение подземного потока (рис. 205) совпадает в основных

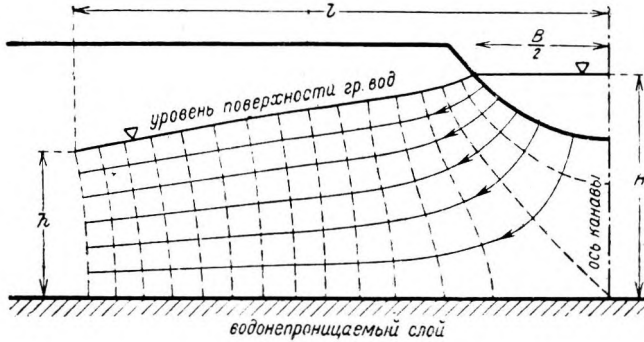


Рис. 205. Приближенный способ вычисления фильтрации в грунт через стенки и дно канавы при помощи теории потенциала (по Далеру).

чертах с действительным его видом и позволяет простым путем производить вычисление просачивающейся массы воды.

Так, например, если уровень в водотоке, шириною по поверхности воды  $B$ , возвышается над горизонтальным водонепроницаемым слоем на высоту  $H$ , и уровень грунтовых вод на расстоянии от оси канавы имеет высоту  $h$ ,—то инфильтрующий расход воды может быть в первом приближении вычислен из уравнения:

$$\frac{Q}{k} = H + 2l - B - \sqrt{(H + 2l - B)^2 - 4(H^2 - h^2)}. \quad (102)$$

## V. ТЕМПЕРАТУРА

Для измерения температуры воздуха, воды, почвы и сооружений употребляются жидкие термометры, биметаллические термометры, электрические термометры сопротивления и термопары.

Жидкие термометры применяются в виде стеклянных термометров, реже в виде металлических термометров Бурдона (Bourdon). Наполнителем их до температуры  $-30^\circ$  служит ртуть, для еще более низких температур — этиловый спирт, креозот, толуол и пр.

Биметаллические термометры состоят из двух спаянных или сфальцованных металлических пластинок, с различным, по возможности, коэффициентом расширения, как, например, медь и железо. Чаще встречается дугообразный биметаллический термометр (см. рис. 211), в котором колебания свободного конца соединительной пластинки, вызванные изменениями температуры, увеличиваются при помощи рычажной передачи. Температура может быть отсчитана непосредственно по протарированной шкале делений.

Действие электрического термометра сопротивления основано на том, что электрическое сопротивление металла меняется с изменением температуры. Это сопротивление измеряется мостиком Уитстона и указывается гальванометром, который после соответствующей тарировки может давать непосредственно температуру в градусах.

<sup>1</sup> R. D a c h l e r. Über die Versickerung aus Kanälen. Die Wasserwirtschaft, № 9, Wien 1933.



В электротермометрах с термопарами, благодаря разности температур в местах спаев<sup>1</sup> двух различных металлов, образуется электродвижущая сила. Изменение напряжения определяется по показаниям милливольтметра, шкала которого градуирована. Термопара состоит из двух спаянных, равной длины, очень тонких тепло- и электропроводящих проволок, например, из медной проволоки, толщиной в 0,05 мм, и константановой проволоки, толщиной в 0,1 мм. Один из спаев помещают в точку измерения, а другой погружают в водяную ванну, которая помещается в термофоровой бутылке, причем в ней, как своего рода нулевом пункте, поддерживается все время одинаковая температура. При помощи переключателя сопротивлений (передвижного реостата) можно включать в цепь гальванометра те сопротивления, которые оказываются целесообразными при данных разностях температур.

Электрические термометры и того и другого рода могут быть сконструированы с неуволимо малой термической инерцией, следовательно являются приборами, особо приспособленными для измерения быстро меняющихся колебаний температуры. Далее, они обладают тем преимуществом, что отсчетное устройство может быть установлено на некотором расстоянии от места измерения, причем оно может быть, как у биметаллического термометра, сконструировано в виде самопишущего прибора.

Биметаллические термометры, электрические термометры сопротивления и термопары должны градуироваться особым способом. Жидкие термометры должны проверяться ежегодно, вследствие возможности сдвига температурной шкалы и сжатия оболочки термометра.

**Температура воздуха.** Истинной температурой воздуха является та температура, которую термометр показывает под действием теплопроводности, исключая влияние какого-либо рода излучения. Поэтому надо уделять большое внимание месту установки термометра.

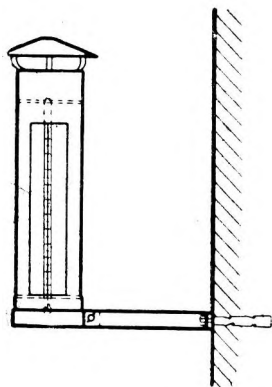


Рис. 206. Воздушный термометр в защитной будке.

Судя по опыту, термометр следует помещать на северной стене дома в домике из жести (рис. 206). Самопишущий термометр-термограф устанавливается, обычно в соединении с барографом и гигрографом, в жалюзийной деревянной будке с двойными стенками (рис. 207). Эта будка не должна обязательно стоять в тени (у северной стороны дома), а может помещаться на открытом месте и быть доступна солнечным лучам.

Кроме нормальных термометров, применяются специальные максимальные и минимальные термометры, по которым могут быть отсчитаны наивысшие и наиминимые суточные температуры.

Для исследований, где вопрос идет о возможности точной, без каких-либо пропусков, регистрации температуры в небольших районах, как, например, при изучении микроклимата, наиболее пригоден термометр сопротивления.

**Температура воды.** Как приборы, так и процесс измерения — различны, в зависимости от того, в каких водах, текущих или стоячих, производятся измерения.

Измерение температуры в текущих водах не вызывает особых затруднений, поскольку, вследствие сильного перемешивания воды при турбулентном движении, как правило, не удастся установить заметной разницы температуры в отдельных точках живого сечения. Кроме того, разность наибольшей

<sup>1</sup> Проволокам придается дугообразная форма и они спаиваются по обоим концам, то есть в двух местах. (Прим. пер.)

и наименьшей суточной температуры воды в Средней Европе весьма незначительна и редко превышает 1°. Поэтому в практических целях достаточно

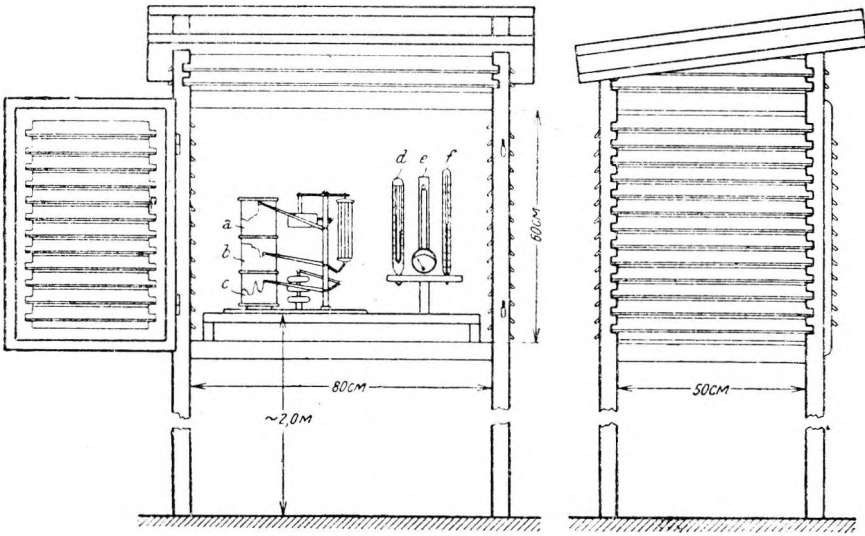


Рис. 207. Жалюзийная деревянная будка для метеорологических приборов.  
 Самопишущие приборы: *a*—термограф; *b*—гигрограф; *c*—барограф. Контролирующие приборы: *d*—максимальный и минимальный термометры; *e*—волосной гигрометр; *f*—термометр.

производить наблюдения в одном месте живого сечения и один раз в сутки. Для измерения выбирают на реке место, защищенное от солнечной инсоляции, с быстрым течением и не слишком мелкое.

Для точных научных исследований должно быть увеличено как число точек, на которых производятся измерения, так и число измерений за сутки, причем надо учитывать применение самопишущих и максимальных и минимальных термометров.

Чтобы, по возможности, сохранять показания термометра неизменными при вынимании его из воды и при отсчете, надо защищать термометр от влияния воздуха. С этой целью применяют самостоятельные черпаки (рис. 208) или так называемые глубинные термометры (рис. 209). Термометр держат в воде около двух минут, затем вместе с черпаком быстро вынимают из воды и производят отсчет.

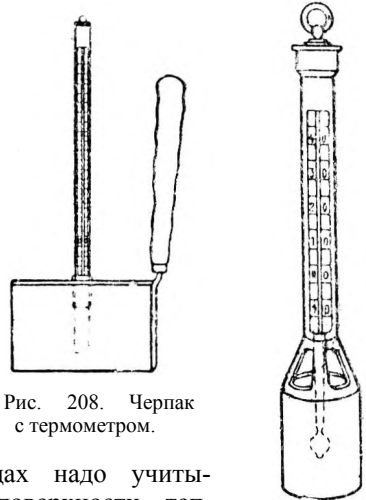


Рис. 208. Черпак с термометром.

Рис. 209. Глубинный черпаковый термометр.

При измерении температур в стоячих водах надо учитывать, что вода, вследствие направленного от поверхности теплого течения, располагается в отношении температуры по слоям.

В зависимости от времени года температура слоев воды прибывает или убывает с глубиной. Наиболее сильное изменение температуры воды происходит, примерно, на глубине от 10 до 15 м. Это изменение носит характер своего рода прыжка, и поэтому указанный слой воды называют переломным слоем.

Ниже переломного слоя, в достаточно глубоких озерах, температура воды приближается к 4°, то есть к той температуре, при которой вода обнаруживает наибольшую плотность (рис. 251).

Разница в распределении температуры в озерах требует измерения температуры в нескольких точках по глубине. Приборы, проходя при вынимании через слои с различной температурой, не должны изменять своих показаний. В этих целях заслуживают внимания термометры с большой тепловой инерцией, опрокидывающиеся термометры и температурные лоты.



Рис. 210. Опрокидывающийся термометр.

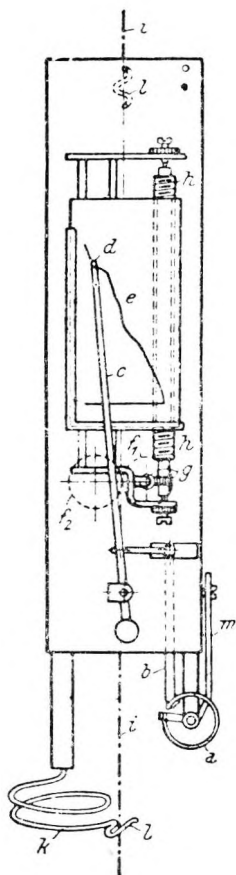


Рис. 211. Температурный лот.

Особенность действия инертного термометра основывается на том, что резервуар термометра, вследствие покрытия его защитным слоем из воска или роговой резины, становится мало теплопроводным и не реагирует на непродолжительные изменения температуры. Подобного рода термометры требуют поэтому продолжительного пребывания в воде, но зато, проходя при вынимании через слои с другою температурой, почти не испытывают ее влияния.

Опрокидывающиеся термометры необходимо перед выниманием поворачивать на  $180^\circ$  (рис. 210). При этом ртуть в нижней узкой части капиллярной трубки разрывается и заполняет прежнюю верхнюю часть капилляра, где температура может быть правильно отсчитана и в опрокинутом состоянии. Перебеганию ртути, заполняющей ртутный шарик, препятствует изогнутая форма капиллярной трубки. Опрокидываемому термометру придан еще один термометр меньших размеров, по которому устанавливается температура, соответствующая моменту отсчета, чтобы таким образом иметь возможность производить требуемую поверку отсчетов по опрокидываемому термометру.

При измерениях указанными выше термометрами они погружаются в воду поодиночке или рядами. При этом температуры получаются только для отдельных точек, расстояние между которыми назначается в 1 м.

Для более точных исследований о перемещении тепла в озерах желательна непрерывная запись температуры самопишущим прибором. Потребности в этом отвечает температурный лот (рис. 211).<sup>1</sup>

Отклонение биметаллического термометра *a* передается плечу *c* и помещающемуся на конце его сапфировому перу *d* и наносится на закопченное стекло *e*. Во время измерения весь прибор в целом скользит по тросу натягиваемому при помощи гири. Движущий блок *f*<sub>1</sub> и холостой блок *f*<sub>2</sub> при посредстве червячной передачи *g* и подъемного винта *A* обеспечивают при изменении глубины погружения прибора выдержанное в масштабе вертикальное перемещение стекла *e*.

Если прибор должен записать вертикальное распределение температуры в каком-либо озере, то его опускают по направляющему тросу *i*, свободно

<sup>1</sup> W. Schmidt. Das Wärmelot, ein Gerät zum Aufzeichnen der Tiefentemperaturen in stehenden Gewässern. Sitzungsbericht d. Akad. d. Wiss. in Wien. Bd. 136, H. 7, 1927.

свисающему с лодки, причем 1 м по глубине прибор должен проходить за время от 2 до 3 сек. Результаты наблюдений, произведенных этим прибором, обнаруживают точность порядка 0,1°, что для указанных измерений является вполне достаточным.

**Температура почвы и сооружений.** Изменения температуры почвы асинхронны изменениям температуры воздуха, причем уже на небольших глубинах в почве отмечается заметное затухание температурных колебаний. В средних широтах температура почвы на глубине 1,5 м остается в течение всего года постоянной, по величине несколько превышая среднюю годовую температуру (рис. 245).

По этой причине является достаточным ограничиться при измерениях температуры почвы сравнительно неглубоким слоем. Обычно ограничиваются измерениями до предполагаемой границы промерзания. Установление границы промерзания грунта, следовательно определение мощности того слоя почвы, в котором в течение годового периода имела место минимальная температура в 0°, имеет со строительной точки зрения большое значение. Производство подобного рода исследований, позволяющих судить не только о величине и пределах колебания температуры, но и об ее продолжительности, имеет особое значение для оснований сооружений, закладки водопроводных труб, а также для постройки высокогорных гидростанций. При измерениях в высоко расположенных местностях следует еще учитывать влияние на температуру почвы со стороны снегового покрова, а также распределение температуры внутри снегового покрова.

В остальном температура почвы зависит от характера почвы, от поверхностного ее покрова и от условий влажности, вследствие чего характеристика температурных условий почвы определенного района может быть получена только на основе многих родов наблюдений или одного рода наблюдений, но отвечающего среднему температурному состоянию почвы.

Термометр опускается в почву в вертикальной трубе из обожженной глины или эбонита. Установка его на требуемую глубину производится при помощи штанг или цепи, к нижнему концу которых он прикрепляется. В целях защиты от повреждений термометр заключается в медную оправу имеющую прорез для отсчетов. Пространство между медной оправой и резервуаром термометра наполняется какой-либо засыпкой, чтобы предотвратить изменение температуры во время вынимания прибора и отсчета по нему.

При измерении температур на глубинах до 0,5 м правильнее не пользоваться трубками и придавать термометру наклонное или горизонтальное положение, чтобы уменьшить неточность, связанную с указанием средней глубины погружения резервуара термометра, который имеет длину в несколько сантиметров.

Чтобы избежать всех технических трудностей, связанных с применением жидких термометров, начинают и при измерении температуры почвы все больше применять электрический способ измерения помощью термометров сопротивления или термопар, который, помимо всего, обладает еще преимуществом самозаписи наблюдений.<sup>1</sup>

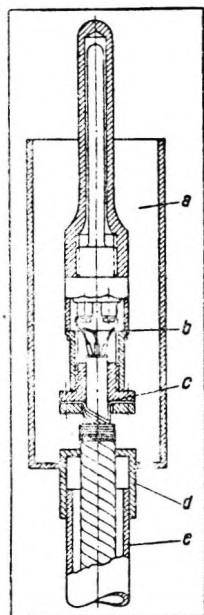


Рис. 212. Электрический термометр сопротивления для измерения температуры в кладке сооружений.

<sup>1</sup> W. Schmidt. Ein neues Verfahren zur Messung der Bodentemperatur. Zeitschrift für Instrumentenkunde, H. 8, 1925.

Местность, где устанавливают почвенные термометры, должна быть незатененной, плоской и допускающей свободный сток выпавших осадков. Выпавший снег должен оставаться в естественном состоянии, и поверхность почвы должна возможно меньше нарушаться передвижением по ней. Следует также следить за тем, чтобы термометры не погружались в грунтовые воды.

Для измерения температурных изменений в массивных сооружениях, как, например, в плотинах, которые следует отнести за счет процессов затвердевания бетона, можно рекомендовать электрический термометр сопротивления (рис. 212).

## VI. АТМОСФЕРНОЕ ДАВЛЕНИЕ

Атмосферное давление измеряется при помощи жидких барометров—ртутных барометров, металлических барометров-анероидов, а также термобарометров или гипсотермометров.

В технических целях атмосферное давление выражается в линейных мерах, в миллиметрах ртутного столба, а для научных исследований и для международных сводок о состоянии погоды—в мерах давления, в миллибарах. Пересчет миллибар (1 миллибар = 1000  $\text{дин}/\text{см}^2$ ) в миллиметры ртутного столба получается из соотношения, что 1000 миллибар на уровне моря под  $45^\circ$  географической широты соответствует высоте ртутного столба в 750,08 мм. Деление шкалы барометра на миллибары является нецелесообразным, так как величина единицы деления для каждого места различна вследствие разницы в величине силы тяжести.

Для пересчета в миллибары служит табл. 5.

Таблица 5

Пересчет миллиметров ртутного столба в миллибары

мм	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
0	0	13,3	26,7	40,0	53,3	66,7	80,0	93,3	106,7	120,0
100	133,3	146,6	160,0	173,3	186,6	200,0	213,3	226,6	240,0	253,3
200	266,6	279,9	293,3	306,6	320,0	333,3	346,7	360,0	373,3	386,6
300	400,0	413,3	426,6	440,0	453,3	466,6	480,0	493,3	506,6	520,0
400	533,3	546,7	560,0	573,3	586,6	599,9	613,3	626,6	640,0	653,3
500	666,6	680,0	693,3	706,6	719,9	733,3	746,6	759,9	773,3	786,6
600	799,9	813,3	826,6	839,9	853,2	866,6	879,9	893,2	906,6	919,9
700	933,2	946,6	959,9	973,2	986,6	999,9	1013,2	1026,6	1039,9	1053,2

Для ртутных барометров, показания которых должны быть сравнены с измерениями атмосферного давления в других пунктах, необходимо приведение показаний к нормальной температуре в  $0^\circ$  и к уровню моря.<sup>1</sup> Для этого надо определить абсолютную высоту нижнего уровня ртути в барометре, причем для такого определения достаточна точность в 1 м, соответствующая разности давлений в 0,1 мм.

Анероиды необходимо на месте их установки сравнивать с хорошим ртутным барометром, помещая барометры при сравнении в нетопленное помещение. Сравнение дает поправку на местоположение барометра, которая и подлежит введению в показания барометра, наряду с температурной поправкой. Самопишущему барометру-барографу следует, в целях контроля, придавать ртутный барометр.

<sup>1</sup> Случается, что отсчеты приводят к нормальной силе тяжести, то есть к силе тяжести, действующей под  $45^\circ$  широты. Во избежание ошибок, необходимо ясно оговаривать введение поправки на силу тяжести.

У термобарометров для определения давления служит величина температуры кипения. Прибор должен иметь такое устройство, чтобы резервуар термометра не соприкасался с самою кипящею водою, а только с ее парами. Приборы этого рода подлежат тщательному градуированию. Для перевода отсчитанных по прибору температур кипения в единицы давления может служить табл. 6.

Таблица 6

Температура кипения воды при различном атмосферном давлении, в градусах

Атмосферное давление в мм ртутного столба						Атм. давление в мб					
	0	2	4	6	8		0	2	4	6	8
790	101,09	1,16	1,23	1,30	1,37	1050	101,00	1,06	1,11	1,17	1,23
780	100,73	0,80	0,87	0,94	1,02	1040	100,73	0,78	0,84	0,89	0,94
770	100,37	0,44	0,51	0,58	0,66	1030	100,46	0,51	0,57	0,62	0,68
760	100,00	0,07	0,15	0,22	0,29	1020	100,18	0,24	0,29	0,35	0,40
750	99,63	9,70	9,78	9,85	9,93	1010	99,91	9,96	0,03	0,07	0,13
740	99,26	9,33	9,41	9,48	9,56	1000	99,63	9,69	9,74	9,80	9,85
730	98,88	8,95	9,03	9,10	9,18	990	99,35	9,41	9,46	9,52	9,58
720	98,49	8,57	8,65	8,72	8,80	980	99,07	9,12	9,18	9,24	9,28
710	98,11	8,18	8,26	8,34	8,42	970	98,78	8,84	3,90	8,95	9,01
700	97,71	7,79	7,87	7,95	8,03	960	98,49	8,55	8,61	8,67	8,72
690	97,32	7,40	7,48	7,56	7,63	950	98,20	8,26	8,32	8,38	8,44
680	96,92	7,00	7,08	7,16	7,24	940	97,91	7,97	8,03	8,09	8,14

## VII. ВЛАЖНОСТЬ ВОЗДУХА

Водяной пар, образующийся на поверхности, земли, вследствие испарения с водной поверхности, с влажной почвы и с растительности распространяется в атмосфере посредством диффузии и под влиянием ветра. Распределение температуры ставит пределы распространению водяного пара, так как при низких температурах он сгущается. Влага распределена очень неравномерно. Ее количество в воздухе, влажность воздуха, определяется с различных точек зрения и согласно этому измеряется:<sup>1</sup>

1) по упругости водяного пара, той упругости, которая бы царил в безвоздушном пространстве при наличии в нем только водяного пара; упругость водяного пара выражается в миллиметрах ртутного столба;

2) по абсолютной влажности, то есть весу водяного пара, содержащегося в одном кубическом метре воздуха;

3) по удельной влажности или весу водяного пара в килограмме влажного воздуха;

4) по отношению упругости водяного пара, действительно содержащегося в воздухе, к максимально возможной упругости водяного пара при данной температуре, то есть по относительной влажности;

5) по разности между максимально возможной упругостью водяного пара при данной температуре и действительно наблюдающейся упругостью водяного пара; эта разность носит название недостатка насыщения или дефицита влажности.

При некоторых явлениях необходимо обращать внимание на различие между ледовым и водяным паром, следовательно на разницу между упругостью водяного пара над льдом и над водою.

<sup>1</sup> Reinhard - S ü r i n g . Leitfaden der Meteorologie. Leipzig 1927.

Наибольшее давление пара над льдом составляет:

При температуре	0°	—5°	—10°	—20°	—30°
В миллиметрах ртутного столба	4,58	3,03	1,97	0,79	0,29

При обычных метеорологических наблюдениях в качестве приборов измеряющих влажность — гигрометров — применяются волосной гигрометр и психрометр.

Действие волосного гигрометра основано на том, что обезжиренный человеческий волос удлиняется с увеличением влажности. Поэтому длина волоса или пучка волос может, при условии специального градуирования шкалы гигрометра, служить для непосредственного определения относительной влажности воздуха. При помощи одновременно отсчитываемой по термометру температуры воздуха  $t$  можно вычислить упругость водяного пара из выражения:

$$4,53 \times 10^{\frac{7,45 t}{243,7 + t}} \times \frac{\text{относительная влажность}}{100}.$$

Для непрерывной записи влажности воздуха применяют специального устройства волосной гигрометр с приспособлением для самозаписи—гигрограф.

Психрометр—это термометр, ртутный шарик которого поддерживается во влажном состоянии. Разность одновременных отсчетов по смоченному и по сухому термометрам служит мерой для определения водяного пара в воздухе.

Для измерения на расстоянии применяют приборы с термо-электрической передачей, которые основаны, как и обычный психрометр, на принципе испарения. Один спай термобатареи находится в условиях температуры данного помещения, тогда как другой спай покрыт засасывающим рукавом, погруженным в сосуд с дистиллированной водой. Благодаря наступающему испарению, между спаями батареи образуется разность температур и возникает электрический ток, пропорциональный по силе разности температур и являющийся мерой влажности, содержащейся в воздухе. Подобного рода приборы могут быть соединены как с циферблатами, так и с самописцами.

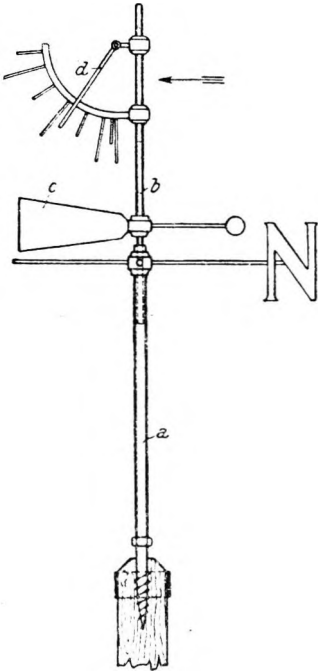


Рис. 213. Флюгер со шкалой силы ветра по Вильду—Фюссу.

## VIII. ВЕТЕР

Если является желательным представить ветер в виде векториальной величины, необходимо измерить его направление и его скорость, называемую также силой ветра. Оба эти фактора в сильной мере зависят от установки измерительного прибора. Поэтому место для установки прибора и высота его над землей должны выбираться, исходя из установленных норм. Принято ветер у поверхности земли измерять на плоском, незастроенном и незалесенном месте на нормальной высоте от 10 до 20 м.

Направление ветра устанавливается по положению флюгера, указывающего с какой стороны света дует ветер (рис. 213).

Специально для установления направления ветра применяется флюгер с 8 или 16-стрельчатой розой ветров (рис. 214).

Для обозначения направлений ветра пользуются следующими сокращениями.

Север.....	N	Юг .....	S
Северо-северо-восток.....	NNE	Юго-юго-запад.....	SSW
Северо-восток.....	NE	Юго-запад.....	SW
Востоко-северо-восток .....	ENE	Западо-юго-запад.....	WSW
Восток .....	E	Запад.....	W
Востоко-юго-восток.....	ESE	Западо-северо-запад .....	WNW
Юго-восток.....	SE	Северо-запад .....	NW
Юго-юго-восток.....	SSE	Северо-северо-запад.....	NNW

Скорость или сила ветра оценивается обычно по 12-градусной шкале Бофорта. Примерная связь между силой ветра, определенной по Бофорту, скоростью ветра и давлением ветра <sup>1</sup> имеет характер, выраженный в цифрах в табл. 7.

Таблица 7

Связь между силой, скоростью и давлением ветра

Сила ветра	Скорость ветра в км/час	Давление ветра в кг м <sup>2</sup>
0	—	—
1	4—7	0,18
2	7—14	0,72
3	14—22	2,00
4	22—29	3,92
5	29—40	7,22
6	40—50	12,5
7	50—61	19,2
8	61—76	28,9
9	76—90	42,3
10	90—104	58,3
11	104—122	79,3
12	122	80

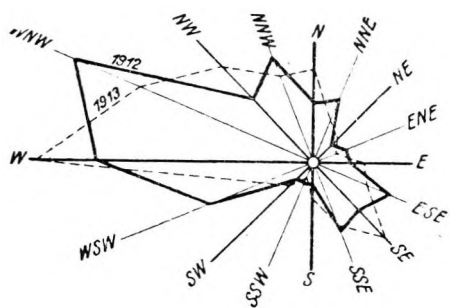


Рис. 214. Роза ветров. Частоты ветра по его направлениям.

Оценка силы ветра производится, исходя из действия, оказываемого им на деревья, строения и людей, согласно определениям, приведенным в табл. 8.

Таблица 8

Оценка силы ветра (шкала Бофорта)

Сила ветра	Обозначение силы ветра и ее характеристика
0	Полное безветрие или штиль
1	Очень тихое, едва ощутимое дуновение, дым поднимается почти вертикально
2	Легкий ветер, становится ощутимым
3	Слабый ветер, колеблет легкий вымпел и листья деревьев
4	Умеренный ветер, натягивает вымпел и колеблет маленькие ветви деревьев
5	Свежий ветер, колеблет более крупные ветви и становится уже неприятным для ощущения
6	Сильный ветер, колеблет большие ветви и сучья деревьев

<sup>1</sup> Указанная связь действительна только для малых поверхностей.



Сила ветра	Обозначение силы ветра и ее характеристика
7	Крепкий ветер, колеблет стволы небольших деревьев, поднимает на стоячей воде волны, набегаящие одна на другую
8	Штормовой ветер, качаются целые деревья и сучья на них ломаются; идущий против ветра человек заметно задерживается в своем движении
9	Шторм, относительно легкие предметы, как черепица и т. п., сдвигаются с места, сучья и слабые деревья ломаются, итти по открытому месту становится уже затруднительно
10	Сильный шторм, крепкие деревья ломаются или вырываются с корнем
11	Жесткий шторм, разрушения тяжелого характера: буреломы, повреждение строений, людей валит с ног
12	Ураган, опустошение самого тяжелого характера: срывает крыши, сбрасывает заделанные в стены трубы, несет тяжелые предметы

Для более точных определений силы ветра служат флюгера с отклоняющейся доской и анемометры.

В первых из указанных приборах сила ветра измеряется по отклонению свободно подвешенной доски  $d$  (см. рис. 213).

Анемометры устраиваются либо в виде колеса с лопастями, либо в виде креста с чашечками. Характер их действия подобен характеру действия соответствующих гидрометрических приборов.

Приборы по измерению направления и силы ветра могут быть оборудованы электрическими передатчиками на расстояние и самописцами. Это дорогие приборы, которые доступны, вообще говоря, только специальным метеорологическим учреждениям.

## IX. ВЛЕКОМЫЕ НАНОСЫ

**Описание материала, составляющего наносы.** Достаточное с точки зрения инженерной гидрологии описание материала влекомых наносов должно содержать данные о характере напластования наносов, структуре, механическом составе и форме отдельных зерен.<sup>1</sup>

Напластование или состав наносов может быть однородным или неоднородным в зависимости от того, является ли состав почвенных материалов повсюду одинаковым или же он меняется от места к месту. Неоднородное напластование может быть опять-таки определено как слоистое и неслоистое, смотря по тому, преобладает ли ясно выраженная слоистость с различным составом грунта в отдельных слоях или же полная неравномерность в распределении отдельных составных частей смеси. Слоистое напластование обозначается как устойчиво неоднородное или неустойчиво неоднородное, в зависимости от того, проявляется ли слоистость в очень слабых или очень мощных пластах.<sup>2</sup>

Структура частиц грунта бывает зернистой, ячеистой или губчатой.

Механический состав почвенного материала принято обозначать через частные веса отдельных фракций грунта, выраженные в процентах от общего веса данного количества исследуемого грунта в сухом состоянии.

Для подразделения на фракции удобно следующее правило.<sup>3</sup> У почвенных материалов, содержащих крупнозернистые частицы, выбирается шкала

<sup>1</sup> Этим требованиям удовлетворяет работа E. L e p n i k. Untersuchungen der Sinkstoffe und des Geschiebes und deren Vereinheitlichung. III. Hydrologische Konferenz der Baltischen Staaten, 1930.

<sup>2</sup> F. S c h a f f e r n a k. Erforschung der physikalischen Gesetze, nach welchen die Durchsickerung des Wassers durch eine Talsperre oder durch den Untergrund stattfindet. Referat für die Teiltagung der Weltkraftkonferenz in Stockholm 1933. Die Wasserwirtschaft, № 30, Wien 1933.

<sup>3</sup> K. T e r z a g h i. Erdbaumechanik auf bodenphysikalischer Grundlage. Wien 1925.

фракций: с диаметром частиц от 0 до 3 мм, от 3 до 5 мм, от 5 до 10 мм, от 10 до 20 мм, от 20 до 30 мм, от 30 до 50 мм, от 50 до 70 мм, от 70 до 100 мм, от 100 до 150 мм и т. д. Для материалов, у которых размер диаметра самого крупного зерна меньше 3 мм, или для продолжения вниз шкалы крупнозернистых материалов мелкозернистые частицы разбиваются по величине диаметра на следующие фракции: от 3 до 2 мм, от 2 до 1 мм, от 1 до 0,6 мм, от 0,6 до 0,1 мм, от 0,1 до 0,06 мм, от 0,06 до 0,00 мм.

Определение содержания фракций производится при помощи набора крупных сит с квадратными отверстиями в 3, 5, 10, 20, 30, 50 мм. Для

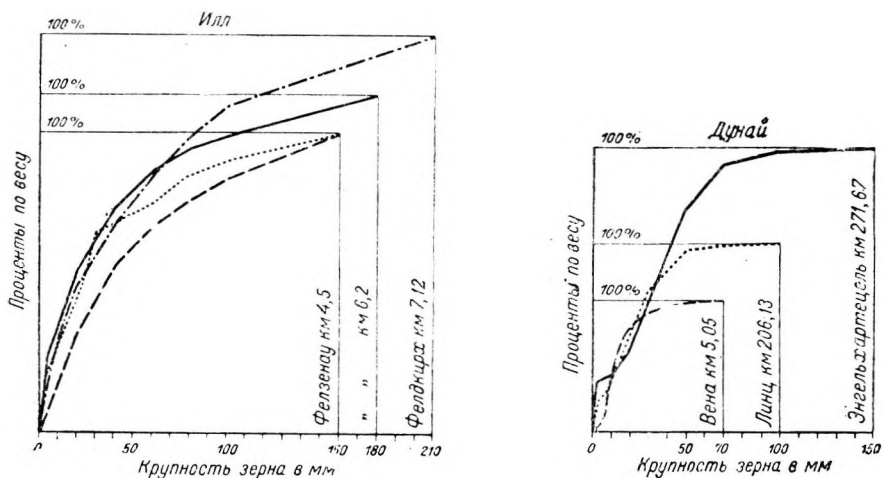


Рис. 215. Изображение кривых механического состава по Шаффернаку.

установления количества частиц крупнее 50 мм лучше всего применять квадратные шаблоны с соответствующими размерам частиц отверстиями в 70, 100 мм и т. д. Для определения содержания фракций мелкозернистых частиц необходимы сита с размерами отверстий в 3, 2, 1, 0,6, 0,1 и 0,06 мм.

Выделение еще более мелкозернистых частиц осуществимо только путем отмучивания. В чисто гидрологических целях столь далеко идущий анализ вряд ли целесообразен, однако он играет большую роль в вопросах механики грунтов.

Результат подобного рода анализов изображают графически в виде так называемой кривой механического анализа, если требуется характеризовать состав наносов отдельных местностей. Принято кривые механического анализа для крупнозернистых частиц изображать в таком виде, как это показано на рис. 215, причем для размеров зерна берется линейный масштаб.<sup>1</sup> Для графического изображения результатов анализа мелкозернистых частиц пользуются логарифмическим масштабом, получая благодаря этому кривые механического анализа с более ясным изображением содержания более мелких фракций<sup>2</sup> (рис. 216).

Изменение механического состава наносов на более или менее длинном участке реки лучше всего изображается на продольном графике механического состава наносов (рис. 217). На основании известных кривых механического анализа для отдельных поперечных сечений реки получают проектированием с кривых на проведенные в этих сечениях ординаты распределение в них наносов по фракциям. Соединение между собою точек, принадле-

<sup>1</sup> F. Schaffernak. Neue Grundlagen für die Berechnung der Geschiebeführung in Flussläufen. Wien 1922.

<sup>2</sup> K. Terzaghi. Erdbaumechanik auf bodenphysikalischer Grundlage. Wien 1925; H. Grassberger. Der Aufbau der Böden. Die Wasserwirtschaft, H. 17 bis 19, Wien 1933.

жащих одним и тем же фракциям, на протяжении рассматриваемого участка реки дает продольный график механического состава. Он в наглядной форме изображает через плавные отрезки прямой влияние шлифовки и стирания частиц, а через резкие изменения состава наносов на участках непосредственно после впадения притоков—морфологическое влияние этих притоков.

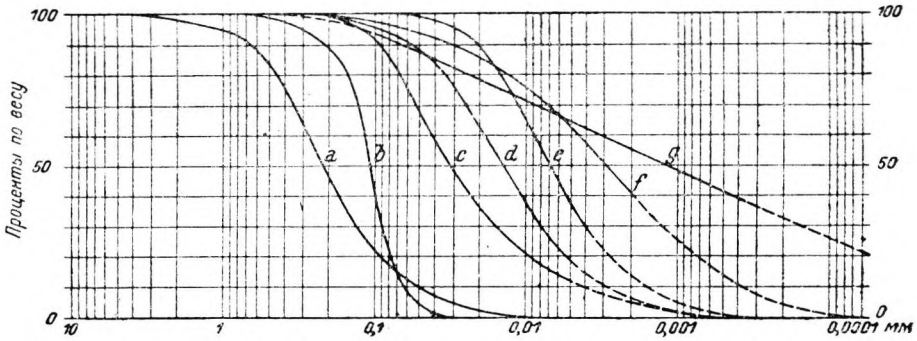


Рис. 216. Изображение кривых механического состава по Терцаги.  
*a, b*—пески; *c, d*—суглинки (легкие глины); *e, f*—тяжелые глины; *g*—тяжелый мергелистый суглинок.

Более простую, однако менее точную, чем кривая механического анализа, характеристику состава наносов представляет величина коэффициента неоднородности грунта. Под этим последним понимают отношение двух размеров зерна  $d_{60}$  и  $d_{10}$ , которые таким образом разделяют смесь, что вес всех более

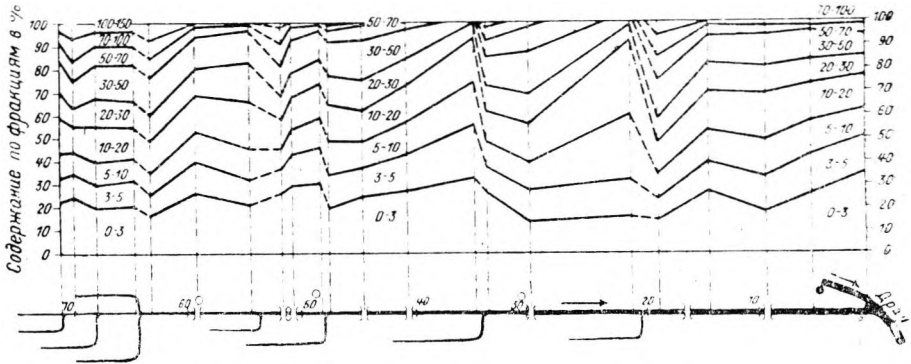


Рис. 217. Продольный график механического состава наносов.

мелких, чем они, по размеру частиц составляет 60 и соответственно 10% от общего веса смеси (рис. 218).

Поэтому <sup>1</sup>

коэффициент неоднородности равен 
$$\frac{d_{(60)}}{d_{10}} = \frac{d_{(60)}}{d_{10}}. \tag{103}$$

Форма отдельного зерна приблизительно определяется размером зерна  $d$ , который, согласно условию, соответствует размеру отверстия в сите, через которое данное зерно только-только что не проходит. Еще более точная характеристика зерна может быть дана по его трем главным размерам.

Брать пробы наносов следует, по возможности, на перекатах, но если это неосуществимо, тогда на образованных наносами косах, островах и т. д.

<sup>1</sup>  $d_{10}$ , согласно приведенному ранее определению, представляет собой действующую величину зерна  $d_w$ .

Так как на перекатах пробы берутся обычно под водою, необходимо принимать меры против их вымывания. Из подводных отложений наносов пробу следует брать, удаляя верхний крупнозернистый слой, из ямы, глубиною примерно, в 1 м; при наличии грунтовых вод нужно также принимать меры против вымывания ямы.

**Мгновенный и суммарный расход влекомых наносов.** Влекомыми наносами называют те твердые вещества, которые передвигаются течением

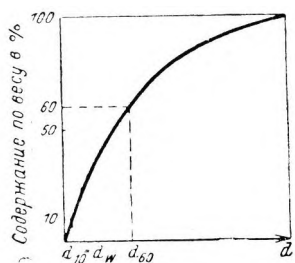


Рис. 218. Коэффициент неоднородности грунта.

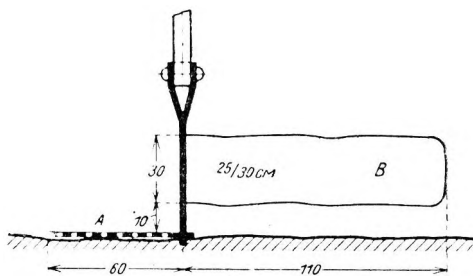


Рис. 219. Батометр-мешок для влекомых наносов по Шаффернаку.

воды по дну водотока. Они передвигаются скользя, а также прыгая, то есть отделяясь от дна только на коротких участках своего пути.

Под мгновенным расходом или просто расходом влекомых наносов понимают количество наносов, проходящее через данное живое сечение

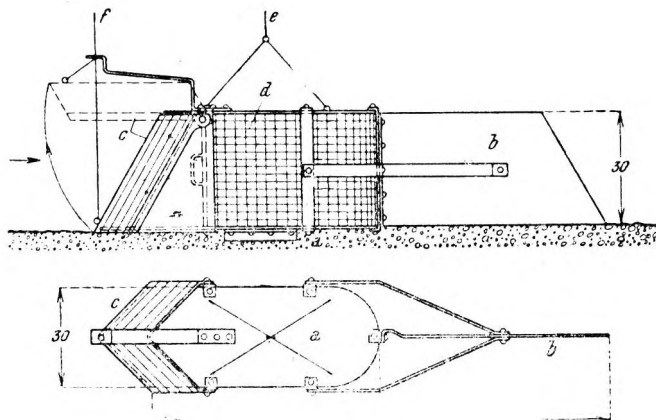


Рис. 220. Ящичный батометр Борна.

в единицу времени. Расход наносов принято выражать как в единицах веса — в кг сек., так и в единицах объема — в м<sup>3</sup>/сек. сухой массы. При выражении в объемных мерах предполагается рыхлое состояние массы.

Суммарный расход влекомых наносов — это то их количество, которое проходит через данное поперечное сечение за определенный промежуток времени. Суммарный расход выражается в килограммах или в кубических метрах сухой массы в рыхлом состоянии.

Расходы влекомых наносов измеряются при помощи приборов, начало которым положено батометром — мешком (Fangbeutel), примененным Шаффернаком в 1908 г. на р. Мур в Штирии (рис. 219). От этого прибора произошли ящичный батометр Борна для измерения мелкозернистых наносов на равнинных реках (рис. 220) <sup>1</sup> и ящичный батометр Мюльхофера, снабженный

<sup>1</sup> А. В о р н. Erhebung über Sinkstoffe und Geschiebeführung in Flussläufen. II Baltische hydrologische Konferenz, 1928.

глубинным ( $T_s$ ) и боковым ( $S$ ) рулями и поддоном, для измерения крупнозернистых наносов на горных реках <sup>1</sup> (рис. 221).

Производство подобного рода измерений напоминает измерения гидрометрической вертушкой. Батометр  $F$  опускают на отдельных вертикалях до самого дна, с судов или с мостов, отверстием прямо против течения, причем

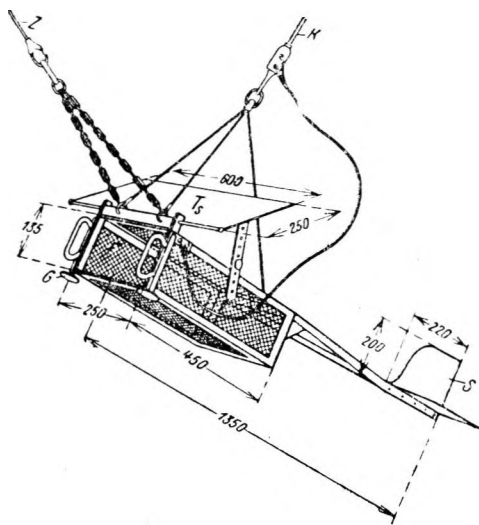


Рис. 221. Ящичный батометр Мюльхофера.

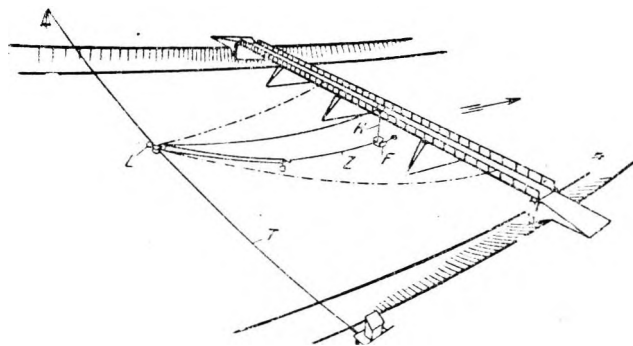


Рис. 222. Способ установки ящичного батометра Мюльхофера.

следят за правильным его положением и плотным прилеганием ко дну и соразмеряют продолжительность измерения с величиной прибора (рис. 222). Чтобы получить при измерениях сколько-нибудь точные результаты, рекомендуется предварительно протарировать прибор. Тарировка приблизительно может быть проведена с моделью батометра, причем она дает соотношение между количеством наносов, уловленных батометром, шириною  $b$ , и количеством наносов, прошедших по дну реки, шириною  $B$ . <sup>2</sup>

Непосредственное заключение о величине суммарного расхода влекомых наносов является возможным на основании измерения заилений и дельтообразований, наблюдающихся в водохранилищах и озерах. Трудность заключается при этом не столько в определении посредством геодезической съемки геометрической формы образовавшегося заиления, сколько в установ-

лении того, какая часть заиления приходится за счет влекомых наносов и какая за счет взвешенных наносов. Для установления этого необходимо взятие проб отложившегося грунта и анализ их. На основании наблюдений над наименьшей величиной зерна влекомых наносов и наибольшей величиной зерна взвешенных наносов и в связи с режимом стока реки могут быть тогда намечены границы между наносами того и другого рода. <sup>3</sup>

## Х. ВЗВЕШЕННЫЕ НАНОСЫ

**Мгновенный и суммарный расход взвешенных наносов.** Взвешенные вещества движутся по всему живому сечению. С уменьшением скорости

<sup>1</sup> L. M ü h l h o f e r. Untersuchungen über die Schwebestoff- und Geschiebeführung des Inn. Die Wasserwirtschaft, № 1 u. 2. Wien 1933.

<sup>2</sup> R. E h r e n b e r g e r. Geschiebemessungen an Flüssen mittels Auffanggeräten und Modellversuche mit letzteren. Z. d. österr. Ing - u. Arch.-Vereines, H. 5 u. 6 1933.

<sup>3</sup> P. J a k u s c h o f f. Beitrag zur Erforschung der Geschiebe- und Schwebestoffbewegung in Deltamündungen von Flüssen. Wasserkraft u Wasserwirtschaft, H. 9 bis 11, 1932.

течения они отлагаются, чтобы затем с увеличением скорости быть вновь подхваченными и унесенными водою. Причиной способности текучей воды поднимать и нести взвешенные вещества является движение воды в поперечном направлении, имеющее место при турбулентном движении. Расход взвешенных наносов и суммарный расход взвешенных наносов приводятся в весовых или в объемных мерах. Для получения объемной меры необходимо знать вес единицы объема массы взвешенных наносов. Так как единообразное установление веса единицы объема сырых взвешенных веществ встречается трудности, то вес единицы объема относят к массе взвешенных веществ в сухом состоянии. Для нее вес объемной единицы может также иметь разные значения, смотря по степени уплотнения материала. Обычно эта величина дается по пробе либо рыхло насыпанной, либо уплотненной путем сильного встряхивания. Коэффициент для перехода от веса объемной единицы сырых взвешенных веществ, отложившихся в водохранилище, к весу объемной единицы соответственных сухих веществ, так называемая плотность взвешенных веществ, может быть определен только на основании испытаний.<sup>1</sup>

Для производства измерения расхода взвешенных наносов важно знать, что взвешенные вещества не только неравномерно распределяются по живому сечению, но, кроме того, вследствие пульсации скорости течения, количество их, проносимое водою, все время меняется, то увеличиваясь, то уменьшаясь. Отсюда следует, что для очень точных определений недостаточно измерять количество несомых водою взвешенных наносов только в одной точке живого сечения.

Определение расходов взвешенных наносов производится или путем определения содержания взвешенных веществ во взятых пробах воды, или через определение мутности воды (фотоэлектрическим путем), или измерением отложений наносов в водоемах.

В настоящее время способом, почти повсюду общепринятым, является взятие проб и притом лучше всего в профиле водомерного поста. Для этого пользуются цилиндрическим ведром (рис. 223), загруженным по дну свинцом *a*, объемом в один литр, считая до отверстия *b*. Ведро погружается на несколько дециметров под воду на некотором расстоянии от берега. После подъема его из воды, излишняя вода стекает через отверстие *b*, а в ведре остается ровно 1 л жидкости.

Число проб зависит от того, можно ли ограничиться приближенными данными о количестве проносимых водою взвешенных наносов или же необходимо учесть также и кратковременные колебания в их расходе и достичь тем самым точного определения их количества.

В первом случае рекомендуется следующий порядок определения. Под взятые пробы, которые берутся ежедневно, лучше всего в час водомерных наблюдений, готовится стеклянный или эмалированный жестяной сосуд с крышкой, вес которого известен. В этот собирательный сосуд сливается ежедневная проба, сосуд закрывается и помещается в водяную баню, где нагревается до тех пор, пока не испарится большая часть пробы, причем температура никогда не должна превосходить 100°. По прошествии более или менее продолжительного времени, примерно одного месяца, после окончательного испарения воды производится снова взвешивание, и из разности обоих весов определяется среднее количество взвешенных наносов в одной пробе.

После этого количество взвешенных наносов относится к объемной единице расхода воды  $Q$  и пересчитывается в объемные или весовые меры.

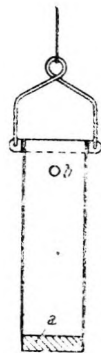


Рис. 223.  
Ведро для взятия проб взвешенных наносов.

<sup>1</sup> Ermittlung der Schwebstoffführung in natürlichen Gewässern. Die Bautechnik, H. 35, u. 38, 1929.

Этим путем получают среднее за известный промежуток времени количество взвешенных наносов  $s$  на одну объемную единицу расхода воды. Умножая

это количество на величину суммарного расхода воды  $\sum_{t_1}^{t_2} Q \Delta t$  за тот же промежуток времени, получают суммарный расход взвешенных наносов  $\bar{s} \sum_{t_1}^{t_2} Q \Delta t$ .

Указанный способ прост и не требует много времени, но основывается на предположениях о равном распределении взвешенных наносов по всем точкам живого сечения и пропорциональности между расходом воды и расходом взвешенных наносов, то есть предположениях, не всегда достаточно точно оправдывающихся.<sup>1</sup>

Кроме того, этот способ может обладать еще одним источником ошибок, приводящим к преувеличению суммарного расхода взвешенных наносов. Если вода в реке содержит, помимо переносимых ею нерастворенных взвешенных веществ, еще и растворенные вещества, то при выпаривании и они выделяются из воды и увеличат твердый осадок. Поэтому данный способ не должен применяться там, где река протекает через известковые породы.<sup>2</sup>

Уточнение заключается в том, что учитывают кратковременные периодические колебания в движении взвешенных наносов, что особенно рекомендуется делать на горных речках. В этом случае промежутки времени, в которые берутся пробы, должны быть выбраны соответственно указанным колебаниям. В паводки промежутки времени, через которые надо брать пробы, сократятся до нескольких часов, а поблизости от пика—и еще больше, в то время как в низкую воду окажется достаточным брать пробы один или два раза в неделю.

При этом способе каждая отдельная проба фильтруется через бумажный фильтр, и вес взвешенных веществ, содержащихся в пробе, определяется через взвешивание фильтра до и после фильтрования. Эта величина относится затем к единице расхода воды  $Q$  и выражается в виде потока

взвешенных веществ  $s$ . Из выражения  $\sum_{t_1}^{t_2} Qs \Delta t$  получается затем суммарный расход взвешенных наносов за промежуток времени от  $t_1$  до  $t_2$ .

Способ измерения может быть, наконец, усовершенствован далее, а именно, измерения можно производить подобно тому, как при измерениях скоростей вертушками, точечным, множественным и интеграционным методами.

При точечном методе, где должно быть достигнуто возможно равномерное распределение точек по живому сечению, требуется сосуд, который бы допускал постепенное наполнение без нарушения процесса течения.

В качестве примера подобного сосуда, снабженного опрокидывающим приспособлением, следует привести батометр Хохштеттера<sup>3</sup> (рис. 224). Он состоит из свободно плавающего цилиндра  $z$ , который после спуска в воду опрокидывается на заранее установленной глубине и затем постепенно наполняется водой. Для более значительных глубин прибор не пригоден.

<sup>1</sup> L. M ü h l h o f e r. Untersuchungen über die Schwebestoff- und Geschiebeführung des Inn. Die Wasserwirtschaft, № 1 u. 2, Wien 1933.

<sup>2</sup> Так, например, на Дунае у Линца оказалось, что половина всех полученных после выпаривания взвешенных наносов должна быть отнесена за счет растворенных веществ. См. F. R o s e n a u e r. Die Schwebestafführung der Donau bei Linz. Die Wasserwirtschaft, № 21. Wien 1933.

<sup>3</sup> F. R o s e n a u e r. Der Donauschöpfer. ein neues Messgerät zur Entnahme von Wasserproben aus rasch fließenden Gewässern. Die Wasserwirtschaft, № 22, 1933.

Другими заслуживающими внимания приборами являются батометр, применяемый на австрийском Дунае, и мутномер, употребляемый на итальянских реках (рис. 225).

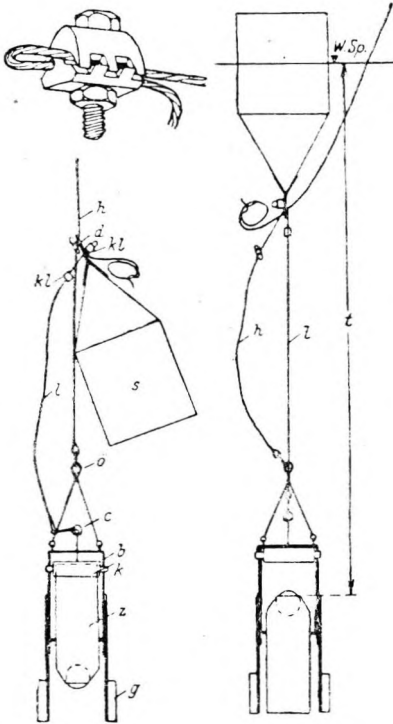


Рис. 224. Батометр Хохштеттера.

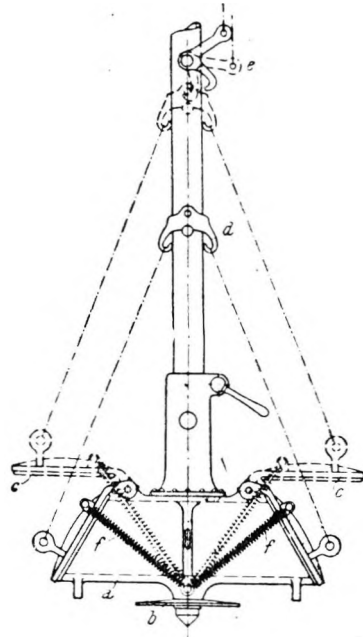


Рис. 225. Мутномер, употребляемый на итальянских реках.

Последний состоит из короткого, горизонтального, трубообразного батометра *a*, погружаемого в воду при помощи штанги. Поддон *b*, при установке прибора у дна реки, препятствует погружению его в грунт. После открытия зацепки *e* крышки батометра закрываются при помощи упругих пружин *f*, а прибор поднимается наружу и проба из него выливается.

Все приборы, сконструированные по этому принципу, сравнительно крупных размеров и тяжелого веса и требуют для точного определения расхода взвешенных наносов еще измерения при помощи вертушки скорости течения воды в точках установки батометра, вследствие чего процесс измерения становится громоздким. Этим недостатком не имеет прибор, изображенный на рис. 226.<sup>1</sup>

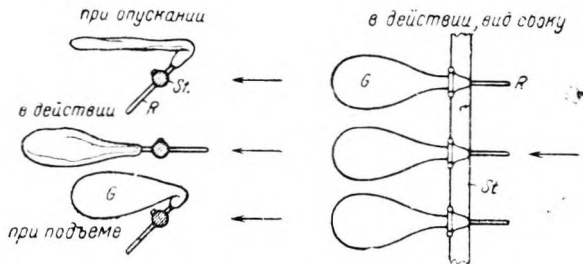


Рис. 226. Батометр-тахиметр для взвешенных наносов.

<sup>1</sup> Параллельное измерение скорости вертушкой необходимо и здесь, так как батометр не точно учитывает скорость течения. (Прим. пер.)



Он состоит из резинового мешка  $G$ , объемом, примерно, в  $1000 \text{ см}^3$ , с трубкой  $R$ , имеющей входное отверстие диаметром в  $6 \text{ мм}$ . Прибор укрепляется на упорной штанге  $St$ , причем при опускании в воду трубка должна быть обращена своим отверстием вниз по течению. По достижении требуемой глубины, трубка поворачивается против течения, после чего начинается наполнение резинового мешка единственно, под влиянием скоростного напора, исключая гидростатическое давление. Чтобы прекратить взятие пробы, вновь поворачивают штангу вокруг ее оси, после чего доступ воды прекращается вследствие отгиба шейки мешка.

Связь между скоростью течения воды  $u$  и количеством воды  $q$ , поступающим в резиновый мешок в одну секунду времени, получают из тарировки батометра. Процесс тарировки имеет, примерно, такой же характер, как и для вертушки.

Как показал опыт, в результате тарировки выражение для тарировочной кривой получается вида  $q = au$ , то есть тарировочная кривая оказывается прямой.

При применении интеграционного способа передвигают батометр все время с одной и той же скоростью вдоль по вертикали. Количество воды, поступившее в мешок за время передвижения от момента  $t_1$  до момента  $t_2$ ,

составляет  $\sum_{t_1}^{t_2} q \Delta t$ . В среднем, в единицу времени в батометр поступит количество воды:

$$Q' = \frac{\sum_{t_1}^{t_2} q \Delta t}{t_2 - t_1} = \frac{\sum_{t_1}^{t_2} au \Delta t}{t_2 - t_1} = a \frac{\sum_{t_1}^{t_2} u \Delta t}{t_2 - t_1}. \quad (104)$$

Если площадь живого сечения составляет  $F^1$  и расход воды  $Q$ , то получается что

$$Q = Q' \frac{F}{a}, \quad (105)$$

исходя из того, что

$$\frac{\sum_{t_1}^{t_2} u \Delta t}{t_2 - t_1} = u_m = \frac{Q}{F} = \frac{Q'}{a}.$$

Если в объемной единице взятой пробы содержится  $s$  весовых единиц взвешенных веществ, то расход взвешенных наносов составляет:

$$S = Qs = Q' \frac{F}{a} s, \quad (106)$$

откуда суммарный расход взвешенных наносов за время от  $t_1$  до  $t_2$ , выраженный в весовых единицах, получается в виде:

$$\sum_{t_1}^{t_2} s \Delta t = \sum_{t_1}^{t_2} Q' \frac{F}{a} s \Delta t = Q' \frac{F}{a} s (t_2 - t_1). \quad (107)$$

Определение движения взвешенных веществ при помощи измерения мутности фотоэлектрическим путем представляет ряд преимуществ по сравнению с указанными выше способами. Измерительный прибор в этом случае удобен для обращения, время требуемое для измерения непродолжительно, взятие проб отпадает, а установление относительного распределения взвешенных веществ в живом сечении достигается очень простым путем.

Прибор, впервые предложенный Калитиным, <sup>1</sup> в усовершенствованном виде представляет род вилки, которая на концах своих зубьев имеет на одном источник света *L*, заключенный в водонепроницаемую оболочку, а на другом фотоэлемент *F* (рис. 227). Вода течет между источником света и фотоэлементом, вследствие чего образуется различной силы (в зависимости от степени мутности) фототок, измеряемый при помощи миллиамперметра. Зависимость между содержанием взвешенных веществ и отклонением амперметра устанавливается посредством тарировки. При конструировании прибора нельзя пренебрегать влиянием дневного света и отраженных дном реки световых лучей. Следует также учитывать влияние механического состава смеси взвешенных веществ.

Суммарный расход взвешенных наносов, подобно суммарному расходу влекомых наносов, может быть также определен по размерам заилиения в водохранилищах или в озерах. При этом необходимо учитывать все то, что было сказано для случая определения суммарного расхода влекомых наносов.

## XI. ЛЕД

Если рассматривать лед с точки зрения гидрологии, то есть если стремиться в надлежащей форме численно выразить его влияние на режим движения воды, следует учитывать разнообразные формы проявления льда на земной поверхности, так как каждая форма его проявления требует особых технических приемов изучения и измерения. В соответствии с этим, лед глетчеров и ледообразования в стоячих и текучих водах следует рассматривать отдельно.

**Лед глетчеров.** Лед глетчеров играет важную роль в процессе накопления земного кругооборота воды. Поэтому знание изменений в размерах различных глетчеров составляет одну из основ для тех водохозяйственных исследований, которые распространяются на высокогорные водосборы.

Преобразование в глетчерах льда в талую воду, убыль глетчеров (Gletscherablation) зависит от температуры воздуха, а также от количества осадков, выпавших на водосборе глетчеров. Продвижение глетчеров вниз по долинам происходит ниже границы вечного снега до тех пор, пока не установится равновесие между тающими и поступающими сверху массами льда. Поэтому в сырые, прохладные и снежные годы языки глетчеров выдвигаются вперед, в то время как в теплые и сухие годы отмечается их отступление.

Для установления режима глетчеров необходимо, поэтому, определение скорости движения, годового изменения длины языка и величины площади поперечного сечения глетчеров.

Для оценки работ по обмеру глетчеров является важным знать крайние значения определяемых величин. Альпийские глетчеры проходят вниз по долинам от 40 до 200 м за год, в то время как поступательное движение гренландских глетчеров доходит до 20 м за день.

<sup>1</sup> Н. К а л и т и н . Известия Научно-Мелиорационного института НКЗ. Ленинград 1925 и 1926 гг.

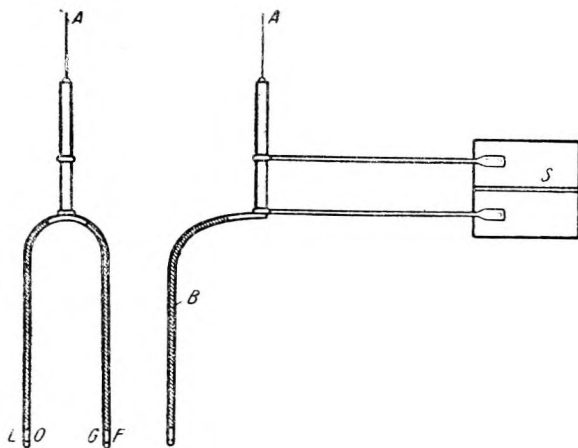


Рис. 227. Фотоэлектрический мутномер по Калитину.

*A*—подвес и электрические провода; *B*—свинцовое наполнение; *F*—фотоэлемент; *G*—стеклянный диск; *L*—источник света; *O*—объективная линза; *S*—руль.

Языки альпийских глетчеров находятся в процессе отступления. Наибольшим поперечным сечением в Альпах обладает большой Алезский глетчер, мощность которого превышает 300 м.

Скорость движения льда измеряется по продвижению деревянных шестов, втыкаемых в лед глетчера, против легко отличимых марок на скалах или на неподвижных обломках скал-

Определение величины поперечного сечения глетчера состоит, с одной стороны, из измерения изменений глетчера с поверхности и, с другой стороны, из установления высотного положения взрытого глетчером дна долины. Измерениями изменений глетчера с его поверхности, если эти измерения производятся постоянно, устанавливается также и убыль, или абляция глетчера. Измерение может производиться или при помощи деревянных шестов, длиной около 2 м, которые втыкаются в приготовленные во льду скважины, или при помощи самих скважин. В первом случае измеряют длину выступающих концов шестов, во втором—устанавливают уменьшение глубины скважин. И то и другое приспособление называют абляционными рейками (Ablationsregel), причем скважины служат лучше, так как они свободны от повреждений. Оба способа контролируют один другой, так как и увеличение длины выступающего конца шеста и уменьшение глубины скважины соответствуют уменьшению толщины ледяного слоя, то есть абляции.

Высотное положение дна глетчера устанавливается или посредством сквального бурения или сейсмографическим способом.

Буровые работы производятся стальными бурами, с применением обсадных труб и искусственной промывки скважины. Буровые работы тяжелы, и при глубоких скважинах нередко имеют место неудачи-

При сейсмическом определении глубины (посредством взрывов) на поверхности ледника вызываются упругие волнообразные сотрясения, которые отражаются дном ледяного тела. Глубину можно вычислить по промежутку времени между взрывом и наступлением отраженной звуковой волны.

**Лед в стоячих водах.** В стоячих водах образуется только поверхностный лед. Образование льда начинается, когда температура воды у поверхности опустится, примерно, до  $+2^{\circ}$ , а средняя температура воды в озере станет меньше  $4^{\circ}$ . Безветрие способствует процессу замерзания.

Ледяной покров образует защитный слой для находящейся под ним воды и предохраняет ее от дальнейшего охлаждения. Замерзание начинается от берегов, но очень быстро распространяется по всей поверхности озера. В течение зимы толщина ледяного покрова, вследствие дальнейшего выделения тепла, увеличивается до тех пор, пока выделение тепла ледяным покровом не станет равным количеству тепла окружающего воздуха.

Дополнительные гидрологические наблюдения должны заключаться в наблюдении сроков образования и исчезновения ледяного покрова, а также в измерении толщины ледяного покрова. Толщина ледяного покрова увеличивается сравнительно медленно; у берегов, как правило, толщина больше, чем на середине озера, и с повышением температуры убывает одновременно как с поверхности, так и снизу.

**Лед в текучих водах.** В текучих водах процесс образования льда дает иную картину, чем в стоячих водах.

Образование льда наступает только тогда, когда температура массы воды упадет примерно до  $0^{\circ}$ . Оно происходит тем позже, чем глубже водоток и чем больше характер процесса движения потока препятствует полному перемешиванию водной массы. Последнее обстоятельство является также причиной того, что непродолжительные морозы часто оказываются недостаточными для образования льда в водотоках.

По охлаждению всей массы воды образуются микроскопически малые частицы льда, которые соединяются в связные сцепления сначала там, где меньше скорость течения и где имеются точки опоры для этих мельчайших

частиц. Поэтому первое ледообразование происходит вдоль берегов, в виде заберегов, причем береговой лед отличается связностью и прозрачностью, как и лед в стоячих водах. С увеличением силы течения, отрываются более или менее значительные куски льда, и образуется ледоход. Последний усиливается еще вследствие того, что при дальнейшем охлаждении частицы льда, плавающие у поверхности воды, сцепляются и смерзаются вместе. В результате образуется кашеобразная ледяная масса (Eisbrei), которая постепенно застывает вокруг ледяных центров и уплывает в виде дискообразных льдин.

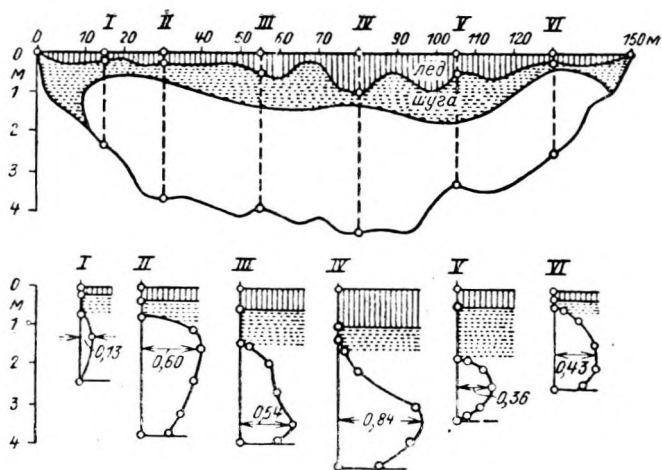


Рис. 228. Замерзание и распределение скоростей в створе Неманиунай р. Неман 21 декабря 1927 г.

Существенно отличным по характеру образования, структуре и расположению является донный лед, играющий на крупных реках большую роль, чем забереги. Упомянутые выше микроскопически малые частицы льда могут под влиянием направляющих молекулярных сил соединяться также и внутри потока. Подобного рода молекулярные силы могут исходить от центров кристаллизации, которые образуются находящимися в воде взвешенными частицами. Образуется непрозрачный губчатый лед, который оседает, главным образом, на шероховатом дне, почему его и называют донным льдом.<sup>1</sup> Донный лед, нередко обладающий мощностью слоя в несколько метров, может под действием подъемной силы отделиться от своего основания и всплыть, увеличивая, в свою очередь, кашеобразную массу льда и ледоход. При всплывании он захватывает ил и частицы донных наносов, благодаря чему его легко бывает распознать.

Сильные снегопады способствуют образованию льда и играют большую роль в цементировании плывущих масс льда. Если при продолжающемся морозе река покрыта льдом по всей своей ширине, то бывает достаточно

<sup>1</sup> Согласно распространенным теориям образования донного льда (Барнеса, Альтберга) причиной образования донного и взвешенного льда следует рассматривать переохлаждение воды и переохлаждение почвы. Донный лед образуется при этом непосредственно у дна и у находящихся там предметов, причем, по преимуществу, на местах, подверженных сильным потерям тепла, например, от ветра, на порогах или на незамерзающих участках. Само переохлаждение может составлять доли градуса, однако скрытая теплота, выделяющаяся при ледообразовании, не компенсирует потерь тепла, и температура воды продолжает оставаться несколько ниже нуля. (Прим. пер.)

ничтожного толчка, чтобы массы льда остановились. Подпорные бьефы, сужения живого сечения опорами мостов и каменистыми осередками, резкие закругления, а также озерные устья рек могут быть причиной образования ледяных затворов.

Движущиеся вниз по реке льдины собираются вместе и надвигаются в форме чешуи одна на другую; образовавшаяся ледяная преграда, ледяной затвор нарастает вверх по реке со скоростью, которая часто составляет больше 2 км в час. В момент образования ледяной преграды ее внезапно поднимает вверх нередко на несколько метров, так как вода не течет

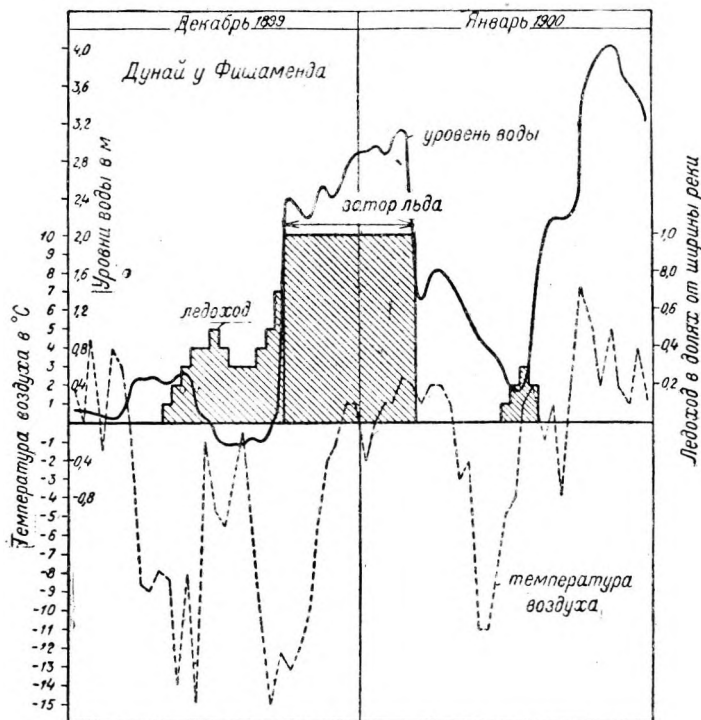


Рис. 229. Влияние затвора льда на уровень воды на Дунае у Фишаменда.

более в условиях свободной водной поверхности, но вынуждена двигаться под давлением в замкнутом сечении с большой шероховатостью стенок.

Ледяной покров образует защитный тепловой слой, вследствие чего донный лед всплывает и примыкает к ледяному покрову снизу в виде кашеобразной массы; образования донного льда больше не происходит (рис. 228).

С наступлением оттепели начинается рассасывание затвора, которое развивается в большинстве случаев в направлении, противоположном образованию затвора, то есть вниз по реке. В других местах (ниже по реке) могут опять происходить затворы льда, сильные подъемы воды и, как следствие этого, катастрофические затопления прибрежной территории.

Для суждения о процессах движения льда в текучих водах с точки зрения инженерной гидрологии необходимо располагать сведениями о величине ледохода и расходе льда и иметь описания нарастания и рассасывания затворов льда, меняющихся по месту, времени и мощности.

Ледоход  $e$  в каком-либо определенном поперечном сечении оценивается в десятых долях от ширины реки, причем толщина льдин не учитывается.

Ледоход  $e = 3/10$  означает, что если представить себе льдины совершенно плотно сдвинутыми, однако без перекрытия ими друг друга, то они займут  $3/10$  от ширины реки в данном сечении.

Расход или количество льда  $E$ , которое в единицу времени проходит через живое сечение шириною  $B$ , при средней скорости течения воды  $u_m$ , если опять не учитывать толщину льда, равняется приближенно:

$$E = eBu_m. \quad (108)$$

О нарастании и ликвидации заторов льда наилучшее представление дают хронологические графики, на которые наносят также и величину ледохода (рис. 229).

Мощность затора льда, то есть толщина ледяного покрова в различных точках образовавшейся ледовой преграды, определяется посредством бурения.

## ГЛАВА ВТОРАЯ

### СИСТЕМАТИЗАЦИЯ ДАННЫХ НАБЛЮДЕНИЙ И ИЗМЕРЕНИЙ

Каждая научная дисциплина стремится создать,—в целях определения понятий, наглядности изображения изучаемых явлений и уяснения связи между ними,—соответствующую методику обработки данных наблюдений и измерений. Эта методика не должна, однако, приводить к схематизации научной работы, что могло бы связывать работу мысли и тем самым препятствовать проявлению самостоятельной точки зрения исследователя. Исходя из этого, приводимые ниже способы, основанные на законах математической статистики, должны давать только направление для целесообразной предварительной обработки гидрологических, метеорологических и морфологических наблюдений.

Отдельные ряды, составленные из наблюдаемых величин, образуют собрание однородных, обладающих определенными признаками предметов, которые в статистике носят обозначение совокупностей или коллективов.

Обработка совокупностей является делом математической статистики, задача которой заключается в том, чтобы в естественных науках дополнить описательное изложение вопроса числовыми зависимостями. При этом или может получиться нетесная, коррелятивная форма зависимости между известными переменными данными наблюдений или, если существует обусловленная физическими законами внутренняя связь между явлениями, которую оказывается возможным выразить аналитически,—это может привести к тесной функциональной связи.

Применение математической статистики к решению задач инженерной гидрологии принято подразделять на аналитическую и на графическую часть, так как благодаря этому лучше всего освещаются различные способы, их преимущества и недостатки в изображении конечного результата, а также их особенности в отношении применимости при решении задач того или иного рода.

#### I. АНАЛИТИЧЕСКАЯ СТАТИСТИКА

К аналитической статистике в той части, в какой она с успехом может быть привлечена к решению задач инженерной гидрологии, относятся статистическое исследование совокупностей, корреляция признаков совокупности, подбор кривых к данной системе точек, сглаживание кривых, а также гармонический анализ и анализ периодограмм.<sup>1</sup>

##### 1. Аналитико-статистическое исследование совокупности

Каждому статистическому исследованию совокупности должно предшествовать описание ее, из которого можно уяснить себе отдельные признаки объединенных этой совокупностью предметов или членов совокупности.

<sup>1</sup> E. C z u b e r. Die statistischen Forschungsmethoden. Wien 1921; H. L. R i t z und F. V a u r. Handbuch der mathematischen Statistik. Leipzig 1930.

Общее число  $N$  всех членов называется объемом совокупности. Признаком может считаться установление наличия известного свойства, присущего данной совокупности, например цвета; признаком может быть также величина измерения, как, например, уровень воды в реке.

Измеритель выраженного в одних и тех же статистических единицах признака совокупности—аргумент  $x$  является величиной переменной. Эта переменная  $x$  может быть непрерывной, то есть способной принимать все значения в пределах от  $x_1$  до  $x_N$ , или иметь прерывчатый характер в том случае, когда она выражается в виде прерывных, дискретных величин. Каждому значению переменной  $x$  в последнем случае соответствует определенное число  $z$  членов совокупности, причем это число называют частотой.

**Таблица распределения.** Учет некоторой совокупности в отношении какого-либо определенного признака дает в результате статистический ряд чисел. Чтобы установить распределение признака по отдельным членам совокупности, располагают члены по возрастающей величине аргумента  $x$  и разбивают совокупность на  $n$  классов с равной величины интервалами  $\Delta X$  (рис. 230).

Если еще указать число членов, приходящихся на определенный класс с центром  $X_i$ , то есть частоту класса  $z$ , то получается таблица распределения. Эта таблица служит основой для обработки совокупности.

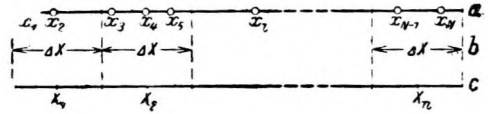


Рис. 230. Аргумент  $x$  совокупности и распределение его по классам.  
 $a$ —отдельные значения ряда;  $b$ —классы;  $c$ —центры классов

Для лучшего пояснения высказанных общих положений ниже приведена и обработана метеорологическая совокупность, а именно—температура воздуха в Бостоне за годы с 1911 по 1920. Общим признаком для данной совокупности может служить суточный максимум температуры в июле, выраженный в градусах Фаренгейта. Объем совокупности определяется числом суточных максимумов температуры, наблюдаемых в июле за 10 лет. Этот объем включает, следовательно,  $10 \times 31 = 310$  членов ряда. Аргумент в этом случае—прерывная величина, так как наблюдаемые значения температур следуют друг за другом на определенных интервалах.

Из полученного статистического ряда чисел, путем подсчета числа членов, приходящихся на классы от 59,5 до 62,5, от 62,5 до 65,5, ... от 101,5 до 104,5, получается частота классов  $z$  и построенная по центрам классов  $X = 61, 64, 67, \dots, 100, 103$  градусов Фаренгейта таблица распределения (табл. 9).

Таблица 9

Таблица распределения для совокупности температур воздуха в Бостоне

$X$	61	64	67	70	73	76	79	82	85	88	91	94	97	100	103
$z$	3	7	11	25	24	32	59	42	31	26	25	8	9	6	2

**Кривая частоты.** В случаях более длинных статистических рядов для большей наглядности с успехом пользуются графическим их изображением. Для этого, при наличии таблицы распределения, прибегают к изображению частот классов или в виде ступенчатого графика частот, называемого также гистограммой, или в виде многоугольника (полигона) частот. При ступенчатом графике на интервалах строятся прямоугольники, высота которых равняется частоте соответственных классов. При многоугольнике частоты классов откладываются на горизонтальных линиях, проведенных через центры



классов (или интервалов), и полученные точки соединяются между собою отрезками прямой.

Для примера с температурными максимумами в Бостоне ступенчатый график и полигональная кривая имеют характер, изображенный на рис. 231.

При возрастающем объеме наблюдений некоторой совокупности, можно уменьшить величину интервала (класса) и приблизиться благодаря этому

к изображению совокупности в виде плавной линии, так называемой кривой частоты  $Z = H(x)$ , которая представляет распределение частот всей совокупности, причем отдельные наблюдаемые значения являются своего рода частными подтверждениями кривой.

Опыт учит, что кривые частоты совокупностей, допускающих статистическую обработку, обнаруживают различные характерные формы. Идеальный случай представляет кривая частоты совершенно симметричной формы, нормальная кривая частоты, называемая также кривую Гаусса (кривую, соответствующую закону погрешностей Гаусса), уравнение которой:

$$z = H(x) = \frac{k}{\sqrt{\pi}} e^{-k^2(x-x_d)^2}, \quad (109)$$

где  $\frac{k}{\sqrt{\pi}} = z_{\text{макс}}$ . (рис. 232, a). В природе в большинстве случаев встречаются несимметричные кривые частоты (рис. 232, b). В качестве предельного случая для формы кривой частоты следует рассматривать совершенно одностороннее распределение частот, при котором частоты убывают от максимума в одном

направлении (рис. 232, c). Наблюдались и такие распределения, которые давали два максимума и даже более (рис. 232, d),

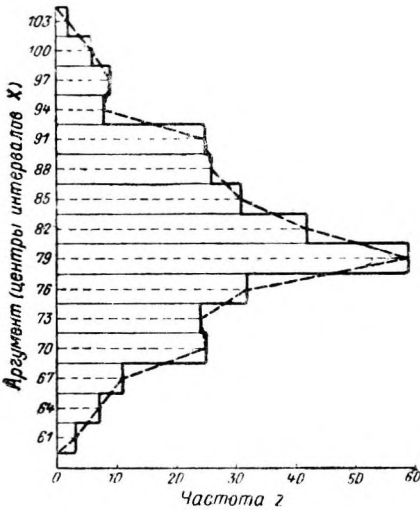


Рис. 231. Изображение частоты  $z$  некоторого признака совокупности посредством ступенчатого графика (сплошной линией) или полигона (прерывистой линией)

Признак совокупности; суточный максимум температуры в Бостоне в июле за годы с 1911 по 1920. Аргумент: градусы Фаренгейта

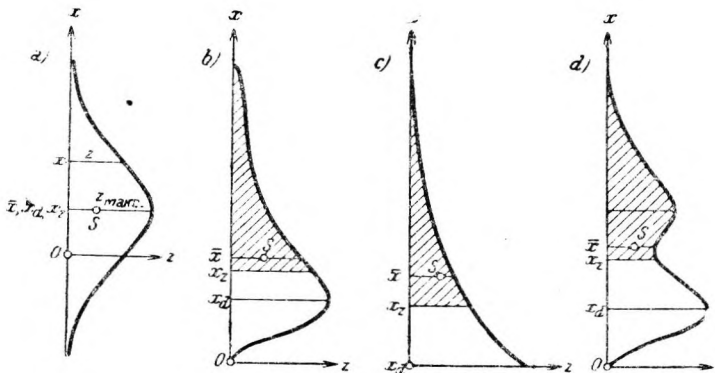


Рис. 232. Кривые частоты.

a — нормальная; b — асимметричная с одним максимумом; c — односторонняя; d — асимметричная с двумя максимумами.

**Интегральная таблица.** Помимо таблицы распределения, для статистических исследований пользуются также интегральной таблицей, которую

получают из таблицы распределения путем последовательного—от интервала к интервалу—суммирования частот  $z$ .

Для рассматриваемого примера получается нижеследующая интегральная таблица.

Таблица 10

**Интегральная таблица для совокупности температур воздуха в Бостоне**

$X <$	59,5	62,5	65,5	68,5	71,5	74,5	77,5	80,5	83,5	86,5	89,5	92,5	95,5	98,5	101,5	104,5
$\Sigma z$	0	3	10	21	46	70	102	161	203	234	260	285	293	302	308	310

Аналитическим выражением для интегральной таблицы служит интегральная функция  $S(x) = \int_0^x z dx$ . Ее графическое выражение дает интегральную кривую частоты. Иногда вместо частоты  $z$  пользуются так называемой относительной частотой  $\frac{z}{\int z dx}$ , и в этом случае получают на интегральной кривой относительной частоты значение максимальной ординаты равным единице.

Статистические параметры. При необходимости сравнить между собою несколько признаков одной и той же совокупности, это можно было бы сделать путем сопоставления таблиц распределения или кривых частот. Однако этот способ не отличается краткостью и не дает сжатой цифровой характеристики соотношений этих признаков.

Сравнение может быть осуществлено простым способом при помощи однозначно определяемых статистических параметров. В качестве таковых служат среднее арифметическое, "взвешенное" среднее арифметическое,<sup>1</sup> медиана (Zentralwert), мода (Dichteste Wert) и среднее квадратическое отклонение (мера рассеяния). Из них первые параметры и дают, собственно, возможность сравнения, тогда как среднее квадратическое отклонение указывает в какой мере отдельные данные наблюдений отклоняются от среднего значения.

Если  $x_1, x_2, x_3, \dots, x_N$  отдельные значения аргумента и  $N$  общее число этих значений, то среднее арифметическое значение совокупности составляет:

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_N}{N} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i. \quad (110)$$

Для этого выражения безразлично, все ли  $x$  различны между собою или среди них имеются группы с одинаковыми значениями. Поэтому указанное уравнение пригодно для вычисления среднего арифметического  $\bar{x}$  по его статистическому ряду.

Если значения аргумента объединены группами в  $n$  классов и если  $z_i$  обозначает частоту класса  $i$ , а  $X_i$  среднее значение класса  $i$ , тогда вообще справедливо выражение:

$$\sum_{i=1}^N x_i = \sum_{i=1}^n z_i X_i \quad (111)$$

и

$$\sum_{i=1}^n z_i = N. \quad (112)$$

<sup>1</sup> Термин "взвешенное" среднее арифметическое проф. Шаффернак применяет для обозначения среднего арифметического значения членов ряда при разбивке совокупности на классы. (Прим. пер.)

Отсюда, при использовании уравнения (110), получается "взвешенное" среднее арифметическое значение:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n z_i X_i}{\sum_{i=1}^n z_i} = \frac{z_1 X_1 + z_2 X_2 + \dots + z_n X_n}{z_1 + z_2 + \dots + z_n}. \quad (113)$$

Если  $\bar{x}_0$  является приближенным "взвешенным" средним арифметическим значением, очень близким к истинному среднему значению, тогда получается, что:

$$\bar{x} = \bar{x}_0 + \frac{z_1 (X_1 - \bar{x}_0) + \dots + z_n (X_n - \bar{x}_0)}{z_1 + z_2 + \dots + z_n} = \bar{x}_0 + \frac{\sum_{i=1}^n z_i (X_i - \bar{x}_0)}{N} \quad (114)$$

Уравнения (113) или (114) применяются, если „взвешенное" среднее арифметическое значение подлежит вычислению из таблицы распределения, а не непосредственно из статистического ряда.

Графически „взвешенное" среднее арифметическое  $\bar{x}$  дается ординатой центра тяжести  $S$  площади, замкнутой кривою частоты и осью ординат (см. 232,  $a-d$ ).

Медиана—это то значение  $x_z$  аргумента  $x$ , которое разделяет объем расположенной в принятом порядке совокупности на две равные части. Значения аргумента, расположенные ниже центрального значения, повторяются столь же часто, как и значения, расположенные выше него. Отсюда сумма частот, подсчитанная от начала таблицы распределения и до медианы,

составляет 
$$\frac{\sum_{i=0}^n z_i}{2} = \frac{N}{2}.$$

Учитывая это, можно получить медиану простым способом из интегральной таблицы частот как значение, соответствующее сумме частот  $N/2$ . На графике горизонтальная линия, проходящая через медиану, делит площадь, заключенную между кривою частот и осью  $x$ -ов, пополам (см. рис. 232,  $a-d$ ).

Мода определяет то значение  $x_d$  аргумента  $x$ , которое в данной совокупности встречается чаще всего. Его обычно определяют в качестве эмпирического значения наибольшей частоты из таблицы распределения путем приведения значения аргумента для центра того класса или интервала, который имеет наибольшую частоту. На кривой частот значение наибольшей частоты определяется касательной, параллельной оси  $x$ -ов. Если кривая частот представляет совершенно одностороннюю линию, то значение наибольшей частоты совпадает с наибольшим значением  $\bar{x}$  (см. рис. 232,  $c$ ).

Применение статистических средних зависит от той цели, для которой должно служить вычисляемое среднее. При применении основных положений статистики, полученных выше теоретическим путем, к совокупностям, представляющим интерес с точки зрения гидрологии, будет показано, какие средние здесь имеют значение и какое гидрологическое толкование им можно дать.

Вычисление рассеяния или дисперсии должно так же, как и в случае средних значений, охватывать решительно все значения аргумента. Как понятие, эта величина должна отличаться определенностью и поддаваться вычислению простым путем.

Самой распространенной мерой рассеяния является среднее квадратическое отклонение.

Под средним квадратическим отклонением понимают корень квадратный из средней величины квадратов отклонений отдельных значений аргумента  $x$  от их среднего арифметического  $\bar{x}$ . Тем самым, следовательно, о чисто математической точки зрения среднее квадратическое отклонение есть совершенно то же самое, что и средняя ошибка в теории уравнительных вычислений. Отклонения отдельных значений  $x_i$  и соответственно значений центров классов  $X_i$  от среднего арифметического значения  $\bar{x}$  составляют  $x_i - \bar{x}$  и соответственно  $X_i - \bar{x}$ .

В первом случае среднее квадратическое отклонение будет:

$$\sigma = \sqrt{\frac{(x_1 - \bar{x})^2 + \dots + (x_N - \bar{x})^2}{N}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}{N}}, \quad (115)$$

а во втором случае:

$$\sigma = \sqrt{\frac{z_1 (X_1 - \bar{x})^2 + \dots + z_n (X_n - \bar{x})^2}{N}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [z_i (X_i - \bar{x})^2]}{N}}. \quad (116)$$

При числовом выражении уравнения (116) рекомендуется преобразовать его подобно тому, как это было сделано с уравнением (114), пользуясь приближенным средним значением в выражении:

$$\sigma = \sqrt{\frac{z_1 (X_1 - x_0)^2 + \dots + z_n (X_n - x_0)^2}{N} - (\bar{x} - \bar{x}_0)^2},$$

или

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [z_i (X_i - x_0)^2]}{N} - (\bar{x} - \bar{x}_0)^2}. \quad (117)$$

В соответствии со способом получения средних величин применяют уравнение (115), в соединении со статистическим рядом значений аргумента, и уравнения (116) или (117) для вычисления среднего квадратического отклонения из таблицы распределения.

В рассматриваемом примере из таблицы распределения на стр. 183 или из графического изображения ее на рис. 231 и из интегральной таблицы на стр. 185, получаются следующие средние значения:

Мода.....  $x_d = 79^{\circ},00$   
 Медиана.....  $x_z = 80^{\circ},34$

Вычисление "взвешенного" среднего арифметического значения  $\bar{x}$  и среднего квадратического отклонения  $\sigma$  производится при помощи табл. 11.

Вычисление среднего арифметического  $\bar{x}$  и среднего квадратического отклонения

$X_i$	$z_i$	$\frac{X_i - \bar{x}_0}{\Delta X}$	$z_i \frac{X_i - \bar{x}_0}{\Delta X}$	$z_i \left( \frac{X_i - \bar{x}_0}{\Delta X} \right)^2$
61	3	-6	-18	108
64	7	-5	-35	175
67	11	-4	-44	176
70	25	-3	-75	225
73	24	-2	-48	96
76	32	-1	-32	32
79	59	0	0	0
82	42	1	42	42
85	31	2	62	124
88	26	3	78	234
91	25	4	100	400
94	8	5	40	200
97	9	6	54	324
100	6	7	42	294
103	2	8	16	128
Сумма	310	—	+ 182	2558

$$\bar{x}_0 = 79^{\circ},00, \quad \Delta X = 3,$$

$$\frac{x - \bar{x}_0}{\Delta X} = \frac{182}{310} = 0,587,$$

$$\bar{x} = 79^{\circ},00 + 3 \times 0,587 = 80^{\circ},76,$$

$$\left( \frac{\sigma}{\Delta X} \right)^2 = \frac{2558}{310} - 0,587^2 = 7,907,$$

$$\frac{\sigma}{\Delta X} = 2,812,$$

$$\sigma = 3 \times 2,812 = 8^{\circ},44.$$

Здесь следует заметить, что для упрощения хода вычислений оказывается целесообразным при вычислениях иметь дело не с самими отклонениями  $X_i - \bar{x}_0$ , а со значениями  $\frac{X_i - \bar{x}_0}{\Delta X}$ .

## 2. Корреляция двух признаков данной совокупности. Простая корреляция

И теория и опыт указывают, что между признаками одной и той же статистической величины существует известная количественная зависимость. Эта зависимость, называемая коррелятивной связью, располагается между обоими крайними случаями связей, а именно между математической функциональной зависимостью и полной независимостью в том смысле, какой придается этому понятию в теории вероятностей. В то время, как при функциональной зависимости каждому значению одной переменной  $x$  соответствует вполне определенное значение другой переменной  $y$ , при коррелятивной связи наблюдается, что какому-либо значению одной переменной соответствуют различные значения другой, причем они, однако, обнаруживают определенное, обусловленное первой переменной, распределение. Согласно этому определенному исходному значению переменной  $x$  соответствует особое распределение частот переменной  $y$ . Коррелятивная связь является именно зависимостью более общего характера, чем зависимость аналитическая.

**Корреляционная таблица.** Вместо рассмотренного выше расположения значений аргумента в виде ряда, при наличии двух признаков одной и той же совокупности, устанавливается плоскостная связь между значениями обоих переменных  $x$  и  $y$  и соответствующих им частот  $z_x$  и  $z_y$ . Простая таблица распределения, составляемая на основе статистического ряда значений аргумента, заменяется двойной корреляционной таблицей  $x$  и  $y$ , где числовые значения располагаются рядами (строками), а именно в виде горизонтальных строк и вертикальных колонок, которые, в свою очередь, распадаются на клетки.

Если переменная  $x$  разбита на  $n$  классов с центрами  $X_i$  и переменная  $y$  на  $m$  классов с центрами  $Y_j$ , то образуется  $m$  строк,  $n$  колонок и  $nm$  клеток. Число членов, приходящихся на определенную клетку, называют частотой клетки  $z = z_{ij}$ , где индексы обозначают, что данная клетка относится к колонке  $i$  и к строке  $j$ . Суммы членов в отдельных рядах составляют

$$\sum_{j=1}^m z_{ij} = z_{xj} = z_x \text{ и соответственно } \sum_{i=1}^n y_j = z_{yj} = z_y, \text{ причем эти суммы являются}$$

частотами классов и характеризуют распределение совокупности каждая в

отношении своего признака. Полная сумма всех строк

$$\sum_{i=1}^n z_{xi} \text{ дает объем совокупности (см. рис. 233).}$$

**Поле частот.** Геометрическое изображение этого двойного распределения приводит к полю частот. Для этого из центров клеток корреляционной таблицы восстанавливают перпендикуляры к ее плоскости, откладывают на них в принятом масштабе частоты клеток корреляционной таблицы и объединяют их конечные точки некоторой криволинейной поверхностью. Для графического изображения этой криволинейной поверхности частот на плоскости чертежа лучше всего пользоваться системой изолиний, нанося в плоскости системы координат  $x, y$  линии равных частот клеток.

В качестве примера совокупности с двумя признаками ниже рассмотрена задача с суточными максимумами температур в июле за период с 1911 по 1920 гг. в Бостоне и в Нью-Йорке. На основе полных рядов температурных наблюдений в обоих городах получается нижеследующая корреляционная таблица (табл. 12, стр. 190).

Построенные по данным табл. 12 линии равных частот изображены на рис. 234. Данное графическое изображение дает наилучшее представление о своеобразном характере связи температур для Бостона и Нью-Йорка. При помощи частот их связь друг с другом выступает яснее и шире. Если дается определенная величина частоты, например  $z = 1$ , то какому-либо определенному значению максимума температуры в Бостоне, например  $X = 76^\circ$ , соответствуют определенные значения максимумов температуры в Нью-Йорке, а именно  $Y = 67^\circ$  и  $91^\circ$ , так как указанная линия равной частоты служит выражением той зависимости, которая соответствует частоте  $z = 1$ .

**Уравнения прямых регрессий.** Для дальнейшего анализа поверхности частот в целях построения коррелятивной связи между признаками  $x$  и  $y$ , переходят от прежнего пространственного рассмотрения к изображению зависи-

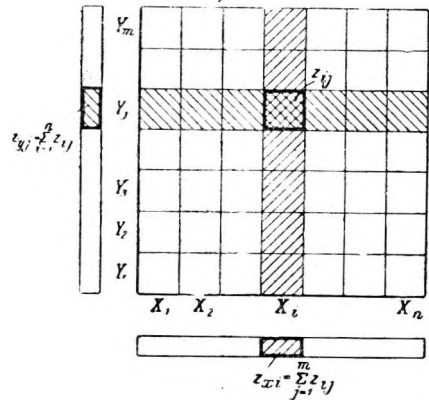


Рис. 233.

$$\sum_{j=1}^m z_{yj} \text{ или всех колонок}$$

Корреляционная таблица суточных максимумов температур в июле для периода лет с 1911 по 1920 г. в Бостоне и в Нью-Йорке

Бостон (X)	Нью-Йорк (Y)														
	61	64	67	70	73	76	79	82	85	88	91	94	97	100	103
97	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
94	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
91	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
88	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
85	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
82	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
79	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
76	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
73	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
70	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
67	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
64	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

мости в плоскости. Поверхность частот заменяется двумя линиями, так называемыми характеристиками совокупности. Для получения этих линий вычисляют средние арифметические строчек и колонок корреляционной таблицы,

наносят их в виде точек в системе координат  $x, y$  и проводят особые линии по точкам, соответствующим средним значениям горизонтальных строк, то есть по  $\bar{x}_i, \bar{x}_2, \dots$ <sup>1</sup> и по соответствующим средним значениям колонок, то есть по  $\bar{y}_1, \bar{y}_2, \dots$ . В очень многих встречающихся на практике случаях характеристики  $R_1$  и  $R_2$ , полученные таким путем, можно выразить прямыми линиями. В таких случаях говорят о линейной корреляции. Линии  $R_1$  и  $R_2$  называются прямыми связи или прямыми регрессии (рис. 234).

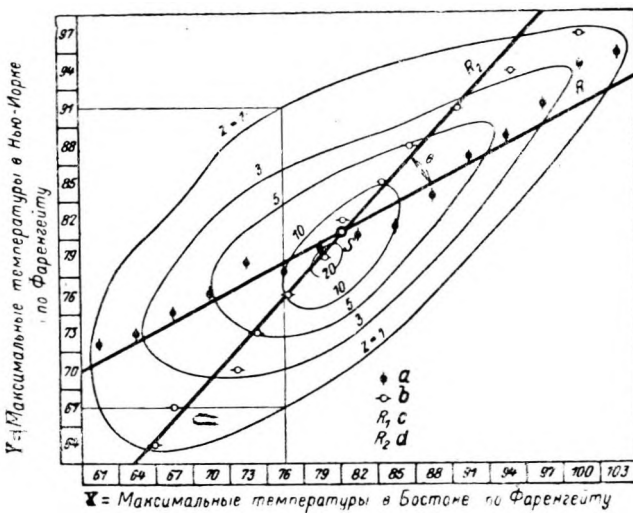


Рис. 234. Поле частот в изолиниях равных частот  $z$  для суточных максимумов температуры в Бостоне и Нью-Йорке в июле за годы с 1911 по 1920.

$a$ —средние колонок;  $b$ —средние строк;  $c$ —прямая регрессии  $x$  по  $y$ ;  
 $d$ —прямая регрессии  $y$  по  $x$

Изображенные на рис. 234 замкнутые линии равных частот принимают

форму эллипсов, если распределение значений совокупности внутри строк и колонок симметрично. В этом случае легко показать, что прямые регрессии пересекают отдельные эллипсы в точках, где касательные к эллипсам парал-

<sup>1</sup> Средние значения  $\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots$  наносятся на чертеж по связи с рядовыми (а не средними) значениями переменной  $y$ , то есть  $y_1, y_2, \dots$  а  $\bar{y}_1, \bar{y}_2, \dots$  по связи с рядовыми значениями переменной  $x$ , то есть  $x_1, x_2, \dots$  (Прим. пер.).

лельны оси  $x$ -ов или оси  $y$ -ов Исходя из этого свойства, можно различать следующие три крайние случая связи между  $x$  и  $y$ .

1- Эллипсы превращаются в окружности, прямые регрессии принимают направление, параллельное оси  $x$ -ов и  $y$ -ов, и, следовательно, перпендикулярны друг другу; тем самым между  $x$  и  $y$  отсутствует всякая корреляционная связь.

2. Если большие оси эллипсов уходят в бесконечность, в то время как малые оси остаются конечными по размерам, то эллипсы превращаются каждый в две параллельные прямые, а поверхность частот становится цилиндрической поверхностью. Прямые регрессии совпадают, корреляция полная.

3. Если малые оси эллипсов принимают бесконечно-малые размеры, тогда как большие оси остаются конечными по размерам, то эллипсы превращаются в отрезки, располагающиеся на одной прямой. Обе прямые регрессии также лежат на этой прямой, то есть совпадают. Зависимость между  $x$  и  $y$  приняла характер функциональной и притом однозначной линейной связи.

Если упомянутая выше симметричность в распределении по осям  $x$ -ов и  $y$ -ов не имеет места, то указанные крайние случаи опять-таки возможны, причем во втором случае будет наблюдаться нелинейная коррелятивная связь, а в третьем случае нелинейная функциональная связь.

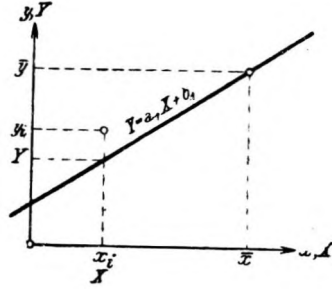


Рис. 235.

Уравнения прямых регрессий могут быть выведены или на основе отдельных значений аргументов  $x_1, x_2, \dots, x_p, \dots, x_N, y_1, y_2, \dots, y_p, \dots, y_N$  или на основе вычисленных значений центров классов  $X_1, X_2, \dots, X_p, \dots, X_N, Y_1, Y_2, \dots, Y_p, \dots, Y_N$ . Первый способ пригоден для подсчета по данным полных статистических рядов, а второй применим тогда, когда уже имеется корреляционная таблица, составленная по классам.

Прямые регрессии должны быть теми линиями, которые ближе всего отвечают расположению точек  $x, y$ , причем  $y$  первой прямой выравнивание по точкам происходит в направлении  $y$ -ов, а  $y$  второй—в направлении  $x$ -ов (рис. 235). По законам теории вероятностей прямые должны удовлетворять условию, что сумма квадратов отклонений всех точек данного поля от прямой в соответственном для каждой прямой направлении, то есть в направлении  $y$ -ов для первой прямой и в направлении  $x$ -ов для второй,—будет наименьшей. Отсюда прежде всего следует, что в общем прямая регрессии, которая выражает зависимость наилучших (наиболее близких к действительно наблюдаемым точкам) значений  $y$  от значений  $x$ , отличается от той прямой, которая представляет связь между наилучшими значениями  $x$  и заданными значениями  $y$ .

Если, следовательно, первая прямая удовлетворяет уравнению:

$$Y = a_1 X + b_1,$$

то этим выражается, что заданному значению  $X$  аргумента  $x$  по ней соответствует наилучшее значение аргумента  $y$ , выраженное через  $Y$ . Подобным же образом уравнение второй прямой регрессии

$$X = a_2 Y + b_2$$

означает, что заданному значению  $Y$  аргумента  $y$  по прямой соответствует наилучшее значение  $X$  аргумента  $x$ .

Вычисление параметров  $a$  и  $b$  может быть произведено следующим образом. Рассматривая отдельные значения аргумента можно видеть, что каждая точка поля точек отклоняется от прямой регрессии

$$Y = a_1 X + b_1 \text{ на}$$



расстояние  $y_i - Y$  в направлении оси  $y$ -ов. Согласно приведенному выше условию сумма квадратов отклонений

$$\sum_{i=1}^N (y_i - Y)^2 = \sum_{i=1}^N [y_i - (a_1 X + b_1)]^2 \quad (118)$$

должна быть наименьшей. Так как для отдельных значений аргумента  $X = x_i$ , то условие минимума может быть выражено в виде:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial}{\partial a_1} \left\{ \sum_{i=1}^N [y_i - (a_1 x_i + b_1)]^2 \right\} = 0 \\ \frac{\partial}{\partial b_1} \left\{ \sum_{i=1}^N [y_i - (a_1 x_i + b_1)]^2 \right\} = 0 \end{aligned} \right\} \quad (119)$$

Так как

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Sigma}{\partial a_1} &= -2 \sum_{i=1}^N [y_i - (a_1 x_i + b_1)] x_i = -2 \sum_{i=1}^N [x_i y_i - a_1 x_i^2 - b_1 x_i] = 0, \\ \frac{\partial \Sigma}{\partial b_1} &= -2 \sum_{i=1}^N [y_i - a_1 x_i - b_1] = 0, \end{aligned}$$

то учитывая, что

$$\sum_{i=1}^N x_i = N\bar{x} \quad \text{и} \quad \sum_{i=1}^N y_i = N\bar{y},$$

где  $\bar{x}$  и  $\bar{y}$  представляют взвешенные средние арифметические значения аргументов  $x$  и  $y$ , следует:

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^N x_i y_i - a_1 \sum_{i=1}^N x_i^2 - b_1 N\bar{x} &= 0, \\ N\bar{y} - N\bar{x} a_1 - N b_1 &= 0, \end{aligned}$$

откуда:

$$\left. \begin{aligned} a_1 &= \frac{\sum_{i=1}^N x_i y_i - N\bar{x}\bar{y}}{\sum_{i=1}^N x_i^2 - N\bar{x}^2} = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} \\ b_1 &= \bar{y} - a_1 \bar{x}. \end{aligned} \right\} \quad (120)$$

Уравнение первой прямой регрессии по подстановке полученных выражений для  $b_1$  и  $a_1$  приобретает вид:

$$Y = a_1 X + \bar{y} - a_1 \bar{x} = \bar{y} + a_1 (X - \bar{x})$$

и далее:

$$Y = \bar{y} + \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} (X - \bar{x}). \quad (121)$$

Подобным же способом для уравнения второй прямой регрессии получаются значения:

$$\left. \begin{aligned} a_2 &= \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2} \\ b_2 &= \bar{x} - a_2 \bar{y}, \end{aligned} \right\} \quad (122)$$

откуда следует:

$$X = \bar{x} + \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2} (Y - \bar{y}). \quad (123)$$

Если исходными служат не отдельные значения аргументов  $x$ ,  $y$ , а средние групповые значения центров классов  $X_i$  и  $Y_j$ , тогда при выполнении условия минимума в качестве веса должна учитываться частота клеток  $z = z_{ij}$ . Уравнению (118) в этом случае соответствует:

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m z_{ij} (Y_j - \bar{Y})^2 = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m z_{ij} [Y_j - (a_1 X_i + b_1)]^2$$

и после частного дифференцирования по  $a_1$  и  $b_1$  получается:

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m z_{ij} X_i Y_j - a_1 \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m z_{ij} X_i^2 - b_1 N \bar{x} &= 0, \\ N \bar{y} - N x a_1 - N b_1 &= 0. \end{aligned}$$

Затем

$$\left. \begin{aligned} a_1 &= \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m z_{ij} (X_i - \bar{x})(Y_j - \bar{y})}{\sum_{i=1}^n z_{xi} (X_i - \bar{x})^2} \\ b_1 &= \bar{y} - a_1 \bar{x} \end{aligned} \right\} \quad (124)$$

и, наконец, уравнения прямых регрессий:

$$\left. \begin{aligned} Y &= \bar{y} + \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m z_{ij} (X_i - \bar{x})(Y_j - \bar{y})}{\sum_{i=1}^n z_{xi} (X_i - \bar{x})^2} (X - \bar{x}) \\ X &= \bar{x} + \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m z_{ij} (X_i - \bar{x})(Y - \bar{y})}{\sum_{j=1}^m z_{yi} (Y_i - \bar{y})^2} (Y - \bar{y}) \end{aligned} \right\} \quad (125)$$

**Коэффициент корреляции.** Стремление дать степени коррелятивной связи также и числовое выражение послужило поводом к введению коэффициента корреляции.

В случае совпадения обеих прямых регрессии одновременно удовлетворяются оба уравнения этих прямых с каждой из пар значений  $X, Y, a_1$

становится равным  $1/a_2$ , то есть  $a_1 a_2 = 1$ , и между  $x$  и  $y$  получается однозначная линейная коррелятивная связь. Если прямые регрессии образуют между собою угол, тогда, как это можно доказать, произведение  $a_1 a_2$  располагается между значениями  $+1$  и  $-1$  и приближается к одному из этих пределов тем более, чем с большим приближением удовлетворяются оба уравнения прямых регрессии. В соответствии с этим произведение  $a_1 a_2$  может служить мерой корреляции между  $x$  и  $y$ . За коэффициент корреляции принимают величину:

$$r = \sqrt{a_1 a_2}. \tag{126}$$

Если  $a_1$  и  $a_2$  заменить выражением для них из уравнений (120) и (122), то получается.

$$r = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2}} \tag{127}$$

или, применяя уравнение (124),

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m z_{ij} (X_i - \bar{x})(Y_j - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n z_{xi} (X_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{j=1}^m z_{yj} (Y_j - \bar{y})^2}}. \tag{128}$$

Средние квадратические отклонения  $\sigma_x$  и  $\sigma_y$  обоих статистических рядов значений аргументов согласно формуле (115) могут быть выражены в виде:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_x &= \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} \\ \sigma_y &= \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2} \end{aligned} \right\} \tag{129}$$

На основании этого можно написать, что

$$r = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{N \sigma_x \sigma_y}. \tag{130}$$

Тем самым коэффициент корреляции двух рядов значений, выраженный в соответственных средних квадратических отклонениях как в единицах, равняется среднему арифметическому произведений отклонений частных значений  $x_i$  и  $y_i$  от средних  $\bar{x}$  и  $\bar{y}$ . Если в уравнение (130) ввести приближен-

ные средние арифметические  $\bar{x}_0$  и  $\bar{y}_0$ , то после небольшого преобразования получается:

$$r = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x}_0) (y_i - \bar{y}_0) - (\bar{x} - \bar{x}_0) (\bar{y} - \bar{y}_0)}{\sigma_x \sigma_y} \quad (131)$$

В соответствии с приведенными выше определениями можно сказать: чем больше коэффициент корреляции  $r$  приближается к одному из предельных для него значений  $+1$  или  $-1$ , тем больше связь данных переменных приближается к полной коррелятивной связи. При  $r = +1$  переменные  $x$  и  $y$  в общем возрастают одновременно, в то время как  $r = -1$  указывает на возрастание одной переменной и одновременное убывание другой. С другой стороны было бы неправильно при получении  $r = 0$  делать заключение о полной независимости переменных; этот результат надо расценивать, как отсутствие коррелятивной связи между обеими переменными.

Как уже упоминалось, в случае простой корреляции средние арифметические рядов не всегда располагаются по прямым линиям. Известны случаи, когда линейная корреляция отсутствует, когда, следовательно, тот или другой ряд средних значений образует кривую линию.<sup>1</sup>

Чтобы убедиться в этом или, напротив, чтобы привести доказательства в пользу линейной корреляции, является целесообразным наносить точки средних значений, полученных по корреляционной таблице, на чертеж, как то сделано на рис. 234. Тогда можно легко убедиться, расположены ли связующие точки таким образом, что при проведении по ним прямой обеспечена достаточно точная коррелятивная связь. Такие проведенные "на-глаз" прямые естественно не отвечают в полной мере прямой регрессии, вычисленным по способу наименьших квадратов; тем не менее они дают часто вполне достаточное приближение. На основании подобного рода графических изображений по величине угла  $\theta$  можно судить о степени коррелятивной связи.

Если углы, образуемые прямыми регрессии  $R_1$  и  $R_2$  с осью  $x$ -ов, согласно рис. 236, равняются  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$ , то угол, образуемый пересечением прямых:

$$\theta = \alpha_2 - \alpha_1$$

и следовательно

$$\operatorname{tg} \theta = \frac{\operatorname{tg} \alpha_2 - \operatorname{tg} \alpha_1}{1 + \operatorname{tg} \alpha_1 \operatorname{tg} \alpha_2}.$$

Из уравнений (120), (122), (127) и (129) следует:<sup>1</sup>

$$\operatorname{tg} \alpha_1 = a_1 = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x}) (y_i - \bar{y})}{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} = r \frac{\sigma_y}{\sigma_x}$$

<sup>1</sup> K. F i s c h e r. Verdunstung in den Schweizer Alpen. Mit Bemerkungen zur Korrelationsrechnung. Meteorologische Zeitschrift. Bd. 50, H. 9, 1933.

<sup>2</sup> Уравнения прямых регрессии в силу этого можно написать еще в следующей форме:

$$Y = \bar{y} + r \frac{\sigma_y}{\sigma_x} (X - \bar{x}), \quad X = \bar{x} + r \frac{\sigma_x}{\sigma_y} (Y - \bar{y}).$$

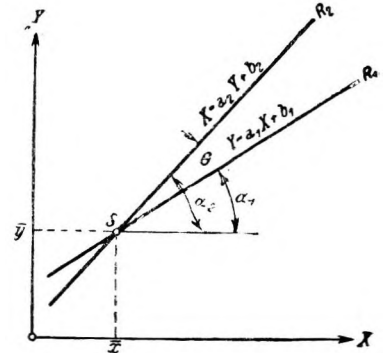


Рис. 236.

$$\operatorname{tg} \alpha_2 = \frac{1}{a_2} = \frac{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})} = \frac{1}{r} \frac{\sigma_y}{\sigma_x}$$

и далее

$$\operatorname{tg} \theta = \frac{\frac{1}{r} \frac{\sigma_y}{\sigma_x} - r \frac{\sigma_y}{\sigma_x}}{1 + \left(\frac{\sigma_y}{\sigma_x}\right)^2} \quad (132)$$

В этом уравнении заключается доказательство правильности приведенных выше предельных значений  $+1$  и  $-1$  коэффициента корреляции  $r$ . Действительно, при

$$\begin{array}{ll} r = 1 \dots \dots \dots \operatorname{tg} \theta = 0, & \text{следовательно } \theta = 0^\circ \\ r = 0 \dots \dots \dots \operatorname{tg} \theta = \infty, & \text{следовательно } \theta = 90^\circ \\ r = -1 \dots \dots \dots \operatorname{tg} \theta = 0, & \text{следовательно } \theta = 180^\circ. \end{array}$$

Для рассматриваемого примера совокупности с двумя признаками—суточными максимумами температуры в Бостоне и в Нью-Йорке—вычисления, служащие для получения уравнений прямых регрессии и коэффициента корреляции, приведены в табл. 13.

В табл. 13, справа от корреляционной таблицы и ниже ее, расположены две таблицы, которые служат для вычисления суммарных значений, арифметических средних, средних квадратических отклонений и коэффициента корреляции. Чтобы при вычислении не иметь дела с большими числами, вводят

$$\text{вместо величин } X \text{ и } Y \text{ новые величины } \xi = \frac{X - x_0}{\Delta X} \text{ и } \eta = \frac{Y - y_0}{\Delta Y}. \quad \text{Благодаря}$$

этому новые величины классов  $\Delta \xi$  и  $\Delta \eta$  приобретают значение, равное 1.

Далее, приближенным средним значениям  $X$  и  $Y$ , а именно  $\bar{x}_0 = 79$  и  $\bar{y}_0 = 82$ , соответствуют нулевые значения  $\xi$  и  $\eta$  (см. табл. 13).

При вычислениях следует делать различие между частотами классов

$$\text{или интервалов } z_x = \sum_{x=1}^n z, z_y = \sum_{y=1}^m z \quad \text{и частотой клеток } z. \text{ Первые служат}$$

для вычисления сумм однородных величин  $\Sigma z_x \xi = 182$ ,  $\Sigma z_x \xi^2 = 2558$ ,  $\Sigma z_y \eta = -103$ ,  $\Sigma z_y \eta^2 = 1429$  в 3-й и 4-й строках вспомогательных таблиц, тогда как  $z$  служит для подсчета сумм величин, принадлежащих обоим признакам,  $\Sigma z \xi \eta = \Sigma z \eta \xi = 1220$  в 6-й строке вспомогательных таблиц. Равенство двух последних сумм служит проверкой для вычислений.

Вычисление средних арифметических  $\bar{\xi}$ ,  $\bar{\eta}$ , средних квадратических отклонений  $\sigma_\xi$ ,  $\sigma_\eta$  и коэффициента корреляции  $r$  помещено в табл. 13. Выражение для  $\sigma_\eta^2$  вытекает из уравнения (117), а для  $r$  — из уравнения (131).

Если возвратиться к первоначальным величинам  $X$  и  $Y$ , то средние арифметические значения получаются:

$$\left. \begin{array}{l} \bar{x} = \bar{x}_0 + \Delta X \bar{\xi} = 79 + 3 \cdot 0,5871 = 80,76 \\ \bar{y} = \bar{y}_0 + \Delta Y \bar{\eta} = 82 - 3 \cdot 0,3323 = 81,00 \\ \bar{x} = \bar{x}_0 + \Delta X \bar{\xi} = 79 + 3 \times 0,5871 = 80,76 \\ \bar{y} = \bar{y}_0 + \Delta Y \bar{\eta} = 82 - 3 \times 0,3323 = 81,00 \end{array} \right\} \text{ по Фаренгейту,}$$

и средние квадратические отклонения

$$\left. \begin{array}{l} \sigma_x = \Delta X \sigma_\xi = 3 \times 2,8119 = 8,44 \\ \sigma_y = \Delta Y \sigma_\eta = 3 \times 2,1212 = 6,36 \end{array} \right\} \text{ по Фаренгейту.}$$

Коэффициент корреляции как величина отвлеченная остается без изменения  $r = 0,69$ .

Вычисление коэффициента корреляции для суточных максимумов температур в июле за период 1911—1920 гг. в Бостоне и Нью-Йорке

Бостон (X)	Нью-Йорк (Y)										$\bar{x}$	$\frac{\eta = -y_0}{Y - y_0}$ $\Delta Y$	$\bar{x}\eta$	$\bar{x}\eta^2$	$\Sigma z\xi$	$\Sigma z^2\xi$					
	61	64	67	70	73	76	79	82	85	88							91	94	97	100	103
97																4	+5	20	100	28	140
94																13	+4	52	208	67	268
91																11	+3	33	99	41	123
88																31	+2	62	124	76	152
85																45	+1	45	45	75	75
82																51	0	—	—	27	—
79																66	-1	-66	66	7	-7
76																45	-2	-90	180	-40	80
73																26	-3	-78	234	-45	135
70																11	-4	-44	176	-25	100
67																5	-5	-25	100	-20	100
64																2	-6	-12	72	-9	54
61																310	—	-103	1429	—	1220

$$\bar{\eta} = \frac{1}{N} \Sigma \eta = \frac{-103}{310} = -0,3323$$

$$\bar{\xi} = 0,5871$$

$$\sigma_{\eta}^2 = \frac{1}{N} \Sigma z\eta^2 - \bar{\eta}^2 = \frac{1429}{310} - 0,3323^2 = 4,4993$$

$$\sigma_{\xi}^2 = 7,9069$$

$$r = \frac{\frac{1}{N} \cdot \Sigma z\xi\eta - \bar{\xi}\bar{\eta}}{\sigma_{\xi} \sigma_{\eta}} = \frac{\frac{1220}{310} + 0,3323 \cdot 0,5871}{\frac{2,1212 \cdot 2,8119}{\sigma_{\xi} \sigma_{\eta}}} = 0,69$$

Уравнения для обеих прямых регрессии кратчайшим образом получаются путем подстановки приведенных выше значений в уравнение (125):

$$Y - 81,00 = 0,499 (X - 80,76)$$

$$X - 80,76 = 0,962 (Y - 81,00).$$

В третьей главе, при рассмотрении вопроса об определении катастрофических расходов воды, приведен второй пример вычисления прямых регрессии, в котором, в противоположность только что рассмотренному примеру, суммарные величины подсчитаны непосредственно по всем значениям переменных. Таким образом в этом случае отпадают разбишка на классы, корреляционная таблица, вычисления с частотами  $z$ ,  $z_x$ ,  $z_y$ , приведение к единичным интервалам или классам  $\xi = 1$  и  $\eta = 1$  и приближенные средние  $\bar{x}_0$  и  $\bar{y}_0$ , а также обратное приведение результатов к первоначальным средним интервалов  $X$  и  $Y$ . Отказ от всех этих вспомогательных средств там целесообразен, однако, только потому, что весь ряд значений аргумента состоит всего из 41 члена, тогда как в рассмотренном случае их 310. Поэтому здесь непосредственное вычисление на основе всех членов ряда потребовало бы, вследствие слишком большого их числа, большей затраты труда. Число значений аргумента является, следовательно, мерилем для выбора способа вычисления.

### 3. Подбор кривых

Если, в противоположность рассмотренным до сих пор не тесным связям между переменными, обнаружится более тесная связь, выражающаяся в меньшем рассеянии точек, тогда возникает возможность установления функциональной зависимости.

Задача заключается в подборе для наблюдаемых точек наиболее подходящей аналитической кривой. Ниже будут рассмотрены некоторые способы, служащие для установления уравнения подобного рода кривой и ее параметров.

Чтобы получить уравнение кривой в наиболее простом удобном виде, наносят точки в такой системе координат, где масштабы для осей выбраны с расчетом, чтобы точки ложились примерно по прямой.

В столбце I табл. 14 перечислены уравнения тех кривых, которые в первую очередь применяются при гидрологических исследованиях. Рядом в столбце II приведены масштабы для координатных осей, при помощи которых могут быть получены уравнения связи в линейном виде, приведенные в столбце III.

Таблица 14

Примеры кривых для подбора

I Вид уравнения	II Масштабы для координатных осей		III Уравнение подбираемой кривой $Y = AX + B$ в выбранных масштабах координатных осей
	абсцисса X	ордината Y	
$y = ax + b$	x	y	$y = ax + b$
$y = ax^b$	log x	log y	$[\log y] = b [\log x] + \log a$
$y = be^{ax}$	x	log y	$[\log y] = 0,4313 a [x] + \log b$
$y = a + bx + cx^2$ Вторые производные по y — постоянные величины	$x - x_0$	$\frac{y - y_0}{x - x_0}$	$\frac{y - y_0}{x - x_0} = c [x - x_0] + (b + 2cx_0)$ $x_0$ и $y_0$ координаты любой соприкасающейся с кривой точки

Для определения параметров  $a$ ,  $b$ ,  $c$  можно пользоваться различными способами.

**Графический способ.** Подбирают "на-глаз" вполне подходящую прямую, наиболее отвечающую расположению точек, нанесенных в системе координат с масштабами осей  $X$ ,  $Y$ , выбранными в столбце II вышеприведенной таблицы, измеряют угол ее наклона  $\operatorname{tg} \alpha = A$  и отрезок  $B$ , отсекаемый ею на оси  $y$ -ов.

Если, например, уравнение (2) в табл. 14:  $y = ax^b$  — при нанесении в новой координатной системе с логарифмическими масштабами осей дало прямую, то уравнение этой прямой  $Y = AX + B$  принимает согласно столбцу III вид  $[\log y] = b[\log x] + \log a$ . Измеряя  $A$  и  $B$ , равные в данном случае  $\log a = B$  и  $b = A$ , определяют отсюда параметры  $a$  и  $b$ .

**Способ характерных точек.** Из числа наблюдаемых точек выбирают, смотря по числу параметров подбираемой кривой, такие точки, которые предположительно расположатся в характерных местах на определяемой кривой. Так как, например, кривая с тремя параметрами определяется тремя точками, то в этом случае надлежит выбрать три точки.

Если, например, при подборе кривой остановиться на уравнении (4) табл. 14:  $y = a + bx + cx^2$ , то для выбранных точек  $x_1, y_1; x_2, y_2; x_3, y_3$  по подстановке их в указанное уравнение действительны равенства:

$$\left. \begin{aligned} y_1 &= a + bx_1 + cx_1^2 \\ y_2 &= a + bx_2 + cx_2^2 \\ y_3 &= a + bx_3 + cx_3^2, \end{aligned} \right\} \quad (133)$$

откуда и могут быть вычислены параметры  $a$ ,  $b$ ,  $c$ . Полученное таким путем уравнение кривой, вследствие произвольности в выборке точек  $x_1, y_1, x_2, y_2$  и  $x_3, y_3$ , может в различной степени удовлетворять расположению нанесенных точек.

**Способ осреднений.** По этому способу определяют угол наклона  $A$  и отсекаемый на ординате отрезок  $B$  подбираемой прямой (по столбцу III табл. 14) приближенно, путем следующих простых вычислений.

Если, например, подбираемая прямая имеет два параметра, и в ее уравнение подставить координаты  $X, Y$  всех  $n$  точек связи, то получится  $n$  уравнений первой степени с  $A$  и  $B$  в качестве неизвестных. Все уравнения разбивают на две, примерно, равные по числу уравнений группы. Затем уравнения каждой группы складывают и сумму делят на число уравнений данной группы, получая таким путем для  $A$  и  $B$  два осредненные уравнения первой степени. Из этих уравнений определяют  $A$  и  $B$  и затем так же, как и в графическом способе, параметры  $a$  и  $b$ .

При кривой с тремя параметрами имеются три неизвестные, и потому все уравнения необходимо разбивать на три группы.

**Способ наименьших квадратов.** Даны  $n$  точек  $x_1, y_1, x_2, y_2, \dots, x_n, y_n$  эмпирической кривой, ординаты которой  $y_i$  заключают в себе некоторые ошибки.<sup>1</sup> Если наметить приближенную функциональную зависимость

$$y = f(x, a, b, c, \dots), \quad (134)$$

то соответственная приближенная кривая будет наилучшим образом отвечать данной эмпирической кривой в том случае, когда параметры  $a, b, c, \dots$  приближенной функции определены при условии, что сумма квадратов расхождений  $y - y_i$ , именно  $\sum (y - y_i)^2$ , станет минимумом. Поэтому справедливо:

$$\frac{\partial \sum (y - y_i)^2}{\partial a} = 0, \quad \frac{\partial \sum (y - y_i)^2}{\partial b} = 0, \quad \frac{\partial \sum (y - y_i)^2}{\partial c} = 0. \quad (135)$$

<sup>1</sup> C. Runge und H. König, Vorlesungen über numerisches Rechnen. Berlin 1924.



Подставляя  $y$  из уравнения (134) в уравнения (135) и произведя дифференцирование, получают нужное число уравнений для определения искомых параметров. Чаще всего уравнение (134) построено таким образом, что в отношении параметров  $a, b, c$  оно является линейным и в отношении  $x$  рациональным, следовательно, имеет вид:

$$y = a + bx + cx^2 + dx^3. \quad (136)$$

Служащие для определения параметров уравнения образуют тогда систему уравнений, так называемые нормальные уравнения.

Для применимости способа необходимо, чтобы число известных точек эмпирической кривой было больше числа параметров в уравнении (134).

В том, довольно часто встречающемся случае, когда приближенная кривая является прямой

$$y = a + bx, \quad (137)$$

нормальные уравнения принимают вид:

$$\left. \begin{aligned} an + b\Sigma x_i &= \Sigma y_i \\ a\Sigma x_i + b\Sigma x_i^2 &= \Sigma x_i y_i \end{aligned} \right\} \quad (138)$$

Эти уравнения поддаются легкому решению.

Если уравнение (134) приближенной функции не является линейным по отношению к параметрам  $a, b, c, \dots$ , то задача оказывается разрешимой только в том случае, когда удастся подобрать для параметров приближенные значения  $a_0, b_0, c_0, \dots$ . Тогда разлагают уравнение (134) в ряд Тэйлора:

$$y = f(a, b, c, \dots) = f(x, a_0, b_0, c_0, \dots) + \left(\frac{\partial f}{\partial a}\right)_0 \delta a + \left(\frac{\partial f}{\partial b}\right)_0 \delta b + \left(\frac{\partial f}{\partial c}\right)_0 \delta c + \dots, \quad (139)$$

обрывают его на линейных членах и рассматривают  $\delta a, \delta b, \delta c, \dots$  как новые параметры, которые вычисляются согласно указанному выше.

Если приближенная функция не линейна в отношении параметров или содержит слишком много параметров, то иногда проще сначала выравнять известную эмпирическую кривую по одному из только что указанных способов, после чего может быть применена система простых уравнений (137) и (138).

**Способ моментов.** <sup>1</sup> Параметры приближенной функции (134) могут быть получены также следующим образом: вычисляются как для приближенной, так и для эмпирической кривой 0-й, 1-й, 2-й, . . . моменты ординат относительно оси  $y$ -ов и соответственные моменты приравниваются друг другу:

$$\left. \begin{aligned} \Sigma f(x_i, a, b, c, \dots) &= \Sigma y_i \\ \Sigma x_i f(x_i, a, b, c, \dots) &= \Sigma x_i y_i \\ \Sigma x_i^2 f(x_i, a, b, c, \dots) &= \Sigma x_i^2 y_i \end{aligned} \right\} \quad (140)$$

При этом следует брать столько моментов, сколько имеется параметров. При более точных вычислениях надлежит брать моменты не по ординатам, а по площадям. В этом случае в левой части уравнений (140) будут находиться соответственные определенные интегралы, подлежащие аналитическому решению, а в правой части расположатся суммы, подсчитываемые по одному из способов графического интегрирования или по закону трапеций и по правилу Симпсона. Если приближенная функция выбирается в виде кривой с уравнением (136), то настоящий способ приводит к совершенно тем же результатам, что и способ наименьших квадратов. Если принятая приближенная функция не линейна в отношении параметров, то следует поступать так же, как при способе наименьших квадратов.

<sup>1</sup> H. L. R i t z und F. B a u r. Handbuch der mathematischen Statistik. Leipzig 1930.

#### 4. Сглаживание неправильных линий и анализ сглаживания

При графическом изображении гидрологических, а также метеорологических зависимостей обычным является более или менее неправильная форма полигона, связывающего отдельные точки. Так как, однако, большинство гидрологических и метеорологических явлений имеют во времени постоянный характер изменений, то для дальнейших исследований является целесообразным выравнять их ординаты таким образом, чтобы исчезли неравномерные колебания линии полигона, происшедшие из-за ошибок в наблюдениях.

Обычно исключают эти непостоянного характера изменения тем путем, что, руководствуясь известным чувством меры, вписывают в данный полигон сглаживающую плавную линию. Поскольку, однако, такое выравнивание иногда приводит к известному произволу, лучше производить исключения неправильностей по частям при помощи простых формул. Такой способ называют сглаживанием эмпирической кривой.<sup>1</sup>

Сглаживание отличается от рассмотренного выше подбора кривой. Первое служит только для получения плавной и закономерно изменяющейся линии, тогда как посредством подбора кривой такого рода сглаженная линия приводится к аналитическому виду.

В дальнейшем предполагается, что ординаты  $y_0, y_1 \dots y_n$  эмпирической линии располагаются на равных расстояниях  $\Delta z = x_1 - x_0 = x_2 - x_1 \dots$  друг от друга. При сглаживании простейшего вида пользуются способом линейного приближения, заменяя каждую ординату  $y_n$  средним значением из  $y_n$  и обеих соседних ординат  $y_{n-1}$  и  $y_{n+1}$ , а именно

$$\frac{1}{3}(y_{n-1} + y_n + y_{n+1}). \quad (141)$$

Среднее, образованное из значений пяти соседних ординат:

$$\frac{1}{5}(y_{n-2} + y_{n-1} + y_n + y_{n+1} + y_{n+2}) \quad (142)$$

очень употребительно в метеорологии и носит там название среднего пентадного. При сильной неравномерности ступенчатой линии довольно часто применяется следующее среднее:

$$\frac{1}{4}(y_{n-1} + 2y_n + y_{n+1}). \quad (143)$$

Сглаживание удается усилить неоднократным применением указанных формул.

Если ординаты даны с большими интервалами, то при применении линейных формул, особенно уравнения (142), возникает опасность, что линия может быть искажена в отношении ее основных колебаний и притом тем более, чем чаще повторяется сглаживание. В этом случае сглаживание необходимо вести при помощи приближенной функции, которая учитывает пять соседних ординат и дает для  $y_n$  осредненное значение следующего вида:

$$\frac{1}{35}(-3y_{n-2} + 12y_{n-1} + 17y_n + 12y_{n+1} - 3y_{n+2}). \quad (144)$$

Эта функция в меньшей степени нарушает основные колебания сглаживаемой функции и благодаря этому устраняет разброс точек сильнее, чем приведенные выше упрощенные формулы. Последнее еще в большей степени относится, правда, к гораздо более пространственным формулам Вулхауза (Woolhouse), Хайгама (Higham) и Спенсера (Spenser), которые охватывают собою соответственно 15, 17 и 21 ординату. Многочленные формулы,

<sup>1</sup> C. Runge und H. König. Vorlesungen über numerisches Rechnen. Berlin 1924.

помимо больших вычислений, страдают еще тем недостатком, что не дают значения для первых и последних  $v-1/2$  ординат (если  $v$  — число входящих в формулу ординат).

Неоднократно и последовательно проведенное сглаживание линии, изображающей колебания какого-либо явления, называют анализом сглаживания.<sup>1</sup> Если применить этого рода анализ к линии колебания уровня воды, то во многих случаях оказывается возможным, путем неоднократного планомерного сглаживания неравномерностей, добиться разложения линии графика на отдельные периодические колебания. Обязательными предпосыл-

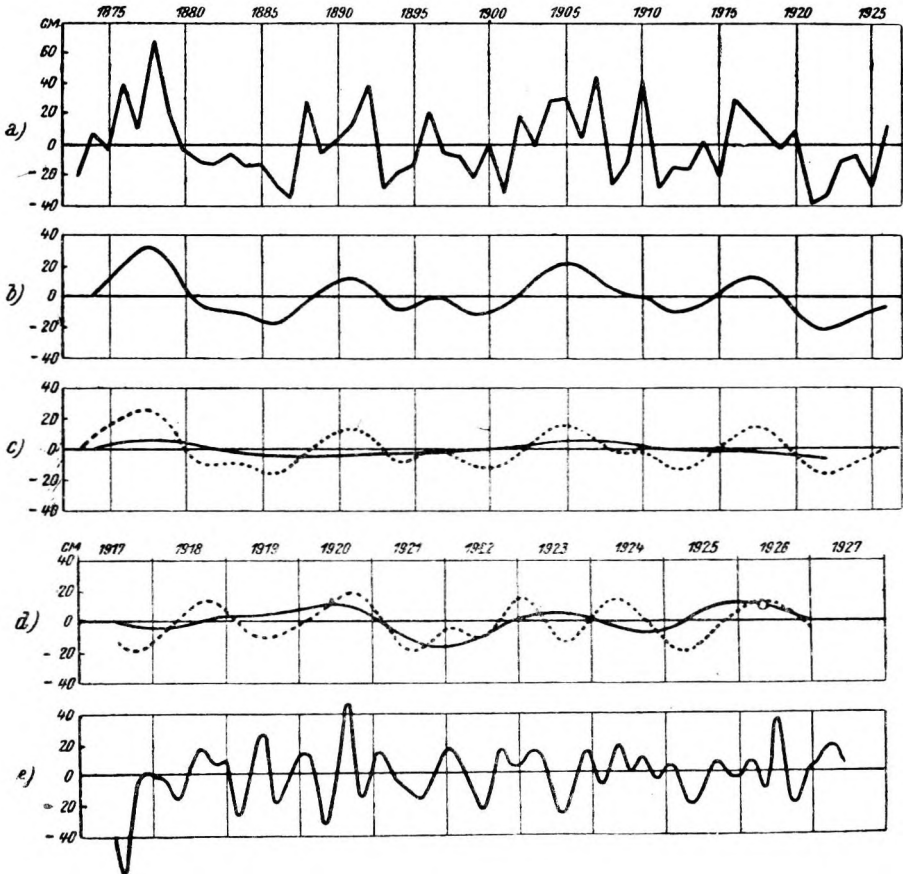


Рис. 237. Анализ сглаживания хронологического графика средних уровней воды р. Мур у Фронлейтена.

a) график средних годовых уровней; б) результат первого сглаживания; в) разложение на 13- и 29-летние периоды колебаний; д) разложение на 3-летний (сплошная линия) и 2-летний (пунктир) периоды колебаний; е) результат после выделения 2- и 3-летнего периодов колебаний и дальнейшего сглаживания.

ками для такого анализа являются устойчивость русла в данном поперечном сечении и наличие для него длинного ряда водомерных наблюдений.

Этим условиям отвечает, например, р. Мур в Штирии в профиле водомерного поста у Фронлейтена.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Вернее это назвать графическим анализом периодичности колебания. (Прим. пер.).

<sup>2</sup> W. v. Kesslitz. Über verschiedene Methoden zur Vorausberechnung von Monatsmittelwerten der Wasserführung österreichischer Alpenflüsse. Die Wasserwirtschaft, № 7, 8 u. 9, Wien 1928. В указанной статье автор применяет на примере р. Мур анализ графика уровня воды одной североамериканской реки, изложенный в работе: Streiff. On the investigation of cycles and the relation of the Bruckner- and solar cycles.

Рис. 237, *a*, изображает ход средних годовых уровней воды за период 1873—1925 гг. После сглаживания при помощи формулы  $\frac{1}{4}(y_{n-1} + 2y_n + y_{n+1})$  получаются колебания периодического характера, в которых, повидимому, отражены климатический период Брюкнера и период солнечных пятен (рис. 237, *b*). Дальнейшим сглаживанием удалось выделить 13-летний период, который, по всей вероятности, объясняется действием солнечных пятен, и тем самым осуществить разделение колебаний на 13-летние и 29-летние периоды (рис. 237, *c*).

После освобождения линии колебания уровня от 13-летнего и 29-летнего периодов и от среднего 52-годового хода уровня—остается линия прочих колебаний (Störungsganglinie). Для ее анализа применены вместо средних годовых средние месячные значения уровня.

После нового неоднократно повторяемого сглаживания удалось разложить эту линию на две относительно плавные волнистые линии, из которых первая служит выражением трехлетнего и вторая двухлетнего периода колебаний (рис. 237, *d*). Выделение этих последних линий и последовавшее затем двукратное сглаживание дали, в конце концов, линию незакономерного характера (рис. 237, *e*), дальнейшее разложение которой, вследствие незакономерности ее колебания, представляется безнадежным делом.

## 5. Гармонический анализ и анализ периодограмм

Гидрологические и метеорологические ряды наблюдений и соответственные графики колебаний подвергаются неоднократно анализу для установления в них наличия и размеров периодических колебаний. Изложенный выше способ сглаживания позволяет проводить эти исследования простейшим образом в тех случаях, когда участие колебаний периодического характера в общих колебаниях является значительным. Если природа связей явлений носит очень сложный, запутанный характер, применяются способы Фурье и Шустера.

Гармонический анализ<sup>1</sup> при помощи рядов Фурье применяется тогда, когда статистический хронологический ряд является строго периодической функцией и период  $p$  известен. Подлежащая анализу функция  $f(x)$  может быть в этом случае выражена через ряд Фурье:

$$g(x) = \frac{a_0}{2} = \sum_{n=1}^n (a_n \cos n \frac{2\pi}{p} x + b_n \sin n \frac{2\pi}{p} x), \quad (145)$$

коэффициенты которого получаются из выражений:

$$\left. \begin{aligned} \frac{a_0}{2} &= \frac{1}{p} \int_0^p f(x) dx \\ a_n &= \frac{2}{p} \int_0^p f(x) \cos n \frac{2\pi}{p} x dx \\ b_n &= \frac{2}{p} \int_0^p f(x) \sin n \frac{2\pi}{p} x dx. \end{aligned} \right\} \quad (146)$$

<sup>1</sup> K. Stumpf. Analyse periodischer Vorgänge. Sammlung geophysikalischer Schriften. Berlin 1927; P. Terebesi. Aufsuchen versteckter Periodizitäten. Zeitschrift für Geophysik. H. 6-8, 1933.

Их можно определять вычислением или при помощи гармонического анализатора. Последний способ предпочтительнее, так как вычисления при нем отпадают. В качестве примера гармонического анализатора на рис. 238 изображен анализатор типа Мадер—Отта (Mader—Ott).

На доске (12) расположен планиметр (14), рядом линейка (10) с тележкой (1). Тележка может катиться по колее в линейке и приводится в движение подвижным плечом (6), снабженным подвижным пером (7) и рукояткой (8). Плечо соединено под прямым углом с рычагом (6), который передвигает помещающийся на тележке скользящий движок (2) и зубчатую рейку (3), задевающую зубчатое колесо (5). Последнее снабжено двумя маленькими углублениями  $c$  и  $s$  для подвижного острия планиметра, которое вставляют в то или другое из них в зависимости от того,

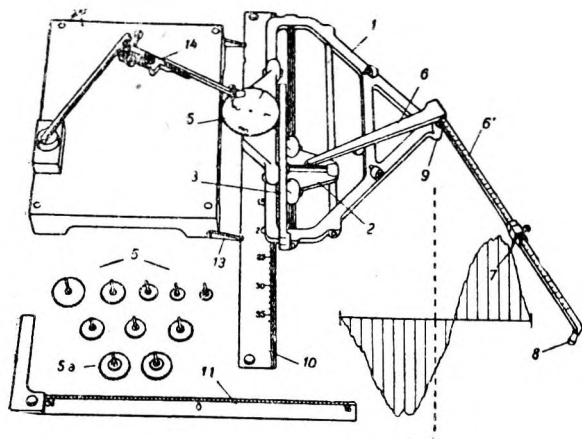


Рис. 238. Гармонический анализатор системы Мадер—Отта.

нусоидальное или синусоидальное колебания кривой. Для различных колебаний имеются разной величины зубчатые колеса (5) и (5a). Угольник (11) облегчает установку прибора относительно анализируемой кривой. Площадь, замкнутая анализируемой кривой и осью абсцисс, обводится подвижным пером (7), и по барабану планиметра непосредственно отсчитывается искомая амплитуда анализируемого колебания.

Анализ периодограмм Шустера применим также и для более часто встречающихся в гидрологии случаев с неизвестной величиной пе-

риода. В метеорологии по этой причине он нашел себе применение уже давно. Его применение заключается в следующем.

Если волнистая линия представляет синусоиду и известны ординаты большого числа точек, расположенных на равных друг от друга расстояниях, и  $n$  этих известных значений приходится на длину одной полной волны (периода), то сумма этих  $n$  ординат будет равняться нулю. Однако с повышением всех ординат на величину  $a$  для всех точек частное от деления суммы  $n$  членов на  $n$  составит это число  $a$ . Путем последовательного осреднения данных  $n$  значений из числового ряда исчезает, таким образом, заключавшаяся в нем ранее синусоидальная периодичность с длиной периода, соответствующего  $n$  точкам. Этот способ оказывается применимым также к сложным волнообразным линиям, происходящим от накладывания друг на друга нескольких волн с различной длиной. Если даны ординаты этих волн в точках, расположенных на равных расстояниях по абсциссе, и известна более или менее точно длина наименьшей заключенной в числовом ряду волны, определяемая  $n$  точками, то путем образования сумм по  $n$  членов эта волна совершенно исключается из числового ряда. В ряду, полученном из деленных на  $n$  сумм по  $n$  членов, останутся только прочие более длинные волны. Если теперь в оставшемся числовом ряду удастся найти указание на длину следующей по величине волны, последняя может быть исключена из ряда таким же способом. Способ применяется до полного исчезновения волнистой линии. Если длина какой-либо из волн, заключенных в данной линии, известна лишь приближенно, то осреднением по ее длине удастся достичь только частичного ее исчезновения. Это становится сразу же ясным из полу-

чаемых сумм, а именно или из скачкообразных изменений их значений или по тому, что, несмотря на суммирование, частично сохраняются экстремные значения первой волны. В этом случае следует исправить длину волны и повторить расчет.

Чтобы получить в чистом виде волну, по длине соответствующую  $n$  точкам, отложенную от идеальной нулевой линии, необходимо лишь вычесть из первоначального числового ряда ряд, полученный путем деления на  $n$  сумм первоначального ряда. При повторении этого приема, в конце концов, все волны выразятся в виде некоторых отклонений от идеальной нулевой линии.

Применение указанного способа по выделению отдельных волн из незакономерной волнистой линии связано с условием, чтобы амплитуда отдельных волн осталась равна постоянной. Сильные изменения амплитуды отдельных волн препятствуют правильному осреднению. Постоянные и не слишком большие изменения амплитуды не особенно сказываются на средних, так что данный способ допустим и в этих случаях. Анализ периодограмм по Шустеру непригоден—это следует подчеркнуть—для коротких статистических рядов; он требует статистических рядов, охватывающих длинные периоды наблюдений.

В качестве примера анализа периодограмм ниже приведено исследование колебаний осадков в Европе. Для составления суточных сумм осадков взято 92 станции.<sup>1</sup>

За отрезок времени выбран календарный 1909 г. На рис. 239, в виде примера, нанесены истинные значения суммарных количеств осадков за время с 26 мая по 19 июля. При этом получается впечатление, как будто бы осадки проходили в пределах данной области их выпадения волнами. Они периодически нарастают, примерно, через равные отрезки времени, продолжительностью, кругло, в шесть дней. Однако максимумы этих волн не одинаковы по высоте, что заставляет предполагать, что (наряду с этими шестидневными колебаниями) существуют еще другие колебания осадков с более длительным периодом. Чтобы их отыскать, надо сначала освободить наблюдаемые значения, помещенные в табл. 15, от колебаний с периодом примерно в шесть дней. Это достигнуто путем осреднения по указанному выше способу, причем в данном случае вычислялись средние семидневные значения, приведенные в табл. 16. В них, действительно, уже не найти следов коротких колебаний. Эти последние, в виде отклонений от идеальной нулевой линии, получаются путем вычитания значений табл. 16 из соответственных значений табл. 15. Они содержатся в табл. 17.

Периоды колебаний отмечены выделением максимумов. Периоды колеблются в пределах от 5 до 7 дней, и их среднее значение составляет 5,7 дня. При продолжении подобного рода анализа, в конце концов, приходим к заключению, что в Европе осадки подчиняются нескольким периодам колебаний (в годовом разрезе) с продолжительностью в 5,7, 13,0 и 24,5 дней.

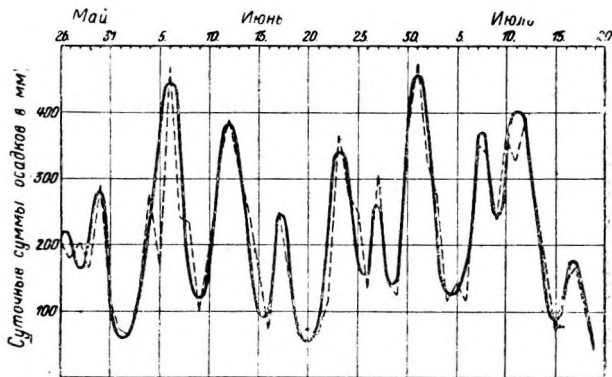


Рис. 239. Ход суточных сумм осадков по 92 дождемерным станциям Европы.

<sup>1</sup> Так как речь идет только об исследовании общего характера, суточная сумма осадков, измеренных на 92 станциях, может считаться мерой среднего модуля осадков.

Суммы суточных осадков по 92 станциям Европы за 1909 г.

Число ме- сяца	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
1	96	150	207	105	244	73	477	109	272	285	208	171
2	81	164	441	95	222	65	327	72	360	267	164	415
3	27	149	272	117	261	134	277	370	350	371	181	364
4	65	395	175	229	259	272	113	252	156	284	290	239
5	49	192	241	54	296	177	144	194	225	238	412	201
6	11	170	219	26	285	459	114	169	498	281	203	333
7	24	110	304	55	87	244	356	131	365	384	169	294
8	119	219	232	18	52	233	335	72	139	215	79	167
9	286	81	235	40	45	102	234	110	107	250	88	261
10	237	76	109	81	182	191	363	138	125	253	121	276
11	203	150	143	60	241	336	326	149	291	122	164	279
12	116	256	147	37	54	390	389	205	105	97	306	279
13	141	211	209	247	76	305	302	141	386	50	356	149
14	227	86	134	309	202	248	177	135	271	112	149	83
15	169	81	159	231	118	162	69	106	129	163	147	70
16	199	123	180	101	94	69	148	92	74	88	404	60
17	203	138	186	75	76	249	171	187	106	162	436	113
18	205	132	135	49	142	158	123	172	160	90	401	109
19	125	45	179	130	88	64	43	244	348	134	249	247
20	59	50	119	170	22	76	106	111	204	86	190	301
21	77	61	176	176	44	67	224	167	106	174	142	316
22	72	61	102	94	51	118	74	222	53	126	212	349
23	21	76	110	51	53	366	87	367	156	123	185	222
24	22	44	190	90	17	274	122	236	149	189	181	197
25	34	35	197	92	117	243	197	279	193	187	180	214
26	36	101	223	162	206	132	180	166	189	363	134	210
27	50	127	256	151	181	306	290	235	256	305	105	141
28	59	268	137	191	206	141	119	340	324	234	98	231
29	22	—	128	253	164	122	271	247	221	328	204	245
30	42	—	161	129	288	325	65	196	260	216	167	317
31	136	—	211	—	116	—	208	201	—	207	—	152

Таблица 16

Средние семидневные значения сумм суточных осадков

Число ме- сяца	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
1	—	171	227	149	223	159	255	192	255	287	228	237
2	—	175	247	139	238	161	255	181	252	271	240	252
3	—	191	260	119	242	185	254	195	295	284	238	256
4	50	190	265	97	236	203	258	185	318	302	232	274
5	54	200	269	85	209	226	238	180	299	292	214	273
6	83	188	240	77	183	232	225	185	263	289	203	251
7	113	178	216	72	172	240	240	152	231	272	195	239
8	133	143	212	48	170	249	267	137	250	249	177	245
9	144	152	198	45	135	279	302	139	233	229	161	255
10	161	158	197	77	105	257	329	135	217	197	183	243
11	190	154	173	113	122	257	304	136	203	157	180	214
12	197	133	162	144	131	248	266	141	202	150	190	200
13	185	140	155	152	138	243	253	138	197	126	235	172
14	180	149	164	152	121	251	226	145	195	113	280	149
15	180	147	163	150	109	225	197	148	176	123	313	124
16	181	117	169	163	113	179	148	154	211	128	306	120

Число ме- сяца	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
17	169	93	157	152	106	146	119	150	184	134	282	142
18	148	90	162	133	83	120	126	154	161	142	281	175
19	134	86	154	113	74	114	127	171	150	137	290	215
20	109	80	144	106	68	156	118	210	163	142	259	238
21	83	67	145	109	60	160	111	217	167	146	223	250
22	59	53	153	115	56	172	122	232	172	145	191	265
23	46	61	160	118	73	180	141	221	149	178	175	260
24	45	72	179	117	96	215	168	239	156	210	163	237
25	42	102	174	119	119	226	153	264	187	218	156	223
26	35	123	177	142	185	226	181	267	211	248	155	209
27	38	175	185	153	168	220	178	243	227	260	153	222
28	54	207	188	175	183	250	190	238	247	263	151	216
29	71	—	174	193	176	261	177	237	257	269	185	199
30	89	—	156	208	156	282	162	264	283	235	218	179
31	103	—	136	—	150	—	173	281	—	220	—	186

Таблица 17

## Шестидневные периоды суточных сумм осадков

Число ме- сяца	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
1	—	—21	20	—44	21	—86	222	—83	17	—2	—20	—66
2	—	—11	194	44	—16	—96	72	—109	108	—4	—76	163
3	—	—45	12	—2	19	—51	23	185	55	87	—57	108
4	15	205	10	132	23	69	—145	67	—162	—18	58	—35
5	—5	—8	—28	—31	87	—49	—94	14	—74	—54	198	—72
6	—72	—18	—21	—51	102	227	—111	—16	235	—8	0	—18
7	—109	—68	88	—17	—85	4	116	—21	134	112	—26	55
8	—14	76	20	—30	—118	—16	68	—65	—111	—34	98	—78
9	142	—71	37	—5	—70	—117	—68	—29	—126	—21	—73	6
10	76	—82	—88	4	77	—66	34	3	—92	56	—62	33
11	13	—4	—30	—53	119	79	22	13	88	—25	—24	65
12	—81	123	—15	—107	—77	142	123	64	—97	—53	116	74
13	—44	71	54	95	—62	62	49	3	189	—76	121	—23
14	47	—63	—30	157	81	—3	—49	—10	76	—1	—131	—66
15	—11	—66	4	81	9	—63	—128	—42	—47	40	—166	—54
16	17	6	—11	—62	—19	—110	0	—62	—137	—40	98	—60
17	34	45	29	—77	—30	100	52	37	—78	—28	154	—29
18	57	42	—27	—84	—59	38	—3	18	—1	58	120	—66
19	—9	—41	25	17	14	—50	—84	73	198	—3	—41	32
20	—50	—30	25	64	—46	—80	—12	—99	41	—56	—69	63
21	—6	—6	31	67	—16	—93	113	—50	—61	28	—81	66
22	13	—8	—51	—21	—5	—54	—48	—10	—119	19	—21	84
23	—25	15	—50	—67	—20	—186	—54	146	7	—55	10	—38
24	—23	—28	11	—27	—79	59	—46	—3	—13	—21	18	—40
25	—8	—67	23	—27	—2	17	34	—15	6	—21	24	—9
26	1	—22	46	—20	71	—94	—1	—101	—22	115	—21	1
27	12	—48	71	—3	13	86	112	—8	29	45	—48	—81
28	5	61	—51	16	23	—109	—71	102	77	—29	—53	15
29	—49	—	—46	60	—12	—139	94	10	—46	59	19	46
30	—47	—	5	—79	132	43	—97	—68	—23	—19	—51	138
31	33	—	75	—	—34	—	35	—80	—	—13	—	—34



До сих пор способы математической статистики развивались в общей аналитической форме. Теперь их следует приспособить к специальным целям, преследуемым гидрологией, причем понятия математической статистики должны быть переведены на язык гидрологии. Графические изображения, употреблявшиеся в предыдущем параграфе только в целях лучшего уяснения результатов аналитических расчетов, в дальнейшем сами станут основой, так как они отвечают практическим запросам гидролога гораздо больше, чем чисто аналитические построения. При дальнейшем изложении численные выражения отступят на задний план и найдут себе применение только в подготовительных работах, например в составлении первоначальных таблиц значений переменных и в расположении их по статистическим рядам, а также при сопоставлении результатов исследований.

Задачи графической статистики, поскольку дело касается обслуживания ею гидрологии, могут быть разбиты на следующие разделы: графически-статистическая обработка ряда наблюдений, установление связей между гидрологическими явлениями и графическое изображение уже известных зависимостей.

### 1. Графически-статистическая обработка ряда наблюдаемых значений

Эта обработка исходит, так же как и аналитически-статистическая обработка, из статистических рядов чисел, полученных на основе данных наблюдений природных явлений. Первоначальная таблица значений совокупности здесь заменяется графическим изображением измеренных величин изучаемого гидрологического, метеорологического или морфологического элемента.

В гидрологии, так же как и в метеорологии, преобладают хронологические ряды, ряды, которые характеризуют ход изменения наблюдаемого элемента во времени. Графически они изображаются или в виде хронологических графиков  $x=f(t)$  или в виде хронограмм  $x=f(y, t)$ , в зависимости от того, происходит ли изменение наблюдаемого элемента  $x$  в момент времени  $t$  в одном определенном пункте или в различных пунктах, расположенных на известных расстояниях друг от друга.

**Хронологический график.** Хронологический график представляет или непрерывную кривую линию, получаемую, например, в самопишущих приборах, или полигональную прерывную линию в тех случаях, когда он составляется по отдельным наблюдениям.

При выводе средних для данных наблюдений за определенные отрезки времени, то есть при образовании своего рода хронологических средних и нанесении осредненного хода явления на чертеж, получается ступенчатый хронологический график средних значений. Если вывод средних значений производится из данных наблюдений для одного и того же момента времени или за один и тот же календарный отрезок времени многолетнего ряда наблюдений, то получают календарные средние значения. При выводе средних за период продолжительностью, по меньшей мере, в 25 лет они получают название нормальных величин. Наконец, средние значения наблюдаемых однородных элементов могут выводиться не только для отдельных пунктов, но и для целых площадей, например для речного бассейна. В этих случаях получают пространственные или территориальные средние величины и соответственные хронологические графики.

Несмотря на многообразие форм хронологических графиков гидрологических и морфологических элементов, они обнаруживают известные общие, характеризующие их свойства, и дают при анализе их данные, имеющие ценность для практического приложения. Ниже приводятся примеры важнейших хронологических графиков с кратким их пояснением.

Хронологический график осадков  $h_N=f(t)$  изображается, вследствие прерывного характера выпадения осадков, в виде ступенчатого графика. Изображение хода суточных величин осадков менее удобно, чем месячных или годовых. В табл. 18 и 19 приведены данные об осадках по дождемерной станции Вена-Хохе-Варте.

Таблица 18

Суточные осадки по станции Вена-Хохе-Варте за 1910 метеорологический год

Число месяца	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	I
1	2,3	—	—	3,8	—	—	0,2	21,9	—	1,1	2,5	—
2	2	—	—	53,4	—	—	—	19,7	—	1,2	2,2	0,2
3	0,1	—	0,1	28	—	10,3	0,6	5,7	3,6	0,2	1,6	1,1
4	13,6	—	—	27,2	—	3,9	0,3	0,1	5	—	0,2	10,7
5	9,9	—	—	7,3	0,8	—	4,3	0,2	10,9	11,1	0,1	6,6
6	0,1	—	—	—	1	5,1	8,2	11,7	—	6,8	—	—
7	4,8	—	1,1	4	2,4	0,1	0,9	0,7	—	0,1	—	0,2
8	1,7	—	—	14,9	—	2,2	—	2	—	0,6	—	—
9	10,8	—	0,5	1,3	—	0,5	—	0,2	—	7,7	—	—
10	—	—	0,2	1,8	7	2,2	5,2	26,4	—	6,4	—	1,5
11	—	—	—	4,6	0,2	2,2	3,1	13,1	—	0,7	—	0,2
12	—	—	—	10,1	1,8	—	—	1,4	—	—	—	—
13	0,2	—	—	3,3	43,4	0,1	1	—	—	—	—	0,2
14	—	—	—	0,1	0,1	0,7	—	—	—	1	—	—
15	—	—	1,9	—	—	7,5	—	—	—	18,2	—	—
16	—	—	—	—	—	—	31,7	—	—	0,6	0,2	—
17	—	0,6	6	—	8,7	—	—	—	—	—	—	—
18	—	—	7,9	—	2,9	7,1	—	—	0,1	17,9	3,9	0,7
19	—	6	4,1	—	1	0,4	—	—	—	—	3,8	—
20	—	0,4	3,8	—	—	—	1,1	3,7	0,2	—	17,6	—
21	—	—	4,8	—	—	—	0,1	8,8	0,1	0,6	—	—
22	—	—	2,3	—	—	—	5	4,5	—	1,3	—	—
23	—	3,5	4,2	0,5	2,9	9,3	1,3	0,5	—	9	—	—
24	—	—	—	—	1,1	12,2	—	—	—	—	—	—
25	—	—	—	—	4,2	—	0,6	—	—	—	0,8	1,5
26	—	0,2	—	—	5,6	20,5	—	—	0,1	10,2	—	1,3
27	1,7	—	—	—	0,2	—	0,1	—	0,1	—	2	—
28	—	1,4	—	0,6	1,9	—	—	—	—	1,4	1,5	0,8
29	—	8	—	0,2	5,4	—	—	—	1	0,1	—	—
30	—	19,7	11,5	—	6	—	13,6	—	2,1	1,5	—	0,5
31	—	—	—	—	—	—	27,3	—	0,1	—	—	—
	47	39	48	151	97	84	105	121	23	98	39	26

Используя табл. 18, которая содержит суточные величины осадков за 1910 г. и, следовательно, представляет собою с точки зрения статистики первоначальную таблицу значений переменной, получен ступенчатый хронологический график, изображенный на рис. 240, а. Рис. 240, с, представляет хронологический график годовых количеств осадков за метеорологические годы с 1901 по 1925, составленный на основе данных табл. 19. Из него видно, что в самый сырой 1910 г. количество осадков составило 888 мм, в самый сухой 1908 г.—477 мм и „нормальное" годовое количество за период 1901—1925 гг.—704 мм. Таким образом 1910 метеорологический год на 26,2% выше нормального, а 1908 метеорологический год на 32,3% ниже

Месячные и годовые осадки по станции Вена-Хохе-Варте за 1901 - 1925 метеорологические годы

Годы	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	I	Годовая сумма
1901	31	60	65	18	24	35	42	98	40	36	34	54	537
1902	50	67	25	67	92	103	54	47	39	1	93	42	680
1903	30	37	95	20	87	142	114	72	57	111	57	5	827
1904	54	41	81	40	34	16	55	115	112	53	77	14	692
1905	20	70	77	49	33	80	60	22	50	135	27	16	639
1906	41	71	20	55	113	105	39	119	34	59	49	41	746
1907	9	38	100	48	52	165	51	20	50	54	77	30	694
1908	36	21	57	60	43	90	75	31	3	25	14	22	477
1909	70	55	46	112	46	71	71	62	25	24	56	41	679
1910	47	39	48	161	97	84	105	121	23	98	39	26	888
1911	35	51	40	166	79	36	72	53	50	24	64	27	697
1912	50	51	52	120	91	130	51	94	42	33	19	30	763
1913	9	21	36	52	46	155	83	56	27	93	76	19	673
1914	5	46	32	80	58	134	43	78	36	27	46	90	675
1915	30	79	65	41	113	101	83	74	89	49	48	66	838
1916	50	33	127	61	85	165	90	86	27	26	51	86	887
1917	21	45	102	20	8	47	41	13	81	46	65	16	505
1918	34	21	55	24	138	92	128	41	100	39	95	44	811
1919	24	67	68	104	72	92	48	75	53	86	58	77	824
1920	34	17	50	81	105	130	136	43	1	2	116	67	782
1921	90	2	148	47	63	46	32	27	53	37	45	78	668
1922	29	35	24	30	58	34	57	181	146	31	50	53	723
1923	34	69	59	37	69	53	45	50	81	35	85	22	639
1924	33	26	69	85	107	42	49	50	23	15	13	7	519
1925	24	18	61	78	130	89	87	34	35	109	31	27	723

Нормальные месячные осадки

36	43	64	66	74	90	68	67	51	50	55	40	704
----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	-----

нормального. На рис. 240, *b*, для обоих характерных лет даны хронологические графики месячных количеств осадков. Для сравнения на том же чертеже дан: хронологический график нормальных (средних многолетних) месячных количеств осадков для среднего фиктивного года за период 1901 — 1925 гг., откуда видно в какой мере отдельные месяцы 1903 г. и 1910 г. выше или ниже соответственных нормальных.

Хронологические графики уровня  $h_p=f(t)$ , изображенные на рис. 241, имеют вид непрерывных линий. Они приведены для водомерного поста Вена-Рейхсбрюкке на Дунае для самого маловодного 1921 г. и для самого многоводного 1910 г. за период 1901—1925 гг. Для сравнения на том же рисунке изображены средние месячные уровни за оба указанных года.

Изменение календарных средних за нормальный (средний фиктивный) год дает хронологический график нормальных (средних фиктивных) уровней, приведенный на рис. 242. Определенные по отношению к линии этого графика месячные и средние годовые значения приводят в конечном результате к нормальному или среднему годовому многолетнему уровню воды со значением  $\pm 0$  см.

На этом же рисунке изображены и хронологические графики экстремных уровней (или верхняя и нижняя огибающие кривые уровня), а именно наивысших и наиминимумов когда-либо наблюдавшихся за период 1901—1925 гг. (абсолютные годовые максимумы и минимумы уровня). Они позволяют судить, с какими крайними отклонениями уровня приходится считаться в наименеевыгоднейшем случае в тот или иной определенный день года. Из

НИХ также видно, что за период 1901—1925 гг. наивысший уровень был 482 см, а наинизший—214 см; следовательно наибольшая амплитуда колебания уровня составила 696 см.

Хронологический график расходов воды  $Q=f(t)$  получается, связывая хронологический график уровней воды  $h_p=f(t)$  и кривую расходов воды  $Q=f(h_p)$ , причем переменная  $h_p$  исключается графическим путем. Процесс

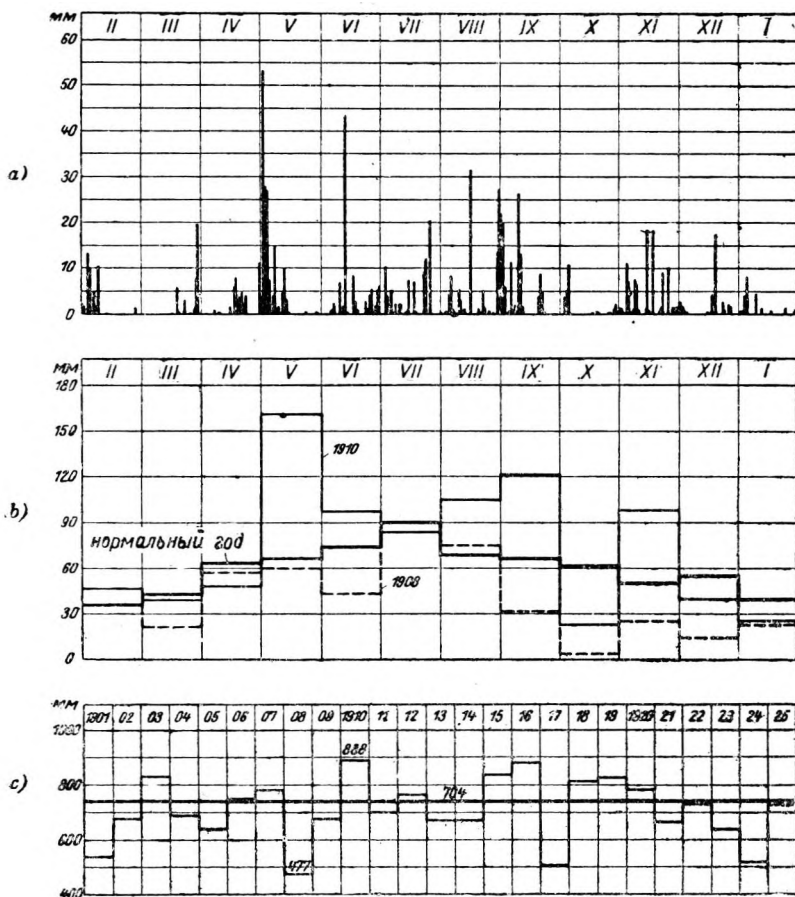


Рис. 240. Хронологические графики высот слоя осадков по метстанции Вена-Хохе-Варте.

a) суточные осадки за год с 1 февраля 1910 г. по 31 января 1911 г.; б) месячные осадки за год с 1 февраля 1908 г. по 31 января 1909 г. и с 1 февраля 1910 г. по 31 января 1911 г.; нормальные (средние) значения месячных осадков за период с 1911 по 1925 г.; в) годовые осадки и их нормальные (средние значения за период с 1901 по 1925 г.

построения графика расходов воды за 1921 г. для водомерного поста и створа на Дунае в Вене у Рейхсбрюкке показан на рис. 243. Линии  $AB$  и  $ACDEB$  исходят из точки  $A$  хронологического графика уровней воды и дают в пересечении точку  $B$  хронологического графика расходов воды.

Хронологический график уровня грунтовых вод вычерчивается обычно в виде ступенчатой линии. Для исследований с целью определения водного баланса грунтовых вод необходимо сравнение уровня грунтовых вод в возможно большем числе пунктов. В виде примера на рис. 244 изображены данные наблюдений над уровнем грунтовых вод в бассейне р. Везера за 1916—1925 гг. Из рисунка видно, насколько существенна разница в коле-

баниях уровня грунтовых вод в отдельных пунктах наблюдений. В то время, как, например, в Штöккендребере наибольшая годовая амплитуда колебания составляет 1,5 м, в Хейлигенберге ее величина—всего несколько сантиметров.

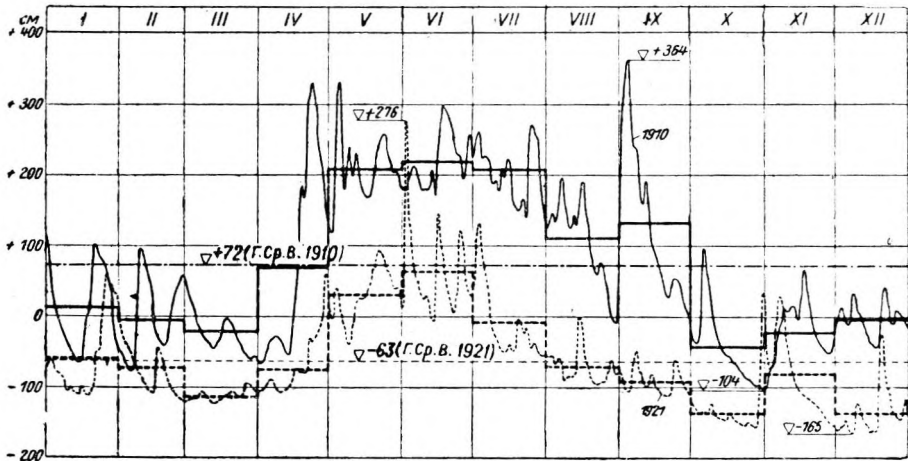


Рис. 241. Графики колебания уровня воды р. Дуная в створе Вена-Рейхсбрюкке за самый многоводный (1910) и маловодный (1921) годы периода 1901—1925 гг.

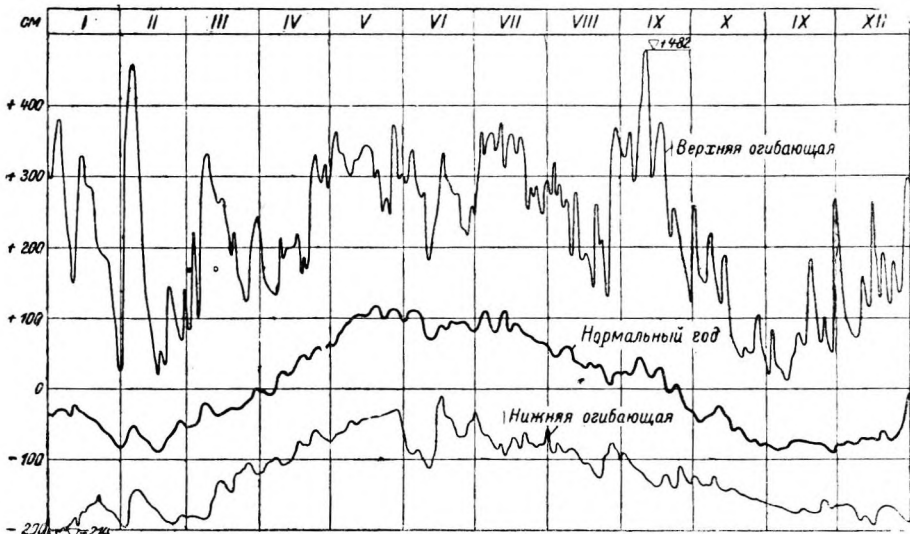


Рис. 242. Годовые графики ежедневных средних и экстремных уровней за период 1901—1925 гг. в створе Вена-Рейхсбрюкке на р. Дунае.

Хронологические графики изменения метеорологических элементов подвергаются ниже лишь самому поверхностному рассмотрению, так как для гидролога имеют значение только выведенные на основе их хронограммы. В целях большей наглядности взаимной зависимости отдельных изучаемых элементов является целесообразным давать ход изменения их в виде совмещенного по времени хронологического графика, как на рис. 245.<sup>1</sup>

Ход изменения морфологических элементов до сих пор мало исследовался, так как затруднения по их определению полностью еще не преодолены. Из этого рода элементов, привлекающих внимание гидролога, оказы-

<sup>1</sup> В данном случае графики получены соединением точек, соответствующих средним пятидневным значениям наблюдаемых величин.



вается возможным дать хронологический график лишь для движения взвешенных наносов и притом с едва допустимой степенью точности. На рис. 246 изображен ход движения взвешенных наносов в створе на Дунае у Линца. Приведенный на том же рисунке, в целях сравнения, график изменения рас-

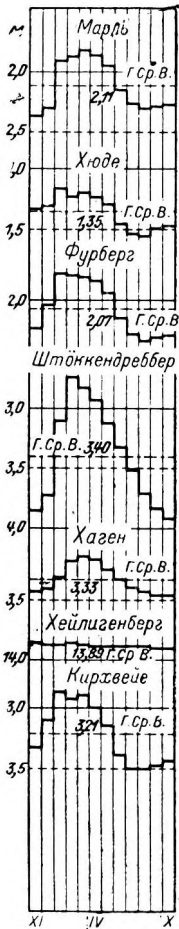


Рис. 244. Средние месячные уровни грунтовых вод за период 1916—1925 гг. в бассейне р. Везера.

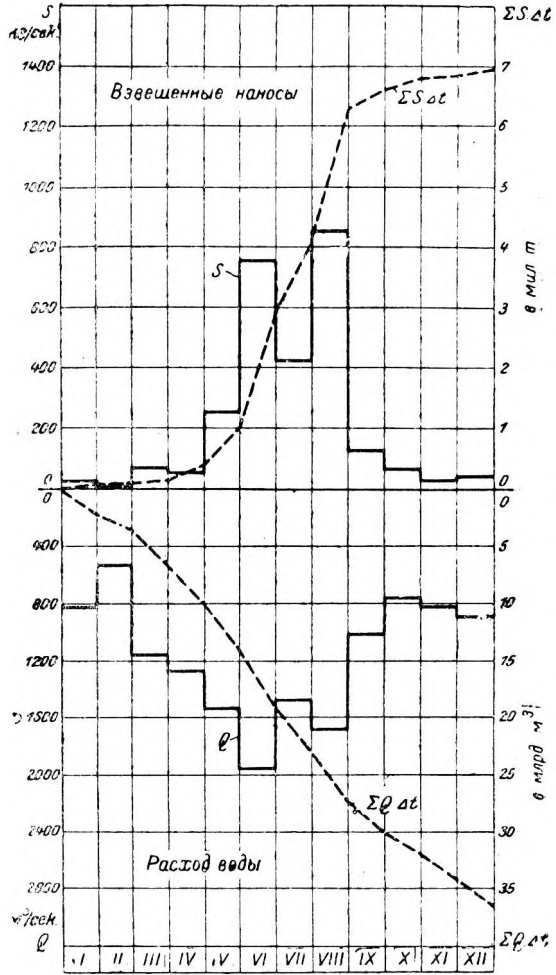


Рис. 246. Режим расходов воды и взвешенных наносов р. Дуная у Линца в 1929 г.

ходов воды указывает лишь на относительную связь между движением взвешенных наносов и расходом воды. Движение взвешенных наносов зависит помимо уровня воды еще от ряда других факторов, как время года, их генезис, частота и характер строения паводков.<sup>1</sup>

**Хронограмма.** Хронограмма может быть представлена в общем виде  $x=f(y,t)$ , если известны хронологические графики изменения элементов  $x$ , наблюдаемых одновременно в различных пунктах. На рис. 247 изображены хронологические графики  $x=f_1(t)$ ,  $x=f_2(t)$  для пунктов  $y_1$ ,  $y_2$ . Соединяя между собою точки  $P_{1,1}$ ,  $P_{2,1}$ , ...,  $P_{n,1}$  и точки  $P_{1,2}$ ,  $P_{2,2}$ , ...,  $P_{n,2}$  и т. д., которые

<sup>1</sup> F. D ü l l . Die Schwebstoffführung des Lech. Die Bautechnik, H. 28, 1933.

по самому построению соответствуют равным величинам  $x_1, x_2...$  получают линии  $x = x_1; x = x_2...$  и вместе с тем хронограмму  $x = f(y, t)$  в изолиниях.<sup>1</sup> Хронограммы дают наглядную характеристику изменения явлений как во

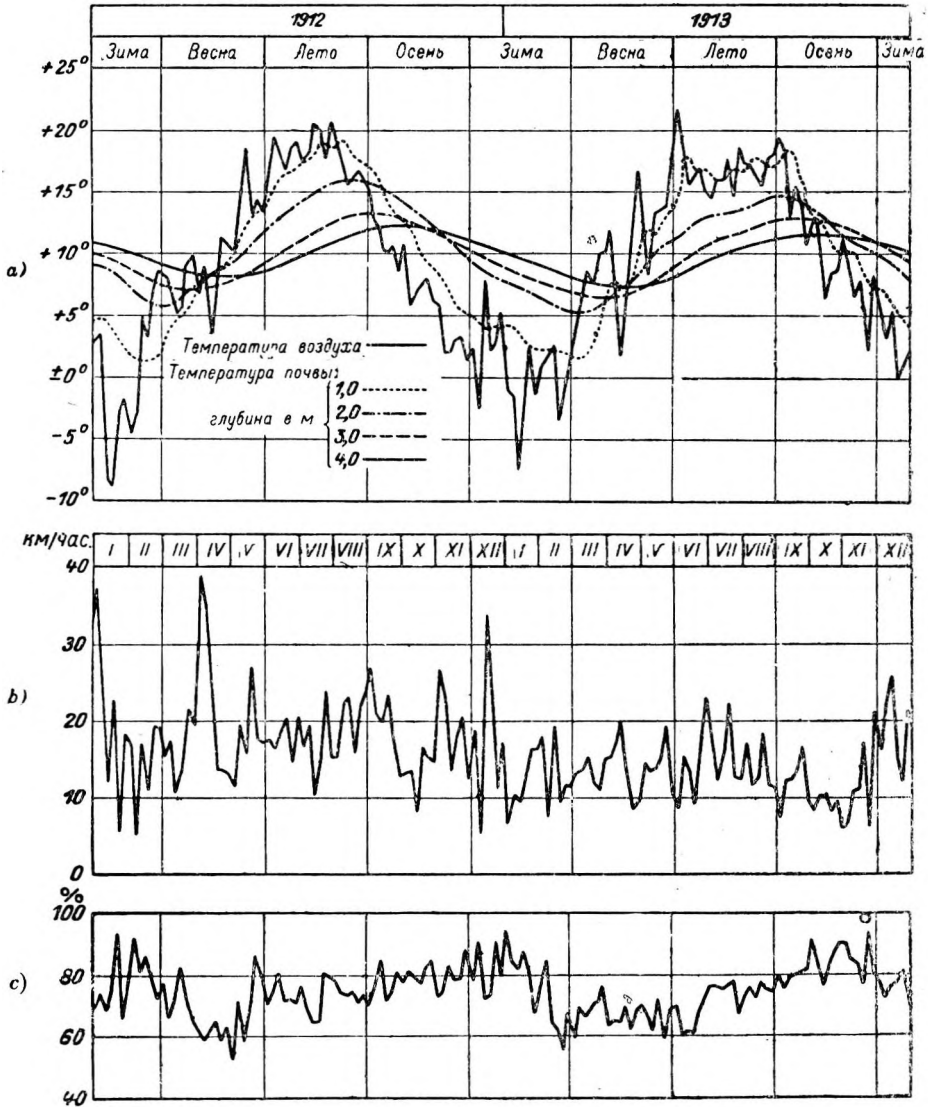


Рис. 245. Метеорологические данные наблюдений по станции Вена-Хохе-Варте за 1912—1913 гг. в средних пятидневных.

а-графики температуры воздуха и почвы; б—графики скорости ветра; с—графики относительной влажности.

времени, так и в пространстве и по этой причине все больше и больше внедряются в гидрологию.

В качестве примера хронограммы, изображающей режим водного потока, на рис. 248 приведена хронограмма расходов воды  $Q=f(x,t)$  для движения волны паводка в сентябре 1890 г. на участке р. Эльбы от Течена до Гам-

<sup>1</sup> Это общее название для линий равных числовых значений. В приложении к отдельным наблюдаемым метеорологическим и гидрологическим факторам они носят следующие названия: для осадков—изогипеты, температуры—изотермы, атмосферного давления—изобары, скорости течения—изотакхи и глубин воды—изобаты.



бурга  $x$  является в ней ординатой, обозначающей место расположения створа по длине реки. На этом графике ясно видно убывание расходов воды с возрастанием длины пробега волны. Действительно, расход воды

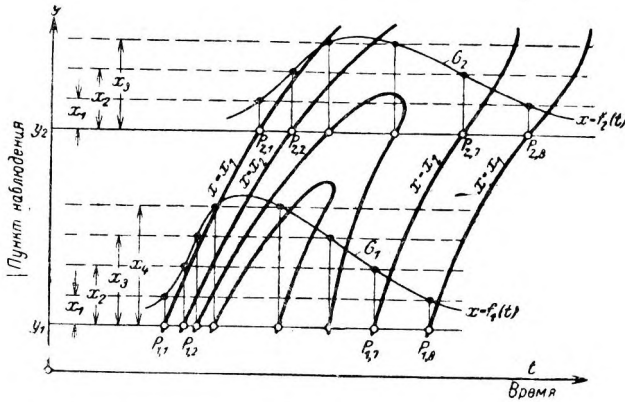


Рис. 247. Построение хронограммы  $x = f(y, t)$ .

в  $4000 \text{ м}^3/\text{сек}$  не встречается ниже  $230 \text{ км}$  (считая от Течена), расход воды в  $3000 \text{ м}^3/\text{сек}$ — ниже  $490 \text{ км}$  и в  $2000 \text{ м}^3/\text{сек}$ — ниже  $600 \text{ км}$ . Это явление, известное под именем расплывания волны паводка, имеет первостепенное значение при рассмотрении режима неустановившегося движения воды.

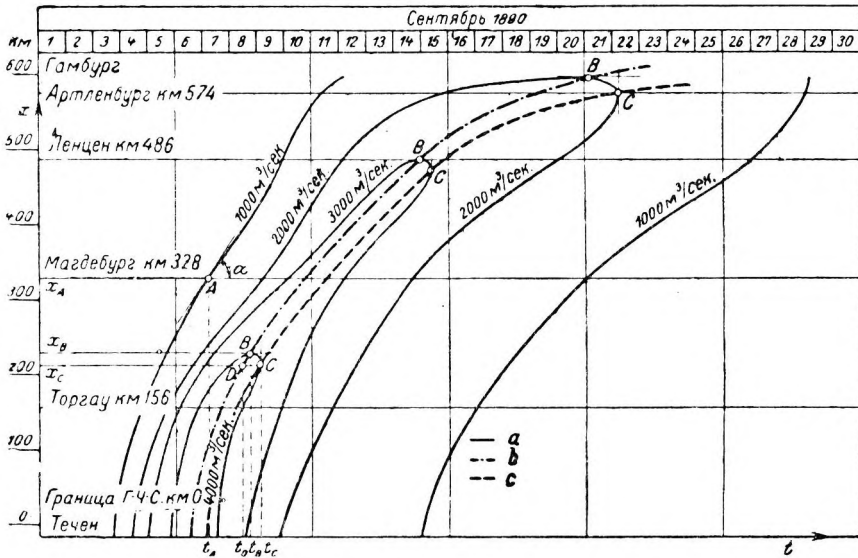


Рис. 248. Хронограмма расходов воды для паводка на р. Эльбе в сентябре 1890 г.  
 $a$ —изолинии и кривые пробега для  $Q = \text{const}$ ;  $b$ —кривая пробега последовательного ряда  $Q_{\text{макс.}}$ ;  
 $c$ —кривая пробега последовательного ряда  $h_{\text{макс.}}$

В качестве особого рода хронограммы температуры воздуха на рис. 249 приведен пример изменения температуры в надпочвенных слоях воздуха. Он взят из исследований, относящихся к так называемому микроклимату, приобретающих все большее значение в области агрикультурных мероприятий. Из рисунка видно, что в пределах 35-сантиметрового растительного слоя колебания температуры постепенно замирают в направлении к поверхности почвы.

Хронограммы температуры воды в озерах и реках также представляют важное вспомогательное средство при их изучении. На рис. 250 и 251 изображены хронограммы температуры воды оз. Вёртерзе в Каринтии, на первом в изотермах, то есть в линиях равных температур, и на втором в таутохронах, или в линиях равных времен.

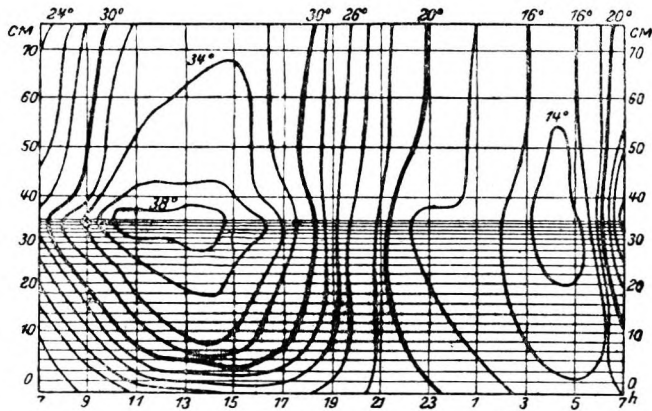


Рис. 249. Хронограмма температуры в растительном покрове (в траве) и непосредственно над ним (по Воейкову).

К построению хронограмм прибегают также при исследованиях тепляющего воздействия на почву со стороны снегового покрова и при исследованиях температуры почвы (рис. 252 и 253).

**Преобразование хронологических графиков и хронограмм.** Хронологические графики и хронограммы дают не во всех случаях непосредственно

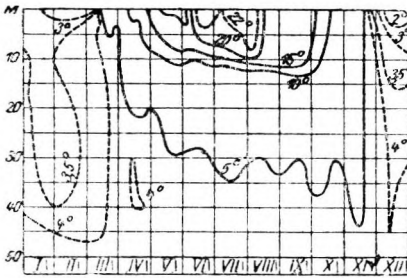


Рис. 250. Хронограмма температуры воды Вёртерзе в 1890 г.

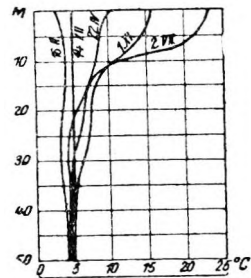


Рис. 251. Таутохроны Вёртерзе в 1909 г.

те величины исследуемых элементов, которые требуются для производства водохозяйственных расчетов.

Поэтому хронологический график преобразуется графическим путем в интегральную кривую, в интегральную кривую разностей, в кривую частоты (повторяемости) и кривую продолжительности.

**Интегральная кривая.**<sup>1</sup> Суммирование зависимой переменной  $x$  по независимой переменной времени  $t$  дает интегральную кривую (рис. 254). Приращение ординаты  $\eta$  интегральной кривой, соответствующее приращению

<sup>1</sup> Ниже в курсе приводится описание интегральной кривой в прямоугольных координатах. (Прим пер.)

абсциссы  $dt$ , составляет  $d\eta = xdt$ , а тангенс угла наклона касательной к кривой на этом участке получается:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{xdt}{dt} = x. \quad (147)$$

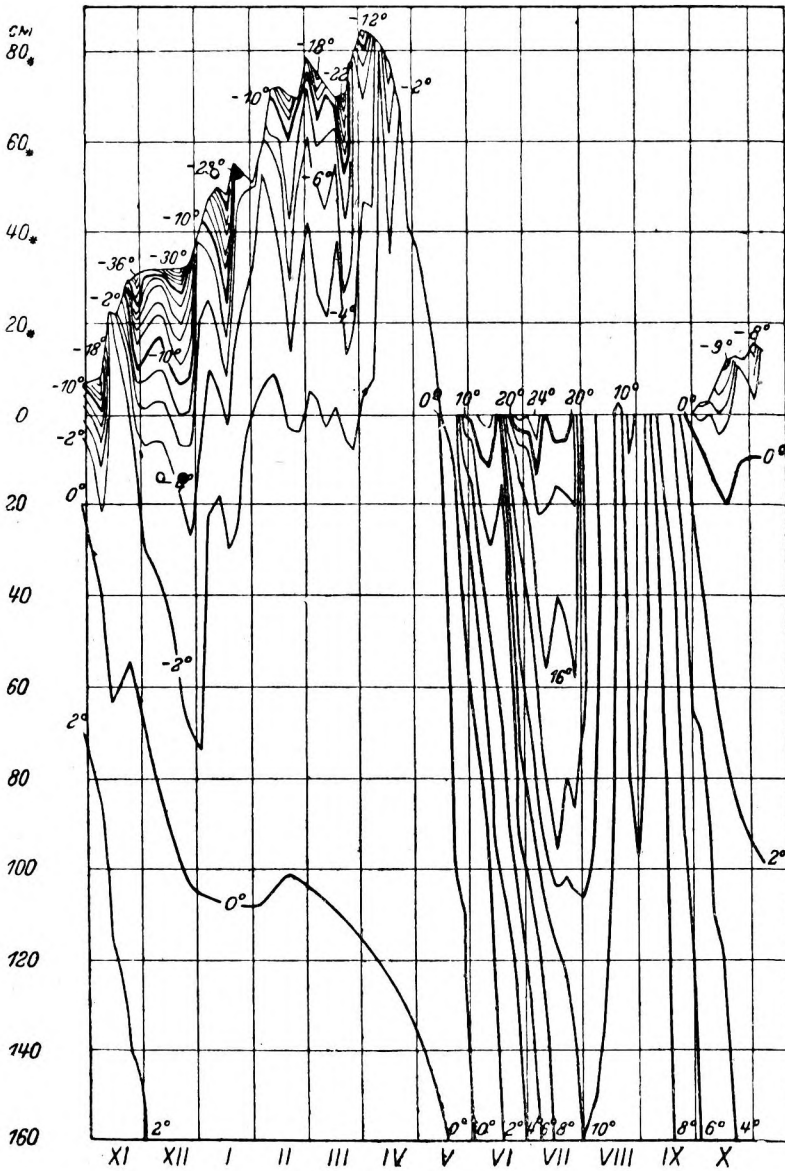


Рис. 252. Хронограмма температур снегового покрова и почвы в Соданкиля в 1916 г.

Таким образом по данной интегральной кривой можно заключать об изменении  $x$ , пользуясь тангенсами угла наклона касательных как масштабом для зависимой переменной.

Масштаб тангенсов чертится как показано на рис. 254. Если из точки  $A$  провести лучи под различной величины углами наклона  $\alpha$ , то частные от деления длин  $a$ , взятых в масштабе сумм, на длину  $b$ , выраженную в масштабе

времени, дадут значения  $x$  для соответственных углов наклона  $\alpha$ . Если, например,  $a...$  равняется 8,40 единицам величины  $\eta$  и  $b...$  5,00 единицам времени  $t$ , то угол  $\alpha$  соответствует величине  $x = 8,40/5,00 = 1,68$ .

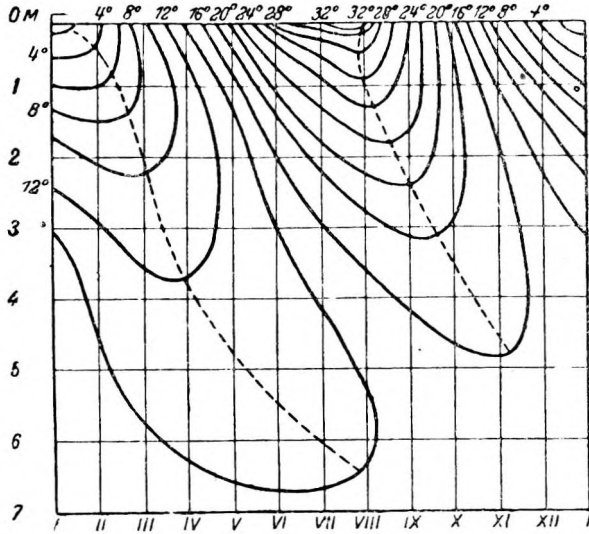


Рис. 253. Хронограмма пятилетних средних месячных температур почвы в Тбилиси (по Ханну).

На масштабе тангенсов следует для каждого  $a$  выписать соответствующее ему значение  $x$ , как это и сделано на рис. 254. Если теперь требуется определить из интегральной кривой значение  $x$  в точке  $B$ , то из точки  $A$  масштаба тангенсов проводят луч, параллельный касательной, к кривой в точке  $B$  и отсчитывают  $x$  по ординате масштаба тангенсов.

Для построения интегральной кривой применяют способы аналитический, механический и чисто графический, в зависимости от допустимой погрешности, а также от навыка.

По приближенному аналитическому способу вычисляют элементы площади  $x dt$  (как прямоугольники), последовательно суммируют их, а значения сумм наносят в целесообразно выбранном масштабе в виде ординат  $\eta$ .

Применение механических вспомогательных средств, как, например, планиметра, рекомендуется только тогда, когда идет речь об определении отдельных промежуточных сумм или только одной конечной суммы.

В большинстве случаев вполне достаточным является чисто графический способ. Согласно ему, выбирают равные отрезки конечной величины  $\Delta t$ ,

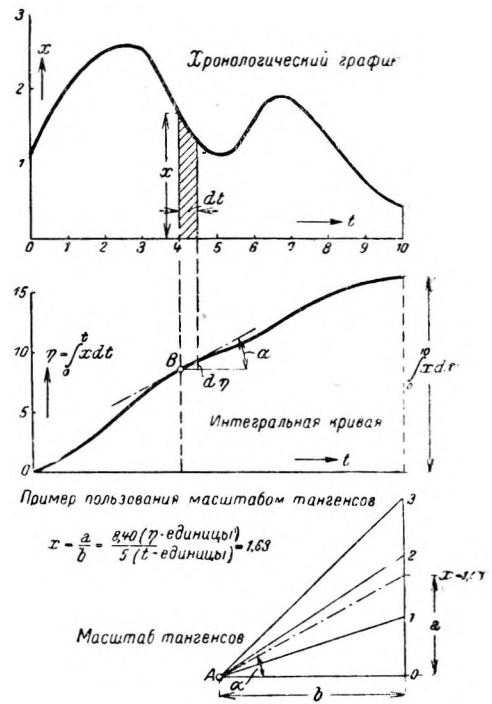


Рис. 254. Интегральная кривая.

берут для каждого из них с чертежа по масштабу или циркулем средние значения  $x$  и откладывают просуммированные значения  $x$  в виде ординат по концам отдельных  $\Delta t$ . Так как искомые суммы площадей равны  $\Delta t \Sigma x$ , то достаточно перемножить выраженные в соответственных единицах отрезки  $\Sigma x$  с выбранным  $\Delta t$ , чтобы получить значения ординат  $\eta$  интегральной кривой.

Интегральные кривые находят применение для выражения суммарной высоты слоя осадков, суммарного расхода воды, взвешенных наносов, влекомых наносов и, в частности, при решении задач по аккумулярованию стока.

В качестве примера ниже приведено определение суммарного расхода воды или суммарного стока р. Дуная в створе у Рейхсбрюкке в Вене (рис. 243).

Построенная на основе хронологического графика изменения расходов воды интегральная кривая стока показывает, что суммарный сток с водосбора в  $101707 \text{ км}^2$  составлял в 1921 г  $40,14 \times 10^9 \text{ м}^3$ . Отсюда получается

высота слоя стекшей воды 
$$h_A = \frac{40,14 \times 10^9}{101\,707 \times 1000} = 395 \text{ мм}$$
 и средний модуль

стока за 1921 г. 
$$q_A = \frac{40,14 \times 10^9}{101\,707 + 365 \times 86\,400} = 0,0125 \text{ м}^3/\text{сек с } 1 \text{ км}^2$$
 —  
 $= 0,125 \text{ л/сек с } 1 \text{ га}$ .

Соединяя прямой начальную и конечную точки интегральной кривой получают линию, наклон которой определяет величину среднего годового расхода воды, то есть расхода воды, который дал бы в течение года суммарный сток, равный полученному по интегральной кривой. При помощи масштаба тангенсов величина среднего годового расхода воды определяется в  $1273 \text{ м}^3/\text{сек}$ . Этой величине расхода воды соответствует по рис. 243 уровень воды—58 см.

Если теперь определить (лучше всего путем вычислений) среднее арифметическое ежедневных уровней воды, то оказывается, что средний годовой уровень воды равен — 64 см. Таким образом уровень воды, соответствующий среднему расходу воды, и средний уровень, подсчитанный как среднее арифметическое всех уровней воды, не вполне совпадают между собою, что важно иметь в виду в случаях детального гидрологического анализа.

Установление при помощи интегральной кривой суммарного расхода взвешенных наносов приведено на рис. 246. По кривой видно, что Дунай у Линца перенес за 1929 г. всего 6 950 000 т взвешенных наносов.

Интегральная кривая разностей (Zeit-Differenzsummenlinie).<sup>1</sup> Все способы, основывающиеся на интегральной кривой, получают благодаря ее наглядности и простоте большое преимущество перед теми способами, которые опираются непосредственно на хронологические графики. Однако пользование интегральными кривыми имеет тот недостаток, что вследствие неизбежно малого вертикального масштаба для интегральных кривых точность отсчета ординат по интегральным кривым невелика и, кроме того, вытянутое положение кривой сказывается неблагоприятным образом на точности расчетов при сечении ее линиями, направленными к ней под острыми углами. Обоих недостатков можно избежать при помощи следующего искусственного приема.

Если представить себе все ординаты хронологического графика  $x = f_1(t)$  уменьшенными на постоянную величину  $x_0$ , то можно построить интегральную кривую для функции  $x - x_0 = f_2(t)$ . Получающаяся в результате такого построения кривая будет в дальнейшем носить название интегральной кривой разностей (рис. 255).

<sup>1</sup> Интегральная кривая разностей является по существу интегральной кривой в косоугольных координатах, но благодаря несколько особому приему построения она не требует координатной сетки. (Прим. пер.)



выпавших осадков получают умножением предыдущей величины на величину площади бассейна; она получается равной  $108,4 \times 10^9 \text{ м}^3$ . Средний многолетний (нормальный) модуль осадков вычисляется из выражения:

$$Q_N = \frac{1065,6 \times 1000}{366 \times 86400} = \frac{1065600}{31536000} = 0,034 \text{ м}^3/\text{сек с } 1 \text{ км}^2$$

или  $0,34 \text{ л/сек с } 1 \text{ га}$ .

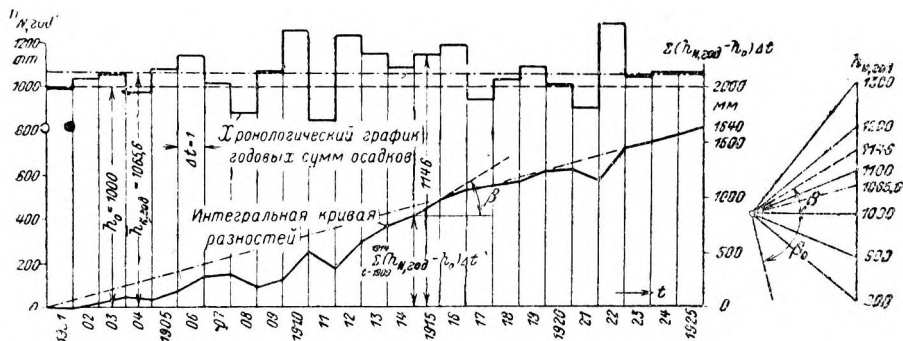


Рис. 256. Интегральная кривая разностей для годовых сумм осадков в бассейне р. Дуная у Вены за период 1901—1925 гг.

Кривая частоты (повторяемости). Способ получения кривой частоты по таблице распределения приведен выше. Ниже речь идет о замене аналитического способа достаточно точным графическим.

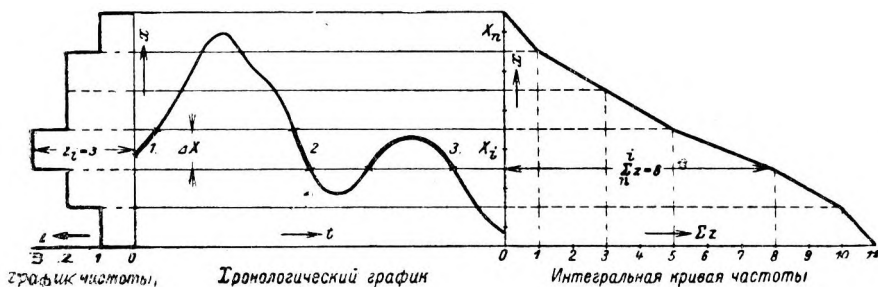


Рис. 257. Построение графика частоты и интегральной кривой частоты по хронологическому графику путем подсчета числа значений наблюдаемой величины  $x$  в классе  $X$  с величиною интервала  $\Delta X$ .

Для этого разбивают полную охваченную наблюдениями амплитуду элемента  $x$  на равные интервалы величиною  $\Delta X$ , проводят через центры интервалов  $X_1, X_2, \dots, X_i, \dots, X_n$  линии параллельные абсциссе (оси времени), откладывают на них соответственные частоты  $z$  и, соединяя конечные точки этих параллельных линий, получают кривую частоты по отдельным интервалам наблюдаемой величины.

Частота какого-либо интервала  $z$  может устанавливаться, смотря по роду задачи, либо путем простого подсчета числа членов, приходящихся на данный интервал, либо приведением той продолжительности, в течение которой наблюдаемые значения встречались в пределах данного интервала.

Первый способ выражения кривой частоты находит себе применение тогда, когда идет речь о гидрологических явлениях, в которых по временам наблюдаются перерывы. Соединение конечных точек ординат производят в этом случае по ступеням, в результате чего получается ступенчатый график частоты (рис. 257). Ступенчатые графики частоты применяются для изображения осадков, так как их выпадение представляет собою прерывистый процесс.

По второму способу строят кривые частоты таким образом, что откладывают в центрах интервалов  $X_1, \dots, X_i, \dots, X_n$  сумму отрезков времени  $\Delta t_1, \Delta t_2, \dots$  равную продолжительности, в течение которой наблюдаемая величина  $x$  встречалась в пределах того или иного интервала. Полученные точки соединяют или по ступеням или ломаной линией. В результате получается или ступенчатый график или многоугольник (полигон) частоты. Последний способ изображения частот находит применение только при непрерывно протекающих процессах, как то, например, имеет место в отношении уровня и расхода воды.

Если объектом обработки служит уровень воды  $h_p$  или расход воды  $Q$ , то в результате получается кривая частоты уровня или расхода воды (по интервалам). Определение отрезков времени  $\Delta t_1, \Delta t_2, \dots$  лучше производить непосредственно по таблицам уровней (расходов воды), так как измерение их по графикам слишком неточно.

В качестве примера ниже разобрано построение кривой частоты уровня (по интервалам) в створе поста Вена-Рейхсбрюкке на р. Дунае за 1921 г.

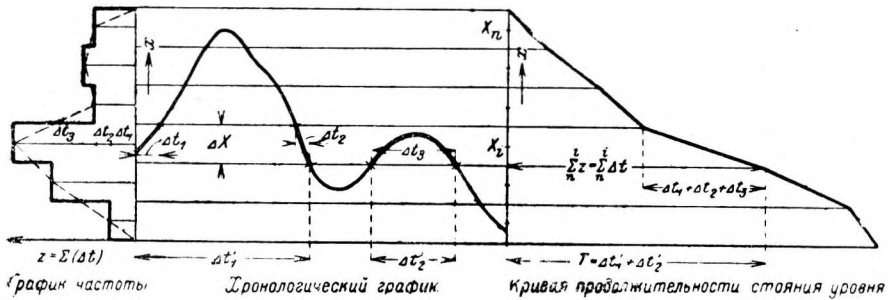


Рис. 253. Построение графика частоты и интегральной кривой частоты по хронологическому графику путем указания продолжительности стояния наблюдаемой величины  $x$  в классе  $X$  с величиною интервала  $\Delta X$ .  
Частота  $z = \Sigma (\Delta t)$ .

Для подсчета взяты заимствованные из Гидрологического ежегодника ежедневные уровни, приведенные в табл. 20. Частоты для отдельных интервалов, выраженные в мерах времени, подсчитаны, принимая величину интервала равной 10 см, с таким расчетом, чтобы центры интервалов соответствовали числам, оканчивающимся на пять. При этом надо иметь в виду, что при сильных изменениях уровня воды последний может в течение одного дня подняться или опуститься на высоту, соответствующую нескольким интервалам, так что приходится приводить продолжительность с точностью до сотых долей одного дня. Результат подсчета приведен в табл. 21.<sup>1</sup>

Графическое изображение кривой дано на рис. 243. Значению уровня наибольшей частоты здесь соответствует уровень—105 см, который может быть обозначен как "величина (ступень) уровня наибольшей продолжительности". Ему соответствует расход воды 985 м<sup>3</sup>/сек, который соответственно может быть обозначен как "величина расхода воды наибольшей продолжительности". В данном году частота этого расхода равнялась 42,3 дням.

Кривая продолжительности. Если просуммировать последовательно значения частот, отложенные в центрах интервалов  $X_1, X_2, \dots, X_p, \dots, X_n$  на кривой частоты, и отложить полученные промежуточные суммы по концам соответственных интервалов, то путем соединения прямыми полученных таким образом точек получается интегральная кривая частот интервалов наблюдаемых значений, соответствующая в аналитической статистике таблице сумм (рис. 258).

<sup>1</sup> Точность, с которой подсчитаны частоты в табл. 21, является излишней и не может служить примером при вычислениях подобного рода. (Прим. пер.)



**Уровни воды по водомерному посту Вена-Рейхсбрюкке на Дунае  
за 1921 гидрологический год**

Число месяца	XII	I		II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI
	1	-162	-30	23	-118	-108	33	11	30	-55	-82	-116	33
2	-160	-71	-6	-120	-102	12	35	48	-57	-80	-124	-21	
3	-158	-64	-4	-121	-106	-5	265	106	-57	-95	-129	-63	
4	-159	-64	-36	-118	-104	31	185	130	-56	-104	-134	-74	
5	-158	-73	-40	-118	-100	39	125	108	-67	-109	-138	-67	
6	-153	-76	-46	-118	-97	21	81	82	-62	-98	-137	-20	
7	-151	-94	-56	-116	-90	-4	62	53	-58	-65	-135	6	
8	-151	-83	-64	-110	-90	-22	51	25	-76	-50	-137	30	
9	149	-86	-72	-106	-99	-34	37	-6	-90	-76	-135	17	
10	-149	-99	-81	-109	-104	-40	25	-22	-88	-78	-123	-17	
11	-151	-106	-84	-114	-108	-30	24	-28	-85	-90	-136	-38	
12	-153	-100	-94	-120	-107	-10	29	-37	-86	-99	-140	-58	
13	-153	-105	-99	-123	-106	14	18	-46	-85	-100	-144	-75	
14	-154	-106	-105	-123	-104	24	-6	-50	-78	-90	-144	-86	
15	-155	-110	-108	-122	-99	23	-8	-51	-4	-83	-146	-97	
16	-156	-108	-110	-119	-94	23	42	-50	3	-92	-149	-105	
17	-160	-99	-84	-118	-84	26	145	-40	-40	-101	-143	-108	
18	-164	-103	-44	-115	-74	35	108	-49	-60	-104	-137	-111	
19	-167	-113	-50	-111	-78	48	85	-49	-70	-109	-142	-113	
20	-163	-112	-59	-110	-79	66	60	-37	-82	-111	-146	-115	
21	-164	-106	-73	-107	-80	68	38	-4	-92	-111	-149	-117	
22	-164	-94	-88	-106	-82	84	17	-9	-96	-113	-150	-122	
23	-165	-51	-94	-109	-74	92	4	-24	-96	-107	-153	-125	
24	-166	-49	-103	-113	-32	87	18	-16	-93	-88	-152	-128	
25	-168	-22	-106	-114	-39	79	38	-32	-93	-62	-154	-132	
26	-165	74	-111	-113	-30	62	121	-46	-93	-72	-141	-139	
27	-155	55	-115	-106	-21	63	110	-40	-83	-81	-154	-142	
28	-150	43	-116	-94	-14	47	68	-40	-76	-90	-155	-145	
29	-119	45	—	-95	4	38	39	-51	-62	-100	-158	-150	
30	-137	31	—	-99	58	38	29	-55	-82	-105	-144	-153	
31	-41	32	—	-106	—	41	—	-56	-82	—	14	—	

Таблица 21

**Частота уровня воды (по интервалам) в створе поста Вена-Рейхсбрюкке на Дунае  
за 1921 г.**

Интервалы	Частота в днях	Интервалы	Частота в днях	Интервалы	Частота в днях
265	0,02	115	1,75	— 35	11,68
255	0,12	105	0,75	— 45	14,01
245	0,12	95	2,25	— 55	15,51
235	0,12	85	2,75	— 65	14,24
225	0,12	75	3,15	— 75	16,82
215	0,15	65	5,85	— 85	25,24
205	0,15	55	4,05	— 95	27,29
195	0,25	45	6,85	— 105	42,28
185	0,25	35	11,10	— 115	27,96
175	0,15	25	15,10	— 125	10,90
165	0,15	15	8,55	— 135	11,02
155	0,25	— 5	7,45	— 145	16,15
145	0,35	— 5	8,55	— 155	23,15
135	0,55	— 15	7,45	— 165	11,01
125	0,65	— 25	7,87	—	—

Уменьшая интервалы, получают в пределе сплошную, плавную интегральную кривую частоты.

Если частота наблюдаемой величины выражена в мерах времени и суммирование начинается с наивысшего значения  $X_n$ , то интегральная кривая приобретает еще то значение, что ее абсциссы показывают продолжительность  $T$ , в течение которой значения исследуемого элемента (например расхода воды или уровня) были выше какой-либо определенной его величины.<sup>1</sup>

Такие кривые продолжительности можно получать и непосредственным путем из хронологических графиков, нанося в конце каждого интервала суммы тех отрезков времени  $\Delta t$ , которые показывают, в течение какого времени явление заключено в границах данного интервала. Подлежащие суммированию значения  $\Delta t'$  представлены на хронологическом графике теми отрезками хорд, которые соответствуют положению нижней границы интервала.

Если объектом исследования служит уровень воды  $h_p$  или расход воды  $Q$ , то, следуя указанным путем, получают кривую продолжительности стояния уровня воды (Benetzungsdauerlinie) или кривую продолжительности расходов воды.

Подсчеты для получения численных значений продолжительности лучше всего производить на основе таблицы распределения (частоты), составляя в последовательном порядке, начиная с наивысшего интервала, суммы частот интервалов и относя каждую сумму к уровню, который соответствует нижней границе последнего интервала суммы.

Табл. 22 содержит результаты подобного подсчета для кривой продолжительности стояния уровня воды в створе поста Вена-Рейхсбрюкке на р. Дунае для 1921 г.

Таблица 22

**Продолжительность стояния уровней воды выше уровня  $H$  в створе водомерного поста Вена-Рейхсбрюкке на р. Дунае для 1921 г.**

Уровень воды $H$	Продолжительность стояния в днях	Уровень воды $H$	Продолжительность стояния в днях	Уровень воды $H$	Продолжительность стояния в днях
260	0,02	110	5,15	—40	109,42
250	0,14	100	5,90	—50	123,43
240	0,26	90	8,15	—60	138,94
230	0,38	80	10,90	—70	153,18
220	0,50	70	14,05	—80	170,00
210	0,65	60	19,90	—90	195,24
200	0,80	50	23,95	—100	222,53
190	1,05	40	30,80	—110	264,81
180	1,30	30	41,90	—120	292,77
170	1,45	20	57,00	—130	303,67
160	1,60	10	65,55	—140	314,69
150	1,85	0	73,00	—150	330,84
140	2,20	—10	81,55	—160	353,99
130	2,75	—20	89,00	—168	365,00
120	3,40	—30	97,74	—	—

Для построения кривой пользуются или табличными данными или суммируют непосредственно по хронологическому графику отрезки соответственных хорд.

<sup>1</sup> В советской специальной литературе время выражают также в процентах от общей продолжительности рассматриваемого периода, например года. (Прим. пер.)

При водохозяйственных расчетах различают и уровни и расходы воды по их рабочей обеспеченности (Betriebsdauer), давая им соответствующие обозначения. Говорят о  $n$ -месячном или  $m$ -суточном обеспеченном уровне воды или, соответственно, о  $n$ -месячном и  $m$ -суточном обеспеченном расходе воды, если продолжительность стояния уровня или расхода воды выше данного значения составляет  $n$  месяцев или, соответственно,  $m$  дней.

Медианным значением уровня, согласно самому определению этого понятия, является 6-месячный или 182,5-суточный обеспеченный уровень и соответственно для расхода воды—6-месячный или 182,5-суточный обеспеченный расход воды.

По кривой продолжительности уровня воды на водомерном посту Вена-Рейхсбрюкке на р. Дунае, приведенной на рис. 243, получается для 1921 г. следующий статистический ряд:

12-месячный обеспеченный уровень.....	—168 см
10    "                  "                  ".....	—127   "
8     "                  "                  ".....	—104   "
6     "                  "                  ".....	—85    "
4     "                  "                  ".....	—42    "

и соответствующие уровням расходы воды—650, 860, 990, 1105 и 1377 м<sup>3</sup>/сек.

Кривая пробега и хронограмма. Данные два вида графического изображения выводятся непосредственно из хронограммы расходов воды  $Q=f(x,t)$ , где на  $x$  следует смотреть как на координату места или расстояния и, следовательно, как на путь, пройденный расходом воды  $Q$ .

Уравнение линий равных расходов воды (изолиний расходов воды), поскольку для этих линий  $Q = \text{const}$  или  $dQ = 0$ , имеет вид:<sup>1</sup>

$$\frac{\partial Q}{\partial x} dx + \frac{\partial Q}{\partial t} dt = 0. \tag{150}$$

Однако, если  $dQ = 0$ , то это говорит, что  $dx$  — тот отрезок пути, который расход воды  $Q$  проходит за время  $dt$ . А следовательно,

$$\frac{dx}{dt} = - \frac{\frac{\partial Q}{\partial t}}{\frac{\partial Q}{\partial x}} = \omega_Q \tag{151}$$

есть быстрота,<sup>2</sup> с которой расход воды  $Q$  (например пик паводка) передвигается вниз по реке, а  $dt$  — его время пробега.

Каждому расходу воды и каждому месту соответствует другое время пробега. Поскольку  $dx/dt = \text{tg}\alpha$ , изолиния  $Q$  дает также картину изменения времени пробега (см. рис. 248). Поэтому в данном специальном случае изолиния  $Q$  может быть рассматриваема как кривая времен пробега расходов воды. Совокупность изолиний  $Q$  хронограммы расходов воды представляет собою в силу этого хронограмму времен пробега расходов воды, так как каждая отдельная изолиния отвечает кривой времени пробега.

Для дальнейшего рассмотрения необходимо воспользоваться пространственным уравнением для случая неустановившегося движения, каковым является прохождение паводка (рис. 259). Если живое сечение на участке реки длиной  $dx$  в момент времени  $t$  составляет в среднем  $F$  и увеличение

<sup>1</sup> K l e i t z . Note sur la théorie du mouvement non permanent des liquides et sur son application a la propagation des crues des rivières. Annales des ponts et chaussées, 1877, 11 Semestre, Paris 1877.

<sup>2</sup> Для  $\omega$  принято употреблять обозначение б ы с т р о т а , а не скорость, чтобы тем самым подчеркнуть, что имеется в виду не движение материальных частиц воды, а поступательное движение некоторого явления, в данном случае—расхода воды.

его по прошествии времени  $dt$  составляет  $\frac{\partial F}{\partial t} dt$ , то согласно условию: накопление плюс разность притока и оттока равняется нулю, должна иметь место зависимость:

$$\frac{\partial F}{\partial t} dt dx + \frac{\partial Q}{\partial x} dx dt = 0$$

или

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0. \quad (152)$$

Пусть к изолинии равных  $Q$  в точке  $C$  проведена касательная параллельная оси  $x$ -ов (рис. 248), тогда  $\frac{\partial Q}{\partial x} = 0$ . Так как  $F = bh_m$ , следовательно:

$$\frac{\partial F}{\partial t} = b \frac{\partial h_m}{\partial t},$$

то отсюда, в конце концов, получается, что

$$\frac{\partial h_m}{\partial t} = 0. \quad (153)$$

Согласно этому, в момент времени  $t_C$ , соответствующий точке  $C$ , достигается наибольшая средняя глубина воды  $h_m$ .

Пусть в точке  $B$  проведена касательная, параллельная оси  $t$ , тогда  $\frac{\partial Q}{\partial t} = 0$ , следовательно, согласно уравнению (151),  $\omega_Q = 0$ . Это означает, что расход воды величиною в  $4000 \text{ м}^3/\text{сек}$  не может больше встретиться в сечении реки, расположенном ниже пункта  $x_B$ . Этим самым наблюдаемое в естественных условиях уменьшение расхода воды с увеличением длины пробега паводковой волны получает математическое выражение. При продолжении секущей линии, проведенной в точке  $C$  параллельно оси  $t$ , можно убедиться, что в точке  $x_C$  максимальный расход воды должен наступить в момент времени  $t_D$ , следовательно раньше, чем наступит максимальный уровень воды, наблюдающийся в момент времени  $t_C$ .

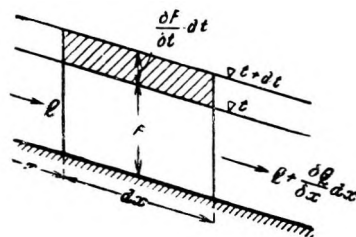


Рис. 259.

Понятие времени пробега может быть обобщено приложением его к различным гидрологическим явлениям. Тем самым область применения кривых и хронограмм времен пробега может быть расширена настолько, что этот способ графического изображения приобретает практическое значение.

Чтобы указать на важнейшие случаи, следует возвратиться к приему, приведенному на рис. 248. Путем соединения между собою всех точек  $B$  получают кривую времени пробега, которая показывает по прошествии какого времени пробега или с какою быстротою наступают в последовательно расположенных вдоль по реке сечениях наблюдающиеся в них максимальные расходы воды. Таким образом устанавливается кривая времени пробега последовательного ряда максимальных уровней.

## 2. Установление связей гидрологических явлений

При установлении связей—коррелятивных или функциональных—для гидрологических явлений, вследствие их зависимости от времени, следует обращать внимание на сравнимость. Переменные признаки только в тех случаях непосредственно сравнимы друг с другом, когда они воздействуют друг

на друга в духе их коррелятивной или функциональной зависимости в соответственный момент времени.

Если это воздействие связано со сдвигом во времени  $\Delta t$ , то это должно быть учтено.  $\Delta t$  не всегда известно вперед, а поэтому приходится искать путь к его определению.

При коррелятивной связи определяют сдвиг  $\Delta t$  из соображения, что хронологические ряды должны быть сдвинуты один относительно другого на такую величину  $\Delta t$ , которая дает наибольшее значение коэффициента корреляции или при графическом изображении связи наименьшую величину угла  $\beta$  между прямыми регрессии. Этот способ требует больших вычислений, однако он уже достиг практических успехов. При отыскании в гидрологии функциональных зависимостей из самого характера постановки проблемы вытекают обычно возможности, позволяющие отыскать сравнимые значения.

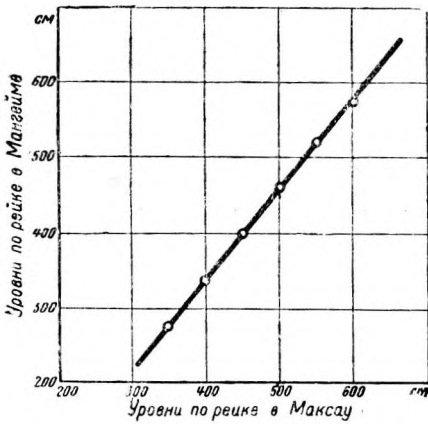


Рис. 260. Кривая связи соответственных уровней водомерных постов Мангейм и Максгау на р. Рейне.

### Кривые связи между уровнями водомерных постов.

Если сопоставить хронологические графики уровней воды двух водомерных постов  $A$  и  $B$ , распо-

ложенных по реке на определенном расстоянии  $\Delta x$  друг от друга, то, строго рассуждая, отсчитанные на этих постах в одно и то же время уровни воды  $h_{p,A}$  и  $h_{p,B}$  сравнимы между собою только в том случае, если уже в течение

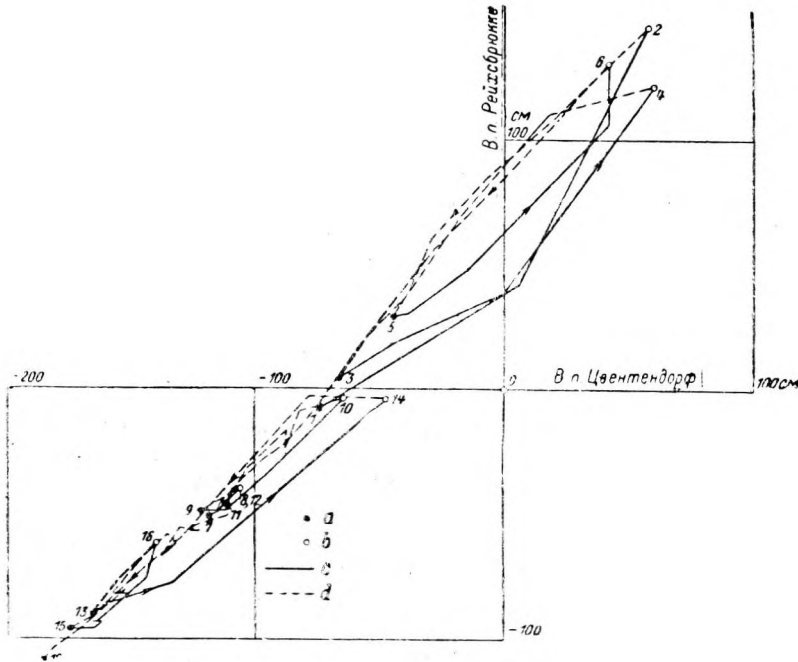


Рис. 261. Петлеобразная кривая связи уровней.

$a$ —провалы;  $b$ —пики;  $c$ —уровни на подъеме;  $d$ —уровни на спаде.

продолжительного времени наблюдается устойчивое стояние уровня воды. Однако, так как устойчивое стояние уровней наблюдается только при низкой

воде, приходится для построения кривой связи для более высоких уровней привлекать уровни наибольшей продолжительности и именно те, которые соответствуют перегибам хронологического графика колебания уровней. При таком способе заодно учитывается и неодновременность наступления сопряженных уровней на обоих связываемых постах, то есть время пробега между ними, и в силу этого получаемые кривые связи следует рассматривать как кривые связи соответственных уровней. Их графическое, а также аналитическое выражение является в большинстве случаев простым, так как точки связи не дают большого разброса. Если форма русла в створах связываемых постов не обнаруживает значительного различия, тогда кривые связи могут быть выражены в виде прямых линий (рис. 260). Если бы, напротив, точки связи брались без учета времени пробега, то есть приводились в сопряжение уровни, одновременно наблюдаемые на обоих водомерных постах, тогда пришлось бы считаться с большим разбросом точек, и кривая связи могла бы выразить связь между уровнями только приближенно. В этом случае правильнее связывать точки посредством петлеобразной ломаной линии 1, 2, ... 16, 17, ..., так называемой петли связи, таким образом, чтобы в ней нашла выражение хронологическая последовательность наступления уровней. На рис. 261 изображены подобного рода петли связи для водомерных постов Цвентендорф и Вена-Рейхсбрюкке на р. Дунае. Стрелками указано направление в ходе уровней. При такого рода изображении ясно видно, что при более высоких уровнях наступает большее рассеяние точек и что при подъеме и при спаде уровня точки отклоняются в разные стороны.<sup>1</sup>

**Кривые расходов воды.** Если отнести расходы воды к соответствующим им уровням, то при условии, что каждый отдельный расход воды был

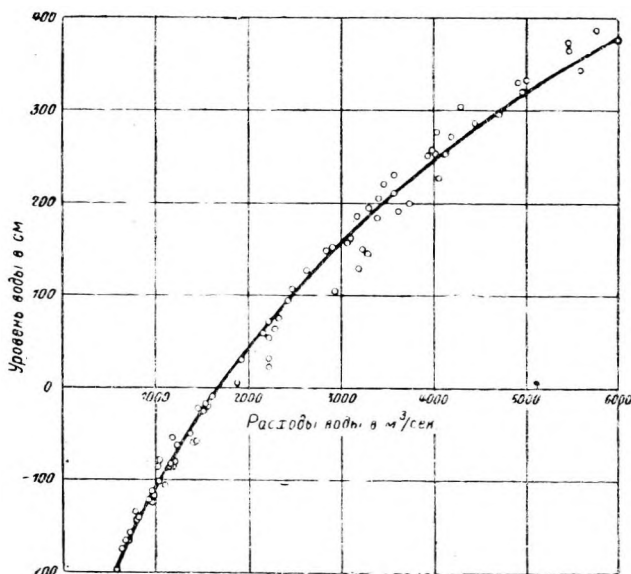


Рис. 262. Кривая расходов воды р. Дуная у Вены по измерениям за период 1897—1926 гг.

измерен при относительно устойчивом уровне, точки связи расходов и уровней воды не дадут большого разброса. В подобном случае линия, выражающая зависимость  $Q = f(h_p)$ , называемая кривой расходов воды, может быть без труда проведена по наблюдаемым точкам в виде одной плавной линии.

<sup>1</sup> Совершенно ясно, что следует стремиться учитывать время пробега для получения связи между уровнями в виде одной линии. Однако даже правильный учет времени пробега не всегда обеспечивает такую однолинейную связь. Наличие притоков или поймы на участке между постами, подпор от притоков или главной реки могут нарушить эту связь. Петля связи характеризует скорее отсутствие связи, чем ее наличие. (Прим. пер.)

Если для получения кривой расходов воды пользуются также расходами воды, измеренными в пределах значительно колеблющихся уровней, как то имеет место при проходе паводков, и, кроме того, берут данные измерений за разные годы, то точки связи обнаруживают сильный разброс. Кривая расходов проводится тогда обычно "на-глаз" (рис. 262). Однако и в этом случае также удастся подчинить точки связи функциональной зависимости, выраженной графически или аналитически.<sup>1</sup> При этом необходимо только учитывать, что при подъеме воды, вследствие большого поверхностного уклона близ пика паводка, должен иметь место больший расход воды, чем при такой же высоте уровня на спаде, где, согласно данным практики, наблюдается меньший поверхностный уклон.

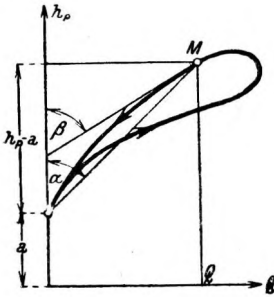


Рис. 263. Схематическое изображение петлеобразной кривой расходов воды.

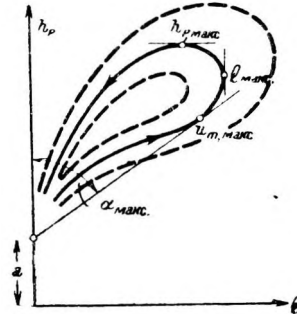


Рис. 264. Схематическое изображение серии петлеобразных кривых расходов воды.

Если теперь соединить точки, нанесенные в координатной системе  $Q, h_p$  двумя отдельными линиями, объединяя точки на подъеме и точки на спаде, то в результате можно придти к петлеобразной кривой расходов воды (рис. 263). Так как такая петлеобразная кривая отвечает только одному паводку с определенной величиной максимального расхода и соответственно максимального уровня воды, то режим различной силы паводков должен быть выражен в виде серии петлеобразных кривых расходов воды (рис. 264).

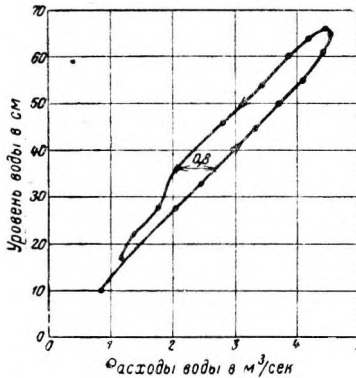


Рис. 265. Петлеобразная кривая расходов воды при искусственном пуске воды на небольшом водотоке.

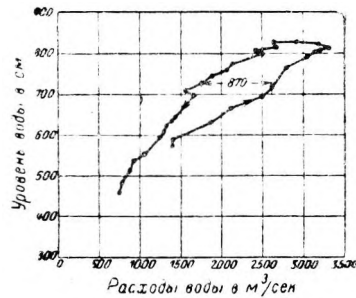


Рис. 266. Петлеобразная кривая расходов воды при проходе высоких вод на р. Тиссе в Венгрии

На рис. 265, 266 и 267 изображены результаты ускоренно проведенных в период одного паводка измерений расходов воды, из которых видно, что

<sup>1</sup> Очевидно это относится к случаям устойчивого русла или отсутствия подпора (от растительности или от ниже расположенного притока.) (Прим. пер.)

при одних и тех же уровнях в величине расхода воды может быть разница до 30%.

Из кривой расходов воды (как однолинейной, так и петлеобразной) можно при помощи зависимостей, полученных при рассмотрении кривых времен пробега, вывести еще следующее.

Из уравнений (151) и (152) следует, что

$$\omega_Q = \frac{\frac{\partial Q}{\partial t}}{\frac{\partial F}{\partial t}}, \quad (154)$$

а так как  $F = bh_m$ , то отсюда

$$\omega_Q = \frac{1}{b} \cdot \frac{\partial Q}{\partial h_m}. \quad (155)$$

Если поперечное сечение имеет, примерно, прямоугольную форму и дно приходится на уровне  $a$ , то можно принять  $\partial h_m = \partial (h_p - a)$  и

$$\omega_Q = \frac{1}{q} \cdot \frac{\partial Q}{\partial (h_p - a)}.$$

Так как

$$u_m = \frac{Q}{F} = \frac{Q}{bh_m} = \frac{1}{b} \cdot \frac{Q}{h_p - a},$$

то отсюда следует, что

$$\omega_Q : u_m = \frac{\partial Q}{\partial (h_p - a)} : \frac{Q}{h_p - a}. \quad (156)$$

Из рис. 263 получается:<sup>1</sup>

$$\frac{Q}{h_p - a} = \operatorname{tg} \alpha \quad \text{и} \quad \frac{\partial Q}{\partial (h_p - a)} = \operatorname{tg} \beta,$$

откуда следует, что  $\frac{\omega_Q}{u_m} = \frac{\operatorname{tg} \beta}{\operatorname{tg} \alpha}$ . Тем самым, на основании петлеобразной кривой расходов воды, можно простым путем сделать заключение о связи между быстротою  $\omega_Q$  и средней скоростью течения воды  $u_m$ . Далее можно видеть,

что, при одинаковом уровне,  $\frac{\omega_Q}{u_m}$  различно на подъеме и на спаде и что

максимальная средняя скорость течения  $u_{m \text{ макс}}$  наблюдается при уровне, для которого  $\alpha = \alpha_{\text{ макс}}$ . (рис. 264). Таким образом при ясно выраженном неустановившемся характере движения воды сначала наступает  $u_{m \text{ макс}}$ , затем  $Q_{\text{ макс}}$  и, наконец,  $h_{p, \text{ макс}}$ .

### 3. Графическое изображение известных функциональных зависимостей

Оно может преследовать цель графического выражения закономерности связи между переменными величинами или представлять чертеж, с которого можно взять только числовые значения этих переменных или на котором дано их положение во времени.

Закономерная зависимость выражается в общем посредством кривых и изолинии связи. Они родственны хронологическим графикам и хронограммам, которые, как уже показано выше, представляют особый случай связи

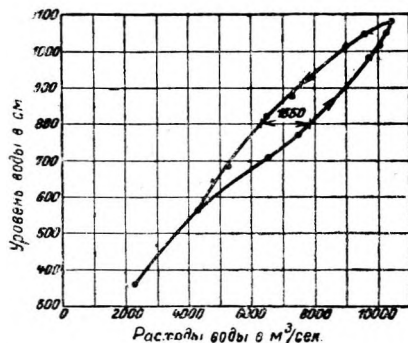


Рис. 267. Петлеобразная кривая расходов воды при прохождении высоких вод на р. Огайо в США.

<sup>1</sup>  $\partial (h_p - a)$  отсекается на оси  $h_p$ , касательной к кривой в точке  $M$ . (Прим. пер.)



между гидрологическими явлениями, где одною из переменных служит время. Кривая расходов воды, кривая связи уровней и кривая механического анализа влекомых наносов представляют примеры кривых связи. Ниже будет дано описание некоторых употребительных в гидрологии и заслуживающих внимания изолиний.

**Изогеты в изогиины.** Для наглядного изображения распределения по какому-либо бассейну осадков, стока и потерь стока пользуются гидрологическими картами. Они содержат речную сеть, водораздельные линии бассейнов рек и все метеорологические и гидрологические станции. Станциям дают различные обозначения, в зависимости от оборудования их измерительными приборами и объема наблюдений на них.

Если теперь представить себе нанесенной на каждой станции измеренную на ней высоту слоя осадков, и точки с равными высотами, соединенными между собою, то распределение осадков в бассейне характеризуется этими линиями равных высот осадков — *изогетами*. Вследствие относительно небольшого числа дождемерных станций, при проведении изогет пользуются тем установленным на опыте обстоятельством, что места, расположенные на одной высоте над уровнем моря и в равных климатических условиях, имеют, примерно, одинаковое количество осадков. Вследствие этого направление изогет, примерно, следует направлению горизонталей. Таким же образом можно показать и распределение снегового покрова, нанося на карту линии равных высот снегового покрова так называемые *изогиины*.

Карты изогет применяются для определения общего количества и средней высоты слоя осадков, выпавших в данном бассейне. Общее количество осадков  $F_N$  получается, как объем тела, образованного изогетами. Средняя

высота слоя осадков определяется из выражения  $F_N/F$ .

Иным путем определяют распределение стока. Из суммарного стока  $F_A$  получается средняя высота слоя стекшей воды в данном бассейне  $F_A/F$ . Определив эту величину для ряда створов, соединяют на карте створы с равной высотой слоя стекшей воды и получают таким образом изолинии высоты слоя стока.<sup>1</sup>

**Номограммы.** При помощи этого способа удастся изобразить в одной плоскости зависимости более чем трех переменных. Это обстоятельство обеспечило номограммам широкую область применения. В гидрологии применимость номограмм, однако, ограничена постольку, поскольку номографическое изображение трех и более переменных предполагает знание аналитического выражения подлежащих графическому изображению зависимостей. Это условие в данной области знания выполнимо редко. Номографические изображения не допускают также необходимых при гидрологических исследованиях преобразований графиков, а также их совмещения. Для выражения же конечных результатов таких исследований там, где требуется сжатое, наглядное изображение зависимых величин, допускающее достаточно точное получение их числовых значений,—этот способ может быть рекомендован и является полноценной заменой объемистого табличного материала.

Номография пользуется главным образом параллельными осями. Задача заключается, следовательно, в том, чтобы перевести изображение из системы прямоугольных координат в систему параллельных координат. При плоских изображениях можно, не зная их аналитического выражения, придти к номограмме графическим путем. Преобразование производится по способу, изображенному на рис. 268, причем кривая  $B$  сначала выравняется в прямую  $G$ . При помощи этой прямой, которую удобнее всего проводить, примерно, под углом в  $45^\circ$  и из начала координат, пара сопряженных значений переменных

<sup>1</sup> В советской гидрологической литературе при проведении карт изолиний стока величина слоя или модуля стока относится не к створу, а к центру бассейна. (*Прим. пер.*)

$x_1, y_1$ , взятых в прямоугольной системе, преобразуется в пару значений  $x'_1, y'_1$ . Если  $U$  и  $V$ —параллельные шкалы и  $CD$  нулевая линия номограммы, то точкам  $x_1, y_1$  в Декартовых координатах соответствует в системе параллельных координат прямая  $EF$ . Необходимо только следить, чтобы в параллельных координатах против сечения  $x'_1$  на шкале  $U$  было проставлено значение  $x_1$  и на шкале  $V$  против  $y'_1$  стояло  $y_1$ . Прямые, выражающие связь, каждая между двумя сопряженными значениями, проходят все через точку  $P$ , причем точками их пересечений с шкалами  $U$  и  $V$  определяются

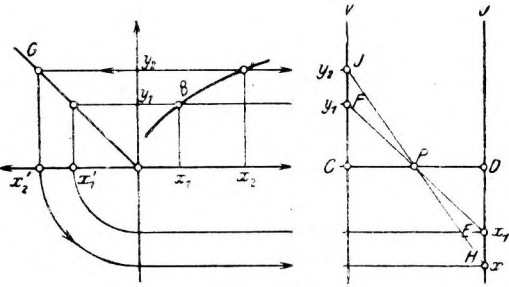


Рис. 268. Преобразование криволинейной зависимости  $B$  в номографическое изображение с двумя шкалами  $U$  и  $V$ .

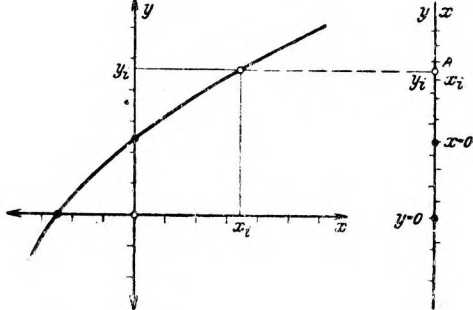


Рис. 269. Двойная шкала.

пары сопряженных значений  $x_2, y_2$  и т. д. Чтобы получить теперь по номограмме сопряженные значения связанных между собою переменных, достаточно провести через точку  $P$  любую прямую и прочесть эти значения в точках пересечения ею шкал  $U$  и  $V$ . Таким же образом, зная определенное значение одной из переменных, положим  $x_2$ , получают сопряженное ему значение другой переменной  $y_2$ , проводя прямую  $HJ$  через точки  $P$  и  $x_2$  на шкале  $U$ .

Имеется ряд работ, содержащих также описание построения номограмм для уравнений гидравлики.<sup>1</sup>

**Шкалы.** Если имеют дело с зависимостями в плоскости, пользуются двойной шкалой. Значения переменных  $x, y$  функции  $y=f(x)$  наносят с обеих сторон произвольно выбранной оси, отыскивая при помощи кривой связи значение  $y_i$  сопряженное  $x_i$ , и обозначая на шкале точку  $A$  значениями  $x_i$  и  $y_i$  (рис. 269). Для практического пользования является удобным разделить шкалы на интервалы, отвечающие приращениям и для  $x$  и для  $y$ . В общем случае шкалы получаются с неравномерными делениями.

Часто следует предпочесть табличное выражение по следующей форме:

$x_1$	$x_2$	$x_3$ .....	$x_{n-1}$	$x_n$
$y_1$	$y_2$	$y_2$ .....	$y_{n-1}$	$y_n$

При этом для одной из переменных обычно выбирают равноотстоящие друг от друга значения.

<sup>1</sup> О. Ласманн. Die Herstellung gezeichneter Rechentafeln. Berlin 1923; М. Pirani. Graphische Darstellung in Wissenschaft und Technik. Sammlung Göschen; М. Mayer. Nomographie des Bauingenieurs. Sammlung Göschen; А. Schoklitsch. Graphische Hydraulik (в русском переводе: Ш о к л и ч, Графическая гидравлика).

Если требуется составить номограмму для двух функций с одной общей переменной, например для  $y = f_1(x)$  и  $z = f_2(x)$ , то можно составить, так же,

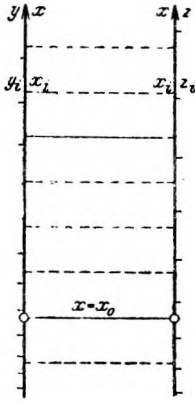


Рис. 270. Тройная шкала для зависимостей  $y = f_1(x)$  и  $z = f_2(x)$ .

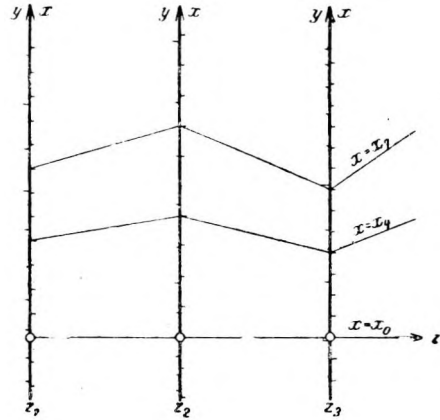


Рис. 271. Номограмма с несколькими двойными шкалами для зависимости  $z = f(x, y)$ .

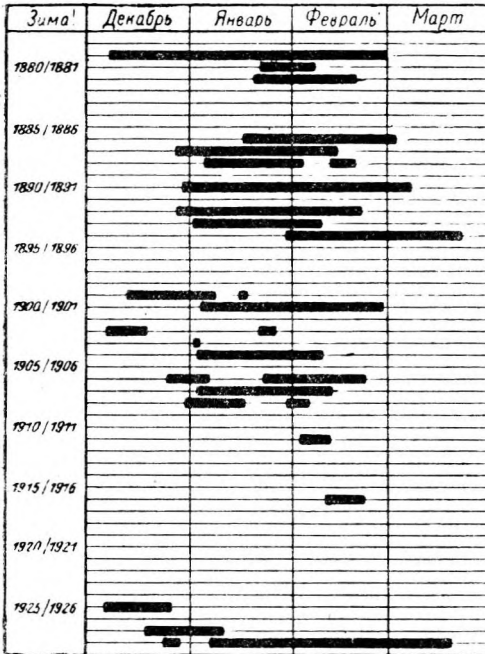


Рис. 272. Синоптическое изображение периодов ледяных затворов на р. Дунае между Регенсбургом и Пассау за годы 1873—1929.

как указано выше, для каждой функции двойную шкалу и, наглядности ради, объединить эти шкалы в тройную шкалу так, как это показано на рис. 270. Для этого выбирают положение для  $x_0$  на обеих шкалах на одной высоте.

Для трехмерных функций  $z = f(x, y)$  с двумя независимыми переменными  $x$  и  $y$  метод изображения при помощи шкал также является применимым и притом в следующей форме.

Пусть значения переменной  $z$  выражаются ординатами  $z_1, z_2, z_3$ , расположенными на расстояниях, соответствующих в произвольно выбранном масштабе значениям этой переменной (рис. 271). На каждой ординате строят двойную шкалу для  $x$  и  $y$ . В заключение можно точки равных  $x$ -ов или  $y$ -ов на всех шкалах соединить между собой отрезками прямых, причем получаются своего рода изолинии, увеличивающие наглядность графика.

**Синоптические графики.** До сих пор рассматривались изображения,

по которым всегда можно было получить числовые значения выраженных графически переменных. Если требуется выразить только наступление, нарастание или убывание какого-либо явления или взаимный ход нескольких явлений во времени, то пользуются синоптическим методом изображения.

Приведенный ниже пример подобного изображения взят из области ледового режима, представляющей значительный интерес для гидротехники, судоходства и для эксплуатации гидростанций. На рис. 272 изображены периоды заторов льда на р. Дунае между Регенсбургом и Пассау, причем отдельные признаки этих заторов, как, например, мощность льда и т. д., во внимание не принимались. Отмечен только самый факт наличия данного явления, и этим дана возможность сравнения условий ледового режима в отдельные наблюдаемые годы.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> K. H e t z e l . Eisbildung und Eisbekämpfung im Donau-Kachlet bei Passau. Wasserkraft und Wasserwirtschaft, H. 13 u. 14, 1929.

## ГЛАВА ТРЕТЬЯ

### ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДАННЫХ НАБЛЮДЕНИЙ И ИЗМЕРЕНИЙ ДЛЯ ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ И ВОДОХОЗЯЙСТВЕННЫХ РАСЧЕТОВ

При помощи математической статистики трудно обозримый материал наблюдений и измерений получает ту наглядную и систематизированную форму, которая делает возможным его дальнейшее использование для вывода общих характеристик и для решения отдельных гидрологических задач. Однако, если уже при приведении в порядок данных наблюдений следует отказываться от их чрезмерной систематизации, то это в гораздо большей степени относится к их использованию для гидрологических и водохозяйственных расчетов, где одна и та же задача часто может быть разрешена различными способами.

Приводимые в дальнейшем исследования и расчеты должны поэтому дать только представление об общих методах их решения. Рассмотрение отдельных задач дается в общих чертах, так как здесь прежде всего обращено внимание на методику и в меньшей степени на установление числовых значений исследуемых величин.

#### I. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РЕЖИМА ОСАДКОВ

**Распределение осадков.** Гидрологическое описание какого-либо района основывается прежде всего на характеристике режима осадков. При этом характеристика их дается за нормальный или средний год и за отдельные характерные годы как для многолетних, так и для коротких периодов.

Распределение осадков в среднем году можно лучше всего изобразить посредством изогипет на гидрологической карте района. В качестве примеров этого приведены на рис. 273 карта изогипет мира, а на рис. 274 карта изогипет Германии.

Из первой карты видно, что максимальное до сих пор наблюденное количество осадков выпадает в районе Гималайских гор. Юго-западный муссон приносит из Индийского океана огромные массы испарившейся влаги, которая в большей части выпадает на южных склонах этих гор, доводя здесь годовое количество осадков до 16000 мм. Другие области на земном шаре, как, например, Сахара и внутренние районы Австралии, напротив, почти лишены осадков.

Карта изогипет Германии дает характерную картину распределения осадков, которое определяется высотой местности, направлением горных хребтов и расположением относительно моря.

По данным наблюдений над осадками может быть установлена связь между ними и высотой местности над уровнем моря. Такая связь бывает обычно недостаточно определенной, так как осадки в каждом данном случае обуславливаются еще и особыми местными условиями. Пример зависимости между осадками и высотой местности над уровнем моря приведен для средне-

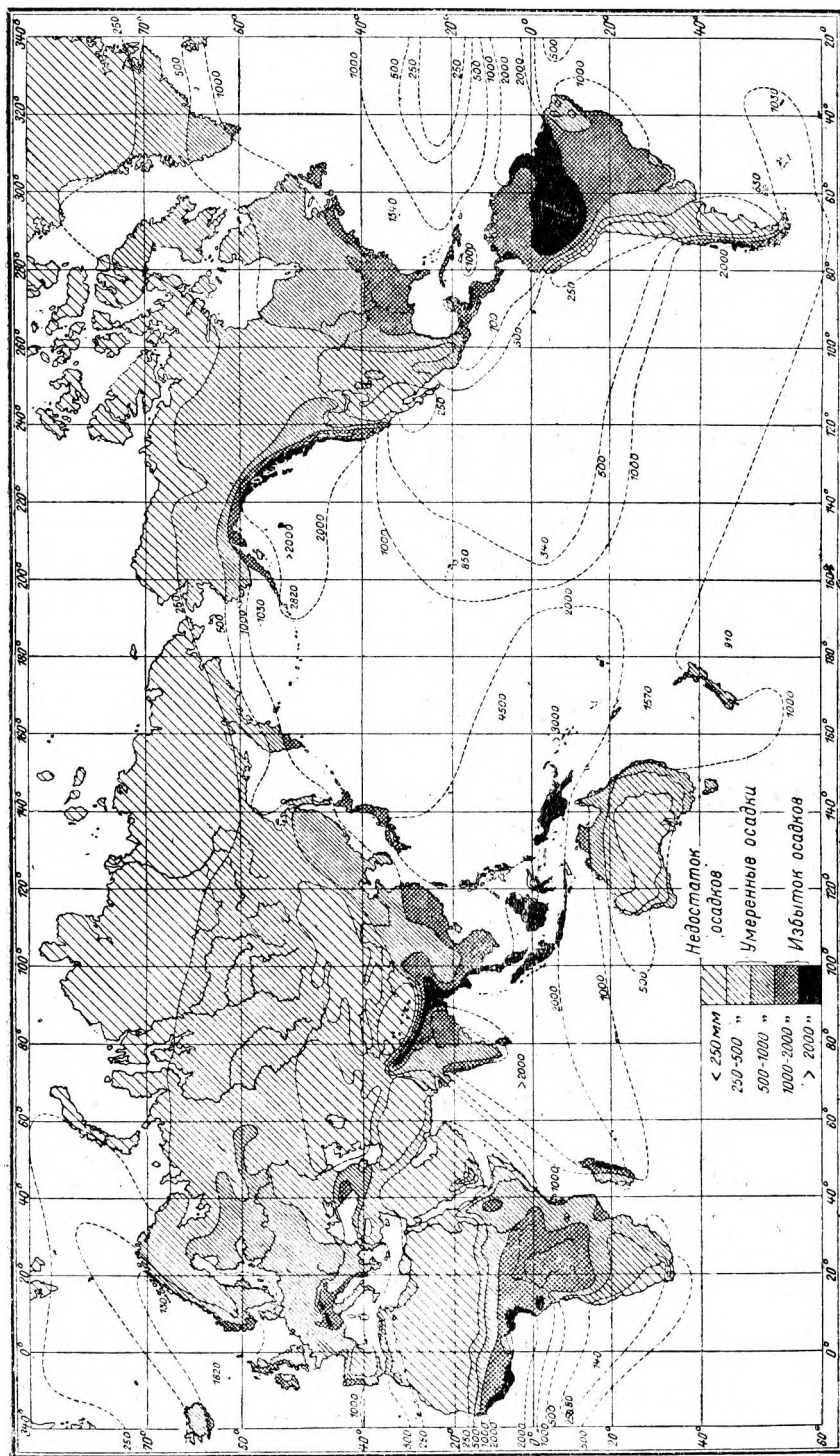


Рис. 273. Карта годовых изогипет мира.

гористого района на рис. 275. Зависимость между высотой слоя осадков  $h_N$  в среднем году (в миллиметрах) и высотой местности над уровнем моря  $A$  (в метрах) выражается здесь прямой с уравнением:

$$h_{N, \text{год}} = 630 + 0,81 h.$$

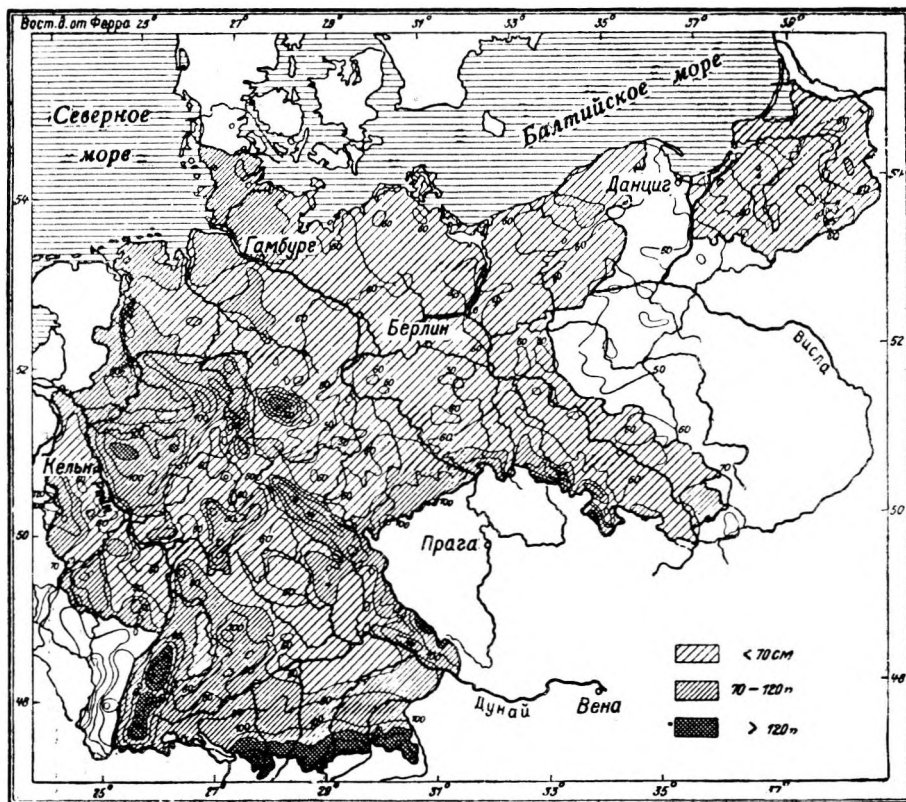


Рис. 274. Карта годовых изогет Германии.

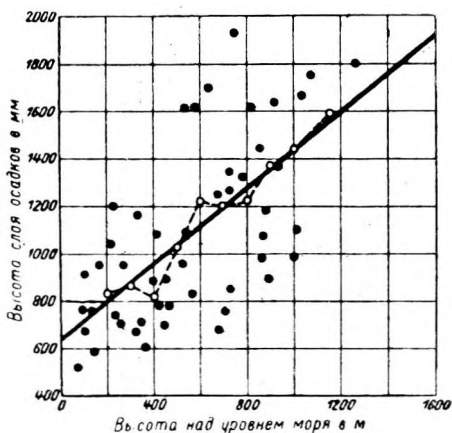


Рис. 275. Зависимость между высотой слоя осадков и высотой местности над уровнем моря в Шварцвальде.

На рисунке точки, соединенные пунктирной линией, означают средние значения высоты слоя осадков для групп станций, различающихся по высоте расположения на 50 м. Отдельные станции дают значительные отклонения, причем те из них, которые расположены на западных и юго-западных склонах, открытых для влагоносных ветров, отклоняются в положительную сторону, а расположенные на противоположных склонах—в отрицательную сторону.

**Анализ ливней.** Чтобы составить полное представление о дожде, вычерчивают карты изогет за короткие, следующие друг за другом, промежуточные времена. По этим картам можно установить те факторы, которые харак-

теризуют данный дождь, а именно—высоту слоя осадков, модуль осадков или их интенсивность и площадь их выпадения.

Подобного рода анализы имеются в виду, в первую очередь, для ливней. Эти дожди обладают по сравнению с затяжными дождями большей интенсивностью при меньшей продолжительности и меньшей площади выпадения.

Ливни наблюдались в самых различных местах на земном шаре.

Районы с большей повторяемостью ливней располагаются на так называемых путях циклонов (рис.

276), хотя вообще говоря ливень может иметь место в любом районе. Отсюда следует важный для гидротехнической практики вывод, что подобного рода исключительные по величине осадки надлежит принимать в расчет также и там, где они до того времени еще не наблюдались.

В табл. 23<sup>1</sup> сопоставлены для некоторых из наиболее сильных ливней, известных до настоящего времени, количество выпавших за ливень осадков, продолжительность и интенсивность ливня.

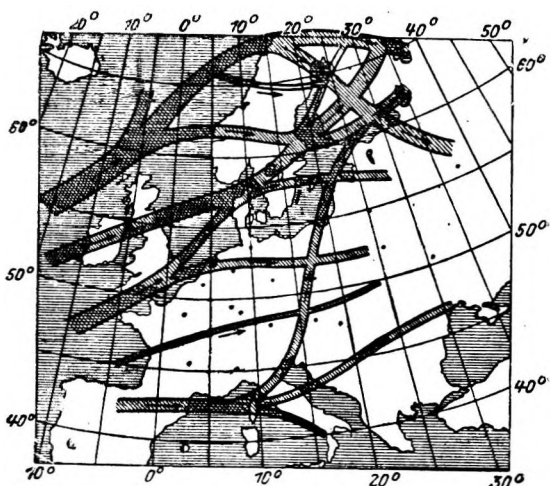


Рис. 276. Пути циклонов в Европе (по Бейберу).

Таблица 23

**Ливни исключительной интенсивности**

Государство	Место наблюдений	Время наблюдений	Количество выпавших осадков, в мм	Продолжительность в минутах	Интенсивность дождя в мм/мин.
Австрия	Крейпец у Виллах Грац	28 V 1904	197	45	4,38
		16 VII 1913	670	180	3,72
		10 VIII 1915	650	120	5,42
Восточная Пруссия	Авейден	1 VIII 1896	17,4	5	3,48
		4 VIII 1895	23	5	4,60
Западная Пруссия	Вильдунген	1 VIII 1876	134	100	1,34
Бавария	Баннвалдзе у Фюсена	25 V 1920	126	8	15,75
Швейцария	Базель	28 VII 1896	22,3	5	4,46
Румыния	Куртеа де Аргес	7 VII 1899	205	20	10,20
Южная Африка	Буловайо	—	356	15	23,73
Южная Калифорния	близ Лос-Анжелоса	5 IV 1926	26	1	26,00
Панама	Порто-Белло	20 IX 1911	63	5	12,60

Для подробного анализа ливней необходимо знать также относящиеся к ним площади выпадения осадков. Размеры этих площадей установлены только в очень немногих случаях, так как для этого требуется наличие густой сети дождемеров, а эта последняя может оказаться как раз в местах выпадения таких необычайных дождей только в виде исключения. Изменение выпадения осадков во времени может быть установлено особо точно только посредством дождемеров-самописцев.

Случалось, что указанные условия имелись налицо; так было, например, в Нюрнберге во время ливня 3 июля 1914 г. Подробная запись ливневого

<sup>1</sup> Таблица приводится в сокращенном виде. (Прим. пер)



процесса позволила подойти к ответу на вопрос о распространении осадков определенного количества, об их интенсивности и продолжительности. По составленным для этого ливня картам изогиет были путем планиметрирования определены частные площади выпадения осадков, относящиеся к определенным средним территориальным значениям высоты слоя осадков. На основании данных о площади, высоте слоя осадков и продолжительности дождя определяется важная для гидротехнической практики величина модуля осадков. Относительно большое число дождемеров-самописцев позволило в указанном случае произвести исследование для отдельных фаз ливня и получить связь между площадью, модулем и продолжительностью осадков, изображенную на рис. 277.

Если такому рассмотрению подвергнуть данные многолетних наблюдений, то можно осадки равной интенсивности или величины модуля расположить по числу их выпадений, то есть по их повторяемости или частоте. Этим устанавливается основа для предсказания ожидаемой величины осадков. Подобные предсказываемые значения, хотя они и носят характер только вероятных значений, представляют для гидротехники большой интерес. Приведение, наряду с величиною модуля осадков, также и их повторяемости особенно важно в тех случаях, когда речь идет о сооружениях, для которых расходы на увеличение их размеров превышают возможные убытки при меньших расчетных размерах. Подобные соображения применяются на деле прежде всего при расчете осушительных систем, где канализационную сеть обычно рассчитывают не на максимальные ожидаемые осадки, а на такое их количество, повторяемость которого в году составляет от 1 до 3 раз.

Установление связи между модулем, продолжительностью и частотой осадков возможно на основании указанных выше правил графической статистики. Ряд наблюдаемых величин, относящихся к совокупности — осадки в какой-либо определенной местности, — имеет в данном случае оба признака: модуль осадков  $q_N$  и продолжительность осадков  $t_r$ . Из первоначальной таблицы значений, например из таблицы ливней для города Нюрнберга, получается для периода 1899—1915 гг. двойная корреляционная таблица с  $q_N$  в л/сек и  $t_r$  в мин. (табл. 24).

Таблица 24

Корреляционная таблица ливней в Нюрнберге в период 1899—1915 гг.

Интенсивность осадков в мм/мин.	$q_N$ — модуль в л/сек. с 1 га	$t_r$ — продолжительность осадков, в минутах					
		1—5	6—10	11—20	21—30	31—45	46—60
0,10	16,7	—	—	—	80	64	50
0,21	35,0	121	100	54	33	24	12
0,31	51,7	106	77	40	19	11	7
0,41	68,3	87	57	26	16	7	4
0,51	85,0	74	42	19	11	6	4
0,61	101,7	57	30	14	6	5	2
0,71	118,3	51	22	И	6	2	2
0,81	135,0	36	17	4	5	2	2
0,91	151,7	32	13	4	4	2	2
1,01	168,3	23	8	4	2	2	1
1,21	201,7	13	4	3	1	1	1
1,41	235,0	8	4	1	1	—	—
1,61	268,3	7	3	1	1	—	—
1,81	301,7	4	1	1	1	—	—
2,01	335,0	3	1	1	—	—	—
2,21	368,3	2	1	1	—	—	—
2,41	401,7	1	1	—	—	—	—
2,61	435,0	1	—	—	—	—	—

Хронограмма частоты принимает вид, изображенный на рис. 278. Если, например, решено прорыть такую осушительную сеть, чтобы она была достаточной для отведения расхода воды, вероятность которого в году составляет

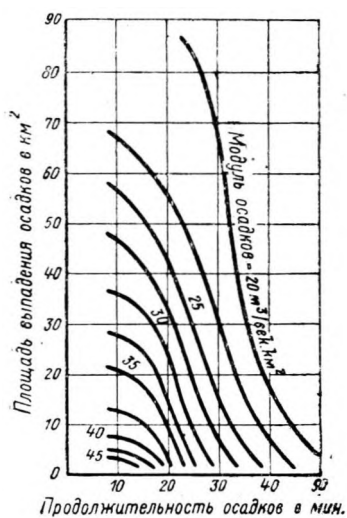


Рис. 277. Зависимость между площадью выпадения, модулем и продолжительностью осадков во время ливня в Нюрнберге 3 июля 1914 г.

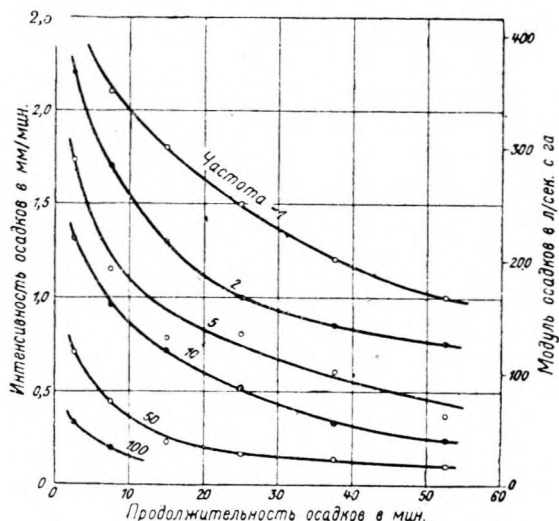


Рис. 278. Хронограмма частот ливней в Нюрнберге за период 1899—1915 г.

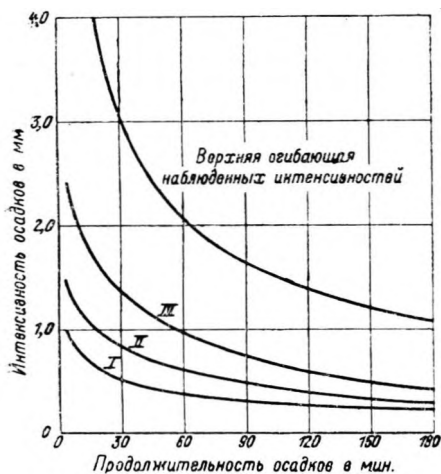


Рис. 279. Классификация ливней в Баварии.

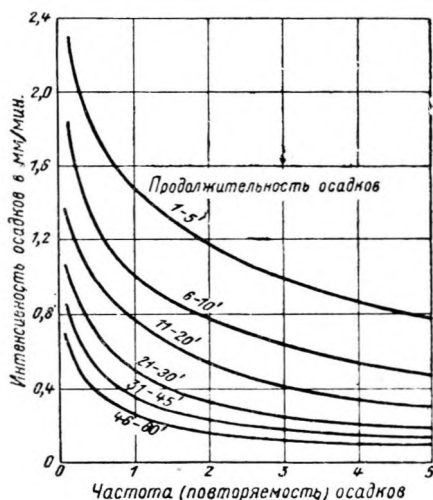


Рис. 280. Зависимость между повторяемостью, интенсивностью и продолжительностью ливней в предгорьях Баварских Альп.

единицу, то получается связь между  $q_N$  и  $t_r$ , которая на рис. 278 выражается кривою связи для частоты 1. Подобные кривые равных частот носят название кривых равных частот дожди равной повторяемости называют хозяйственно равноценными дождями или осадками.

Такого рода анализы дождей производились и для более крупных территорий, чем мелкие объекты осушения. При этом выбирались местности

со сравнительно однородными климатическими условиями. В этом отношении заслуживают внимания работы, проведенные в Баварии. Результаты их изображены на рис. 279 и 280.<sup>1</sup>

Для получения этих данных, действительных только для Баварии, было взято и обработано около 20000 случаев более крупных дождей, наблюдаемых в Баварии в период с 1899 по 1915 год. Прежде всего все наблюдаемые в этом районе ливни были разбиты на группы по интенсивности (рис. 279). Связь между продолжительностью, интенсивностью и частотой осадков, а следовательно кривые, выражающие хозяйственно равноценные дожди, были построены для отдельных районов, внутри которых гидрологические условия

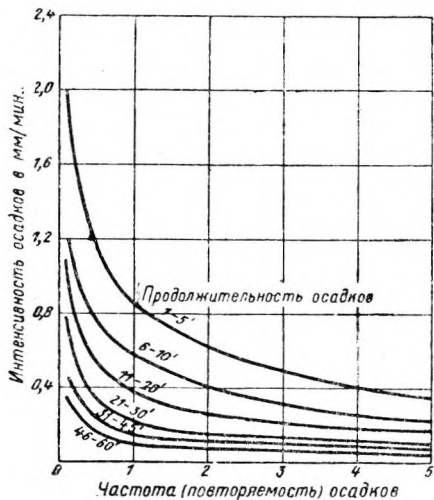


Рис. 281. Зависимость между продолжительностью, интенсивностью и повторяемостью ливней в Баварском Пфальце.

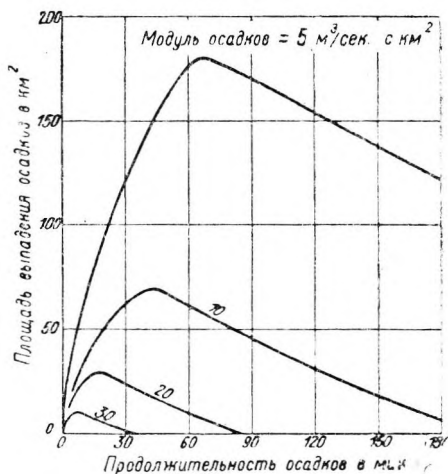


Рис. 282. Зависимость между площадью выпадения, модулем и продолжительностью ливней в Баварии.

относительно однородны (рис. 280 и 281). Зависимость между модулем осадков, их продолжительностью и средней площадью выпадения ливней приведена на рис. 282.

## II. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РЕЖИМА УРОВНЕЙ ВОДЫ РЕЧНОЙ СИСТЕМЫ

### Устойчивость и неустойчивость речных профилей и речных участков.

Использование водомерных данных может привести к неверным результатам, если в период наблюдений русло реки отличалось неустойчивостью и неизвестна степень его изменения. По этим причинам во всех сомнительных случаях обработке водомерных наблюдений должно предшествовать исследование устойчивости рассматриваемого участка реки.

Река, еще не подвергавшаяся никакому регулированию, на которой к тому же не возводилось никаких гидротехнических сооружений, может быть рассматриваема в продолжение коротких промежутков времени как находящаяся в состоянии естественного равновесия. Воздействие, оказываемое на режим реки ее регулированием или иными гидротехническими работами, вызывает нарушение естественного состояния, которое выражается

<sup>1</sup> I. Haeuser. Kurze starke Regenfälle in Bayern, ihre Ergiebigkeit, Dauer, Häufigkeit und Ausdehnung, Abhandlung der Bayerischen Landesstelle für Gewässerkunde, München, 1919.

или в изменении только уровня воды или в изменении также и формы речного русла.

Изменения высоты стояния уровня, вызванные какими-либо искусственными сооружениями, возводимыми на реке, обычно могут быть установлены без особых затруднений. Эти изменения обуславливаются подпором или спадом уровня воды и могут быть вычислены с достаточной точностью, если только известны размеры сооружения, послужившего причиной их возникновения.

По-другому обстоит дело с изменением высоты речного дна и связанным с этим изменением уровня воды. Деформация речного русла недоступна непосредственному наблюдению. Знание абсолютной величины этой деформации и ее формы в рассматриваемом случае и не является обязательным так как, в конце концов, речь идет об изменениях уровня воды. Только в них и следует внести исправления, чтобы сделать их сравнимыми с уровнями, наблюдаемыми до деформации речного дна, и благодаря этому получить возможность включить их в общую обработку водомерных данных.

Поправка на деформацию русла  $\Delta h_p$  может быть положительной или отрицательной, смотря по тому, понизилось или повысилось речное дно (рис. 283). Для сравнимости она должна быть такой величины, чтобы равным расходам воды соответствовали одинаковые отсчеты по водомерному посту. Так, например, под понижением в 15 см понимают, что при определенном расходном режиме реки уровень при первоначальном состоянии русла стоял на 15 см выше, откуда следует, что при настоящем состоянии русла и для той же величины расходов отсчеты по водомерному посту необходимо увеличивать на 15 см, чтобы получить сравнимые уровни.

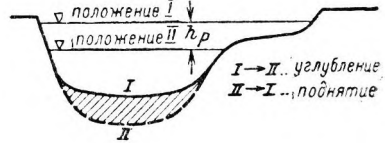


Рис. 283. Деформация русла в поперечном сечении.

Для непосредственного определения поправок на деформацию дна существует ряд способов. Наиболее точный из них основывается на сравнении кривых расходов воды для различных отрезков времени в период развития процесса деформации русла. При описании способов определения расходов воды уже указывалось, что при изменяемости русла реки необходимо время от времени повторять измерения, каждая серия которых должна состояться по меньшей мере из трех измерений, а именно, по одному в пределах низкого, среднего и высокого стояний уровня. Так как при более высоких уровнях изменения русла происходят в более сильной степени, необходимо, в случае весьма точных исследований, производить серию измерений в промежутке между каждыми двумя паводками.

Определение поправок на деформацию может производиться графическим или аналитическим путем, в зависимости от того, имеются ли в распоряжении кривые расходов воды или их аналитическое выражение. Определение графическим путем пояснено ниже на характерном примере, касающемся изменений русла Рейна в створе Базельского поста за период 1867—1925 гг.

Сначала наносят на чертеж полученные кривые расходов воды, в данном случае за годы 1867, 1889, 1908, 1910 и 1925 г. (рис. 284). Если происшедшие изменения отнести к 1925 г., то при их определении надлежит поступать следующим образом: определяют соответствующие одним и тем же расходам воды изменения  $\Delta h_p$ , которые испытал уровень воды в промежутках между исследованными годами. Если, например, расход воды равен  $Q$  и соответствующие ему по кривым уровни равняются  $h_{p, 1867}$ ,  $h_{p, 1889}$ ,  $h_{p, 1908}$  и  $h_{p, 1910}$ , то поправки для отрезков времени 1867—1925, 1889—1925, 1908—1925 и 1910—1925 гг. будут составлять:  $\Delta h_{p, 1867-1925}$ ,  $\Delta h_{p, 1889-1925}$ ,  $\Delta h_{p, 1908-1925}$  и  $\Delta h_{p, 1910-1925}$ . Эти поправки наносят в координатной системе  $h_p$ ,  $\Delta h_p$  и получают в  $A$ ,  $B$ ,  $C$  и  $D$  точки кривых зависимости для поправок на деформа-

цию, происшедшую соответственно с 1867, 1889, 1908 и 1910 по 1925 г. В данном случае эта деформация носит характер понижения. Повторение подобного метода для ряда значений  $Q$  приводит, в конце концов, к серии кривых, выражающих поправки на трансформацию русла.

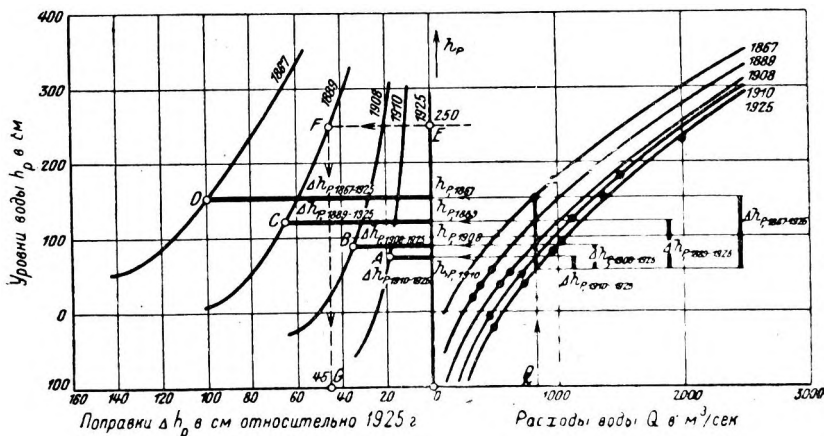


Рис. 284. Определение абсолютных поправок  $\Delta h_p$  Рейна у Базеля за период 1867—1925 гг. при помощи кривых расходов воды.

Применение полученных кривых производится следующим образом: если, например, надлежит, учитывая происшедшие изменения, привести к 1925 г. уровень воды 250 см 1889 г., то линией  $EFG$  определяется величина поправки — 45 см, а вместе с тем и сравнимый уровень 250—45 = 205 см.

Определение поправок аналитическим путем показано ниже на примере с применением уравнений кривых расходов воды для створа водомерного поста Вена-Флорисдорфский мост на Дунае.

Для 1898 г. и соответственно для 1900 г. зависимость расхода воды от уровня выражается с большой степенью приближения следующими уравнениями:

$$Q = 1960 + 7,88h_{P,1898} \quad \text{и} \quad Q = 1597 + 7,12h_{P,1900}$$

где  $Q$  дано в  $\text{м}^3/\text{сек}$  и  $h_p$  в сантиметрах.

Отсюда поднятие дна за период 1898—1900 гг. может быть выражено в следующей форме:<sup>1</sup>

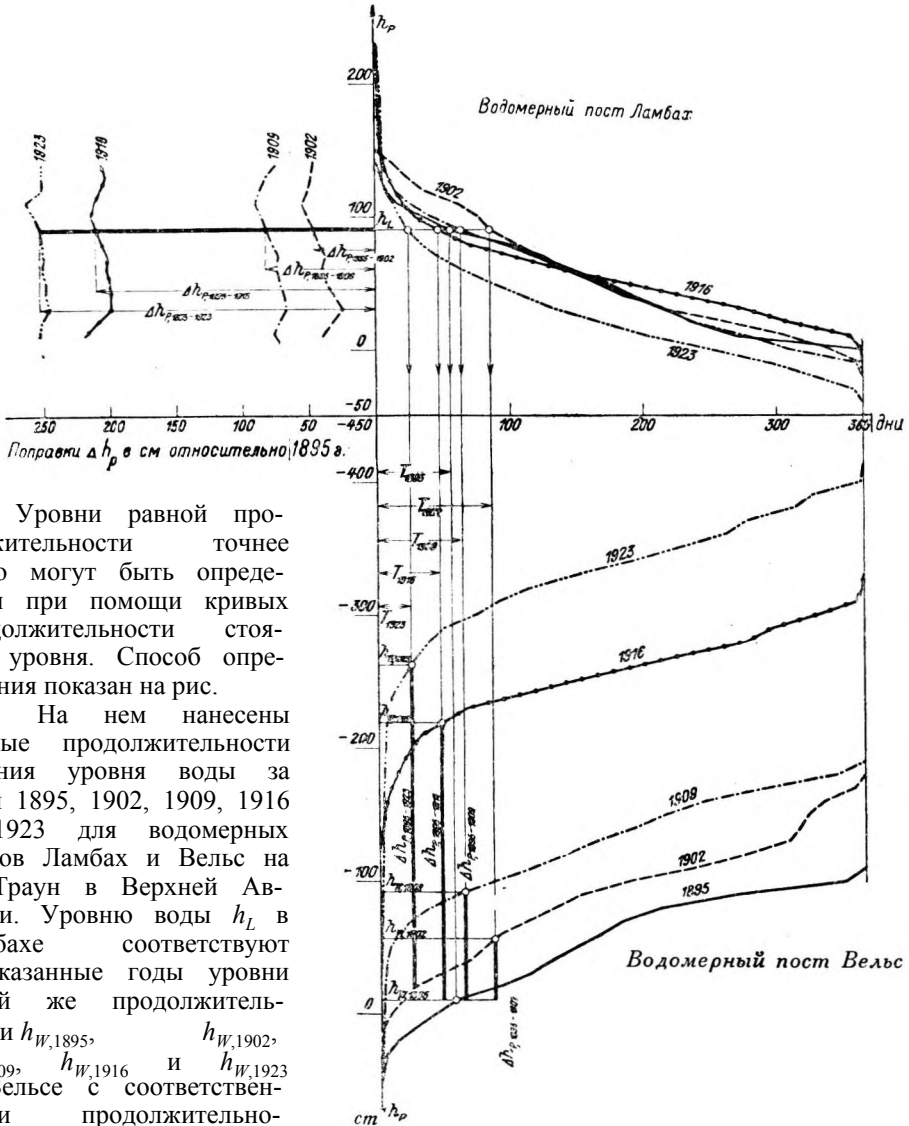
$$\Delta h_{P,1900-1898} = 51 + 0,11h_{P,1898}$$

Согласно этому, уровень 100 см, наблюдаемый в 1898 г., следовало бы, например, увеличить на 62 см, чтобы, учитывая происшедшее поднятие, сделать его сравнимым с соответствующим уровнем 1900 г.

Прочие способы, применяемые для установления поправок на деформацию русла, построены на сравнении данных водомерных наблюдений в исследуемом профиле и в другом, специально выбранном для сравнения. Эти способы, в противоположность способу сравнения по расходам воды, дают, в общем, только относительные значения поправок, которые приближаются к абсолютным значениям в большей или меньшей мере, в зависимости от степени устойчивости русла в выбранном для сравнения профиле. Исследования последнего рода представляют большое преимущество тем, что требуют знания одних уровней, а не расходов воды. Благодаря этому они применяются довольно часто.

<sup>1</sup> Вытекает из равенства  $Q = 1960 + 7,88 h_{P,1898} = 1597 + 7,12 h_{P,1900}$  (Прим. пер.)

Профиль, выбранный для сравнения, и исследуемый профиль должны, разумеется, располагаться на таком участке реки, где нет значительной приточности. Для сравнимости уровней необходимо также учитывать время пробега между профилями. Ясно, что при выборе профиля для сравнения предпочтение, как правило, следует оказывать устойчивому профилю. Если профиль неустойчив, то сначала, пользуясь описанным выше способом, надо определить для него абсолютные поправки на деформацию русла. Само сравнение производится, пользуясь уровнями равной продолжительности.



Уровни равной продолжительности точнее всего могут быть определены при помощи кривых продолжительности стояния уровня. Способ определения показан на рис.

285.<sup>1</sup> На нем нанесены кривые продолжительности стояния уровня воды за годы 1895, 1902, 1909, 1916 и 1923 для водомерных постов Ламбах и Вельс на р. Траун в Верхней Австрии. Уровню воды  $h_L$  в Ламбахе соответствуют в указанные годы уровни такой же продолжительности  $h_{W,1895}$ ,  $h_{W,1902}$ ,  $h_{W,1909}$ ,  $h_{W,1916}$  и  $h_{W,1923}$  в Вельсе с соответственными продолжительностями стояния  $T_{1895}$ ,  $T_{1902}$ ,  $T_{1909}$ ,  $T_{1916}$  и  $T_{1923}$ . В результате получают следующие относительные поправки на деформацию русла в профилях Ламбах и Вельс, считая с 1895 г.:

Рис. 285. Определение относительных поправок  $\Delta h_p$  р. Траун у Вельса за период 1895 — 1923 гг. при помощи кривых продолжительности стояния уровня.

<sup>1</sup> F. D ü l l . Die Auswertung von Pegelbeobachtungen. Die Bautechnik, H. 20, 1927.

$$\begin{aligned} \Delta h_{P,1895-1902} &= h_{W,1902} - h_{W,1895}, \\ \Delta h_{P,1895-1909} &= h_{W,1909} - h_{W,1895}, \\ \Delta h_{P,1895-1916} &= h_{W,1909} - h_{W,1895}, \\ \Delta h_{P,1895-1923} &= h_{W,1923} - h_{W,1895}. \end{aligned}$$

Соответственные уровни кривой связи уровней можно с достаточной степенью точности рассматривать как уровни равной продолжительности. Поэтому можно определять поправки при помощи кривой связи уровней. Этот способ отличается большой простотой и позволяет, как показывает приводимый ниже пример, даже при незначительных деформациях, устанавливать их величину.

Для ряда водомерных постов на Дунае у Вены были построены кривые связи уровней с водомерным постом в Цвентендорфе, где русло в створе

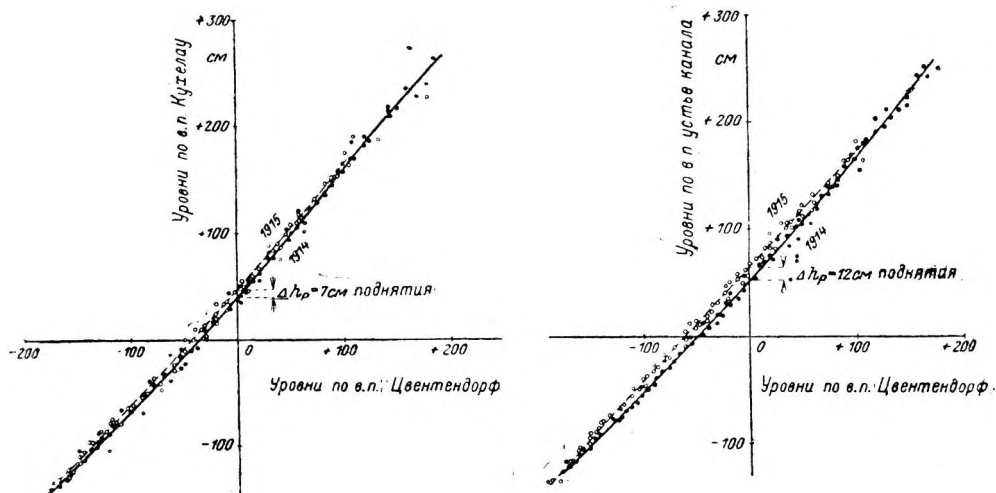


Рис. 286. Определение относительных поправок  $\Delta h_p$  на деформацию русла для Дуная у Вены при помощи кривых связи между уровнями на водомерных постах.

поста является устойчивым. На рис. 236 приведены кривые связи Цвентендорф—Кухелау и Цвентендорф—устье канала для 1914 и 1915 гг. Они дают ясное представление о направлении деформации, несмотря на незначительность ее величины, и подтверждают тем самым возможность пользования указанным способом. Если таким образом проанализировать профили всех водомерных постов, расположенных на каком-либо участке реки, то, как показывает рис. 287, деформация речного участка может быть изображена наглядным образом. В данном случае из рисунка видно, что с 1914 до 1915 г. дно Дуная между Цвентендорфом и Фишамендом в общем повысилось, и наибольшее поднятие в 12 см имело место в створе водомерного поста—устье канала.

Способ сравнения уровней может быть видоизменен и тем самым упрощен путем сравнения низких уровней. В речной гидротехнике он употребляется уже давно; при помощи съемки продольных профилей свободной поверхности воды при низких уровнях получают картину развития процессов деформации регулируемых или свободно формирующихся участков реки.

Наконец, можно упростить задачу настолько, что вообще отказаться от сравнительного профиля и ограничиться сравнением между собою в исследуемом профиле низких уровней за последовательный ряд лет. Здесь полу-

чается приближение к первому из указанных выше способов, поскольку средним низким уровням (за более или менее длительные отрезки времени) отвечают, примерно, одни и те же величины расходов воды. Таким образом получаются, следовательно, приближенные абсолютные значения поправок на деформацию.

Последний прием установления деформации подробнее поясняется ниже на примере р. Траун в Верхней Австрии (рис. 288). На рис. 289 приведены годовые низкие уровни на водомерных постах Ламбах, Вельс и Эбельсберг. Из их сопоставления видно, что деформация русла в створах отдельных постов в период с 1850 по 1902 г. развивалась различным образом. Проведенные на-глаз сглаженные кривые колебания низких уровней позволяют (в отдельности для каждого поста) сделать следующие выводы.

На водомерном посту Ламбах наблюдается скачок сглаженной кривой в 1874 г. Так как ни до этого года ни после него не было никакой деформации, то указанный скачок может быть объяснен только искусственным воздействием. Фактически причина этого действительно заключается в перестановке рейки, в результате чего нуль ее опустился на 30 см, каковая величина получается и непосредственно из рис. 289а.

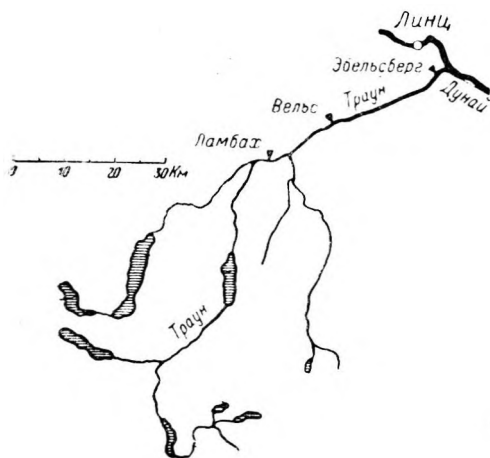


Рис. 288.

Затем наступило поднятие, продолжавшееся до 1891 г., после чего последовало углубление, еще не закончившееся к 1902 г. (рис. 289, с).

Способ сравнения при помощи низких уровней отличается известной ненадежностью, вследствие неравенства расходов воды, относящихся к отдельным периодам с низким стоянием уровня. Эту ненадежность стремятся уменьшить, исследуя наряду с графиком колебания годовых низких уровней еще и графики средних и высоких уровней (рис. 289), и, наконец, ход средних годовых величин осадков в бассейне. Если графики уровней обнаруживают одинаковый характер колебаний, а ход годовых величин осадков складывается по-иному, чем на графиках уровней, то можно с достаточной точностью принять, что изменения, получающиеся из графиков уровней, следует относить за счет деформаций русла, а не за счет климатических колебаний.

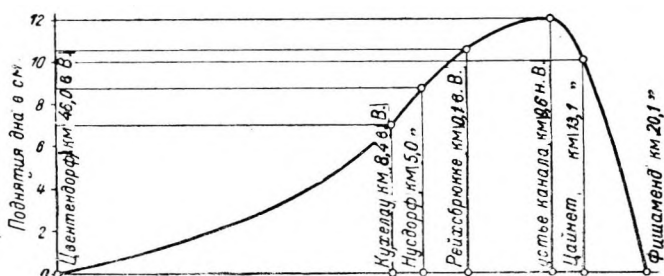


Рис. 287. Поправки на деформацию русла Дуная в 1914 г. на участке между Цвентендорфом и Фишамендом относительно уровня воды  $\pm 0$  на водомерном посту Цвентендорф.

На водомерном посту Вельс до 1883 г. нельзя констатировать сколько-нибудь значительной деформации, а следовательно, река находится в состоянии равновесия (рис. 289, б). Начиная с 1883 г. наступает быстро прогрессирующее углубление русла, которое к 1902 г. дошло приблизительно до 160 см. Эта деформация была вызвана работами по регулированию р. Траун.

В створе водомерного поста Эбельсберг река находилась до 1873 г. в состоянии равновесия.



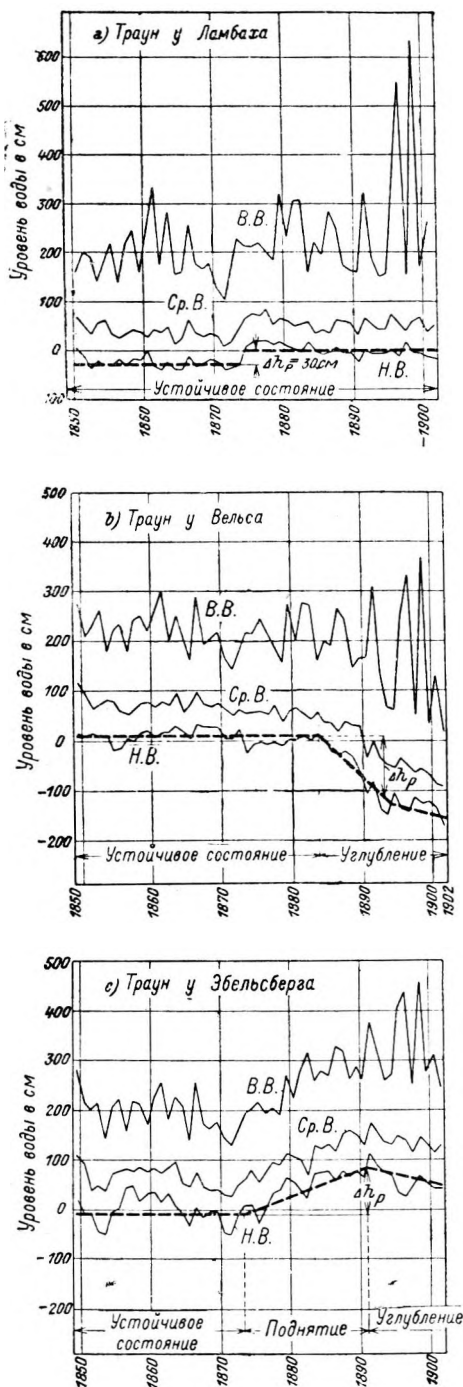


Рис. 289. Определение относительной поправки на деформацию русла р. Траун у Ламбаха, Вельса и Эбельсберга.

**Изображение режима уровней при установившемся движении.** Если вопрос ставится об изображении на каком-либо участке реки только устойчивых уровней воды, наблюдающихся в периоды длительного стояния низких вод зимой или летом или в виде непродолжительных по времени высоких уровней на гребне паводковых волн, причем представляется возможным не рассматривать всех относящихся к неустановившемуся движению переходных уровней,—то достаточно иметь график в том виде, как он изображен на рис. 290.<sup>1</sup>

Реки на этом рисунке изображены схематически в виде вытянутых в длину линий с нанесенными на них пунктами водомерных постов  $P$  (рис. 290, с). Далее, на чертеж нанесены уровни выбранных устойчивых низких и высоких вод, наблюдаемые на водомерных постах  $P_1, P_2, \dots$  главной реки и  $P_1, P_2, \dots$  притока (рис. 290, а). Нули этих постов (реек) располагаются на оси  $x$ -ов. Линии  $L''$ ,  $L_1'' \dots$  и соответственно  $L_1', L_2' \dots$  представляют продольные профили уровня воды (не приведенные к одной плоскости. — Прим. пер.) главной реки и притока. Так как отметки нулей постов (реек) известны, то тем самым дано взаимное высотное положение уровней.<sup>2</sup>

Такое изображение высоты уровня воды требует для полного описания режима еще одного дополнения, относящегося к неодновременности наступления соответственных уровней, причем в данном случае это понятие равнозначит с временем пробега частиц воды. На рис. 290, б, нанесены кривые пробега уровней главной реки  $L_1', L_2' \dots$ , и притока  $L_1', L_2' \dots$ ,  $\tan \alpha$  и  $\tan \beta$  углов наклона этих линий дают быстроту передвижения уровня вдоль по реке, которая в данном случае равна средней скорости течения. Таким образом по наклону кривых пробега можно судить о величине скорости течения и, кроме того, что имеет особое практическое значение, сразу определять, какие пункты на главной реке и на притоках обладают одинаковым временем пробега. Действительно, из чертежа непосредственно видно, что пункты  $A$  и  $B$

<sup>1</sup> G. L e m o i n e et A. de P r é a u d e a u . Etude sur les eues de l'hiver 1882—1883 dans le bassin de la Seine. Annales des ponts et chaussées, 1883.

<sup>2</sup> И, следовательно, могут быть построены продольные профили уровня воды на водомерных постах  $P_1, P_2, \dots$  и  $P_1, P_2, \dots$ , приведенные к одной плоскости. (Прим. пер.)

удовлетворяют этому условию для уровней  $h_{P,a}$  и  $h_{P,b}$  (рис. 290, а), которые поэтому называются уровнями равного времени пробега.

### Изображение режима уровней при неустановившемся движении.

Изображение режима уровней при неустановившемся движении строится на основе анализа графиков колебания уровня воды и получает затем наглядное выражение подобно тому, как при установившемся движении.

Анализ графиков имеет целью выявление отдельных фаз в годовом ходе уровня, а также их распределение по основным видам, что способствует правильной оценке гидрологического характера речного бассейна.

Принято говорить вообще о некотором изменении уровня воды  $h_P'' - h_P'$  за промежуток времени  $\Delta t$ .

Разность между наивысшим и наименьшим уровнем воды за гидрологический год принято называть годовой амплитудой колебания уровня воды.<sup>1</sup>

Величина  $\text{tg } \alpha = \frac{h_P'' - h_P'}{\Delta t}$  дает интенсивность изменения уровня, которая на всех естественных водотоках на подъеме значительно больше, чем на спаде. На пиках графика, а также для устойчивого уровня воды,  $\text{tg } \alpha$  равен нулю.

При детальном рассмотрении отдельных подъемов уровня на графике, можно подразделить колебания на отдельные резко различные участки (рис. 291).<sup>2</sup> За устойчивым уровнем воды, который продолжается до момента времени  $t_1$ , следует до  $t_2$  подъем уровня сравнительно слабой интенсивности  $\text{tg } \alpha_1$ , затем до  $t_3$  подъем большей интенсивности  $\text{tg } \alpha_2$  и, наконец, после перехода через пик — спад с постепенно убывающей интенсивностью  $\text{tg } \alpha_3$ . Эти отдельные фазы колебания уровня получаются как результаты воздействия на процесс стока со стороны проницаемой подпочвы. В период времени между  $t_1$  и  $t_2$  осадки частично просачиваются в почву и, после насыщения последней, к моменту  $t_2$  начинается полный поверхностный сток. После момента времени  $t_3$  — прекращения основного процесса выпадения осадков — сток с поверхностного водосбора убывает, отдача со стороны грунтовых вод начинает преобладать и становится, в конце концов, единственным источником, питающим данный водоток. Слабые подъемы уровня на спаде являются показателями последующих небольших дождей.

Сравнение графиков колебания уровня на реках, принадлежащих к бассейнам с различными климатическими условиями, или подвергаю-

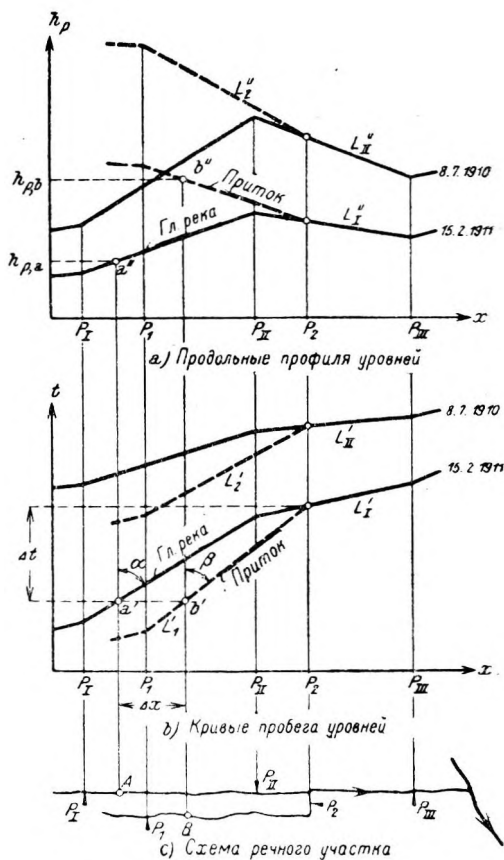


Рис. 290. Изображение режима уровней при установившемся движении.

<sup>1</sup> Как показывают данные по австралийским рекам, годовая амплитуда может достигать 40 м.

<sup>2</sup> J. K o z e n y . Die Wasserführung der Flüsse. Leipzig 1920.

щихся на своем пути влиянию естественных или искусственных подпоров, обнаруживает типичное и своеобразное строение этих графиков в различных случаях.

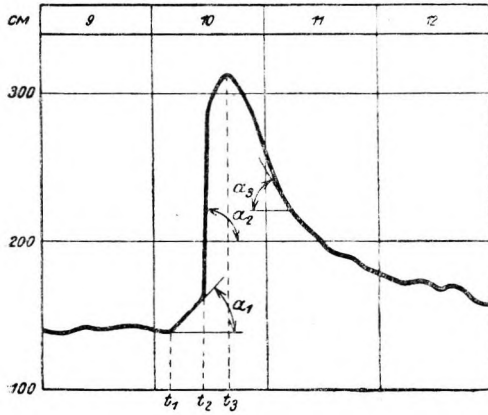


Рис. 291. Дождевой паводок на р. Силь у Сильбругга в Швейцарии в сентябре 1913 г.

Горные реки, которые обязаны своим стоком, в первую очередь, таянию глетчеров и снега, т. е. влиянию температуры воздуха, дают резко выраженные летние подъемы и зимние низкие стояния уровня. На рис. 292, на примере р. Рейс у Зедорфа в Швейцарии, ясно обнаруживается зависимость модуля стока от температуры воздуха у источников питания реки.

Реки переходных типов от горных к равнинным, не имеющие в своем водосборе глетчеров, не обнаруживают подобного единообразного ритма колебаний. Хотя в отдельные гидрологические годы график, в общем и целом остается по своей форме двугорбым, что отвечает весеннему таянию снегов и осенним

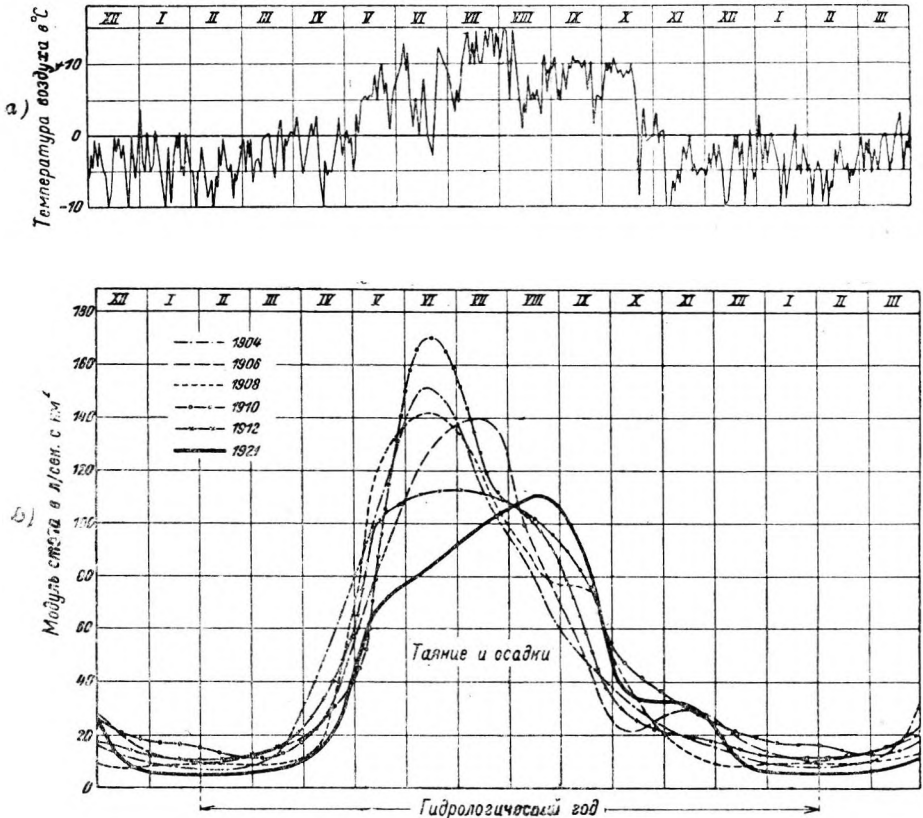


Рис. 292. Хронологические графики модуля стока горной реки.

a) хронологический график средней температуры на Готтард-Хоспиц в 1921 г.; b) хронологические графики средних пятидневных модулей стока: Рейс у Зедорфа в Швейцарии.

дождям, однако, при сравнении между собою ряда лет, не наблюдается такой закономерности в сроках наступления подъемов и спадов, как у горных рек (рис. 293). Производитель строительных работ может быть здесь застигнут паводком в любое время года, так как уровни рек с водосбором переходного типа (без ледникового питания) зависят, в первую очередь, от осадков. Река Тур в Швейцарии дает вполне ясную картину подобного рода режима.

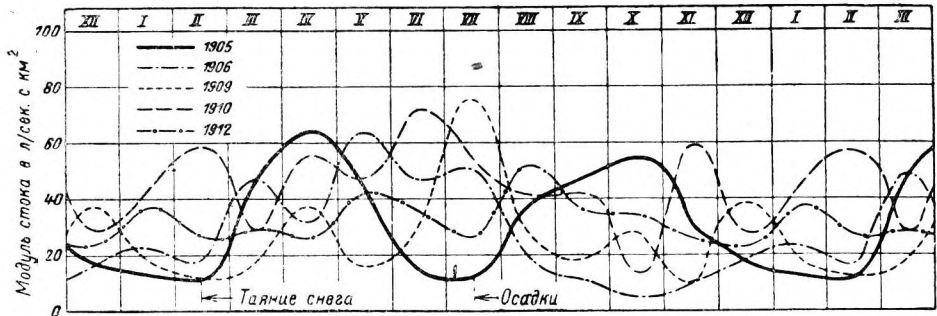


Рис. 293. Хронологические графики модуля стока реки переходного типа. Тур у Гросандельфингена в Швейцарии.

На реках жаркого пояса высокие воды проходят с большой закономерностью и сосредоточенно во времени, так как периоды дождей очерчены там весьма резко. Характерным примером таких рек является Нил, графики

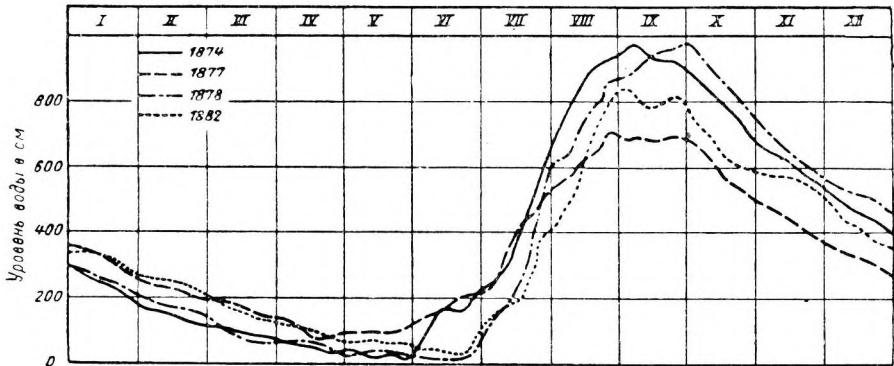


Рис. 291. Хронологические графики колебания уровня воды тропической реки. Нил у Ассуана.

колебания уровня которого приведены на рис. 294. На реках с быстрым нарастанием паводка, как, например, на реках о. Явы, интенсивность изменения уровня воды может быть очень велика (рис. 295).<sup>1</sup>

Процесс оттаивания глетчеров, фирнового льда и горных снегов сопровождается своего рода приливами и отливами стока, а именно — равномерным нарастанием его в часы перед полуднем и убыванием в послеполуденные часы (рис. 296). Чем дальше вверх по реке выдвинуты водомерные посты, тем больше односрочные наблюдения уровня отклоняются от средних суточ-

<sup>1</sup> Fh. Forchheimer. Hydraulik. Leipzig 1930.

ных его значений. Поэтому в интересах водного хозяйства, основывающего свои расчеты на водомерных данных, рекомендуется в подобных случаях

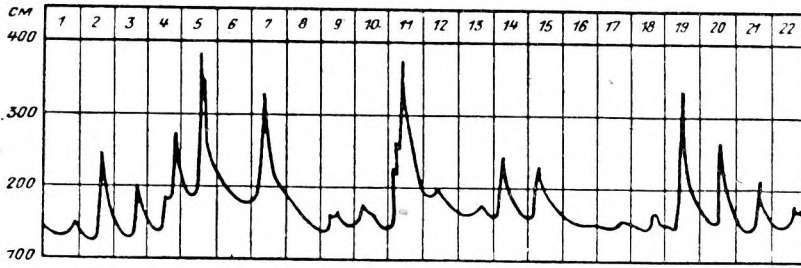


Рис. 295. Хронологический график колебания уровня р. Тьи-Антен у Кратьяк на о. Ява в сентябре 1917 г.

пользоваться лимниграфами или, по меньшей мере, наблюдать уровень по несколько раз в день.

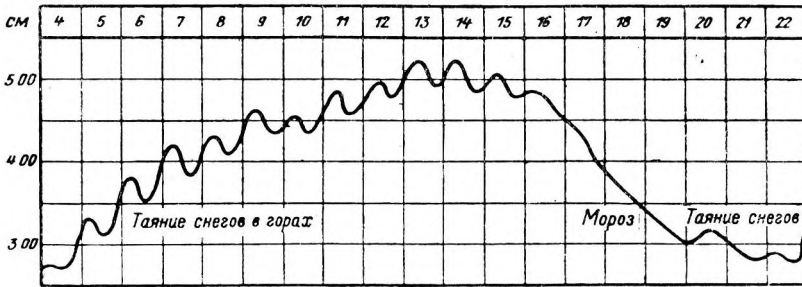


Рис. 296. Подъемы талых вод р. Зальцах у Лауфена в мае 1907 г.

Временные сужения русла в створе водомерного поста, происходящие в результате явлений естественного характера, часто служат причиной зна-



Рис. 297. График колебания уровня воды р. Инн у Вернштейна во время затора льда в январе 1905 г.

чительных искажений уровня. В силу этого уровни должны время от времени подвергаться специальному исследованию, чтобы иметь возможность учесть их влияние на подсчеты стока. К указанным явлениям относятся изменения поперечного сечения, вызванные зарастанием русла, всякого рода заилием и, главным образом, заполнением льдом. Лед в странах умеренного пояса вызывает посредством заторов только кратковременные нарушения режима, в то время как в странах, расположенных севернее, ледостав может захватывать весь зимний период.

График колебания уровня при ледяных заторах (пробках) отличается исключительно характерными признаками. На рис. 297 изображен ход уровня при ледяном заторе на р. Инн. Затор образовывался сначала постепенно, в течение времени с 18 ч. 16 января до 12 ч. 18 января, причем голова его за это время продвинулась (с некоторыми перерывами) от Вернштейна на 11 км вверх по течению. 18 января в 15 ч. последовало внезапное под-

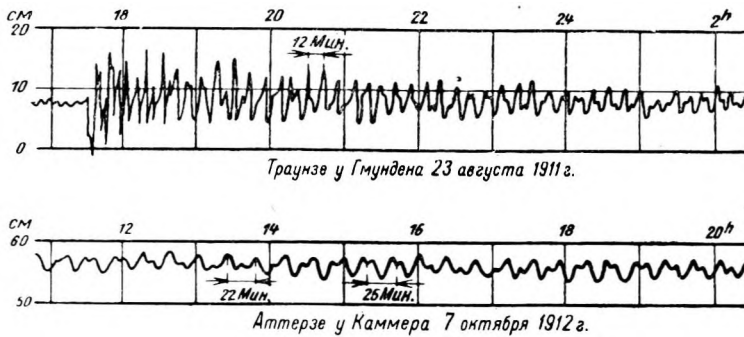


Рис. 298. Колебания уровня воды на озерах.

нятие поверхности льда больше чем на метр, затем в 17 ч. наступил пролив, вызвавший на короткое время такой же силы понижение уровня, непосредственно после чего наступило вновь поднятие. 19 января, примерно,

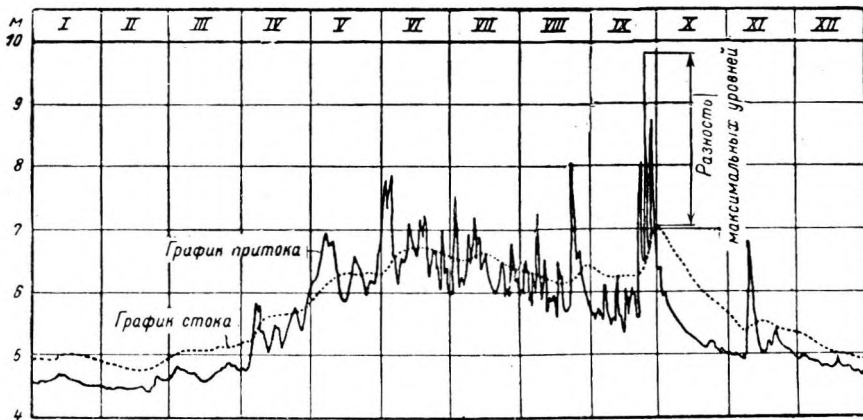


Рис. 299. Аккумуляция паводков в больших озерах. График колебания уровня Рейна до и после Боденского озера в 1927 г.

в 0 ч., началось (вследствие наступления оттепели) рассасывание затора, и в 18 ч. Инн очистился от льда.

К явлениям естественного порядка, оказывающим воздействие на уровень, должны быть также отнесены периодического характера колебания уровня на озерах, так называемые сейши (рис. 298). Они вызываются разностью атмосферного давления, которая при водных поверхностях большого протяжения может проявляться с такой силой, что вода выводится из состояния покоя и приходит в колебательное движение.

Одно из наиболее резких преобразований в ходе уровня вызывает аккумуляция стока в больших озерах (рис. 299). Вместе с величиною аккумуляруемых объемов увеличивается смягчение (срезка) пиков уровня, что имеет большое значение для водного хозяйства, во-первых — с точки

зрения гашения паводков и, во-вторых, в отношении увеличения низких расходов, а вместе с тем и уровней воды на ниже расположенных участках рек.

Высота стояния уровня воды в озере, испытывает, правда, годовые колебания, однако ритм этих колебаний может быть ясно представлен при помощи средних и крайних значений. На рис. 300 дано подобное изображение

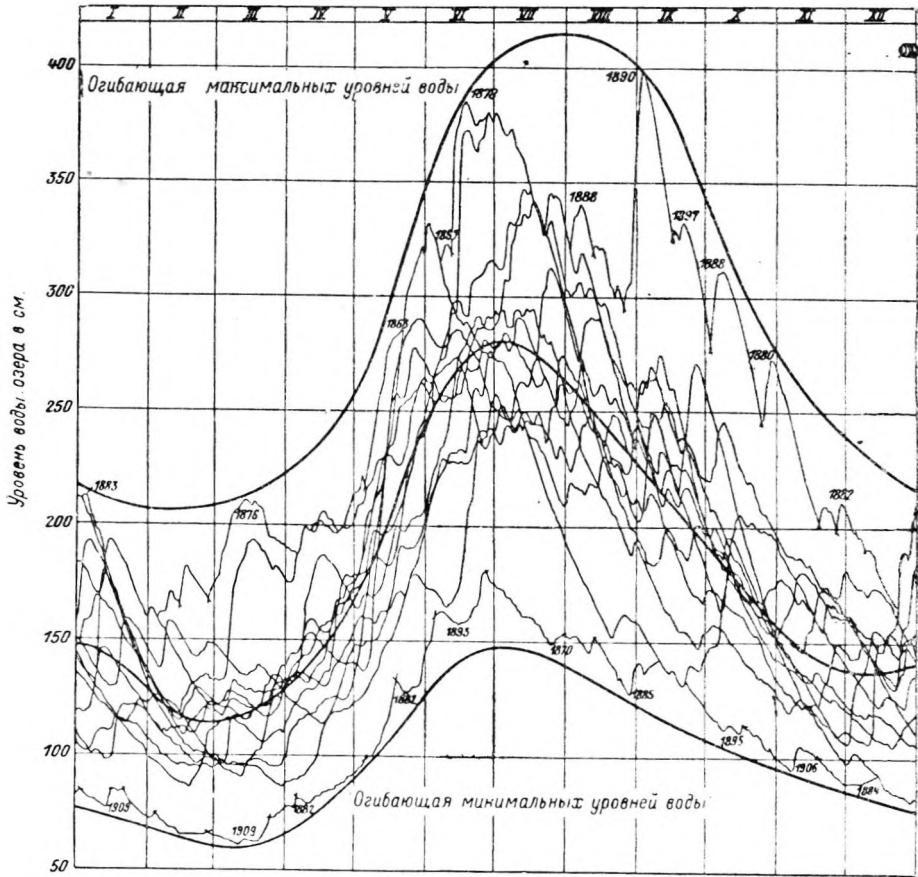


Рис. 300. Графики колебания уровня Боденского озера за 1910—1920 гг. График средних календарных уровней и огибающие экстремальных уровней за период с 1867 г.

ние для Боденского озера—водоема с незарегулированным стоком. Оно показывает, что график календарных средних значений и огибающие максимальных и минимальных уровней, то есть линии вероятных крайних значений, обладают одинаковыми периодами.

Искусственное воздействие на уровень воды оказывают все действующие водохозяйственные объекты. Гидросиловые установки забирают из водохранилищ рабочие расходы воды в соответствии с меняющейся нагрузкой и отдают их реке в тех же величинах и последовательности. Тем самым оказывается влияние на уровень воды не только в водохранилище, но также и в реке, причем прежде всего на участке ее ниже гидростанции. В зависимости от величины водохранилища и характера работы установки получают различные и весьма характерные графики колебания уровня, например, смотря по тому, производится ли годовое, сезонное, недельное (рис. 301) или.

суточное регулирование, или установка служит только для снятия пиков с графика нагрузки (рис. 302).

Условия режима уровня на каком-либо участке реки могут быть также представлены в едином изображении, если правильно видоизменить изложенный выше прием, применимый к условиям установившегося движения. Изоб-

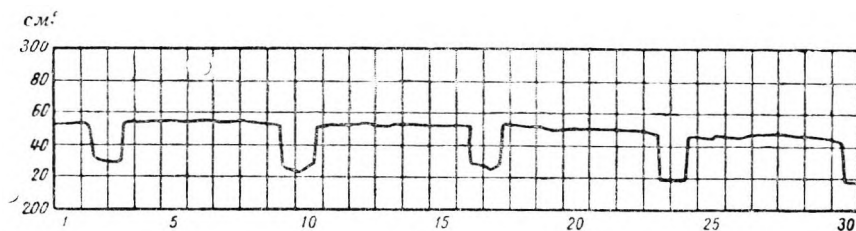


Рис. 301. Недельное регулирование в целях использования водной энергии. Хронологический график колебания уровня на одной из швейцарских рек в створе ниже силовой установки за ноябрь 1929 г.

ражение полного хода уровня, включая и переходные уровни воды, как для главной реки, так и для ее притоков, может быть дано в достаточно наглядной форме, если плоскости, в которых должны были бы лежать графики колебания уровня при пространственном изображении и которые по рис. 290

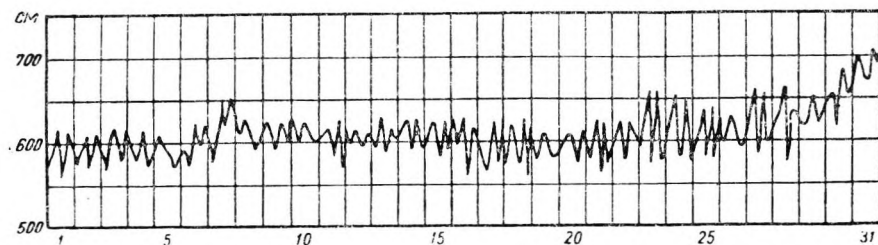


Рис. 302. Регулирование в целях снятия пиков с графика нагрузки. Хронологический график колебания уровня р. Роны у Шанси-Пуаньи в мае 1927 г.

предполагаются перпендикулярными к плоскости чертежа  $h_p, x$ , повернуть на угол  $\delta$  и затем представить себе графики спроектированными на плоскость  $h_p, x$ . Хронограмма получает, благодаря такому повороту ординаты времени, косоугольную систему координат.

Пример графического изображения хода одного паводка в бассейне Рейна, представленный на рис. 303, позволяет лучше всего ознакомиться с особенностями такого способа изображения. На рис. 303, а, изображены сплошными линиями графики колебания уровня для водомерных постов  $P_a, P_b, P_c$  и  $P$  главной реки и пунктирными линиями—для водомерных постов  $P_r$  и  $P_s$  притока. Если теперь спроектировать на рис. 303, б, с графиков пики  $a_3'', b_5'', c_2''$  и  $d_5''$ , то соединение полученных таким способом точек  $a_3', b_5', c_2'$  и  $d_5'$ <sup>1</sup> даст кривую пробега соответственных пиковых уровней главной реки. Подобным же образом получают кривые пробега прочих уровней, например, начальных точек подъема и точек промежуточного пика на графиках главной реки и притока. По кривым пробега, по времени пробега и пройденному отрезку пути можно получать быстроту передвиже-

<sup>1</sup> Точки  $a_3', b_5'$  и другие получаются на пересечении отвесных линий, проведенных из точек  $a_3'', b_5''$  и т. д., с осями времени  $a'—a_4', b'—b_6'$  и т. д. (Прим. пер.)



ния данного уровня. Так, например, для пика и для участка реки  $P_a - P_b = \Delta l$  время пробега равно  $\Delta t$  и быстрота  $\Delta l / \Delta t$ . Следовательно, и при данной форме изображения наклон кривых пробега служит мерой для быстроты передвижения уровней.

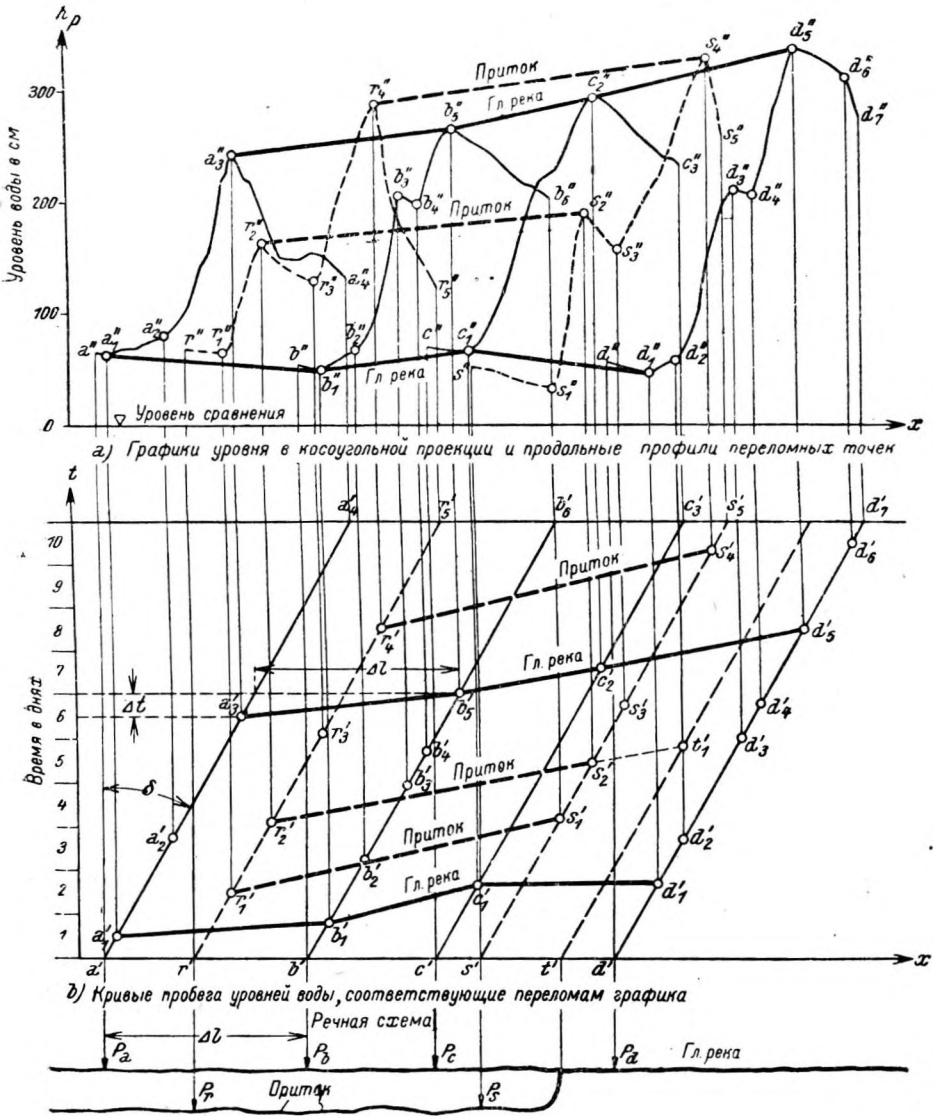


Рис. 303. Изображение режима уровня при неустановившемся движении воды (по Тейку).

Классификация характерных уровней. Не всегда имеется возможность воспользоваться графиками колебания уровня для изображения режима уровня в отдельные гидрологические годы или в различных поперечных сечениях реки. В таких случаях вместо графиков пользуются характерными уровнями. При их помощи возможно во многих в практическом отношении важных случаях в достаточной степени характеризовать режим реки посредством немногих частных значений.

Классификация характерных уровней производится по высоте уровня или по продолжительности его стояния. Уровень обозначен через  $\Gamma$  (горизонт).<sup>1</sup>

Подразделение по высоте уровня.

1) *Минимальный годовой уровень* или *горизонт низких вод* ( $\Gamma_{\text{Н.В.год}}$ ).

2) *Средний минимальный уровень* или *горизонт*, то есть средний из минимальных годовых уровней или горизонтов низких вод за данный ряд лет ( $\Gamma_{\text{Ср.Н.В.}}$ ).

3) *Самый минимальный уровень* или *горизонт наинизших вод* за данный ряд лет ( $\Gamma_{\text{Н.Н.В.}}$ ),

4) *Средний годовой уровень* или *горизонт* ( $\Gamma_{\text{Ср.В.год}}$ ), т. е. среднее арифметическое из всех ежедневных уровней за год (близким, но не равным ему является уровень, соответствующий среднему годовому расходу воды).

5) *Максимальный годовой уровень* или *горизонт высоких вод* ( $\Gamma_{\text{В.В.год}}$ ).

6) *Средний максимальный уровень* или *горизонт* ( $\Gamma_{\text{Ср.В.В.}}$ ) или средний из максимальных годовых уровней или горизонтов данного ряда лет.

7) *Самый максимальный уровень* или *горизонт наивысших вод* за данный ряд лет ( $\Gamma_{\text{Н.ВВ.}}$ ).

8) *Катастрофически высокий уровень* или *горизонт* ( $\Gamma_{\text{К.Г.В.В.}}$ ), наивысший до сих пор известный или возможный уровень.<sup>2</sup>

Подразделение по продолжительности:

1) 12, 10, ... *n-месячный, обеспеченный уровень* или *горизонт*  $\Gamma_{12}$ ,  $\Gamma_{10}$ ,  $\Gamma_n$ , то есть то уровень или горизонт, который в данном году стоял или был превышен в течение 12, 10, ... *n* месяцев.

2) 365, 300 ... *t-суточный обеспеченный уровень* или *горизонт*  $\Gamma_{365}$ ,  $\Gamma_{300}$ ,  $\Gamma_t$ , ... то есть уровень или горизонт, который в данном году стоял или был превышен в течение 365, 300, ... *t* дней.

Указанные уровни можно рассматривать как "нормальные" (средние многолетние) значения в тех случаях, когда период времени, на основе которого они выведены, охватывает по меньшей мере 25 лет.

В качестве примера для подсчета характерных уровней взяты опять водомерный пост Вена-Рейхсбрюкке на р. Дунае за 1921 гидрологический год и период с 1901 по 1925 гг. Основой служили рис. 242 и 243. Установленные значения приведены в табл. 25.

Таблица 25

**Характерные уровни в створе водомерного поста  
Вена-Рейхсбрюкке на р. Дунае**

Характерные уровни	1921	1901-1925
$\Gamma_{\text{Н.В.год}} = \Gamma_{12} = \Gamma_{365}$ .....	—168	—
$\Gamma_{\text{Ср.Н.В.}}$ .....	—	—154
$\Gamma_{\text{Н.Н.В.}}$ .....	—	—124
$\Gamma_{\text{Ср.В.год}}$ .....	—64	—
$\Gamma_{\text{В.В.}}$ .....	276	—
$\Gamma_{\text{Ср.В.В.}}$ .....	—	333
$\Gamma_{\text{Н.ВВ.}}$ .....	—	482
$\Gamma_{10} = \Gamma_{300}$ .....	—127	—
$\Gamma_8 = \Gamma_{240}$ .....	—104	—
$\Gamma_6 = \Gamma_{182,5}$ .....	—85	—
$\Gamma_4 = \Gamma_{120}$ .....	—42	—
$\Gamma_{\text{Ср.В.}}$ .....	—	0

<sup>1</sup> В оригинале через W (Wasserstand). (Прим. пер.)

<sup>2</sup> В советской практике принято отмечать еще и ряд других характерных уровней, как например, минимальный летний или меженный уровень, средний меженный уровень и максимальный и минимальный ледоходные уровни. Они имеют значение для судоходства и гидротехнических расчетов. (Прим. пер.)

### III. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РЕЖИМА СТОКА РЕЧНОГО БАССЕЙНА

**Распределение стока.** Для гидравлического расчета размеров гидротехнического сооружения необходимо знать расход воды, который будет к нему поступать, отводиться им или в том или ином виде использоваться. Поэтому ближайшей целью гидролога является характеристика тех величин стока, которые дает природа в условиях естественного режима. Для наглядного выражения распределения стока по бассейну могут служить высота слоя стока или модуль стока.

Если сток выражается через высоту его слоя, то он может быть изображен на карте в изолиниях высоты слоя стока, как, например, на рис. 304

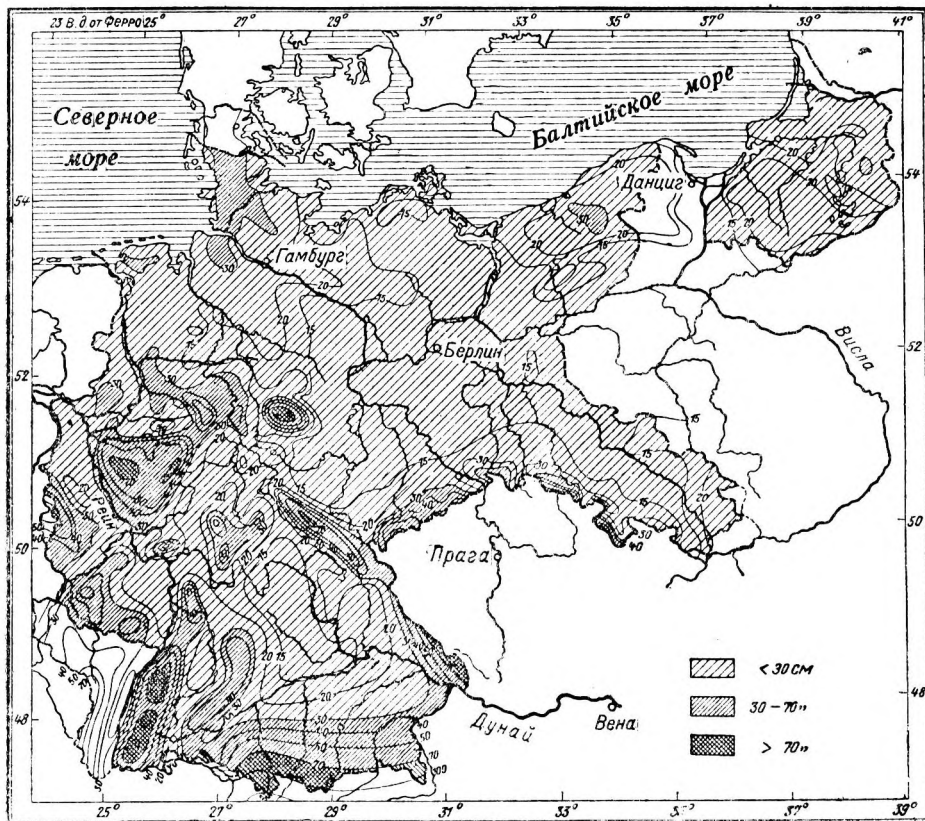


Рис. 304. Изолинии стока для Германии.

для Германии. При наличии таких карт изолиний имеется возможность оценить для любого сечения реки величину слоя стока, а вместе с тем и модуль стока, затем величину среднего годового стока, а отсюда и величину среднего многолетнего расхода воды.

Когда требуется более точный ответ, следует обращаться к табличным данным, подобно приведенным в таблице 26.

Хронологический ход стока в каком-либо сечении реки следует устанавливать по графикам колебания расходов воды. Анализ этих графиков приводит к результатам совершенно подобным тем, которые получаются для графиков уровней. Классификацию расходов воды принято давать аналогично классификации характерных уровней.

Средние годовые осадки, сток и потери стока

Речной бассейн	Площадь водо- сбора, в км <sup>2</sup>	Период	Число лет	Средняя годовая высота слоя осад- ков, в мм	Средняя годовая высота слоя стока в мм	Средняя годовая высота потерь стока, в мм	Коэффициент стока
Неман у Тильзита.....	91 300	1851—1890	40	579	196	383	0,34
Висла у разветвления на Ногат и Вислу.....	193 000	1851—1890	40	620	158	462	0,25
Одер у Ратибора.....	6 737	1896—1905	10	836	311	525	0,37
Нейсса Глацкая (устье).....	4 534	1896—1905	10	759	268	491	0,35
Бобер (устье).....	5 938	1896—1905	10	720	287	433	0,40
Нейсса Лужицкая (устье).....	4 232	1896—1905	10	749	236	513	0,32
Варта у Ландсберга.....	51 893	1896—1905	10	542	120	422	0,22
Одер у Гогензатена.....	109 564	1896—1905	10	608	146	462	0,24
Эльба Богемская у Течена.....	51 000	1876—1890	15	692	192	500	0,28
Вейсерци у Дрездена.....	367	1896—1915	20	873	97	476	0,46
Зала у Требница.....	18 850	1882—1901	20	613	168	445	0,27
Большой Боде у Трезебурга.....	329	1910—1914	5	918	529	389	0,58
Верхний Гавель у Либенвальде.....	2 520	1902—1910	9	578	118	460	0,20
Шпрее у Форстенвальде.....	6 353	1902—1910	9	587	122	465	0,21
Даме у Ново-Миоле.....	1410	1902—1910	9	566	108	458	0,19
Гавель у Ратенау.....	19 500	1902—1910	9	571	123	448	0,22
Верра (устье).....	5 505	1896—1915	20	717	277	440	0,39
Фульда (устье).....	6 955	1896—1915	20	717	262	455	0,37
Везер ниже Димеля.....	14 825	1896—1915	20	721	269	452	0,37
Окер у Юлиусштау.....	64	1907—1913	7	1271	786	485	0,62
Еккер, мост трех импер.....	18	1908—1913	6	1259	807	452	0,64
Шунтер у Гарксбютель.....	570	1910—1920	11	610	171	439	0,28
Рейн у Иланц.....	776	1895—1909	15	1697	1409	288	0,83
Рейн у Тардисбрук (ниже впадения Ландкварты).....	4 260	1895—1909	15	1583	1089	494	0,69
Тур у Андельфинген.....	1696	1905—1914	10	1356	965	391	0,71
Глат у Нидерхорн.....	369	1905—1914	10	1164	706	458	0,61
Шпербельский канал.....	0,56	1903—1915	13	1589	943	646	0,59
Раппенский канал.....	0,70	1903—1915	13	1657	1026	631	0,62
Рейс у Андермат.....	192	1915—1919	5	2442	1929	513	0,79
Рейс у Зеелорфа.....	832	1915—1919	5	2281	1765	516	0,77
Сарнская Аа у Сарнен.....	267	1915—1919	5	1782	1247	535	0,70
Малая Эмма у Вортенштейна.....	355	1915—1919	5	1649	1261	388	0,76
Рейс у Меллингена.....	3 382	1910—1914	5	1850	1379	471	0,75
».....	3 382	1915—1919	5	1786	1363	423	0,76
».....».....	3 382	1910—1919	10	1818	1371	447	0,75
Л. Лаутер (устье).....	191,5	1901—1910	10	905	366	539	0,40
Ремс у Эмса Неккар. (устье).....	580	1896—1906	11	848	232	616	0,27
Мур (устье).....	507	1896—1906	11	884	268	616	0,30
Энци у Лаутенхофа.....	85	1906—1915	9	1324	473	581	0,56
Кохер (устье).....	1989	1888—1898	11	832	309	523	0,37
Ягст (устье).....	1832	1888—1898	11	729	280	449	0,38
Пегниц у Рюкерсдорфа.....	984	1904—1910	7	763	361	402	0,47
Регниц (устье).....	7 540	1899—1903	5	698	226	472	0,42
Зала Франкская (устье).....	2 763	1899—1903	5	730	220	510	0,30
Таубер у Мергентейма.....	1010	1894—1900	7	700	183	517	0,26
Майн у Мильтенберга.....	20 840	1886—1897	12	657	187	470	0,28
Саар (устье).....	7 420	1891—1900	10	765	331	434	0,43
Мозель (устье).....	28230	—	20	764	334	430	0,44
Рур у Штейнхелле.....	52	1910—1914	5	1188	917	271	0,77
Рур у Мешеле.....	425,5	1910—1914	5	1133	819	314	0,72
Венне у Нидерберге.....	214,5	1910—1914	5	1100	755	345	0,69

Речной бассейн	Площадь водо- сбора, в км <sup>2</sup>	Период	Число лет	Средняя годовая высота слоя осад- ков, в мм	Средняя годовая высота слоя стока в мм	Средняя годовая высота потерь стока, в мм	Коэффициент стока
Рёр у Хюстена.....	202	1910-1914	5	1029	648	381	0,63
Мёне у Гюнне.....	436	1910-1914	5	996	564	432	0,57
Рур у Нехейма.....	1 526	1910-1914	5	1056	628	428	0,59
Рур у Валдхофена.....	2 035	1910-1914	5	1019	544	475	0,53
Бигте у Хегена.....	363	1910—1914	5	123	888	335	0,73
Ленне у Алтены.....	1 198	1910-1914	5	1127	728	399	0,65
Рур у Гогензибурга.....	3 453	1910-1914	5	1055	604	451	0,57
Липпе у Дорстена.....	4 495	1893-1902	10	796	306	490	0,38
Рис (устье).....	430	1914-1918	5	871	325	546	0,37
Иллер (устье).....	2193	1901—1906	6	1241	901	340	0,73
Дунай у Вильсхофена.....	47 674	1901-1908	8	838	402	436	0,48
Траун у Ламбаха.....	2 770	1876-1900	25	1729	1123	606	0,65
Эннс у Штейера.....	6140	—	10	1450	900	550	0,62
Дунай у Вены.....	101 600	1898-1902	5	1036	545	491	0,53

**Классификация характерных расходов воды.** Расход воды обозначен через  $Q$ .

Подразделение расхода воды по его величине:

1) *Минимальный годовой расход воды* ( $Q_{Н.В. \text{ год}}$ ), наименьший расход воды в течение одного гидрологического года.

2) *Средний минимальный расход воды* ( $Q_{Ср.Н.В}$ ) или средний из всех минимальных расходов воды данного ряда лет.

3) *Самый минимальный расход воды* ( $Q_{Н.Н.В}$ ) за данный ряд лет.

4) *Средний годовой расход воды* ( $Q_{Ср.В. \text{ год}}$ ), подсчитываемый как тот расход воды, который получается при совершенно равномерном распределении по времени суммарного годового стока (приближенным значением для него будет расход воды, соответствующий среднему годовому уровню).

5) *Максимальный годовой расход воды* ( $Q_{В.В. \text{ год}}$ )

6) *Средний максимальный расход воды* ( $Q_{Ср.В.В}$ ) или средний - из максимальных годовых расходов воды данного ряда лет.

7) *Самый максимальный расход воды* за данный ряд лет ( $Q_{В.В}$ )

8) *Катастрофический расход воды* ( $K. Q$ ), максимальный до сих пор известный или возможный расход воды.

Подразделение по продолжительности:

1) 12, 10...  $n$ -месячный обеспеченный расход воды  $Q_{12}$ ,  $Q_{10}$ ...  $Q_n$ , то есть тот расход воды, который в данном году имел место, или был превышен в течение 12, 10,...  $n$  месяцев.

2) 365, 300...  $t$ -суточный обеспеченный расход воды  $Q_{365}$ ,  $Q_{300}$ ...  $Q_t$ , то есть расход воды, который в данном году имел место или был превышен в течение 365, 300,...  $t$  дней.

Эти характерные значения называются нормальными (средними многолетними) значениями данных характерных расходов воды  $Q$ , если средние величины выведены за период по меньшей мере в 25 лет.

В табл. 27 приведены характерные расходы воды р. Дуная в створе водомерного поста Вена-Рейсбрюкке, определенные при помощи табл. 25 и кривой расходов воды на рис. 243.

Т а б л и ц а 27

Характерные расходы воды р. Дуная в створе водомерного поста Вена-Рейсбрюкке

Характерные расходы воды <i>м<sup>3</sup>/сек</i>	1921	1901-1925
$Q_{Н.В.} = Q_{12} = Q_{365 \text{ год}}$ .....	670	—
$Q_{Ср.Н.В.}$ .....	—	720
$Q_{Н.Н.В.}$ .....	—	475
$Q_{Ср.В. \text{ год}}$ .....	1273	—
$Q_{В.В.}$ .....	4315	—
$Q_{Ср.В.В.}$ .....	—	5120
$Q_{В.В.}$ .....	—	8150
$Q_{10} = Q_{300}$ .....	860	—
$Q_8 = Q_{240}$ .....	1000	—
$Q_6 = Q_{182,5}$ .....	1100	—
$Q_4 = Q_{120}$ .....	1360	—
$Q_{Ср.В.}$ .....	—	1660

#### IV. ХАРАКТЕРИСТИКА ПОТЕРЬ СТОКА В РЕЧНОМ БАССЕЙНЕ

**Уравнение водного баланса.** Рассмотренные выше способы непосредственного измерения испарения непригодны в тех случаях, когда требуется определить средние величины испарения с более крупных и неоднородных по своему характеру площадей водосбора. Поэтому, если речь идет об определении испарения с какого-либо крупного водосбора, то это может быть сделано только по соображению, опираясь на связь между осадками, стоком, испарением и накоплением в том виде, какой дает уравнение водного баланса:

$$h_N = h_A + h_V + h_R.$$

Если значения  $h$  получены как средние за период, по меньшей мере, в 25 лет, причем за одни и те же календарные дни, календарные месяцы или за целые годы, то в результате получают уравнение водного баланса для "нормального" (среднего фиктивного) года:

$$\bar{h}_N = \bar{h}_A + \bar{h}_V + \bar{h}_R, \tag{157}$$

соответственно выбранным календарным отрезкам времени.

В многолетнем разрезе, то есть как раз в среднем фиктивном году, годовое накопление, а значит  $h_{R \text{ год}}$  будет практически равно нулю, так как при больших водосборах можно пренебречь подземным стоком, а потому все осадки, поскольку они не испаряются, должны стекать в виде поверхностного стока. Поэтому уравнение водного баланса для среднего фиктивного года, выраженное в годовых значениях входящих в него элементов, упрощается, принимая следующую форму:

$$\bar{h}_{N \text{ год}} = \bar{h}_{A, \text{ год}} + \bar{h}_{V, \text{ год}}.$$

Отсюда следует, что высота слоя испарения в средний фиктивный год с данного водосбора определяется выражением:

$$\bar{h}_{V, \text{год}} = \bar{h}_{N, \text{год}} - \bar{h}_{A, \text{год}}, \quad (158)$$

причем годовые величины осадков и стока —  $h_{N, \text{год}}$  и  $h_{A, \text{год}}$  — должны быть получены из соответственных наблюдений и измерений в данном бассейне.

Если от рассмотрения годовых величин вновь перейти к изменению отдельных значений  $h$  в течение года, то ход испарения в среднем фиктивном году может быть приближенно установлен, связывая оба уравнения:

$$\left. \begin{aligned} \bar{h}_V &= \bar{h}_N - \bar{h}_A - \bar{h}_R, \\ \bar{h}_{V, \text{год}} &= \bar{h}_{N, \text{год}} - \bar{h}_{A, \text{год}} \end{aligned} \right\}. \quad (159)$$

Оба эти уравнения говорят, что годовой слой испарения  $\bar{h}_{V, \text{год}}$  должен распределяться в силу самого хода испарения, — суточного, недельного или месячного, — в течение года таким образом, что  $\bar{h}_{R, \text{год}}$  будет равно нулю. Для этого распределения необходимо только знание относительного изменения испарения в течение среднего фиктивного года. Приближенно оно достигается путем измерения испарения при помощи испарителей, причем последние дают, как уже указывалось при их описании, хотя и не абсолютные величины испарения, но все же относительные числа, правильно отображающие ход испарения по времени и месту.

Указание, что отношение между испарением с водосбора и в испарителе неодинаково в течение года, правильно. Почве может не хватить воды, которую бы она иначе испаряла, в то время как в испарителе всегда имеется вода. Равным образом в отдельных испарителях не удастся достаточно удовлетворительно воспроизвести многообразные природные условия, как то: озера, луга, возделанные поля, неводеланную и залесенную почву или долины, склоны, горные хребты и т. д. Тем не менее, путем указанных исследований оказывается возможным ближе подойти к ответу на вопрос о годовом ходе испарения с водосбора в целом. Для этого надо только, чтобы могли быть соответственно оценены условия в данном водосборе, а последнее осуществимо в особенности тогда, когда водосбор отличается относительно однородным характером.

Вследствие того, что вывод территориальных средних для значений  $h$  требует продолжительной работы, а также вследствие трудности учета относительного хода испарения, до настоящего времени известны всего несколько разработанных примеров хода испарения с площади целого водосбора. Для водосбора р. Везера с его ключевым питанием и площадью 14825 км<sup>2</sup>, хронологический график изменения испарения за средний фиктивный год периода 1896—1915 гг. получен по вышеописанному способу следующим образом (рис. 305).<sup>1</sup>

Прежде всего, на основе данных наблюдений 177 дождемерных станций путем пространственного осреднения была вычислена высота слоя осадков за отдельные месяцы среднего фиктивного года. Далее, по разности площадей годовых хронологических графиков средних месячных осадков  $h_{N, \text{мес}}$  и средних месячных стоков  $h_{A, \text{мес}}$  было получено годовое количество испарения. Последнее было распределено в течение гидрологического года соответственно тому относительному ходу испарения с водосбора, который был установлен на основе измерений при помощи испарителей. Таким образом

<sup>1</sup> K. F i s c h e r, Niederschlag, Abfluss und Verdunstung des Weserquellgebietes. Jahrbuch für Gewässerkunde Norddeutschlands. Besondere Mitteilungen, Bd. 4, № 3; K. F i s c h e r. Niederschlag, Abfluss und Verdunstung im Weser- und Allergebiet. Издание то же, что и выше Bd. 7, № 2.

был получен хронологический график  $h_V$ , мес. Колебание накопления было затем определено из соотношения  $\bar{h}_R, \text{мес.} = \bar{h}_N, \text{мес.} - \bar{h}_A, \text{мес.} - \bar{h}_V, \text{мес.}$  Накопление получилось в период с марта по июнь отрицательным, а именно, в виде

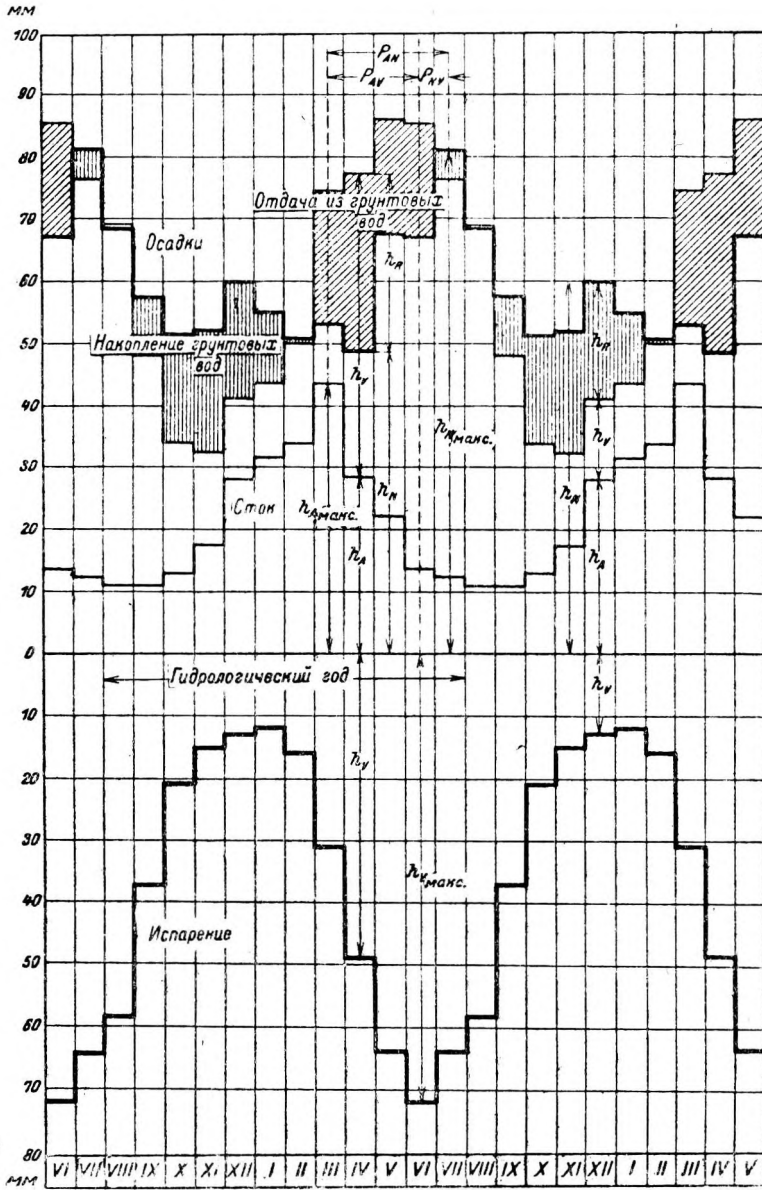


Рис. 305. Водный баланс бассейна р. Везера за период 1896—1915 гг.

$P_{AV}$  — сдвиг фаз стока и испарения;  $P_{NV}$  — сдвиг фаз осадков и испарения;

$P_{AN}$  — сдвиг фаз стока и осадков.

отдачи из запасов грунтовых вод поверхностным водам, а с сентября по февраль положительным в виде образования запаса грунтовых вод.

По графику хода испарения с площади водосбора за средний фиктивный год можно установить сдвиг фаз испарения по отношению к осадкам  $P_{NV}$  и к стоку  $P_{AV}$ , а также то заслуживающее внимания обстоятельство, что для



данного водосбора в многолетнем разрезе испарение в июне в пять раз больше стока, а в январе сток почти в четыре раза превышает испарение.

Такой путь исследования по указанным причинам принадлежит будущему. Пока что исследования о связи между осадками и стоком ведутся в том направлении, чтобы иметь возможность заключать о величине стока непосредственно по осадкам. При этом в практическом отношении можно во многих случаях считать уже достаточным, если эта зависимость может быть дана для годовых величин  $h$  за средний фиктивный год, то есть для средних многолетних годовых осадков, стока или, соответственно, испарения.

Для достижения этой цели можно идти двумя путями. Пытаются или определить отношение между стоком и осадками, так называемый коэффициент стока, для вполне определенных изученных или поддающихся оценке в гидро-

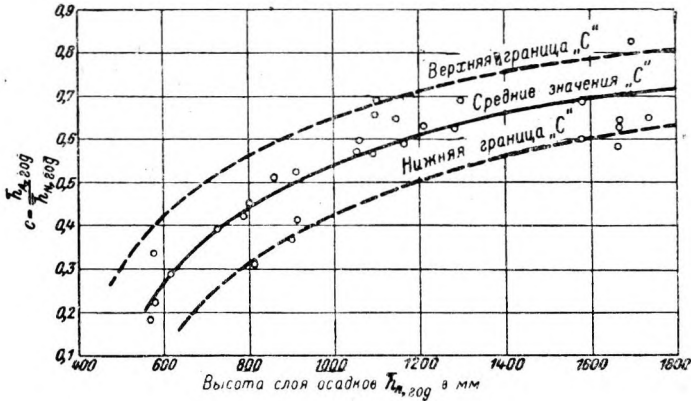


Рис. 306. Зависимость между коэффициентом стока

$$c = \frac{\bar{h}_{A, \text{год}}}{\bar{h}_{N, \text{год}}}$$

$\bar{h}_{N, \text{год}}$  для Средней Европы по Келлеру.

логическом и морфологическом отношении водосборов, или стремятся установить зависимость между осадками и разностью осадков и стока.

Первый способ старше, употребляется в настоящее время почти всюду и оправдывается особенно там, где вычисленный коэффициент повторно применяется для исследуемого водосбора. Второй путь при выводе зависимости общего характера является более целесообразным и в последнее время делает заметные успехи.

Коэффициент стока. Коэффициент стока, собственно говоря, следует определять, учитывая гидрологический год. Только в тех случаях, когда последний близок к календарному году, можно принимать в расчет и календарный год. Согласно определению, коэффициент стока  $c$  равняется отношению многолетнего годового стока к средним многолетним годовым осадкам. При этом безразлично, брать ли отношение средних значений высоты слоя

стока  $\bar{h}_{A, \text{год}}$  к высоте слоя осадков  $\bar{h}_{N, \text{год}}$  или годового стока  $\bar{F}_{A, \text{год}}$ , к годовым осадкам  $\bar{F}_{N, \text{год}}$ , или, наконец, модуля стока  $q_A$  к модулю осадков  $q_N$ , а следовательно:

$$c = \frac{\bar{h}_{A, \text{год}}}{\bar{h}_{N, \text{год}}} = \frac{\bar{F}_{A, \text{год}}}{\bar{F}_{N, \text{год}}} = \frac{q_A}{q_N}. \quad (160)$$

Коэффициент стока нельзя вычислять как среднее из коэффициентов стока за отдельные годы.

В табл. 26 приведены коэффициенты стока за длительные отрезки времени для ряда водосборов. Значения их колеблются в широких пределах между 0,19 и 0,83, причина чего заключается в различном гидрологическом и морфологическом характере водосборов.

На рис. 306 часть этих коэффициентов стока с нанесена в зависимости от величины  $\bar{h}_N, \text{ год.}$  Рисунок показывает, что один и тот же коэффициент стока может иметь место в водосборах с различным количеством осадков. Так, например, значение  $C=0,50$  возможно при осадках в пределах от 700 до 1200 мм.

Была сделана попытка эмпирическим путем установить связь между величиной коэффициента стока и, во всяком случае трудно установимой, характеристикой водосбора. Результаты этой попытки приведены в табл. 28, причем их следует рассматривать только как грубо приближенные величины.

Таблица 28

Коэффициенты стока для многолетнего периода (по Ишковскому)

Категории местности в топографическом отношении	Коэффициент стока
Болота и низины.....	0,2
Низменность и ровное плоскогорье.....	0,25
Частью низменная, частью холмистая местность.....	0,30
Полого-холмистая местность.....	0,35
Частью средне-гористая, частью холмистая местность или холмистая местность с крутыми склонами.....	0,40
Возвышенности вроде Арденн, Эйфеля, Вестервальда и отрогов более крутых гор, в среднем.....	0,45
Возвышенности вроде Гарца, Тюрингенского леса, Рона, Рудных гор и др.....	0,50
Возвышенности вроде Шварцвальда, Вогез, Исполинских гор, Судетских гор, Бескид, в среднем.....	0,55
Высокие горные хребты, смотря по крутизне склонов.....	0,60-0,70

Часто приходится вычислять сток от кратковременных дождей при помощи коэффициента стока. Это имеет прежде всего место при расчете осушительной сети на относительно небольшой площади, для которой расчетным является расход воды от ливней продолжительностью в несколько минут. При этом надо иметь в виду, что при стоке по такой осушительной сети, испарение не играет заметной роли, а фильтрация в грунт, в противоположность рассмотренному выше общему случаю, представляет безвозвратную потерю, так как плотные стенки осушительных канав препятствуют обратному выходу просочившейся воды. При таком упрощении процесса стока исчезают трудности, которые связаны с учетом в уравнении водного баланса, испарения и накопления.

В литературе приводятся многочисленные данные о величине подобных коэффициентов стока для различного характера орошаемых поверхностей; однако в большинстве эти данные представляют собою значения, принимавшиеся различными авторами канализационных проектов. В практику вошли значения, приведенные в табл. 29 и 30.

Для поверхности выпадения осадков площадью  $F$ , состоящей из различных по характеру частей  $F_1, F_2, \dots$  с соответствующими коэффициентами стока  $c_1, \dots, c_2, \dots$  среднее значение коэффициента стока вычисляется по формуле:

$$c_m = \frac{F_1 c_1 + F_2 c_2 + \dots}{F_1 + F_2 + \dots} \quad (161)$$

## Коэффициенты стока для коротких периодов

Характер поверхности выпадения осадков	Коэффициент стока
Металлические и шиферные кровли.....	0,95
Обыкновенная кровельная черепица и толь.....	0,90
Крыши из древесного цемента, прессованного щебеночного настила, следо- вательно, плоские крыши разных способов устройства.....	0,50—0,70
Асфальтовая мостовая и залитые тротуары.....	0,85—0,90
Плотные (непроницаемые) мостовые из камня или дерева.....	0,80—0,85
Мостовые рядами или в елку без заливки швов.....	0,50—0,70
Щебенчатые дороги.....	0,25—0,45
Каменные дороги.....	0,15—0,30

На основании таких же общих соображений получают и следующие коэффициенты стока, которые следует рассматривать только в качестве грубо приближенных значений.

Таблица 30

## Средние значения коэффициентов стока для коротких периодов

Характеристика поверхности водосбора	Коэффициент стока
Очень густо застроенная местность.....	0,80—1,00
Густо застроенная местность.....	0,60—0,80
Виллы или не густо застроенная местность (фабрично-заводская часть города).....	0,40—0,50
Незастроенная местность (лесной и луговой пояс).....	0,20—0,30

Коэффициенты стока для непродолжительных осадков рассматривались, согласно прежним взглядам, как постоянные величины. Новые исследования этого вопроса показали, что они зависят еще от модуля осадков  $q_N$  и продолжительности выпадения  $t_r$ , причем эта зависимость имеет форму:<sup>1</sup>

$$c = mq^\alpha t_r^\beta \quad (162)$$

Здесь коэффициент  $m$  учитывает, в особенности, характер поверхности и одновременно влияние микроклимата, в то время как показатели  $\alpha$  и  $\beta$  от этих факторов зависят мало. Величины  $m$ ,  $\alpha$  и  $\beta$  надлежит определять из опытов или на основании измерений в природных условиях.

Путем подобного рода опытов получена зависимость:<sup>2</sup>

$$c = mq_N^{0,567} t_r^{0,228}, \quad (163)$$

где для  $m$  следует брать значения, смотря по характеру поверхности:

Слабоукатанная песчаная поверхность.....	$m = 0,0064$
Мостовые из обтесанного квадратного камня с засыпкой швов песком.....	$m = 0,0214$
Мостовые из обтесанного квадратного камня с заливкой швов асфальтом.....	$m = 0,0238$

<sup>1</sup> Poggi. Le fognature di Milano. Milano 1914; H. Eigenbrodt. Über die Bestimmung der in Sielnetzen abzuführenden grössten sekundlichen Regenwassermengen. Gesundheits-Ingenieur, H. 1, 7, 8, 11, 1922.

<sup>2</sup> F. Reinhold. Beitrag zur Bestimmung des Abflussbeiwertes bei Regenfällen. Die Bau-technik, H. 33 u. 35, 1929; E. Melli. Die Dimensionierung städtischer Kanäle. Schweizerische Bauzeitung. Bd. 84, № 12, 1924.

Если, например, модуль осадков составляет  $q_N = 125 \text{ л/сек с } 1 \text{ га}$  и продолжительность их  $t_r = 7 \text{ мин.}$ , то следует считать:

при песчаной поверхности  $c \text{ с} = 0,15$   
 при каменной мостовой  $c \text{ с} = 0,52$   
 при каменной мостовой  
 с заливкой швов  $c \text{ с} = 0,57$

Зависимость между осадками и разностью осадков и стока. В среднем фиктивном году разность осадков и стока равна испарению, следовательно:

$$\bar{h}_{N, \text{ год}} - \bar{h}_{A, \text{ год}} = \bar{h}_{V, \text{ год}}$$

Если нанести некоторые значения  $\bar{h}_{N, \text{ год}}$  и  $\bar{h}_{V, \text{ год}}$  из табл. 26, содержащей эти данные для различных среднеевропейских речных бассейнов, то оказывается возможным построить зависимость между осадками  $h_{N, \text{ год}}$  и  $h_{V, \text{ год}}$

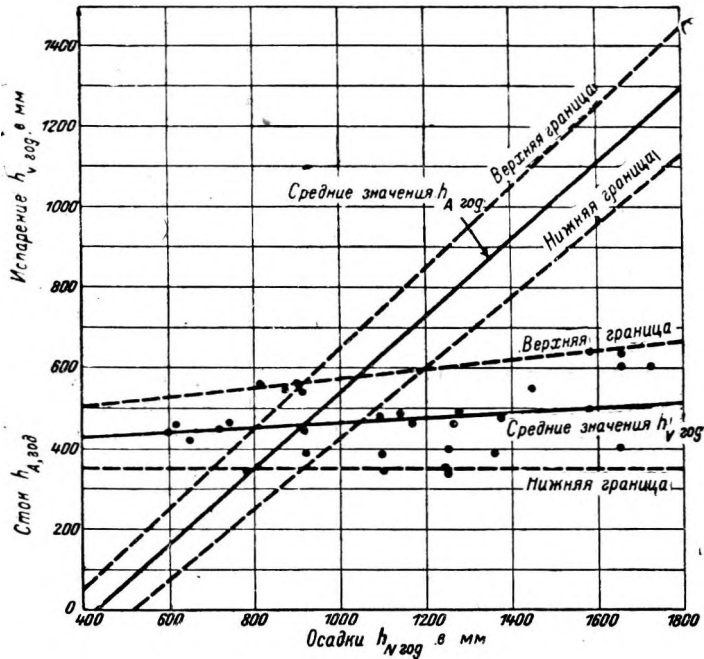


Рис. 307. Зависимость между годовыми величинами стока  $\bar{h}_{A, \text{ год}}$  и испарения  $\bar{h}_{V, \text{ год}}$  и годовыми величинами осадков  $\bar{h}_{N, \text{ год}}$  для Средней Европы (по Келлеру).

(рис. 307). Точки ложатся прямой полосой, а границы этой полосы и линию средних значений точек можно выразить прямыми линиями.<sup>1</sup>

Средняя прямая выражается уравнением:

$$\bar{h}_{V, \text{ год}} = 0,058 \bar{h}_{N, \text{ год}} + 405 \text{ мм}, \tag{164}$$

<sup>1</sup> Н. Keller. Niederschlag, Abfluss und Verdunstung in Mitteleuropa. Jahrbuch für Gewässerkunde Norddeutschlands, Besondere Mitteilungen, Bd. 1, № 4, Berlin 1906; K. Fischer, die durchschnittlichen Beziehungen zwischen Niederschlag, Abfluss und Verdunstung in Mitteleuropa. Deutscher Wasserwirtschafts und Wasserkraftverband. E. V, H. 6, 1921; F. Fischer. Abflussverhältniss, Abflussvermögen und Verdunstung von Flussgebieten Mitteleuropas. Zentralblatt der Bauverwaltung. H. 41, 1925.

нижняя пограничная прямая

$$\bar{h}_{V, \text{год}} = \bar{h}_{N, \text{год}} - \bar{h}_{A, \text{год}} = 350 \text{ мм} \quad (165)$$

и верхняя пограничная прямая

$$\bar{h}_{V, \text{год}} = 0,116 \bar{h}_{N, \text{год}} + 460 \text{ мм}, \quad (166)$$

причем следует учитывать, что уравнение (164) действительно начиная только с  $\bar{h}_{N, \text{год}} = 560 \text{ мм}$ , уравнение (165), начиная с  $\bar{h}_{N, \text{год}} = 500 \text{ мм}$  и уравнение (166), начиная с  $\bar{h}_{N, \text{год}} = 625 \text{ мм}$ .

Каждой прямой испарения соответствует, согласно уравнению  $\bar{h}_{A, \text{год}} = \bar{h}_{N, \text{год}} - \bar{h}_{V, \text{год}}$ , прямая стока, причем средней прямой испарения соответствует средняя прямая стока

$$\bar{h}_{A, \text{год}} = 0,942 \bar{h}_{N, \text{год}} - 405 \text{ мм}, \quad (167)$$

нижней прямой испарения — верхняя прямая стока

$$\bar{h}_{A, \text{год}} = \bar{h}_{N, \text{год}} - 350 \text{ мм} \quad (168)$$

и верхней прямой испарения — нижняя прямая стока

$$\bar{h}_{A, \text{год}} = 0,884 \bar{h}_{N, \text{год}} - 460 \text{ мм}. \quad (169)$$

Районы с примерно равным количеством осадков могут значительно различаться по величине стока, например, для  $\bar{h}_{N, \text{год}} = 1500 \text{ мм}$  на  $280 \text{ мм}$ . Следовательно, одним количеством осадков сток и испарение еще не определяются, а в расчет следует принимать также климатические и морфологические факторы. Характер отдельных водосборов находит отражение в пределах стока и испарения с них. Оказывается, что верхнему пределу стока, которому отвечает нижний предел испарения, соответствует постоянная величина испарения в  $350 \text{ мм}$ . Испарение с водосбора для верхних пределов стока является, следовательно, в условиях Средней Европы величиной почти постоянной.

При выводе зависимостей между осадками и стоком пренебрегалось действием второстепенного вида осадков. Однако, так как эти второстепенного вида или дополнительные осадки имеют причиной процессы конденсации влаги, которые усиливаются с увеличением осадков, а последние возрастают с высотой местности над уровнем моря, то высота слоя дополнительных осадков должна расти с высотой местности. Дополнительные виды осадков не могут, однако, быть измерены при помощи существующих дождемеров. Уже в силу этого приведенные выше зависимости не обладают применимостью во всех случаях.<sup>1</sup>

## V. ЭМПИРИЧЕСКИЕ ФОРМУЛЫ И УРАВНЕНИЯ, ВЫРАЖАЮЩИЕ СВЯЗЬ МЕЖДУ ГИДРОЛОГИЧЕСКИМИ ФАКТОРАМИ

Графический способ изображения при выводе гидрологических зависимостей, равно как и при их дальнейшей разработке, является в большинстве случаев наиболее целесообразным. Однако графическое изображение может

<sup>1</sup> R. D r e n k h a h n. Die Hydrographischen Grundlagen für die Planting von Wasserkraftwerken in Südwestdeutschland, Berlin 1926. Автор дает способ установления для данного водосбора связи между высотой дополнительного слоя стока и средней высотой  $h$  водосбора над уровнем моря и преобразование уравнений Келлера с введением в них средней высоты  $A$  над уровнем моря, выраженной в метрах. Так, например, для юго-запада Германии он нашел следующего вида зависимость:

$$\bar{h}_{A, \text{год}} = \frac{15}{16} \bar{h}_{N, \text{год}} - 460 + 30 \left[ \frac{h}{100} - 6 + \sqrt{\left(\frac{h}{100} - 6\right)^2 + 1} \right].$$

иногда заменяется аналитическим выражением, причем прежде всего в тех случаях, когда требуется облечь в известную форму результат какого-либо исследования, предназначенный в дальнейшем для использования при практической работе. При этом не следует однако обманывать себя (так же как и при номографических изображениях) относительно точности этих выражений; цель эмпирических уравнений заключается только в получении сжатого выражения установленной зависимости между гидрологическими факторами.

Эмпирические уравнения получаются по способам, описанным в предыдущей главе, или непосредственным путем или через посредство графической статистики. Учитывая большую вычислительную работу, затрачиваемую на их вывод, следует признать, что составление их оправдывается только в некоторых специальных случаях.

**Эмпирические формулы для распределения скорости течения воды.** Распределение скорости течения воды в живом сечении представляет не только научный интерес, освещая процессы движения отдельных струй в водном потоке, но имеет еще и практическое значение, так как может впоследствии послужить материалом для вывода эмпирических уравнений для средней скорости течения в живом сечении той или иной определенной формы.

Наглядным образом распределение скорости течения по поперечным и продольным профилям изображается при помощи линий равных скоростей или изотах. Подобные изображения скоростей в изолиниях

дают прежде всего зависимость распределения скорости от формы поперечного или продольного сечения, так как изотахи, в общем, следуют линии дна и берегов (рис. 308). Наибольшие скорости течения наблюдаются у поверхности, а также непосредственно под поверхностью воды. Обычно в поперечном сечении встречается один максимум скорости течения и притом при симметричных формах русла—по середине реки (рис. 309). Могут, впрочем, встретиться два и несколько максимумов, причем часто они располагаются совершенно симметрично по поперечному сечению (рис. 309 *b, c*). Причины этого явления еще не выяснены, однако существует предположение, что они связаны с наличием в потоке циркуляционных течений.

При выводе эмпирических уравнений для распределения скорости по вертикали следует принимать в расчет только случаи с одним максимумом скорости по высоте вертикали. Для выражения закона распределения могут

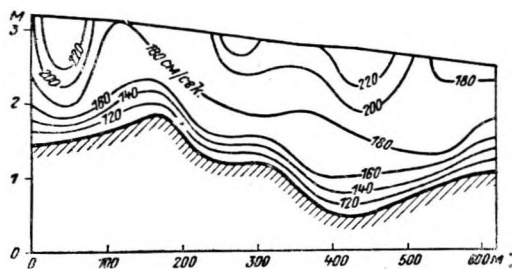


Рис. 308. Изотахи на продольном профиле р. Изар у Платтинга.

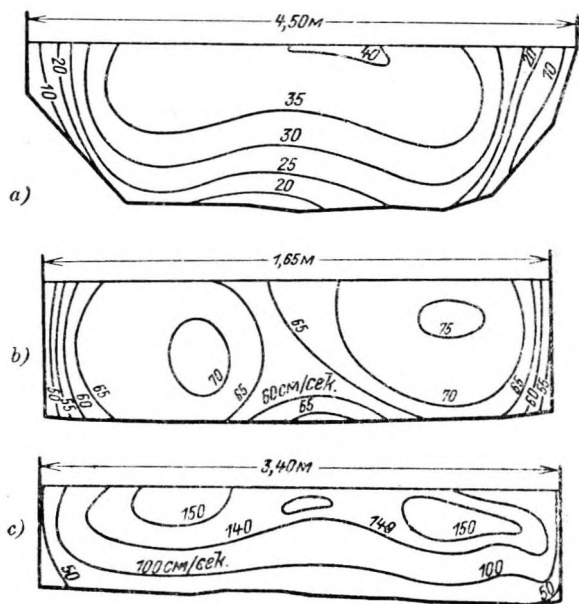


Рис. 309. Изотахи на поперечных профилях.

быть применены следующие кривые, у которых  $u$  представляет горизонтальную и  $z$ —вертикальную координату.

Парабола 2-го порядка с горизонтальной осью

$$u = a + bz + cz^2. \quad (170)$$

Парабола 2-го порядка с вертикальной осью

$$z = a + bu + cu^2. \quad (171)$$

Парабола высшего порядка с вертикальной осью

$$u = a(h - z)^{\frac{1}{m}}. \quad (172)$$

Равнобокая гипербола

$$(u + b)(z + a) = \text{const}. \quad (173)$$

Логарифмическая кривая

$$u = a + b \lg(z + c), \quad (174)$$

или

$$u = a \times 0,434 b \ln(z + c). \quad (175)$$

Считаясь с данными опыта, согласно которым скорость очень сильно убывает у дна, и имея в виду также, чтобы кривая удовлетворяла случаю наличия на реке ледяного покрова, следует предпочитать параболы высшего порядка.<sup>1</sup>

Для распределения скоростей в случае, приведенном на рис. 310, подобрано уравнение  $u = a(h - z)^{\frac{1}{m}}$ . Для определения коэффициента  $a$  и показателя степени  $m$  логарифмируют указанное уравнение, получая:

$$\lg u = \lg a + \frac{1}{m} \lg(h - z).$$

Если нанести точки наблюденных скоростей с рис. 310 на полную логарифмическую сетчатку и провести путем графического подбора прямую  $L$ , то  $m$  получается с учетом неодинаковых масштабов логарифмических делений, из выражения:

$$m = \text{tg} \alpha \frac{e_1}{e_2} = 7,2,$$

$a$  получается на пересечении линии  $L$  с прямой  $h - z = 1$  равным 0,80 (рис. 311).

Если, в целях упрощения, взять для уравнения распределения скорости по вертикали в его окончательном виде степень параболы при  $m = 7$ , то получается  $a = 0,798$ , почему с достаточной точностью можно выразить распределение в виде:

$$u = 0,8(2,9 - z)^{\frac{1}{7}}.$$

Дальнейшие исследования этого вопроса показали, что, при подборе уравнения для выражения закона распределения скорости по вертикали в нормальных природных условиях пригодны параболы от 4-й до 7-й степени,

<sup>1</sup> После попыток Лавая, Кристена и Штриклера ввести параболу высшего порядка, Колупайла повторил эту попытку с успехом, применив логарифмическую анаморфозу. См. St. K o l u p a i l a. Über die Verteilung der Geschwindigkeiten auf der Lotrechten des Stromes, III Балтийская конференция, Варшава 1930.

причем с уменьшением шероховатости дна степень уравнения возрастает. Знание закона распределения скорости по вертикали позволяет дополнять отсутствующие (в особенности вблизи от дна) данные измерений.

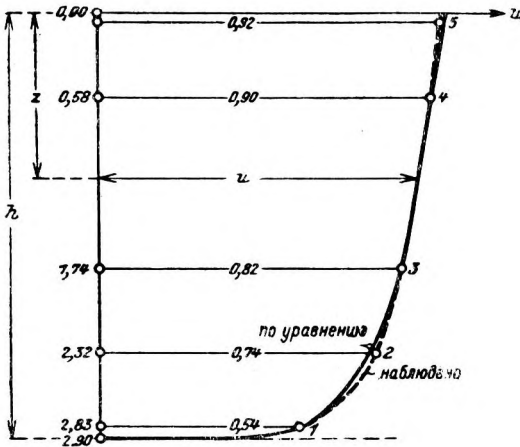


Рис. 310. Распределение скорости по вертикали при свободном русле.

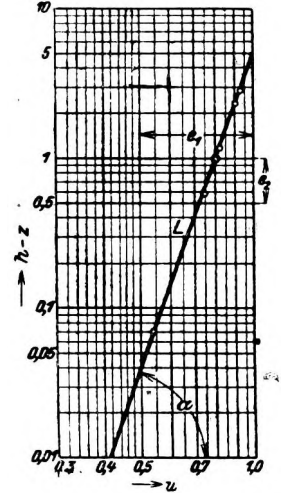


Рис. 311. Определение степени  $m$  и коэффициента  $a$  параболы  $u = a(h - z)^{\frac{1}{m}}$ .

Если река покрыта льдом, скорости на вертикали уменьшаются не только в направлении дна, но и в направлении ледяного покрова (рис. 312). В этом случае составляют кривую распределения из двух парабол с различными степенями  $m$  и  $k$ , причем вершина одной из них располагается у дна, а другой—у нижней поверхности ледяного покрова, и уравнение кривой имеет вид:

$$u = a(h - z)^{\frac{1}{m}} - bh^{\frac{1}{k}} + bz^{\frac{1}{k}}. \quad (176)$$

Коэффициенты  $a$  и  $b$  и показатели степени  $\frac{1}{m}$  и  $\frac{1}{k}$  лучше всего определять методом характерных точек.

При применении этого метода для примера, приведенного на рис. 312, получается уравнение вида:

$$u = 0,92(3,9 - z)^{\frac{1}{4}} + 1,06z^{\frac{1}{7}} - 1,29.$$

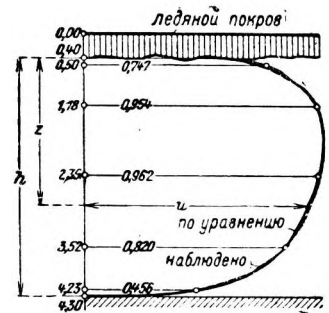


Рис. 312. Распределение скорости по вертикали при ледяном покрове.

На практике подробные данные о распределении скорости требуются в меньшей степени, чем знание связи средней скоростью течения в живом сечении и поверхностными скоростями, которые сравнительно легко и быстро определяются. Если бы удалось выразить в аналитической форме распределение скорости в горизонтальной плоскости так же, как и в вертикальной, тогда, вероятно, могла бы быть выражена аналитически связь для всего поперечного сечения между средней скоростью в живом сечении  $u_m$  и средней поверхностной скоростью  $u_0, m$ . Пока же приходится довольствоваться численными значениями, получаемыми на основе полных вертушечных измерений



На основе подобных значений, полученных для средней скорости и для средней поверхностной скорости, построен ряд эмпирических формул. Так, Зидек (K. Siedek) рекомендует для рек: при  $0,8 < H_m < 2,0 \text{ м}$

$$Q = \sqrt[20]{\frac{H_m^2}{B} \sum_0^B (H \Delta B u_0)}; \tag{177}$$

при  $H > 2,0 \text{ м}$  —

$$Q = \sqrt[20]{\frac{H_m^2}{B} \cdot \frac{\sum_0^B (H \Delta B u_0) + 0,4 \sum_0^B (H \Delta B)}{1,2}}. \tag{178}$$

Фишер получает для небольших рек (Bäche) приближенную формулу:

$$u_m = \alpha \left[ \frac{\sum_0^B (u_0 \Delta B)}{B} \right] + \beta \left[ \frac{\sum_0^B (u_0 \Delta B)}{B} \right]^2, \tag{179}$$

для которой эмпирические коэффициенты  $\alpha$  и  $\beta$  следует брать из табл. 31.

Таблица 31

Опытные данные для  $\alpha$  и  $\beta$  уравнения (179)

Ширина живого сечения	При зарастании тростником или травой		Очень крупный песок (хрящ)		Крупный песок		Песок	
	$\alpha$	$\beta$	$\alpha$	$\beta$	$\alpha$	$\beta$	$\alpha$	$\beta$
$< 3,0 \text{ м}$ $3—10,0 \text{ м}$	0,784 0,795	0,001 0,001	0,832 0,862	0,001 0,000	0,867 0,889	0,000 0,000	0,926 0,954	0,000 0,000

Для приближенных определений расходов воды расход может быть подсчитан по формуле:

$$Q = 0,85 \frac{\sum_0^B (u_0 \Delta B)}{B} \cdot F = 0,85 H_m \sum_0^B (u_0 \Delta B). \tag{180}$$

**Эмпирические формулы для средней скорости течения.** В открытых водотоках с турбулентным и равномерным движением, характеризующий это движение уклон равняется уклону свободной поверхности воды и уклону дна. А. Брамс первый высказал тот взгляд, что величина этого уклона таким образом связана с сопротивлением трения русла, что составляющая силы тяжести в направлении течения воды должна быть равна и прямо противоположна силе сопротивления трения.<sup>1</sup>

Из этого условия, если принять сопротивление трения пропорциональным квадрату средней скорости течения, вытекает формула:

$$u_m = k h_m^{0,5} J^{0,5}, \tag{181}$$

где  $h_m = \frac{F}{B}$  означает среднюю глубину в живом сечении.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> A. B r a m s . Anfangsgründe der Deich- und Wasserbaukunst. Aurich 1754 und 1757.

<sup>2</sup> M. de C h é z y 1775; в "Memoires de la classe des sciences de l'Institut de Paris 1813, 1815, в выдержках; W. K u t t e r . Die neuen Formeln für die Bewegung des Wassers; Wien 1877.

Так как величина  $h_m$  характеризует форму поперечного сечения в достаточной степени только при широких и мелких живых сечениях, Шези (Chezy) ввел вместо  $h_m$  понятие так называемого гидравлического радиуса

$$R = \frac{F}{U},$$

то есть площади живого сечения, деленной на смоченный периметр.

В этом случае предыдущее уравнение принимает вид:

$$u_m = kR^{0,5} J^{0,5}, \quad (182)$$

причем, если  $u_m$  должно быть выражено в м/сек, следует приводить  $R$  в м, коэффициент  $k$  в м<sup>0,5</sup>/сек и  $J$  как синус (при малых уклонах как тангенс) угла наклона линии свободной поверхности воды относительно горизонтальной линии.

Гангилье и Куттер, признавая, что значение коэффициента  $k$  не остается постоянным, а зависит от  $J$ ,  $R$  и шероховатости русла, дали следующую единую формулу для разного характера русел:

$$u_m = \frac{23 + \frac{1}{n} + \frac{0,00155}{J}}{1 + \left(23 + \frac{0,00155}{J}\right) \frac{n}{R^{0,5}}} R^{0,5} J^{0,5}, \quad (183)$$

где  $n$  представляет коэффициент шероховатости, для которого следует принимать следующие значения.

Каналы из тщательно остроганных досок, весьма гладкие и зеркальной поверхности.....	0,010
Каналы из строганных досок, железные и железо-бетонные трубы больших отверстий.....	0,012
Кладка из тесаного четырехугольного камня и бутовая кладка с расшивкой швов .....	0,013
Цементная штукатурка от гладкой до шероховатой.....	0,013—0,017
Каналы из бутовой кладки, шероховатая цементная штукатурка.....	0,017
Каналы с покрытыми одеждой стенками (откосами).....	0,021
Гладкомощеные откосы, более гладкие скалистые породы.....	0,022
Каналы в земляных откосах без растительности, ручьи, речки, реки без влекомых наносов.....	0,025
Потоки с влекомыми наносами и водной растительностью, одернованные горные ручьи.....	0,008
Потоки с руслом из гальки и с влекомыми наносами, шероховатые скалистые берега.....	0,030—0,035
Дренажные канавы.....	0,030
Поймы рек.....	0,040—0,050

Приведенная формула применяется прежде всего для искусственных водотоков, хотя коэффициент  $n$  и не в состоянии полностью учесть влияние шероховатости стенок и дна водотока. Ею можно пользоваться в тех случаях, когда коэффициент шероховатости  $n$  вычислен по расходам воды, определенным в каком-либо водотоке, и формула применяется для водотоков с той же самой одеждой и при той же форме сечения. С этой точки зрения можно рекомендовать ее применение для каналов, труб и штолен гидросиловых установок, для которых можно относительно правильно составить представление о качестве стенок в зависимости от способа их устройства.

Затруднения возникают в случае изменения шероховатости стенок в процессе эксплуатации соответствующих сооружений. Далее ошибки появляются при отложении наносов и, особенно, при их движении.<sup>1</sup>

В целях сокращения вычислений составлены графики для определения  $k$ , образец которых, зарекомендовавший себя на деле, изображен на рис. 313. Пользование им поясняется приводимым ниже примером.

<sup>1</sup> J. Büchi. Rauhigkeits-Koeffizienten von ausgeführten Kanälen, im besonderen von verkleideten und unverkleideten Stollen. Schweizerische Bauzeitung, Bd. 90, № 13, 1927.

Для канала трапециoidalной формы сечения, шириною по дну 5 м, глубиною наполнения 4 м с бетонированными откосами 1:2 можно принять

$n = 0,015$ . Для  $R = F/U = 52/22.9 = 2,27$ ,  $\sqrt{R} = 1,507$  и уклона по дну  $J = 0,00005$

получается в точке пересечения линии  $AB$  с осью  $k$  значение  $k = 78,2$ . Отсюда расход воды составляет.

$$Q = u_m F = 78,2 \cdot 1,507 \sqrt{0,00005} \times 52 = 43,3 \text{ м}^3/\text{сек.}$$

Для искусственных водотоков, которые во время эксплуатации подвержены сильным изменениям шероховатости стенок (в городских каналах вследствие загрязнения и в водопроводных трубах вследствие ржавления), вышеприведенная формула может быть представлена в более простом виде:

$$u_m = \frac{100 R^{0,5}}{m + R^{0,5}} R^{0,5} J^{0,5}. \quad (184)$$

Обычно ее называют формулой Куттера. Коэффициент  $m$  следует принимать равным:

- Для новых железных труб и новых чисто оштукатуренных бетонированных каналов.....0,25
- Для сваченных ржавчиной железных труб и бетонированных каналов, бывших в эксплуатации.....0,35
- Для свежего бетона из-под опалубки (Schalungsбетон).....0,50
- Для старого бетона из-под опалубки .....0,70

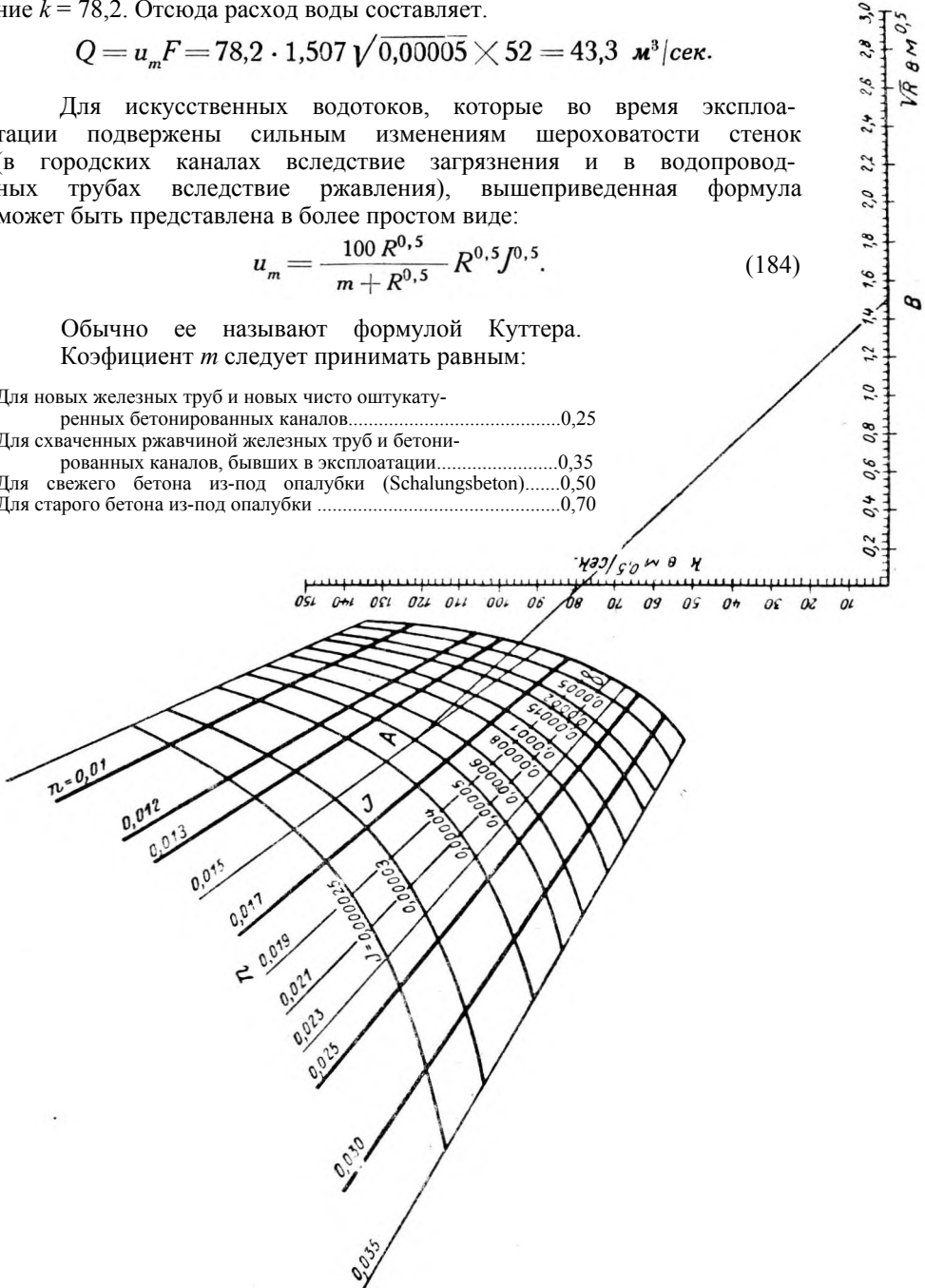


Рис. 313. График для определения коэффициента  $k$  формулы Гангиллье—Куттера.

Эта формула обладает, естественно, значительно меньшей точностью. Последняя, впрочем, недостижима для водотоков с изменяющимся коэффи-

циентом шероховатости даже при применении более чувствительных формул. При применении формулы Куттера наибольшее значение придается обычно оценке крайних пределов пропускной способности водотока, а именно, установлению тех расходов воды, которые водоток может пропустить в состоянии малой шероховатости (в начале эксплуатации) и в состоянии наибольшей шероховатости, ожидаемой при эксплуатации.

Упрощенное выражение для  $k$  дал Базен<sup>1</sup> в своей усовершенствованной ("новой") формуле, точность которой одинакова с точностью формулы Гангилье—Куттера. Она имеет вид, подобный формуле Куттера:

$$u_m = \frac{87 R^{0,5}}{\gamma + R^{0,5}} R^{0,5} J^{0,5}. \quad (185)$$

Коэффициент  $\gamma$  в этой формуле зависит от шероховатости стенок, причем для него следует принимать следующие значения.

Гладкая штукатурка, строганное дерево.....	0,06
Дерево, тесовая и кирпичная кладка.....	0,16
Бутовая кладка.....	0,46
Булыжная мостовая, плотное земляное ложе .....	0,85
Земляные каналы в обычном состоянии.....	1,30
Земляные каналы с особенно сильным сопротивлением.....	1,75

Формула Базена применима для расчета более крупных искусственных водотоков. Как и у всех формул, содержащих специальный коэффициент шероховатости, точность формулы Базена зависит от правильного принятия этого коэффициента. Поэтому для нее действительно все сказанное выше по поводу формулы Гангилье—Куттера.

Имеется еще несколько эмпирических формул подобного рода, которые на основе графического или аналитического выражения данных измерений стремятся с большим или меньшим успехом к установлению связи между  $u_m$ ,  $R$ ,  $J$  и выбираемым коэффициентом шероховатости.<sup>3</sup>

Новую мысль относительно построения скоростных формул высказал Зидек.<sup>3</sup> Он исходит из рассмотрения реки в естественном состоянии, образование русла которой могло происходить путем рыхлых наслоений (отложений). Он отказывается от специального коэффициента шероховатости и принимает, что для характеристики сопротивления трения достаточны ширина реки, средняя глубина и уклон свободной поверхности воды.

Последующие исследователи использовали его мысль для построения одночленных формул, используя, пополняя и отбирая собранный им материал измерений. Эти формулы оказались столь же пригодными для обработки, как и для дальнейших аналитических построений.

Германек дал формулы для широких естественных водотоков с постоянными в известных пределах коэффициентами:<sup>4</sup>

$$\left. \begin{aligned} u_m &= 30,7 h_m J^{0,5} \text{ для } h_m < 1,5 \text{ м,} \\ u_m &= 34 h_m^{0,75} J^{0,5} \text{ для } 1,5 \text{ м} \leq h_m \leq 6 \text{ м,} \\ u_m &= 44,5 h_m^{0,6} J^{0,5} \text{ для } h_m > 6 \text{ м} \end{aligned} \right\}. \quad (186)$$

<sup>1</sup> Н. В а з е н. Annales des ponts et chaussées, стр. 55, 1877.

<sup>2</sup> Обстоятельный критический разбор важнейших, до настоящего времени известных эмпирических скоростных формул дает F o r c h h e i m e r. Hydraulik. Leipzig 1930; имеется русский перевод.

<sup>3</sup> К. S i e d e k. Studie über eine neue Formel zur Ermittlung der Geschwindigkeit des Wassers in Flüssen und Strömen. Z. d. österr. Ing. und Arch. Ver. № 22, 23, 26, 1901, und Studie über eine neue Formel zur Ermittlung der Geschwindigkeit des Wassers in Bächen und Künstlichen Gerinnen. Z. d. österr. I. u. A. Ver., № 7 u. 8, 1903.

<sup>4</sup> J. H e r m a n e k. Die mittlere Profilgeschwindigkeit in natürlichen und künstlichen Gerinnen. Z. d. österr. Ing. u. Arch. Ver. № 16, 1905.

Грöger <sup>1</sup> построил на базе обширного фактического материала формулы, применимые для естественных водотоков:

$$\left. \begin{aligned} u_m &= 23,781 h_m^{0,776} J^{0,458} \text{ для } 0,2 \text{ м} < h_m < 2,0 \text{ м}, \\ u_m &= 22,11 h_m^{0,58} J^{0,43} \text{ для } h_m > 2,0 \text{ м} \end{aligned} \right\}, \quad (187)$$

которые охватывают все встречающиеся на практике случаи в пределах  $B > 10 \text{ м}$  и  $J < 0,005$ .

Для быстрого пользования этими формулами дана номограмма, изображенная на рис. 314. Для сечения с глубиной  $h_m = 1,5 \text{ м}$  и поверхностным уклоном воды  $J = 0,0007$  из нее следует  $u_m = 1,20 \text{ м/сек}$ .

Форхгеймер дал зависимость в виде:

$$u_m = \lambda R^{0,7} J^{0,5}, \quad (188)$$

которая рекомендуется для искусственных водотоков и где  $\lambda$  приблизительно равно  $1/n$  и должно приниматься при выражении его в  $\text{м}^{0,3}/\text{сек}$  равным:

Гладкий бетон.....	90—80
Новый бетон.....	60
Старый, разрушающийся бетон.....	50
Искусственные земляные каналы.....	42—30
Естественные водотоки.....	30—24

Пользование этой формулой облегчается при номографическом ее выражении. На рис. 315 показано определение размеров канала с земляными стенками при  $\lambda = 40$  или, в случае гладкой бетонировки стенок, с  $\lambda = 70$ .

Штриклер<sup>2</sup> ставит коэффициент в зависимость от величины донных наносов, давая в своей формуле:

$$u_m = kR^{\frac{2}{3}} J^{\frac{1}{2}} \quad (189)$$

для  $k$  следующие значения:

Камни величиною с голову.....	25—30 $\text{м}^{1/3}/\text{сек}^{-1}$
Крупная галька, хрящ, размером, примерно, 50 X 100 X 150 мм.....	35 $\text{м}^{1/3}/\text{сек}^{-1}$
Средней величины галька, размером, примерно, 20 X 40 X 60 мм.....	40 $\text{м}^{1/3}/\text{сек}^{-1}$
Мелкая галька, хрящ, размером, примерно, 10 X 20 X 30 мм.....	45 $\text{м}^{1/3}/\text{сек}^{-1}$
Мелкая галька, хрящ с большой примесью песка.....	50 $\text{м}^{1/3}/\text{сек}^{-1}$

Приведенные формулы становятся неприменимыми, если вода в потоке перемешивается с воздухом, что, судя по наблюдениям, может иметь место при больших скоростях течения. Эренбергер <sup>3</sup> на основе опытов, поставлен-

<sup>1</sup> O. G r ö g e r ; Eine neue Geschwindigkeitsformel für natürliche Flussgerinne. Z. d. österr. Ing. u. Arch. Ver., № 35, 1913.

<sup>2</sup> A. Strickler. Beiträge zur Frage der Geschwindigkeitsformel und der Rauigkeitszahlen für Ströme, Kanäle und geschlossene Leitungen. Mitteilungen des Amtes für Wasserwirtschaft, Bern 1923.

<sup>3</sup> R. E h r e n b e r g e r. Wasserbewegung in steilen Rinnen (Schusstennen) mit besonderer Berücksichtigung der Selbstbelüftung. In Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, 6 Folge, Wien 1926.

ных в прямоугольном лотке с гладкими стенками при  $R = 0,3 \text{ м}$ , вывел следующую формулу, действительную до уклона лотка  $\alpha = 45^\circ$ :

$$u_m = 55 R^{0,52} (\sin \alpha)^{0,4} . \quad (190)$$

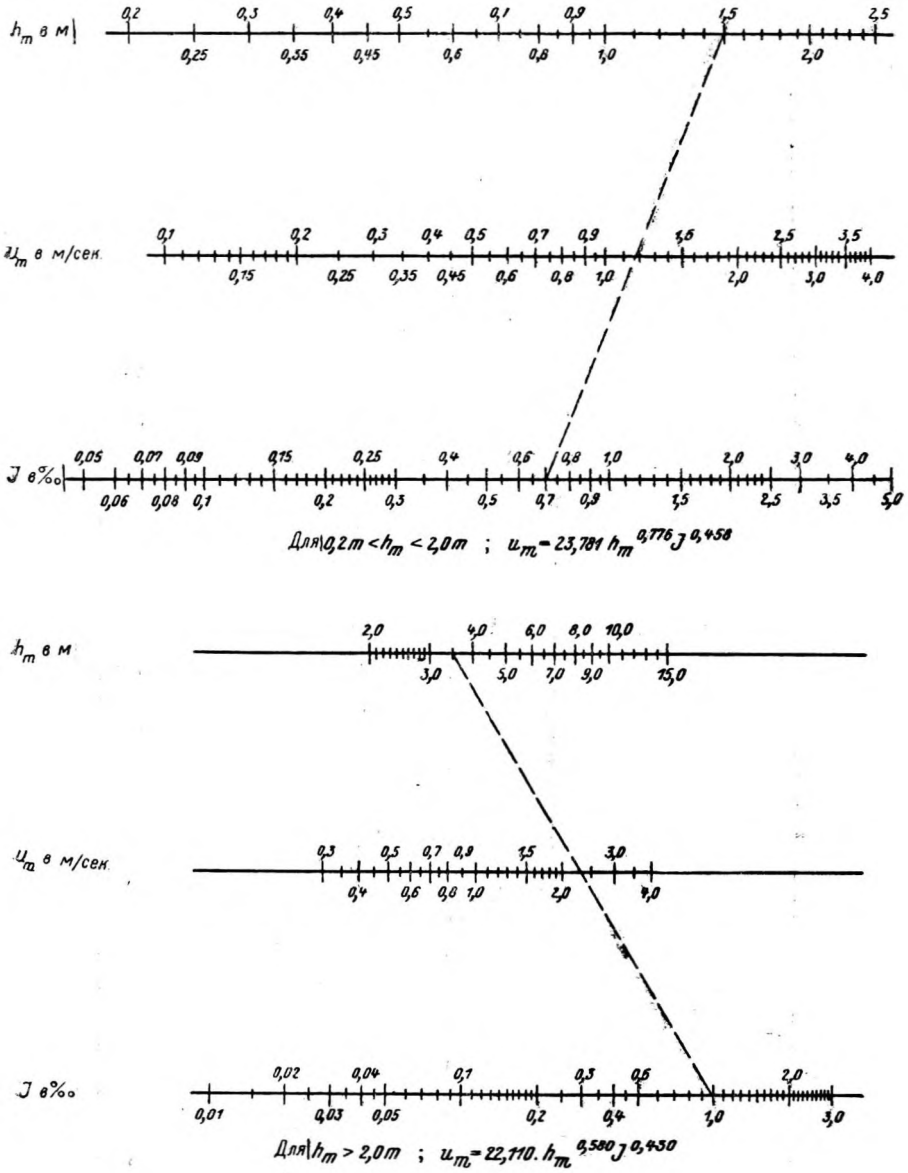


Рис. 314. Номограмма для скоростной формулы Грöгера.

Доля воды в смеси из воды и воздуха выражается через уравнения:

$$\left. \begin{aligned} p_w &= 0,40 R^{-0,05} (\sin \alpha)^{-0,26} && \text{для } \sin \alpha < 0,476, \\ p_w &= 0,28 R^{-0,05} (\sin \alpha)^{-0,74} && \text{для } \sin \alpha > 0,476 \end{aligned} \right\} . \quad (191)$$

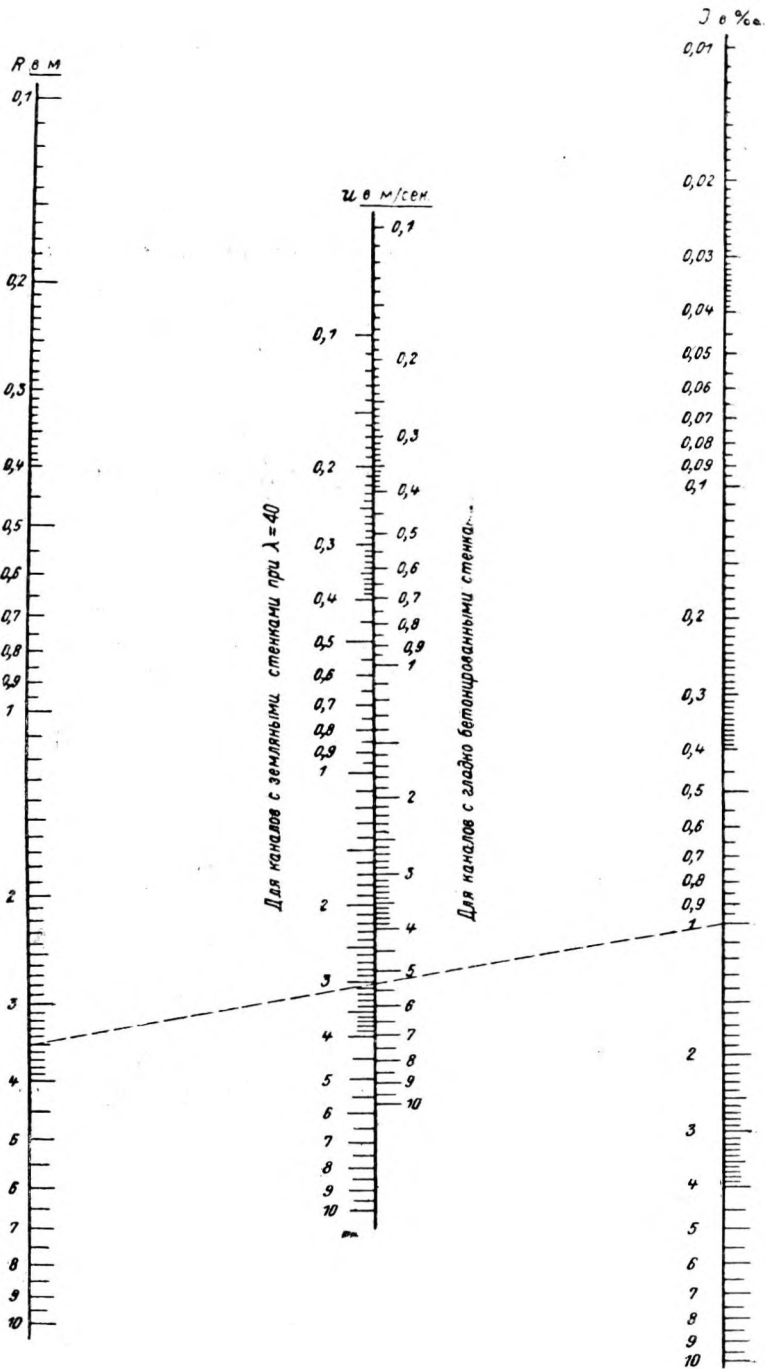


Рис. 315. Номограмма для скоростной формулы Форхгеймера.

Для расхода воды  $Q$  без примеси воздуха живое сечение, потребное для этого расхода в случае примеси воздуха, составит

$$F = \frac{Q}{u_m p_w}. \quad (192)$$

Чтобы избежать при подсчетах больших несоответствий с действительностью, необходимо при применении эмпирических скоростных формул придерживаться определенных правил.

Вычисление  $R$  по полному живому сечению и полному смоченному периметру допустимо только в случаях однородного (einteilig) поперечного сечения. При неоднородных или составных поперечных профилях, которые встречаются в реках с регулированием низких, средних и высоких вод, сле-

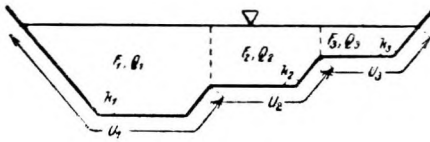


Рис. 316. Вычисление расхода воды при составном профиле.

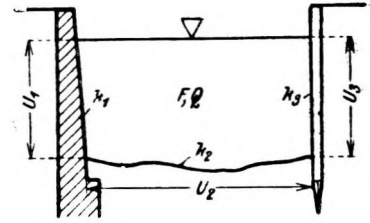


Рис. 317. Вычисление расхода воды при несоставном профиле со стенками разной шероховатости.

дует делить профиль на несколько частей с соответственными  $R$  и  $U$ , так как движение в каждой части происходит почти независимо от других частей.

Если например  $Q_1, Q_2, Q_3$  — расходы воды и  $U_1, U_2, U_3$  — соответственные частные смоченные периметры (рис. 316), то суммарный расход воды составляет

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 = u_{m,1} F_1 + u_{m,2} F_2 + u_{m,3} F_3$$

и, наконец, если применяется, например, уравнение (182), то

$$Q = \left[ k_1 \left( \frac{F_1}{U} \right)^{0,5} F_1 + k_2 \left( \frac{F_2}{U_2} \right)^{0,5} F_2 + k_3 \left( \frac{F_3}{U_3} \right)^{0,5} F_3 \right] J^{0,5}. \quad (193)$$

Если в несоставном поперечном профиле отдельные части смоченного периметра  $U_1, U_2$  и  $U_3$  имеют различные шероховатости (рис. 317), то, поскольку

$$R = \frac{F}{\Sigma U} = \frac{F}{U_1 + U_2 + U_3}$$

и, согласно общему выражению,

$$u_m^2 = k^2 R J = \frac{k^2}{U} F J.$$

Отсюда при различных значениях  $k$  вытекает, что

$$u_m^2 = \frac{F J}{\frac{U_1}{k_1^2} + \frac{U_2}{k_2^2} + \frac{U_3}{k_3^2}}$$

и, следовательно,

$$Q = F^{1,5} J^{0,5} \left[ \frac{1}{\frac{U_1}{k_1^2} + \frac{U_2}{k_2^2} + \frac{U_3}{k_3^2}} \right]^{0,5}. \quad (194)$$



Следует иметь в виду, что при построении эмпирических формул основой служили расходы воды, определенные в большинстве своем при отсутствии движения донных наносов. Установленные для этих формул коэффициенты отвечают, следовательно, движению потока, не несущего влекомых наносов. Исследования на реках показали, что с наступлением заметного передвижения наносов по дну реки, коэффициенты изменяются, причем значения  $n$  могут с глубиной воды как увеличиваться, так и убывать.

Вследствие этого все коэффициенты, приведенные для указанных выше формул, становятся неприменимыми, как только наступает движение наносов. Ввиду этого для вычислений большей точности можно применять только такие коэффициенты, которые выведены на основе расходов воды, определенных при движении наносов.

**Эмпирическое уравнение для кривой расходов воды.** Из выражений  $u_m = kh_m^{0,5} J^{0,5}$  и  $Q = u_m B h_m$  следует, что

$$Q = kBh^{1,5} J^{0,5}.$$

Принимая приближенно  $J$  за постоянную величину для всех расходов воды, получим

$$Q = a_1 h_m^{1,5}.$$

Если заменить  $h_m$  уровнем на водомерном посту  $h_p$ , то уравнение кривой расходов воды получается вида

$$Q = a_1 (h_p + a_2)^{1,5}. \quad (195)$$

Так как, вследствие отклонения формы поперечного сечения от четырехугольной, площади живого сечения возрастают в степени большей чем  $h_m^{1,5}$ , уравнение лучше выражать в общей параболической форме со степенью  $\alpha > 1,5$ :

$$Q = a_1 (h_p + a_2)^\alpha. \quad (196)$$

Для р. Эльбы у Течена, пользуясь данной формулой, получалось уравнение (при  $h_p$  в м):

$$Q = 78,09 (h_p + 1,45)^{1,953}.$$

Для практических целей является более целесообразным использовать уравнение вида:

$$Q = b_1 + b_2 h_p + b_3 h_p^2. \quad (197)$$

Пользуясь этой формулой при  $Q$  в  $m^3/сек$  и  $h_p$  в  $см$ , для р. Дуная у Вены (2,68 км) в 1900 г. получилось уравнение:

$$Q = 1597 + 7,12 h_p + 0,0086 h_p^2.$$

Так же находит себе применение логарифмическая линия в форме уравнения:<sup>1</sup>

$$\lg Q = c_1 \lg (h_p + c_2) + c_3. \quad (198)$$

Для створа водомерного поста на р. Мур у Фронлейтена, где русло находится в состоянии равновесия, получилось:

$$\lg Q = 2,50570 \lg (h_p + 120) - 3,3636.$$

<sup>1</sup> W. Reitz in W. Kesslitz. Über verschiedene Methoden zur Vorausberechnung von Monatsmittelwerten der Wasserführung österreichischer Alpenflüsse. Die Wasserwirtschaft. № 7, 8 и 9. Wien 1928.

### Эмпирические уравнения для кривых продолжительности расходов

**воды.** Кривая продолжительности или обеспеченности расходов воды представляет, согласно правилам математической статистики, суммарную кривую  $T(Q)$ , получаемую из кривой частоты при условии, что суммирование начинается с наибольшего наблюдаемого значения  $Q$  (рис. 318) и за сумму частот принято 365 дней.

Чтобы подобрать уравнение для полученной эмпирическим путем кривой продолжительности расходов воды, исходят из кривой частоты расходов воды, которая, как свидетельствует опыт, имеет обычно несимметричную форму.<sup>1</sup> Уравнение для нее может быть приближенно дано при помощи уравнения нормальной кривой частоты, если это последнее применить не к Самому аргументу, а к его логарифму. Вводя эту замену в уравнение нормальной кривой частоты—уравнение (109),—получают:

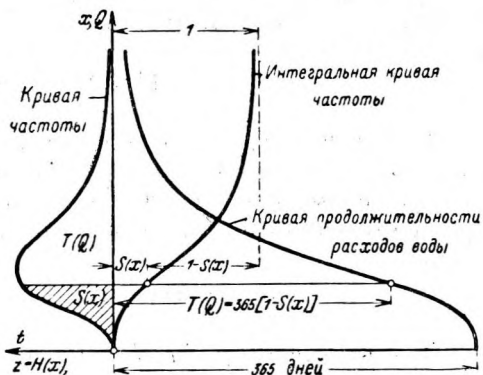


Рис. 318.

$$H(\lg x) = \frac{k}{\sqrt{\pi}} e^{-k^2 (\lg x - \lg x_d)^2} = \frac{k}{\sqrt{\pi}} e^{-k^2 \left(\lg \frac{x}{x_d}\right)^2}. \quad (199)$$

Для перехода от  $H(\lg x)$  к  $H(x)$  пользуемся зависимостью:

$$H(x) = H(\lg x) \frac{d(\lg x)}{dx}, \quad (200)$$

так как для кривой частоты при замене переменной  $x$  функцией  $f(x)$  должно быть соблюдено условие:

$$H(x) dx = H[f(x)] d[f(x)],$$

которое означает, что площади, заключенные между осью ординат и кривыми частоты  $H(x)$  и  $H[f(x)]$ , равны по величине.

Из уравнений (200) и (199) получается

$$H(x) = \frac{k \lg e}{x \sqrt{\pi}} e^{-k^2 \left(\frac{x}{x_d}\right)^2}. \quad (201)$$

Уравнение соответственной суммарной функции следует в общем виде из

$$S(x) = \int_0^x H(x) dx$$

и получается после замены  $\xi = k \lg \frac{x}{x_d}$  в виде:

$$S(x) = \frac{1}{2} [1 + \Phi(\xi)], \quad (202)$$

где

$$\Phi(\xi) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\xi} e^{-\xi^2} d\xi.$$

<sup>1</sup> Н. Grassberger. Die Anwendung der Wahrscheinlichkeitsrechnung auf die Wasserführung der Gewässer. Die Wasserwirtschaft, № 1—6, Wien 1932.

Кривая продолжительности расходов воды  $T(Q)$  выражается через уравнение (202) только приближенно. Степень совпадения между кривой и уравнением может быть увеличена, если включить в уравнение (202) дополнительные члены. В пределе достижимо при бесконечно большом числе членов полное совпадение, причем находит себе применение ряд Брунса: <sup>1</sup>

$$S(x) = \frac{1}{2} [1 + \Phi(\xi) + a\Phi_3(\xi) + b\Phi_4(\xi) + \dots]. \quad (203)$$

В нем  $\Phi_3, \Phi_4 \dots$  означают третью, четвертую ... производные от  $\Phi$  и  $a, b, \dots$  постоянные коэффициенты.

Для применения ряда Брунса к кривой продолжительности расходов воды достаточно сохранение члена  $a\Phi_3(\xi)$  и тогда, если принять  $x = Q$ , получается:

$$T(Q) = 365 [1 - S(Q)] = 182,5 [1 - \Phi(\xi) - a\Phi_3(\xi)]. \quad (204)$$

Три постоянных —  $x_d, k$  и  $a$  определяют, опираясь на три точки данной кривой продолжительности, для которых  $T(Q) = 58, 182,5$  и  $307$  дней. Обозначая соответственные  $Q$  через  $Q_{58}, Q_{182,5}$  и  $Q_{307}$  получают равенства:

$$\left. \begin{aligned} x_d &= \sqrt{Q_{58} Q_{307}}, \\ k &= \frac{\sqrt{2}}{\lg Q_{58} - \lg Q_{307}}, \\ a &= -\frac{1}{2} k \lg \frac{\sqrt{Q_{58} Q_{307}}}{Q_{182,5}}, \\ \xi &= k \lg \frac{Q}{Q_{182,5}} - k \lg \frac{\sqrt{Q_{58} Q_{307}}}{Q_{182,5}} \end{aligned} \right\}. \quad (205).$$

Значения функций  $\Phi(\xi)$  и  $\Phi_3(\xi)$  могут быть взяты из табл. 32.

Таблица 32

Значения функций для подсчета кривой продолжительности расходов воды

$\xi$	$\Phi(\xi)$	$\Phi_3(\xi)$	$\xi$	$\Phi(\xi)$	$\Phi_3(\xi)$	$\xi$	$\Phi(\xi)$	$\Phi_3(\xi)$
0,0	0,000	-2,257	1,0	0,8427	0,830	2,0	0,99532	0,289
0,1	0,112	-2,190	1,1	0,8802	0,956	2,1	0,99702	0,215
0,2	0,223	-1,995	1,2	0,9103	1,005	2,2	0,99814	0,151
0,3	0,329	-1,691	1,3	0,9340	0,991	2,3	0,99886	0,109
0,4	0,428	-1,308	1,4	0,9523	0,928	2,4	0,99931	0,075
0,5	0,520	-0,879	1,5	0,9661	0,832	2,5	0,999593	0,0502
0,6	0,604	-0,441	1,6	0,9763	0,719	2,6	0,999764	0,0328
0,7	0,678	-0,028	1,7	0,9838	0,600	2,7	0,999866	0,0210
0,8	0,742	0,333	1,8	0,9891	0,484	2,8	0,999925	0,01310
0,9	0,797	0,622	1,9	0,9928	0,380	2,9	0,999959	0,00799
1,0	0,843	0,830	2,0	0,9953	0,289	3,0	0,999978	0,00474

Ход вычислений показан ниже—на примере для створа Вена-Рейхс-брюкке на р. Дунае. На рис. 319 изображены средние кривые продолжительности за период 1920—1929 гг., полученные общепринятым графическим способом.

<sup>1</sup> Н. Брунс. Wahrscheinlichkeitsrechnung und Kollektivmasslehre. Leipzig 1906.

С годовой кривой продолжительности получается:

$$Q_{58} = 2760 \text{ м}^3/\text{сек},$$

$$Q_{182,5} = 1760 \text{ м}^3/\text{сек},$$

$$Q_{307} = 1160 \text{ м}^3/\text{сек}.$$

Отсюда, пользуясь уравнениями (205), получают:

$$k = \frac{\sqrt{2}}{\lg 2760 - \lg 1160},$$

$$a = -\frac{3,76}{2} \lg \frac{\sqrt{2760 \times 1160}}{1760} = -0,013,$$

$$\xi = 3,67 \lg \frac{Q}{1760} - 0,76 \lg \frac{\sqrt{1760 \times 1160}}{1760} = 3,76 \lg Q - 12,229.$$

Искомое уравнение годовой кривой продолжительности расходов воды получается окончательно в виде:

$$T(Q) = 182,5 [1 - \Phi(\xi) + 0,013 \Phi_3(\xi)],$$

$$\xi = 3,76 \lg Q - 12,229.$$

Подсчитанная и построенная по этому уравнению годовая кривая продолжительности нанесена на рис. 319 пунктиром и обнаруживает хорошее совпадение с наблюдаемой кривой продолжительности.

Эмпирические уравнения для кривых продолжительности могут быть получены также способом подбора, описание которого приведено ниже.<sup>1</sup>

**Эмпирическое уравнение кривой падения расхода воды в бездождное время.** Как свидетельствуют данные наблюдений, хронологические графики расходов воды обнаруживают после перехода через пик сначала быстрое, а затем постепенное падение. Сдвигая в горизонтальном направлении в одну непрерывную линию падения расхода воды отрезки графика, приходящиеся на спад, получают кривую падения расхода воды в бездождное время.<sup>2</sup> (рис. 320)

Характер и интенсивность выпадавших осадков и процесса таяния и различная влагоемкость и водопроницаемость почвы обуславливают раз-

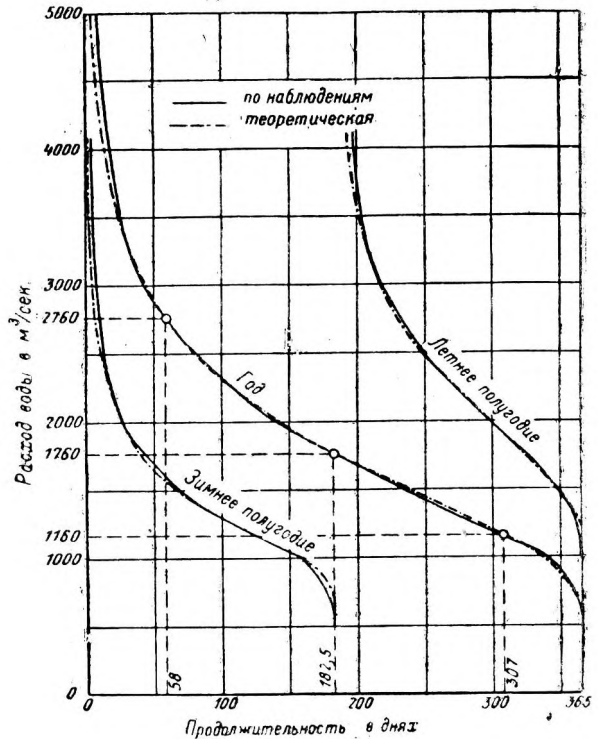


Рис. 319. Вывод эмпирического уравнения кривой продолжительности расходов воды р. Дуная у Вены-Рейхсбрюкке (по Грасбергеру).

<sup>1</sup> Относительно выбора масштаба см. F. Reinhold. Einfache zeichnerische Darstellung von Dauerkurven. Die Wasserwirtsch. № 14, Wien 1933.

<sup>2</sup> G. B e u r l e. Wetterkunde, Gewässerkunde. Wasserwirtschaft. Wasserkraft und Wasserwirtschaft, H. 14 u. 15, München 1930.

личные формы графика, которые, однако, как свидетельствует опыт, допускают приведение их к одной средней кривой падения расхода воды в бездождное время.

На рис. 321 изображена средняя кривая падения расхода воды в бездождное время для створа Фронлейтен. Для получения ее были взяты за

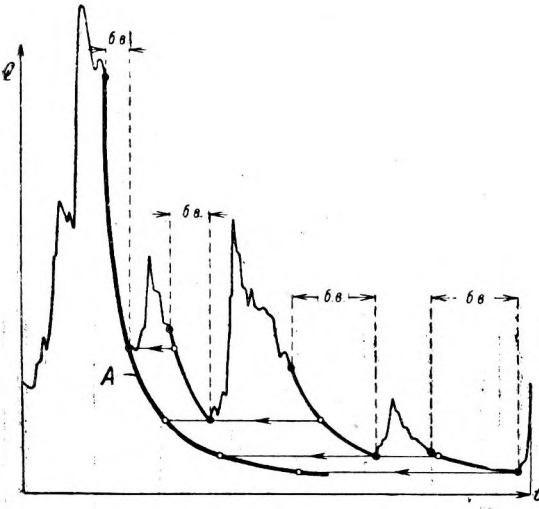


Рис. 320. Построение кривой падения расхода воды в бездождное время.

период 1900—1928 гг. все приходящиеся на спад отрезки графиков, где падение продолжалось по меньшей мере 5 дней, причем для расходов воды, по исключению ненадежных, подсчитаны средние значения.<sup>1</sup>

Уравнение кривой падения расхода воды может быть приведено к виду:

$$Q = ae^{b\sqrt{t}}, \quad (206)$$

где  $Q$ —расход воды, соответствующий числу дней  $t$ , считая от нулевого дня, и  $a$  и  $b$ —постоянные величины. По ряду пар значений  $Q$  и  $t$  известной кривой падения можно вычислить  $a$  и  $b$ , пользуясь способом наименьших квадратов.

Так, например, для створа Фронлейтен на р. Мур этим способом получено уравнение:

$$Q = 766,5 e^{-0,4030\sqrt{t}}$$

или

$$\lg Q = 2,8845 - 0,1750 t^{0,5}.$$

Эмпирическое уравнение кривой пробега уровней воды. Выше, при выводе понятия пробега, исходным материалом служила хронограмма расходов воды. Однако только в очень немногих случаях имеется достаточное число измерений расходов воды для выражения этой хронограммы с достаточной определенностью. Напротив, при густой водо-

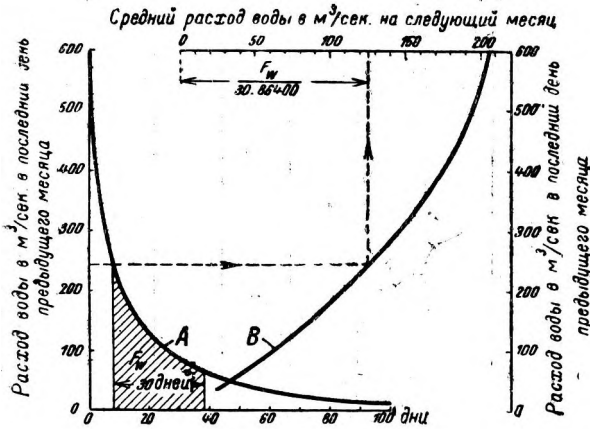


Рис. 321. Средняя кривая падения расхода воды в бездождное время для р. Мур у Фронлейтена за период 1900—1928 гг. Прогноз среднего расхода воды на следующий месяц по средней к. п. р. в б. в. (по Кеслицу).

мерной сети данные водомерных наблюдений всегда имеются в требуемом количестве. Поэтому кривые пробега уровней строят непосредственно по графикам колебания уровней, причем определяют для расстояний  $\Delta x$  между

<sup>1</sup> W. Kesslitz. Über verschiedene Methoden zur Vorausberechnung von Monatsmitteln der Wasserführung österreichischer Alpenflüsse. Die Wasserwirtschaft, H. 7, 8, 9, Wien 1928.

водомерными постами соответствующее время пробега  $\Delta t$  того или другого сравнимого и отмеченного на всем данном участке реки уровня.

Таковыми уровнями являются прежде всего устойчивые уровни низких вод и точки пиков и провалов графика. Их называют равноценными или соответственными уровнями.

Исходя из самой сущности сравнимых уровней можно бы полагать, что при устойчивом стоянии уровня равным уровням на верхнем посту должны соответствовать равные уровни и на нижнем посту. В действительности наблюдаются отклонения от этого, обусловленные влиянием притоков, особенностями в грунтовом питании, деформацией русла и т. д. Необходимо, по возможности, исключать этот недостаток путем соответственного проведения

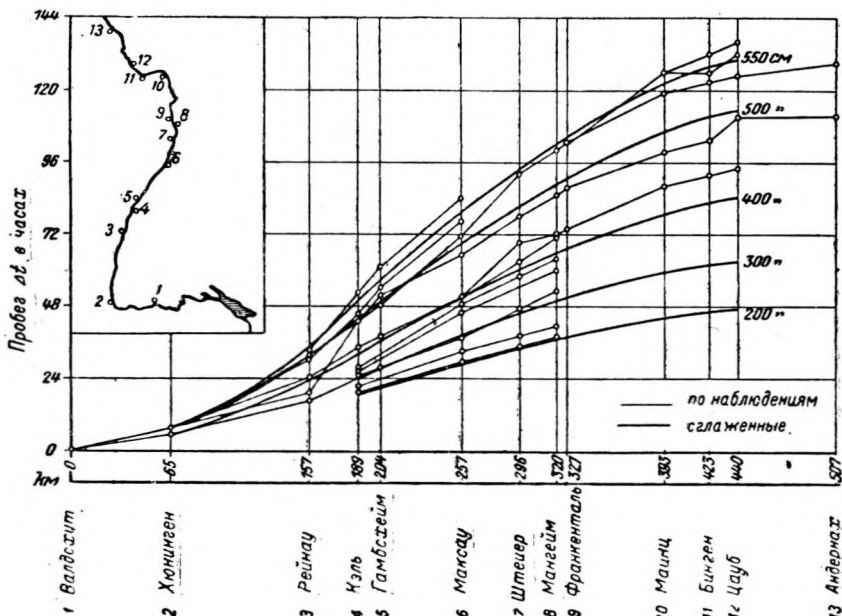


Рис. 322. Наблюденные и сглаженные кривые пробега соответственных уровней р. Рейна от Валдсхута до Андернаха.

Сглаженные кривые помечены исходными уровнями в Валдсхуте.

осредняющих линий, так как он отражается неблагоприятно на точности конечных значений.

Закон изменения характера пробега того или иного явления может быть выражен графически посредством пучка кривых пробега. На рис. 322 приведены подобного рода приближенные кривые для р. Рейна.

Каждая из приведенных кривых (по форме они все напоминают букву S), действительная для уровня воды  $h_p$ , может быть для уровней в пределах основного русла выражена при помощи показательной функции

$$\Delta t = a \left( 1 - e^{-\left(\frac{x}{b}\right)^2} \right) = f(x). \quad (207)$$

Для любого другого уровня воды  $h_p''$  получится уравнение в виде  $\psi/f(x)$ , где  $\psi$  является функцией разности уровней  $h_p' - h_p''$ , и может быть развернуто в ряд Тэйлора. Если следовательно, принять

$$\psi = \alpha + \beta(h_p' - h_p'') + \gamma(h_p' - h_p'')^2,$$

то отсюда следует общее уравнение хронограммы:

$$\Delta t = a [\alpha + \beta (h_p' - h_p'') + \gamma (h_p' - h_p'')^2] \left[ 1 - e^{-\left(\frac{x}{b}\right)^2} \right]. \quad (208)$$

В приведенном примере, беря за основу уровень в Валдсхуте  $h_p' = 550$  см, находят коэффициенты уравнения (207)  $a = 146$  и  $b = 292$ , и само уравнение

$$\Delta t = 146 (1 - e^{-0,00001173x^2}),$$

и коэффициенты уравнения (208)  $\alpha = 1$ , и  $\beta = -0,0028$  и  $\gamma = 0,000003$ . Отсюда следует выражение для времени пробега  $\Delta t$  любого уровня воды  $h_p''$  р. Рейна в Валдсхуте, выраженного в см, до какого-либо водомерного поста, расположенного вниз по реке на расстоянии  $x$  км от Валдсхута:

$$\Delta t = 146 [1 - 0,0028 (550 - h_p'') + 0,000003 (550 - h_p'')^2] \cdot [1 - e^{-0,00001173x^2}].$$

## VI. УСТАНОВЛЕНИЕ РАСЧЕТНЫХ РАСХОДОВ ВОДЫ

Расчетными называют расходы воды, принимаемые за основу при определении размеров гидротехнических сооружений. Для гидротехнических сооружений, служащих защитой от разрушительного действия высоких вод, например, для дамб или для сооружений эксплуатационного значения, которые должны пропускать паводки, например для водосбросов плотин, необходимо знать величину катастрофического расхода воды. Если речь идет только об использовании воды, например для гидросиловых установок или оросительных систем, то требуется знать полезные или рабочие расходы воды (Nutzwassermengen).

Существуют способы установления расчетных расходов воды непосредственным путем и косвенным путем, причем при соответственных предпосылках преимущество принадлежит непосредственным способам. Эти способы используют данные непосредственных измерений расходов воды. Косвенные способы опираются на зависимости, существующие между стоком, временем пробега, накоплением воды и осадками.

### УСТАНОВЛЕНИЕ КАТАСТРОФИЧЕСКИХ РАСХОДОВ ВОДЫ

#### 1. Установление катастрофических расходов воды непосредственным путем

При подразделении характерных расходов воды говорилось о катастрофическом расходе воды. Этим термином обозначался тот максимальный расход воды, который вообще когда-либо наблюдался в данном сечении реки. Это не исключает, разумеется, того, что может встретиться и еще больший расход воды, причем с этим вовсе не связано указание на время наступления расхода воды подобной величины. Понятие об обеспеченности того или иного расхода, введенное в целях расположения расходов воды, действительно обеспечило лучшее разграничение между ними. В случае максимального расхода воды обеспеченность не играет однако особой роли, и здесь много важнее знать повторяемость этого расхода.<sup>1</sup> А следовательно, требуется указать, как часто встречался на протяжении известного периода максимальный расход воды определенной величины (в какое время года он наблюдался—является безразличным). Еще лучше указать для повторяемости, равной единице, соответственное число лет. Таким образом под расходом с повторяемостью один раз в 100 лет или один раз в 1000 лет следует понимать тот расход воды, который встречался один раз в 100 лет или

<sup>1</sup> Это положение основано, очевидно, на недоразумении, объясняющемся, повидимому, новизною этих терминов для автора. (Прим. ред.)

в 1000 лет. Если рассматривать период длиннее того, за который имеются непосредственные наблюдения, то данные, полученные из наблюдений, должны уступить место значениям, обусловленным понятием вероятности.<sup>1</sup>

**Расположение катастрофических расходов воды в порядке вероятности их наступления.** Доказано, что обеспеченность расходов воды в створе того или иного водомерного поста может быть выражена за достаточно длинные периоды лет с помощью теории вероятностей. Максимальные расходы воды за длинные ряды лет обнаруживают, примерно, такое же распределение по частоте, как средние значения расходов воды. Поэтому, при расположении максимальных расходов воды по вероятности их наступления, является возможным применить теорию вероятностей, как и в случае вывода выражения для кривой продолжительности расходов воды в годовом разрезе.

И в этом случае получается, как то ясно видно из нанесенных на рис. 323 суммарных кривых частоты годовых максимумов р. Дуная у Вены, р. Инна у Шердинга и р. Эннса у Штейера, что распределение логарифмов аргумента  $Q$  практически симметрично по отношению к их среднему значению, то есть с достаточной точностью следует нормальной кривой частоты. Наблюдающиеся отклонения могут быть и в данном случае сведены к допустимым значениям при помощи разложения в ряд Брунса с одним дополнительным членом.

Для р. Дуная у Вены суммарная функция для годовых максимальных расходов воды получается, согласно уравнению (203), в виде:

$$S(Q_{\text{год В.В.}}) = \frac{1}{2} \left[ 1 + \Phi(\xi) - 0,063 \frac{1}{4} \Phi_3(\xi) \right], \quad (209)$$

$$\xi = 6,37 (\lg Q - 3,734)$$

где

<sup>1</sup> A. Hazen. Flood flows, a study of frequencies and magnitudes. New York 1930; R. Gibrat. Sur l'ajustement mathématique des courbes de debit dun cours d'eau. Académie des Sciences, Paris 1932; W. Kummer. Die Auswertung unsymmetrischer Verteilungsreihen der Grosszahlforschung. Schweiz. Bauzeitung, Bd. 101, № 11, 1933; H. Grassberger. Die Anwendung der Wahrscheinlichkeitsrechnung auf die Wasserführung der Gewässer. Die Wasserwirtschaft. № 1—6, Wien 1932, и его же — Untersuchungen über die Hochwässer des Jangtse-Kiang. Die Wasserwirtschaft. № 6, Wien 1933. Изложение в данном курсе следует аналитическому методу Грасбергера.

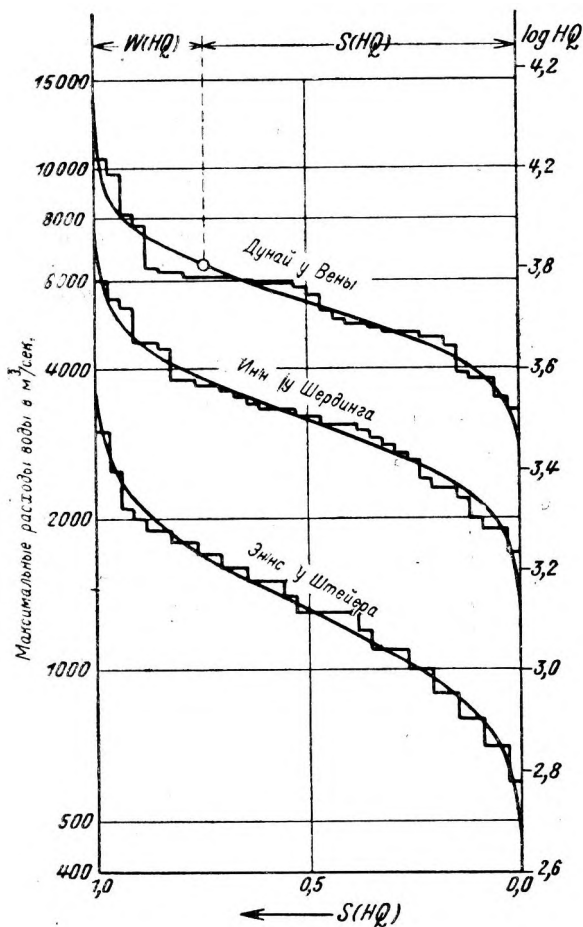


Рис. 323. Суммарные кривые продолжительности годовых максимумов расходов воды р. Дуная у Вены, р. Эннса у Штейера и р. Инна у Шердинга по наблюдениям за период 1897—1930 гг.



Основой для уравнений (209) служат наблюдения за 34-летний период с 1897 по 1930 г., которые представляют своего рода выборку из совокупности годовых максимальных расходов воды р. Дуная у Вены, причем сумма частот членов совокупности принята равной единице.<sup>1</sup> В силу этого  $S(Q_{\text{год}} \text{ В.В.})$  дает непосредственно вероятность годового максимума, меньшего чем  $Q_{\text{год}} \text{ В.В.}$ , а

$$W(Q_{\text{год}} \text{ В.В.}) = 1 - S(Q_{\text{год}} \text{ В.В.}) \quad (210)$$

вероятность максимума, большего чем  $(Q_{\text{год}} \text{ В.В.})$  Следовательно,

$$m = \frac{1}{1 - S(Q_{\text{год}} \text{ В.В.})} \quad (211)$$

означает число лет, на которое в среднем приходится один раз расход воды, величиною  $Q_{\text{год}} \text{ В.В.}$  или выше. В табл. 33 приведено это значение, вычисленное из уравнения (209) для расходов воды от 8000 до 14000  $\text{м}^3/\text{сек}$ .

Таблица 33

Вероятность наступления максимальных расходов воды р. Дуная у Вены

$Q_{\text{год}} \text{ В.В.}$ в $\text{м}^3/\text{сек}$	$\xi$	$\Phi(\xi)$	$\Phi_3(\xi)$	$S(Q_{\text{год}} \text{ В.В.})$	$W(Q_{\text{год}} \text{ В.В.})$	$m$ лет
8 000	1,076	0,8712	0,926	0,9283	0,072	14
9 000	1,400	0,9523	0,928	0,9689	0,031	32
10 000	1,693	0,9833	0,608	0,9869	0,0131	76
11 000	1,955	0,9942	0,330	0,9945	0,0055	180
12 000	2,200	0,99814	0,151	0,99783	0,0022	450
13 000	2,420	0,999367	0,070	0,999133	0,00087	1150
14 000	2,623	0,999787	0,0301	0,999657	0,00034	3000

Таблица показывает, что максимальный расход воды Дуная в 1899 г., равный 10500  $\text{м}^3/\text{сек}$ , обладает в среднем вероятностью один раз в 100 лет, а вычисленный максимальный расход воды в 1501 г., равный кругло 14 000  $\text{м}^3/\text{сек}$ , вероятностью один раз в 3000 лет. Тем самым не устанавливается, разумеется, определенного промежутка времени между подобными катастрофическими событиями, а только дается с точки зрения теории вероятностей значение вероятного ожидаемого в среднем наступления различной величины максимальных расходов воды. Теперь, если бы были известны, с одной стороны, затраты, которые необходимы для снижения вероятности убытков до определенного предела, а, с другой стороны, размеры неизбежных без этих затрат убытков, то можно было бы решить вопрос, оправдывается или нет та или иная строительная смета на сооружения, предназначенные для защиты от катастрофических расходов воды.

К такому сравнению максимальных расходов воды по их вероятности следовало бы стремиться всегда. Однако оно осуществимо только тогда, когда имеется настолько длинный ряд наблюдаемых значений аргумента совокупности  $Q_{\text{год}} \text{ В.В.}$ , что полученное на основе его распределение частот служит достаточно определенным выражением всей совокупности в целом. Это условие в известной степени еще удовлетворимо для более крупных рек, хотя и там часто окажется необходимым дополнить данные непосредственных наблюдений расходами воды, установленными указанными ниже способами.

**Установление катастрофических расходов воды путем экстраполяции кривых расходов воды.** Один из простейших в этом отношении случаев имеется тогда, когда по маркам, заложенным на высоте катастрофических подъемов воды, представляется возможность проследить катастрофиче-

<sup>1</sup> Общая площадь замыкаемая кривою частоты и осью абсцисс представляет сумму частот совокупности. Если принять ее равной единице, тогда какая-либо часть общей площади будет означать относительную частоту, которая идентична вероятности.

ские расходы воды далеко в прошлом, а непосредственные определения расходов воды охватывают значительно более короткий период времени с меньшими величинами расходов воды. Этот случай усложняется, когда марки высоких вод находятся не в исследуемом сечении реки, а где-либо в других пунктах по длине реки.

В первом случае, то есть когда марки высоких вод находятся в исследуемом сечении, воспользоваться ими оказывается затруднительным или совершенно невозможным только тогда, когда за период, прошедший между наблюдаемыми уровнями высоких вод и определениями расходов воды, произошли какие-либо изменения русла на участке реки, влияющем на режим

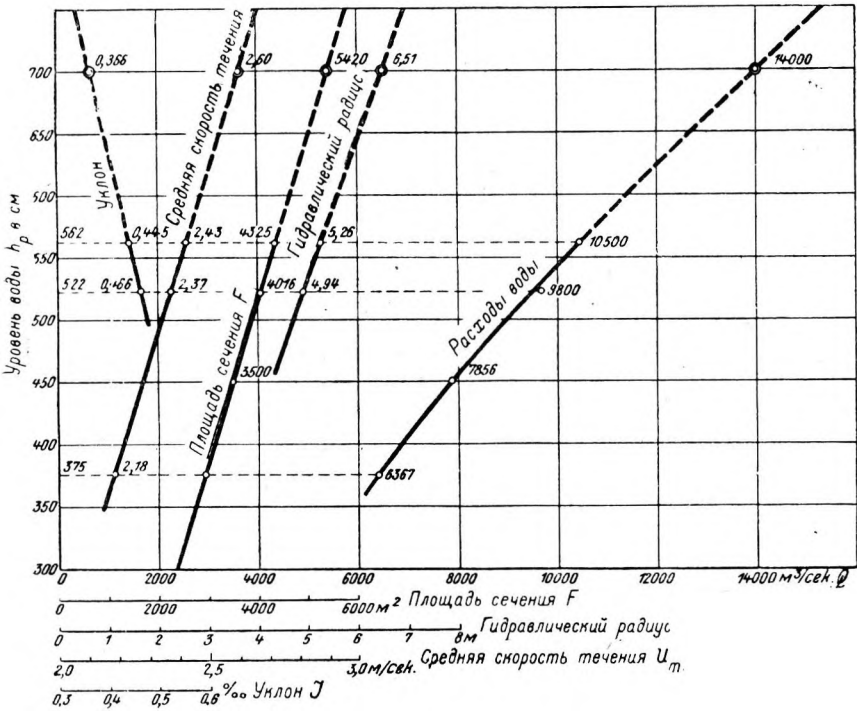


Рис. 324. Определение катастрофических расходов воды р. Дуная у Вены-Нусдорф путем экстраполяции.

в исследуемом ее сечении. При уверенности в постоянстве речного профиля пытаются установить величину расхода воды путем экстраполяции до уровня высоких вод известных зависимостей гидравлических элементов русла и потока. Такая экстраполяция производится обычно графически, однако лучше производить ее аналитически, облекая кривые зависимостей в математическую форму при помощи теории корреляции. При продолжении кривых, в первую очередь продолжают те из них, которые отличаются наиболее прямолинейным характером и при экстраполяции которых, особенно графическим методом, можно ожидать наименьшей ошибки. Как принято поступать при этом, пояснено на приводимом ниже примере.

В створе водомерного поста Вена-Нусдорф на р. Дунае требуется установить величину расхода воды для уровня в 700 см, соответствующего катастрофическому паводку 1501 г. (рис. 324). Определения расходов воды доходят только до уровня 562 см, наблюдаемого в 1899 г. при замеренном расходе 10500  $m^3/sec$ . Вопрос об изменениях русла в данном случае исключается, так как они уже учтены в указанном уровне 700 см.

Экстраполяция кривой  $F$ —кривой зависимости площади живого сечения от высоты уровня—может быть произведена на основе вычисленных по профилю значений площадей. При этом получается  $F = 5420 \text{ м}^2$ . Кривая средних скоростей известна до уровня  $562 \text{ см}$ . В данном случае она имеет почти прямолинейный характер и ее графическое или аналитическое продолжение возможно с достаточной точностью. Если экстраполировать ее графически, то получается для уровня  $h_p = 700 \text{ см}$ ;  $u_m = 2,60 \text{ м/сек}$ ; а отсюда расход воды  $Q = u_m F = 2,60 \cdot 5420 = 14\,000 \text{ м}^3/\text{сек}$ .

Если при некоторых определениях расходов воды наблюдался уклон свободной поверхности воды, тогда может быть вычислен обратным путем коэффициент шероховатости той или иной эмпирической скоростной формулы, например, коэффициент  $n$  из формулы Гангилье — Куттера. Экстраполяция кривых зависимости уклона  $J$  и коэффициента шероховатости в таких случаях обычно не вызывает затруднений и с их помощью удастся построить кривую скоростей. Когда известны кривые площадей и средних скоростей, то тем самым дана и кривая расходов воды.

Для рассмотренного выше примера вычисленный таким путем коэффициент  $n$  получается для всех точек расходов равным  $n = 0,026$ . Кривая для  $J$  может быть продолжена только с относительной точностью. Кривые  $F$  и  $R$  проводятся совершенно точно. Для  $h_p = 700 \text{ см}$  получается  $J = 0,00037$ ,  $R = 6,51 \text{ м}$ . Отсюда по формуле Гангилье—Куттера следует, что  $u_m = 2,51 \text{ м/сек}$ , и, наконец,  $Q = u_m F = 2,51 \cdot 5420 = 13\,600 \text{ м}^3/\text{сек}$ .

**Установление катастрофических расходов воды при помощи последовательного ряда кривых связи между уровнями на водомерных постах.** Если предстоит отнести к данному створу катастрофический уровень, отмеченный в каком-либо другом сечении реки, то попутные исследования относительно изменений русла приобретают еще большее значение. Для перенесения этого катастрофического уровня следует построить ряд кривых связи, начиная с сечения, в котором отмечен уровень, и кончая сечением, в котором требуется вычислить соответствующий перенесенному уровню расход воды. Промежуточные водомерные посты следует выбирать с таким расчетом, чтобы, по возможности, уменьшилось рассеяние точек, обусловленное переменным влиянием режима притоков на расположенный ниже пост. Построение такого рода связей следует производить особо осмотрительно, учитывая влияние притоков<sup>1</sup> и крайне внимательно относясь к выбору соответственных уровней. Чтобы исключить какую-либо произвольность и притти к аналитическому выражению связей, рекомендуется применение корреляционного исчисления.

Способ подобного определения приводится ниже. Для водомерного поста Вена-Нусдорф на р. Дунае требуется установить уровень воды, соответствующий марке, заложенной на уровне катастрофического подъема воды на водомерном посту, расположенном на большом расстоянии выше по реке.

Обширные исследования, производившиеся на р. Дунае, показали, что наибольший наблюдавшийся до настоящего времени подъем воды имел место в 1501 г. Из сохранившихся марок (Пассау  $h_p = 1129 \text{ см}$ , Энгельгартсцель  $h_p = 1132 \text{ см}$ , Линц  $h_p = 798 \text{ см}$  и Мельк  $h_p = 988 \text{ см}$ ) в настоящем примере для восстановления уровня в Нусдорфе использованы две: Энгельгартсцель  $h_p = 1132 \text{ см}$  и Мельк  $h_p = 988 \text{ см}$ .

Кривые связи водомерных постов проведены путем графического осреднения по точкам, соответствующим пикам графиков, которые и представляют соответственные уровни. Таким образом получены кривые связи Энгельгартсцель—Линц, Линц—Маутхаузен, Маутхаузен—Мельк и Мельк—Нусдорф (рис. 325). Уровню воды  $1132 \text{ см}$  в Энгельгартсцеле соответствуют в Линце, Маутхаузене, Мельке и Нусдорфе уровни  $785, 890, 960$  и  $695 \text{ см}$ . Если исходить

<sup>1</sup> Совершенно ясно, что точность этого способа, основанного на связи уровней, зависит от того, так ли влияли притоки на водный режим р. Дуная в свое время (в настоящем примере — во время паводка в 1501 г.), как это отражено в построенных кривых связи.

от уровня 988 см в Мельке, то в Нусдорфе получается соответственный ему уровень 705 см. За окончательный уровень паводка 1501 г. в Нусдорфе принимается средний из полученных по Энгельгартсцелю и Мельку  $695+705 / 2 = 700$  см. Этому уровню (рис. 325) соответствует расход воды  $14\ 000\ м^3/сек.$

В целях пояснения получения кривых связи по законам корреляции ниже приведены примеры вычисления корреляционных зависимостей для максимальных уровней в Энгельгартсцеле и Линце.

При обозначении уровней в Энгельгартсцеле через  $y$  и в Линце через  $x$  вычисления располагаются по схеме, приведенной в табл. 34

Таблица 34

**Корреляционные вычисления для вывода уравнений прямых регрессии максимальных расходов воды на водомерных постах Энгельгартсцель и Линц на р. Дунае**

Годы	$y$	$x$	$y - \bar{y}$	$x - \bar{x}$	$(x - \bar{x})(y - \bar{y})$	$(y - \bar{y})^2$	$(x - \bar{x})^2$
1862	900	595	402	249	100 098	161 604	62 001
1883	734	482	236	136	32 096	55 696	18 496
1890	651	465	153	119	18 207	23 409	14161
1892	524	380	26	34	884	676	1 156
1895	439	332	-59	-14	826	3 481	196
1896	577	405	79	59	4661	6 241	3481
1897	725	515	227	169	38 363	51 529	28 561
1899	869	607	371	261	96 831	137 641	68121
1900	392	270	-106	-76	8056	11236	5 776
1902	354	232	-144	-114	16 416	20 736	12 996
1903	363	252	-135	-94	12 690	18 225	8 836
1906	455	327	-43	-19	817	1849	361
1906	419	273	-79	-73	5 767	6 241	5329
1907	439	297	-59	-49	2 891	3 481	2 401
1907	390	268	-108	-78	8 424	11664	6 084
1908	402	263	-96	-83	7 968	9 216	6 889
1909	531	394	33	48	1584	1089	2 304
1910	475	337	-23	-9	207	529	81
1911	326	210	-172	-136	23 392	29 584	18 496
1911	420	267	-78	-79	6162	6 084	6 241
1912	476	339	-22	-7	154	484	49
1913	398	253	-100	-93	9 300	10 000	8 649
1913	439	296	-59	-50	2950	3 481	2 500
1914	506	360	8	14	112	64	196
1915	357	260	-141	-86	12126	19 881	7 396
1916	411	265	-87	-81	7 047	7 569	6 561
1917	497	374	-1	28	-28	1	784
1918	525	367	27	21	567	729	441
1919	445	306	-53	-40	2120	2 809	1600
1920	696	496	198	150	29 700	39 204	22 500
1922	370	218	-128	-128	16 384	16384	16384
1923	552	429	54	83	4482	2 916	6889
1924	478	359	-20	13	-260	400	169
1924	537	379	39	33	1287	1521	1089
1925	530	376	32	30	960	1024	900
1926	537	389	39	43	1677	1521	1849
1926	472	344	-26	-2	52	676	4
1927	415	260	-83	-86	7 138	6 889	7 396
1928	515	366	17	20	340	289	400
1930	437	286	-61	-60	3 660	3 721	3 600
1931	435	282	-63	-64	4 032	3 969	4 096
Суммы .	20 413	14175	-5	-11	490 140	683 734	365 419
Средние	498	346	0	0	—	—	—

<sup>1</sup> Суммарные значения, служащие для определения коэффициентов  $a$  и  $b$ , вычисляются здесь непосредственно на основе непосредственных значений аргумента, образующего первые три столбца таблицы. Составление корреляционной таблицы было бы (вследствие незначительного числа отдельных значений аргумента) нецелесообразным. См. об этом также указание во 2-й главе при рассмотрении корреляционных зависимостей.

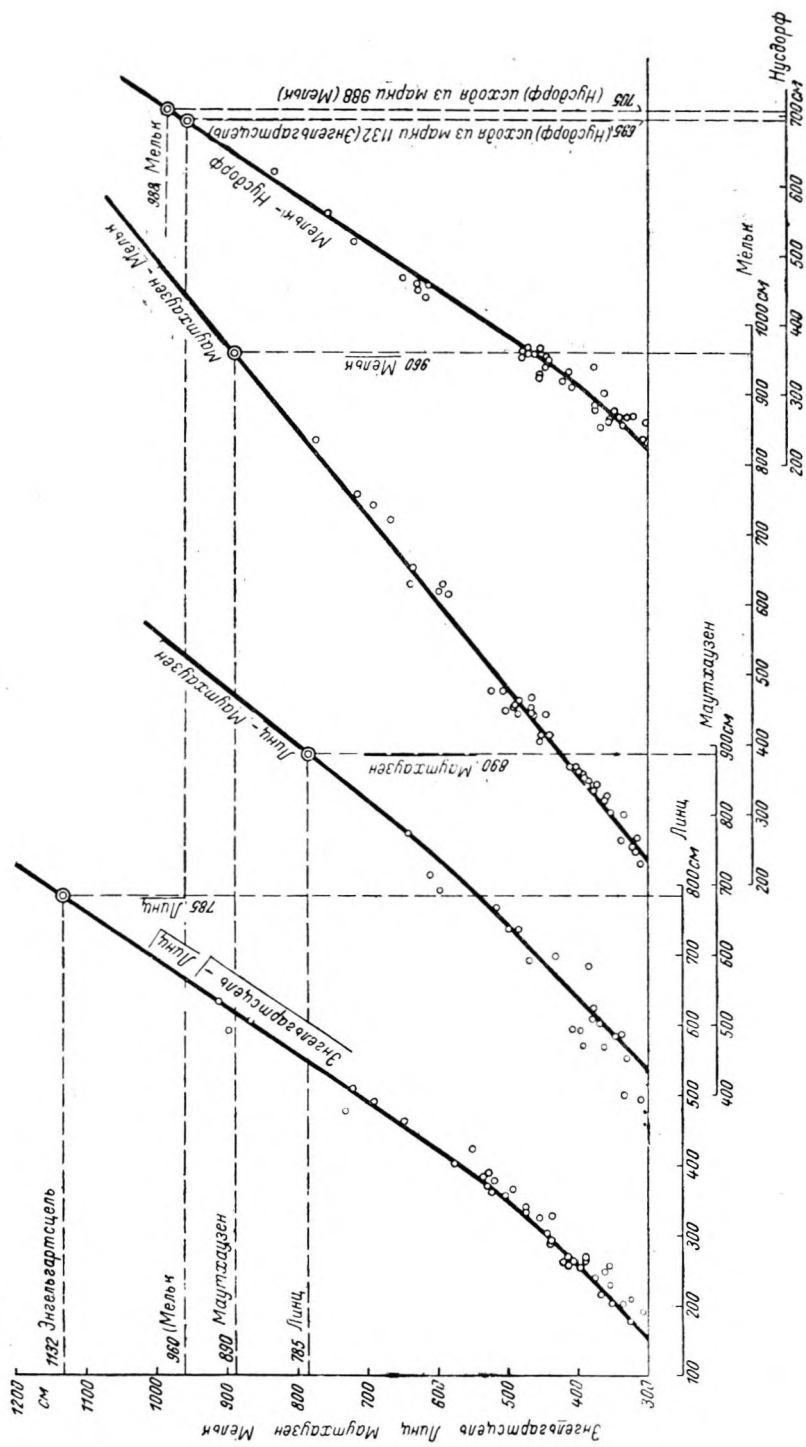


Рис. 325. Определение катастрофического расхода воды р. Дуная у Вены-Нусдорфа в 1501 г. при помощи кривых связи между уровнями воды на водомерных постах Энгельгартцель — Линц—Маутхаузен — Мельк—Нусдорф.

Отсюда для уравнений прямых регрессии:

$$\begin{aligned} h_{P, \text{Л.}} &= \bar{x} + b(h_{P, \text{Э.}} - \bar{y}), \\ h_{P, \text{Э.}} &= \bar{y} + a(h_{P, \text{Л.}} - \bar{x}), \end{aligned}$$

где уровень в Энгельгартсцеле обозначен через  $h_{P, \text{Э.}}$  и в Линце через  $h_{P, \text{Л.}}$ , получают следующие значения коэффициентов:

$$\begin{aligned} a &= \frac{\sum_1^{41} (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum_1^{41} (x_i - \bar{x})^2} = \frac{490\,140}{365\,419} = 1,341, \\ b &= \frac{\sum_1^{41} (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum_1^{41} (y_i - \bar{y})^2} = \frac{490\,140}{683\,734} = 0,717. \end{aligned}$$

Отсюда для уровня в Линце получается (из прямой регрессии  $x$  по  $y$ )

$$h_{P, \text{Л.}} = 346 + 0,717(1132 - 498) = 800 \text{ см.}$$

Коэффициент корреляции составит

$$r = \sqrt{ab} = \sqrt{0,9614} = 0,98.$$

Корреляционная связь является, таким образом, весьма тесной.

## 2. Установление катастрофических расходов воды косвенным путем

Для установления катастрофических расходов воды косвенным путем существуют графические и аналитические способы и эмпирические формулы. В большинстве случаев катастрофический расход воды и ожидаемый максимальный сток—понятия идентичные.

**Аналитический способ вычисления максимального стока по У. Пуппини.**<sup>1</sup> Предполагается, что модуль осадков  $q_N$  и коэффициент стока с постоянны по площади и во времени. Исходным служит уравнение:

$$Q_z dt = Q dt + dV, \quad (212)$$

где  $Q_z$  — расход воды, поступающий с водосбора к отводящему водотоку-осушителю до определенного его сечения за время  $dt$ ,  $Q$ —расход воды, проходящий через это сечение в тот же промежуток времени, и  $V$ —объем воды, находящейся в то же самое время в русле водотока. Если допустить, что поверхность воды во всех трубах осушительной сети неизменно параллельна поверхности дна,  $f$ —площадь, заполненная водою в выбранном сечении, и  $Q_{\text{макс.}}$ ,  $V_{\text{макс.}}$  и  $f_{\text{макс.}}$ —максимальные значения  $Q$ ,  $V$  и  $f$  при наивысшем положении уровня, то справедливо выражение:

$$\frac{V}{f} = \frac{V_{\text{макс.}}}{f_{\text{макс.}}}. \quad (213)$$

Следовательно,

$$dV = \frac{V_{\text{макс.}}}{f_{\text{макс.}}} df. \quad (214)$$

<sup>1</sup> U. P u p p i n i . Coefficienti udometrici per canali di bonifica. L'Ingegnere, N. 12, 1931; U. P u p p i n i . Coefficienti udometrici per generica scala di deflusso. L'Ingegnere, N. 4, 1932.

Из уравнения (189)  $Q = uf = kfR^{2/3} J^{1/2}$  при выражении гидравлического радиуса  $R$  через показательную функцию от  $f$ , следует, что

$$Q = k_1 f^\alpha = k_1 f^{\frac{\beta}{\gamma+1}}. \quad (215)$$

Если подставить  $dV$  и  $Q$  из уравнений (214) и (215) в уравнение (212), ввести

новую переменную  $x = \left( \frac{Q}{Q_z} \right)^{\frac{1}{\beta}}$  и иметь в виду, что  $k_1 = \frac{Q_{\text{макс.}}}{f_{\text{макс.}}^\alpha}$ , то получается:

$$dt = \frac{(\gamma+1) V_{\text{макс.}}}{\frac{1}{\frac{\alpha-1}{Q_{\text{макс.}}^\alpha} Q_z^\alpha}} \cdot \frac{x^\gamma}{1-x^\beta} dx.$$

откуда

$$t = \frac{(\gamma+1) V_{\text{макс.}}}{\frac{1}{\frac{\alpha-1}{Q_{\text{макс.}}^\alpha} Q_z^\alpha}} \int_0^x \frac{x^\gamma dx}{1-x^\beta} = \frac{(\gamma+1) V_{\text{макс.}}}{\frac{1}{\frac{\alpha-1}{Q_{\text{макс.}}^\alpha} Q_z^\alpha}} \cdot \Phi(x). \quad (216)$$

При обозначении значений  $t$  и  $x$ , соответствующих наивысшему положению уровня через  $T$  и  $X$ , получается

$$X = \left( \frac{Q_{\text{макс.}}}{Q_z} \right)^{\frac{1}{\beta}}, \quad (217)$$

$$T = \frac{(\gamma+1) V_{\text{макс.}}}{\frac{1}{\frac{\alpha-1}{Q_{\text{макс.}}^\alpha} Q_z^\alpha}} \Phi(X). \quad (218)$$

Если  $F$  означает площадь водосбора, то  $Q_z = cq_N F$ . Связь между модулем осадков  $q_N$  и продолжительностью осадков  $t_r$  дана при принятой частоте кривую осадков. Последняя может быть приближенно выражена через уравнение

$$q_N = at_r^{b-1}, \quad (219)$$

где  $a$  и  $b$ —постоянные величины и, судя по опыту,  $\frac{1}{4} \leq b \leq \frac{1}{2}$ . Отсюда следует:

$$Q_z = caFt_r^{b-1}, \quad (220)$$

$$X = \left( \frac{Q_{\text{макс.}}}{caFt_r^{b-1}} \right)^{\frac{1}{\beta}}. \quad (221)$$

Анализируя вопрос, можно доказать, что именно тот дождь принятой кривой осадков вызывает максимальный расход воды в осушительном русле,

<sup>1</sup> Монтанари принимает для суммарного слоя осадков за один дождь (продолжительностью  $t_r$ ) зависимость  $h_N = at_r^b$ . Из  $q_N = \frac{h_N}{t_r}$ , помноженных на единицу площади, следует уравнение кривой осадков  $q_N = at_r^{b-1}$ .

для которого  $t_r = T$ . Чтобы вычислить это значение, заменяют прежде всего в уравнениях (220) и (221)  $t_r$  через  $T$  и исключают через совместное решение этих уравнений и уравнения (218)  $T$  и  $Q_z$ . После некоторых преобразований получается

$$\Psi(Q_{\text{макс.}}, T) = Q_{\text{макс.}} - \left. \begin{aligned} & (\gamma + 1)^{\frac{b-1}{b}} X^{\left(\alpha + \frac{1}{b} - 1\right)} \times \\ & \times \left[ \Phi(X) \right]^{\frac{b-1}{b}} V_{\text{макс.}}^{\frac{b-1}{b}} (caF)^{\frac{1}{b}} = 0. \end{aligned} \right\} \quad (222)$$

Вслед за этим надлежит образовать для уравнения (222) производную  $Q_{\text{макс.}}$  по  $T$  и приравнять ее нулю, причем необходимо учесть, что  $Q_{\text{макс.}}$  так же, как и  $T$ , содержатся в выражениях для  $X$  и  $\Phi(X)$ . Поэтому получается в общем:

$$\frac{dQ_{\text{макс.}}}{dT} = \frac{\frac{\partial \Psi(Q_{\text{макс.}}, T)}{\partial T}}{\frac{\partial \Psi(Q_{\text{макс.}}, T)}{\partial Q_{\text{макс.}}}} = 0,$$

следовательно

$$\frac{\partial \Psi(Q_{\text{макс.}}, T)}{\partial T} = 0,$$

и особо

$$\frac{\partial}{\partial X} \left\{ X^{(\gamma + 1) \left(\alpha + \frac{1}{b} - 1\right)} \left[ \Phi(X) \right]^{\frac{b-1}{b}} \right\} \cdot \frac{\partial X}{\partial T} = 0,$$

откуда следует:

$$b = \frac{X \frac{\Phi'(X)}{\Phi(X)} - (\gamma + 1)}{X \frac{\Phi'(X)}{\Phi(X)} + (\gamma + 1) (\alpha - 1)}. \quad (223)$$

Здесь, согласно уравнению (216),

$$\Phi(X) = \int_0^X \frac{x^\gamma dx}{1 - x^\beta}, \quad (224)$$

откуда

$$\Phi'(X) = \frac{X^\gamma}{1 - X^\beta}. \quad (225)$$

Теперь следовало бы исключить из уравнений (222) и (223)  $T$ . Оказывается однако, что проще вместо  $T$  исключить переменную  $X$ . Однако произвести это исключение в общем виде оказывается невозможным. Поэтому, начиная отсюда, рекомендуется продолжать решение вводя определяемые уравнениями (215) и (219) числовые значения  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  и  $b$ . Чтобы получить в уравнении (216) легко интегрируемую, рациональную функцию и тем самым для  $\Phi(X)$  выражение в виде конечного ряда, рекомендуется коэффициенту  $\alpha$

придать вид простой дроби  $\beta / \gamma + 1$ , где, следовательно,  $\beta$  и  $\gamma$  являются натуральными числами. Способом приближения, причем лучше всего в табличной



форме со столбцами  $X$ ,  $\Phi(X)$  и  $\Phi'(X)$  получают из уравнений (223), (224) и (225) то числовое значение для  $X$ , которое отвечает данному значению  $b$ , подставляют его ( $X$ ) в уравнение (222) и получают, наконец, выражение в раскрытом виде для абсолютно максимального значения  $Q_{\text{макс}}$ . Последняя величина является максимальным расходом воды, по которому надлежит рассчитывать осушительный канал в выбранном сечении.

Промежуток времени, протекший от начала выпадения осадков до наступления максимального стока получается из уравнений (221) и (222) через исключение  $Q_{\text{макс}}$  в виде:

$$T = (\gamma + 1)^{\frac{1}{b}} X^{-\frac{\gamma+1}{b}} \left[ \Phi(X) \right]^{\frac{1}{b}} V_{\text{макс.}}^{\frac{1}{b}} (caF)^{-\frac{1}{b}}. \quad (226)$$

Решая в численных выражениях при  $a = 1, \frac{5}{4}, \frac{4}{3}, \frac{3}{2}, \frac{5}{3}, 2$  и  $b = \frac{1}{2}, \frac{1}{3}, \frac{1}{4}$  получают выражение для максимального расхода воды в  $\text{м}^3/\text{сек.}$ :

$$Q_{\text{макс.}} = 10^{-7} C(ca)^{\frac{1}{b}} \left( \frac{F}{V_{\text{макс.}}} \right)^{\frac{1}{b}-1} F, \quad (227)$$

где  $a$  надлежит выражать в  $\text{м X}$  день $^{-b}$ ,  $F$  в  $\text{м}^2$ ,  $V_{\text{макс.}}$  в  $\text{м}^3$ , и отвлеченный коэффициент  $C$  брать по табл. 36.

Таблица 36

Значения коэффициента  $C$  к формуле (227)

$a \backslash b$	1	$\frac{5}{4}$	$\frac{4}{3}$	$\frac{3}{2}$	$\frac{5}{3}$	2
1/2	46,4	49,6	50,7	52,9	53,9	58,0
1/3	29,7	32,3	33,5	35,1	36,8	39,1
1/4	22,2	23,9	24,5	26,1	27,6	29,5

Табличные значения могут быть заменены приближенным выражением  $(30a+60) b$ , причем допускаемая ошибка будет меньше 3,5%. Вводя это выражение вместо  $c$  в формулу (227), получают приближенную формулу, действительную для всех значений  $a$  и  $b$  в пределах  $1 \leq a \leq 2$  и  $1/4 \leq b \leq 1/2$

$$Q_{\text{макс.}} = 10^{-7} (30a + 60) b (ca)^{\frac{1}{b}} \left( \frac{F}{V_{\text{макс.}}} \right)^{\frac{1}{b}-1} F. \quad (228)$$

Для расчета осушительной сети большого протяжения является целесообразным использовать уравнения (227) и (228), а также выражения, служащие для подсчета размеров поперечных сечений, в виде графиков.<sup>1</sup>

Максимальный расход воды может быть установлен также с помощью чисто графического способа. Получаемые при этом результаты удовлетворительно согласуются с данными аналитического расчета.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> A. d e l P r a. Il calcolo della portata di piena dei canali di bonifica. L. Ingegnere. № 3, 1932.

<sup>2</sup> M. V i s i n t i n i, Sulla determinazione dell'effetto degli invasi sui deflussi di un corso d'acqua. (Metodo grafico). Annali dei Lavori Pubblici, 1932.

Проектирование ведется постепенно с последовательным присоединением к уже рассчитанной сети дальнейших ее частей. Если  $V_{\text{макс.}, 1}$  объем уже рассчитанной части осушительной сети, к которой присоединяется в порядке расчета дальнейший отрезок длиной  $L$ , то для него подбирается площадь  $f_{\text{макс.}}$  откуда следует  $V_{\text{макс.}, 2} = V_{\text{макс.}, 1} + Lf_{\text{макс.}}$ . На основе  $V_{\text{макс.}, 2}$  вычисляется  $Q_{\text{макс.}}$  и по нему  $f'_{\text{макс.}}$ . В случае значительного расхождения  $f_{\text{макс.}}$  и  $f'_{\text{макс.}}$  расчет с  $V_{\text{макс.}, 2} = V_{\text{макс.}, 1} + Lf_{\text{макс.}}$  повторяется.

В качестве примера взят водосбор с  $C = 0,56$ , который характеризуется кривою осадков с уравнением  $q_N = 0,068 t_r^{-1/2} \text{ м}^3/\text{день}/\text{м}^2$ . Осушительные каналы имеют трапециoidalное сечение, для которого  $\alpha = 4/3$ . Объем (объем при полном заполнении) уже рассчитанной части сети составляет  $V_{\text{макс.}, 1} = 1800000 \text{ м}^3$ . Следующий присоединяемый отрезок сети имеет длину  $L = 1000 \text{ м}$ , его поперечное сечение принимается  $f_{\text{макс.}} = 40 \text{ м}^2$ , так что получается  $V_{\text{макс.}, 2} = 1\ 840\ 000 \text{ м}^3$ . Величина соответствующей площади водосбора  $F = 8000 \text{ га}$ . Из уравнения (227) следует:

$$Q_{\text{макс.}} = 50,7 \times 10^{-7} (0,56 \times 0,068)^2 \frac{80\ 000\ 000^2}{1\ 840\ 000} = 25,6 \text{ м}^3/\text{сек.}$$

Если уклон рассчитываемого канала составляет 0,0001 и сечение взято с заложением откосов 1:2 и шириною по дну 10 м. то по уравнению (189) при  $k = 35$  глубина наполнения получится равной 2,89 м. Отсюда следует:

$$f'_{\text{макс.}} = 45,6 \text{ м}^2, V'_{\text{макс.}, 2} = 1\ 845\ 600 \text{ м}^3 \text{ и} \\ Q_{\text{макс.}} = 25,5 \text{ м}^3/\text{сек.} \text{ Повторять расчет не нужно.}$$

**Эмпирические формулы для расчета максимального стока.** Эмпирические формулы служат для приближенной оценки ожидаемого стока с водосборов, подверженных катастрофическим осадкам, и должны применяться только как крайнее вспомогательное средство, когда прочие способы отказываются служить. Так как результаты вычислений по эмпирическим формулам крайне ненадежны, берут обычно несколько формул и принимают за вероятнейшее среднее из полученных по ним значение.

В эмпирических формулах установленная выше связь между модулем осадков, их продолжительностью и распространением дождя учитывается только в скрытом виде. Формулы построены или задаваясь действием ливня и затяжного дождя, или на основе переходных чисел между средним и максимальным расходами воды, установленных эмпирическим путем, или же путем вывода средних значений из статистических данных о величинах максимальных расходов воды в данном речном бассейне.

Примером формул первого рода является тот способ подсчета, по которому производится вычисление катастрофического расхода воды  $K$ .  $Q$  для австрийских рек в Гидрологическом центральном бюро в Вене. При этом исходят из предположения, что на водосборе площадью  $F \text{ км}^2$  ливень с максимальной высотой слоя осадков в час выпадает на площади в  $25 \text{ км}^2$ , а на остальной площади водосбора выпадает затяжной дождь продолжительностью в 24 часа.

Если обозначить:  $h_{N, \text{ час}}$  — максимальная высота слоя осадков в час в миллиметрах;  $h_{N, \text{ сутки}}$  — наиболее частая, наблюдавшаяся в данном водосборе, суточная высота слоя осадков в миллиметрах;  $F$  — площадь водосбора в кв. километрах;  $c$  — коэффициент стока по таблицам Ишковского или по другим данным, то величина катастрофического расхода воды, выраженная в  $\text{м}^3/\text{сек.}$ , получается в виде:

$$K \cdot Q = c \left[ \frac{h_{N, \text{ час.}}}{3600} \cdot 10^3 \cdot 25 + \frac{h_{N, \text{ сутки}}}{86\ 400} \cdot 10^3 (F - 25) \right]. \quad (229)$$

По этой формуле для водосбора с площадью  $F=113 \text{ км}^2$ ,  $h_N, \text{ час} = 60 \text{ мм}$ ,  $h_N, \text{ сутки} = 60 \text{ мм}$  и  $c = 0,7$  получается, что

$$K \cdot Q = 0,7 (417 + 61) = 335 \text{ м}^3/\text{сек}.$$

Примером второго рода построения формул является стоковая формула Ишковского.<sup>1</sup> Выведенная на основе большого статистического материала, она имеет вид:<sup>2</sup>

$$K \cdot Q = 10^{-3} c_h m \bar{h}_N, \text{ год} F, \quad (230)$$

где  $c_h$  — коэффициент, зависящий от характера грунта, и  $m$  — коэффициент, учитывающий уменьшение стока, в зависимости от величины площади водосбора. Величины  $c_h$  и  $m$  следует брать по табл. 37 и 38.

Т а б л и ц а 37

Коэффициенты  $c_h$  по Ишковскому

Категории местности по топографическому признаку	Коэффициент $c_h$ для состояния местности по категориям			
	I	II	III	IV
Болота и низины.....	0,017	0,030	—	—
Низменность и ровное плоскогорье.....	0,035	0,040	—	—
Частью низменная, частью холмистая местность.....	0,030	0,055	—	—
Холмистая местность с пологими склонами.....	0,035	0,070	0,125	—
Частью холмистая местность или одни холмы с крутыми склонами.....	0,040	0,082	0,155	0,400
Возвышенности вроде Арденн, Эйфеля, Вестервальда и отрогов более крупных гор, смотря по крутизне склонов.....	0,045	0,100	0,190	0,450
Возвышенности вроде Гарца, Тюрингского леса, Рона, Рудных гор и др., смотря по крутизне склонов.....	0,050	0,120	0,225	0,500
Возвышенности вроде Шварцвальда, Вогез, Исполинских гор, Судет, Бескид, смотря по крутизне склонов.....	0,055	0,140	0,290	0,550
Высокогорная местность, смотря по крутизне склонов.....	0,060—0,080	0,160—0,210	0,360—0,600	0,600—0,800

При выборе коэффициента  $c_h$  следует различать следующие четыре категории местности:

*Категория I.* При всех возвышениях местности для сильно проницаемых грунтов с нормальной растительностью или для смешанных грунтов с обильной растительностью и для пашни. Она дает до  $F=4000 \text{ км}^2$  при менее крупных водосборах с высоким стоянием уровня грунтовых вод уменьшенные расходы воды. Поэтому до  $F=1000 \text{ км}^2$  следует брать категорию II, а между 1000 и 4000  $\text{км}^2$  комбинировать категории I и II. Для  $F < 1000 \text{ км}^2$  категория I применяется только в случаях очень проницаемых грунтов.

*Категория II.* Для всех речных бассейнов при смешанных грунтах с нормальной растительностью в холмистой и гористой местности или при таких же и до менее проницаемых грунтов на равнинной и слабо волнистой

<sup>1</sup> R. Iskowski. Beitrag zur Ermittlung der Niedrigst-, Normal- und Höchstwassermengen auf Grund charakteristischer Merkmale der Flussgebiete. Z. d. österr. Ing. u. Arch. Ver. S. 69, 1886.

<sup>2</sup> Формулу Ишковского, вследствие неправильного ее построения (учет годовой величины осадков для определения величины максимального расхода) и растяжимости коэффициентов, применять не рекомендуется. (Прим. пер.)

местности. При более возвышенном характере местности следует принимать до  $F = 150 \text{ км}^2$ —III категорию, до  $F = 1000 \text{ км}^2$  комбинировать категории II и III, для  $F > 1000 \text{ км}^2$ —II категорию.

*Категория III.* При водонепроницаемых грунтах с нормальной растительностью в холмистой и гористой местности с крутыми склонами, примерно, до  $F = 5000 \text{ км}^2$ . Для  $F$  от 5000 до 12 000  $\text{км}^2$  принимается комбинация из категорий II и III; при еще больших площадях—категория II или, смотря по обстоятельствам, комбинация из категорий I и II. Для менее крупных водосборов с более значительным уклоном для  $F$  до 50  $\text{км}^2$  следует применять категорию IV и выше, примерно, до  $F = 300 \text{ км}^2$  комбинировать категории III и IV.

*Категория IV.* При очень непроницаемых грунтах со скудной растительностью или совсем без нее, в холмистой и гористой местности с крутыми склонами, а также для  $K Q$  при  $F$  до 300  $\text{км}^2$ .

Таблица 38

Коэффициенты  $m$  по Ишковскому

$F$	$m$	$F$	$m$	$F$	$m$	$F$	$m$	$F$	$m$
1	10,000	200	6,87	1400	4,320	8 000	3,060	110 000	1,980
10	9,5	250	6,70	1600	4,145	9 000	3,038	120 000	1,920
20	9,0	300	6,55	1800	3,960	10 000	3,017	130 000	1,855
30	8,5	350	6,37	2000	3,775	20 000	2,909	140 000	1,790
40	8,23	400	6,22	2500	3,613	30 000	2,801	150 000	1,725
50	7,95	500	5,90	3000	3,450	40 000	2,693	160 000	1,650
60	7,75	600	5,60	3500	3,335	50 000	2,575	170 000	1,575
70	7,60	700	5,35	4000	3,250	60 000	2,470	180 000	1,500
80	7,50	800	5,12	4500	3,200	70 000	2,365	190 000	1,425
90	7,43	900	4,90	5000	3,125	80 000	2,260	200 000	1,350
100	7,40	1000	4,70	6000	3,103	90 000	2,155	225 000	1,175
150	7,10	1200	4,515	7000	3,082	100 000	2,050	250 000	1,000

Для приведенного выше примера, согласно данным наблюдений,  $h_{N, \text{год}} = 1650 \text{ мм}$ . По таблице 38 для  $F=113 \text{ км}^2$ ,  $m = 7,4$ . Водосбор расположен в высокогорной местности с некрутыми склонами и его правильное всего оценить как средний между II и III категориями, приняв при этих условиях для  $s$  приближенное значение 0,26.

$$K. Q = 10^{-3} \times 0,26 \times 7,4 \times 1650 \times 113 = 353 \text{ м}^3/\text{сек.}$$

К группе стоковых формул, которые образовались на основе осреднений, принадлежит стоковая формула Кресника: <sup>1</sup>

$$K. Q = \alpha F \frac{32}{0,5 + \sqrt{F}} \text{ в } \text{м}^3/\text{сек}, \quad (231)$$

где  $\alpha$ , как правило, равняется 1,0. При вытянутых водосборах с большим снижением расходов  $\alpha$  падает до 0,6 и при особых условиях повышается до 6,0.

В вышеприведенном примере при  $\alpha = 0,9$  получается, что

$$K. Q = 0,9 \frac{32}{0,5 + \sqrt{113}} 113 = 292 \text{ м}^3/\text{сек.}$$

<sup>1</sup> P. K r e s n i k . Allgemeine Berechnung der Wasser-, Profils- und Gefällsverhältnisse für Flüsse und Kanäle. Technische Vorträge und Abhandlungen, Wien 1886.

Другой формулой этого рода является стоковая формула Хофбауера: <sup>1</sup>

$$K. Q = 60^3 \sqrt{F} \text{ в м}^3/\text{сек}, \quad (232)$$

для которой в пределах  $20000 \text{ км}^2 > F > 10 \text{ км}^2$ :

для равнинной местности	$\beta = 0,25 - 0,35$
для холмистой местности	$\beta = 0,35 - 0,50$
для гористой местности	$\beta = 0,50 - 0,70$

Для того же примера при  $\beta = 0,6$

$$K. Q = 60 \times 0,6 \times \sqrt{113} = 378 \text{ м}^3/\text{сек}.$$

## УСТАНОВЛЕНИЕ ПОЛЕЗНЫХ РАСХОДОВ ВОДЫ

### 1. Установление полезных расходов воды непосредственным путем

При установлении катастрофических расходов воды применение непосредственного метода сильно ограничено из-за отсутствия достаточно длинных гидрометрических рядов, а также и водомерных наблюдений. В большинстве случаев приходится прибегать к косвенным способам, используя данные об осадках. При малых или бытовых расходах, которые главным образом и служат в качестве полезных расходов воды, положение дела обратное. Применение способов, опирающихся на данные об осадках, сопряжено с большими трудностями, так как эти воды поддерживаются, в первую очередь, за счет постепенного расходования запасов грунтовых вод и питания водами глетчеров и снеговых полей, связь же между осадками и избылью грунтовых вод исследована мало. Однако положение сполезными расходами воды благоприятнее в том смысле, что благодаря наличию при низких водах большого числа фактических измерений, можно обходиться почти совсем без приближенных методов.

Надо иметь в виду, что при установлении полезных расходов воды деформации русла могут сказаться весьма сильно на точности результатов.

В этом случае чисто местные изменения поперечных сечений речного русла, не связанные с общим углублением или поднятием dna отдельных речных участков, вовсе не сказывающиеся на положении линии продольного профиля, могут вызывать значительные видоизменения кривой расходов воды. Ввиду этого следует повторять определения расходов воды при низких расходах, по крайней мере каждый раз после прохождения исключительной силы наводка, и учитывать при выводе средних величин происшедшие изменения.

**Установление зимних расходов воды.** Изменяемость кривой расходов воды в каком-либо определенном сечении реки может быть вызвана не только изменениями речного русла. Образование льда может также коренным образом изменить пропускную способность живого сечения реки.

Ледообразование, которое может проявляться как в виде поверхностного, так и донного льда, изменяет не только форму живого сечения, но и шероховатость его стенок. Наблюдения показали, что при одном и том же уровне разница в величине расходов воды при открытом и при частью замерзшем русле доходит до 80%. Совершенно ясно, что нельзя не учитывать этого обстоятельства. Трудности по построению кривых расходов воды, точно отвечающих зимним условиям, весьма значительны; поэтому стремятся избежать этого, применяя разного рода приближенные способы.

В Германии зимние расходы воды стараются определять, по возможности, непосредственным измерением их. Это наиболее верный, но и наиболее трудоемкий путь. В Швеции и в США определяют зимние расходы воды посредством графического способа уменьшения, опираясь на контрольные

<sup>1</sup> R. H o f b a u e r. Eine neue Formel für die Ermittlung der grössten Hochwassermengen Österr. Wochenschrift f. d. öffentl. Baudienst, H. 3, 1916.

измерения на незамерзших участках реки. Этот путь ненадежен, так как в просветах между замерзшим руслом изменения уровня могут вызываться различными причинами.

В Эстонии строят самостоятельные зимние кривые расходов воды, а в Литве переходят к зимним расходам воды от летних при помощи коэффициента, выражающего отношение зимнего расхода воды к летнему.

Этот последний способ привел ко вполне удовлетворительным результатам. В основу его положена мысль, что сдвиг кривой расходов воды вызывается, в первую очередь, увеличением шероховатости стенок русла и лишь затем уменьшением поперечного сечения.<sup>1</sup> Если средняя скорость течения определяется формулой  $u_m = \lambda R^{0,7} J^{0,5}$ , в которой при форме сечения, близкой к корытообразной,  $R$  может быть заменено через  $h_m'$ , то при ширине реки  $B$  летний расход воды будет

$$Q' = B h_m \lambda_1 h_m^{0,7} J^{0,5} = B \lambda_1 h_m^{1,7} J^{0,5}.$$

Если в начале наблюдения учесть только изменение шероховатости и увеличение смоченного периметра на ширину ледяного покрова, которая равна ширине реки, то расход воды изменится и будет иметь выражение:

$$Q'' = B h_m \lambda_2 \left( \frac{h_m}{2} \right)^{0,7} J^{0,5} = \left( \frac{1}{2} \right)^{0,7} B \lambda_2 h_m^{1,7} J^{0,5}.$$

Поверхностный ледяной покров, толщиной  $s$  уменьшает, однако, и величину площади живого сечения, а вместе с тем и среднюю глубину до величины  $h_m' = h_m - s$ , и окончательное выражение для зимнего расхода воды получается в виде:

$$Q''' = \left( \frac{1}{2} \right)^{0,7} B \lambda_2 (h_m - s)^{1,7} J^{0,5}. \quad (233)$$

Отношение зимнего расхода воды к летнему получается при неизменном поверхностном уклоне воды в виде:

$$\varepsilon = \frac{Q'''}{Q'} = 0,62 \frac{\lambda_2}{\lambda_1} \left( 1 - \frac{s}{h_m} \right)^{1,7}, \quad (234)$$

откуда видно, что оно зависит, преимущественно, от характеризующего шероховатость русла коэффициента  $\lambda$  и в меньшей степени от  $s$ .

Вычисление коэффициента  $\varepsilon$  по нескольким определениям расхода воды в поперечном сечении гидрометрического створа Неманиунай на Немане (рис. 228) дало результаты, показанные в табл. 39.

Установление зимних расходов воды по летним показано на рис. 326.

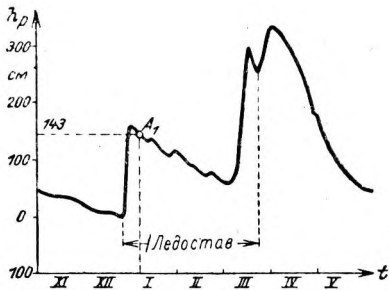
Ход изменения  $\varepsilon$  может быть установлен с достаточной точностью всего на основании нескольких измеренных зимних расходов воды, если иметь в виду следующее. При образовании ледяного покрова  $\varepsilon$  быстро падает от 1 до минимального своего значения, затем начинает медленно возрастать вместе со сглаживающим действием воды на ледяную поверхность и затем с началом исчезновения ледяного покрова вновь быстро возрастает до 1.

В условиях пропускной способности открытого русла для точки  $A_1$  графика колебания уровня воды (рис. 326-а) получают при  $\varepsilon = 1$  точку  $A_2$  на графике изменения  $\varepsilon$  (рис. 326-б), отсюда точку  $A_3$  на летней кривой расходов воды, для которой  $Q = 168 \text{ м}^3/\text{сек.}$  (рис. 326-с), наконец, точку  $A_4$  летнего графика колебания расходов воды (рис. 326-д). Теперь при учете ледяного покрова той же точке  $A_1$  соответствует точка  $A_2'$  с  $\varepsilon = 0,3$ , откуда

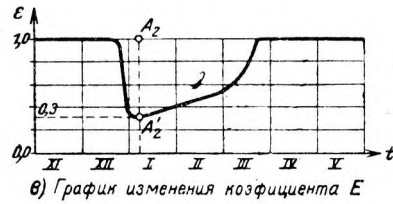
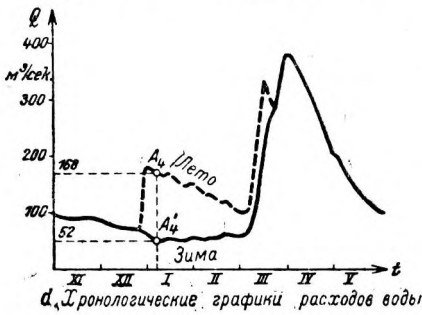
<sup>1</sup> St. K o l u p a i l a. Die Berechnung der Winterabflussmengen. II Baltische hydrologische und hydrometrische Konferenz, Tallin 1928.

Вычисление  $\epsilon$  для гидрометрического створа Неманиунай на р. Немане

Величины	Дата измерения		
	21 XII 1927	24 I 1928	8 III 1928
$h_p$ , в см . . . . .	204	189	132
$Q$ , в м <sup>3</sup> /сек . . . . .	530	488	345
$F$ , в м <sup>2</sup> . . . . .	492,8	456,7	377,1
$u_m$ , в м <sup>3</sup> /сек . . . . .	0,296	0,528	0,683
$B$ , в м . . . . .	150	148	148
$h_m$ , в м . . . . .	3,28	3,09	2,52
$s$ , в м . . . . .	0,44	0,42	0,45
$\frac{s}{h}$ . . . . .	0,134	0,137	0,177
$0,62 \left(1 - \frac{s}{h_m}\right)^{1,7}$ . . . . .	0,484	0,479	0,444
$\lambda_2$ . . . . .	11,30	22,8	40,3
$\lambda_1$ . . . . .	23,0	25,6	29,4
$\frac{\lambda_2}{\lambda_1}$ . . . . .	0,49	0,89	1,37
$Q^{1,11}$ в м <sup>3</sup> /сек . . . . .	125,4	208,5	209,5
$\epsilon$ . . . . .	0,237	0,427	0,607



а) Хронологический график уровня воды

в) График изменения коэффициента  $\epsilon$ 

д) Хронологические графики расходов воды

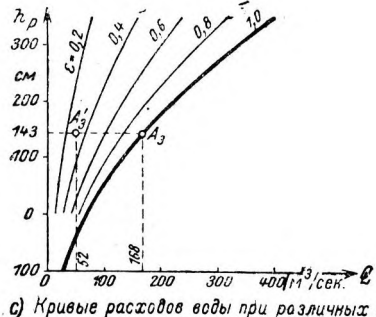
е) Кривые расходов воды при различных  $\epsilon$ 

Рис. 326. Установление хронологического графика зимних расходов воды по Колупайла.

при том же уровне воды  $h_p = 143$  см, получается точка  $A'_3$ , которой соответствует зимний расход воды  $Q = 52$  м<sup>3</sup>/сек, дающий на графике колебания уровня воды точку  $A'_4$ .

## 2. Установление полезных расходов воды косвенным путем

Если данные непосредственных определений расходов воды отсутствуют или нельзя гарантировать измерения их в ближайшее время, а, с другой стороны, для составления какого-либо проекта требуются данные о стоке, то должен быть найден путь для заключения о режиме стока по осадкам и, там где они имеются, по водомерным данным. Необходимо только всегда помнить, что способы, основанные на данных об осадках, являются крайними средствами, и неточность их сказывается при малых расходах воды гораздо больше, чем при максимальных. Если максимальные расходы воды, подсчитанные для проектирования каких-либо защитных сооружений, при расчете несколько увеличивают, то это идет в запас, так как возрастает гарантия от разрушений, которые могут быть вызваны высокими паводками; в пределах низких бытовых расходов воды подобного рода произвольные исправления едва ли допустимы, так как в таком случае становится сомнительным любой экономический расчет.

Наряду с эмпирическими формулами для максимального стока, Ишковский дал формулы и для подсчета бытовых расходов воды:

$$Q \text{ Ср.Н.В.} = 0,4 \nu \overline{Q \text{ Ср.В.}} \quad (235)$$

$$Q \text{ Н.Н.В.} = 0,2 \nu \overline{Q \text{ Ср.В.}} \quad (236)$$

где  $\overline{Q \text{ Ср.В.}} = 0,03171 c h_{N, \text{ год}} F$ , а коэффициент  $\nu$  следует брать по табл. 40. Этот коэффициент зависит от характера почвы, от растительного покрова, от величины площади водосбора и от распределения осадков.

Таблица 40

### Коэффициенты $\nu$ по Ишковскому

Характер водосбора	$\nu$
Средние грунты с нормальной растительностью .....	1
Для водотоков, регулируемых озерами	1,5
Более проницаемые грунты с меньшей растительностью .....	0,4
Менее проницаемые грунты с большей растительностью .....	0,8
Непроницаемые грунты в равнинной местности .....	1—1,5
Непроницаемые грунты в холмистой местности (от высшего к низшему пределу, с уменьшением растительности).....	0,8—0,5
Непроницаемые породы в горах.....	0,6—0,3
Непроницаемые породы и небольшие ручьи.....	до 0,0

При  $F < 200 \text{ км}^2$  и густой растительности  $\nu$  следует увеличивать на 25%.

При	$200 < F < 20\ 000$	$\nu$ остается без изменений,
При	$20\ 000 < F < 50\ 000$	$\nu$ следует увеличивать на 0—15%
При	$50\ 000 < F < 100\ 000$	$\nu$ следует увеличивать на 10—50%
При	$100\ 000 < F < 200\ 000$	$\nu$ следует увеличивать на 50—100%

Чем равномернее распределение осадков, тем больше  $\nu$ ; в районах с морским климатом увеличение его может достигать 50%.

Для приближенной оценки величин стока с какого-либо бассейна, можно пользоваться модулями стока, приведенными в табл. 41, причем вновь должно



быть подчеркнуто, что оперировать этими данными следует с большой осторожностью.

Т а б л и ц а 41

Приближенные значения модуля стока

Преобладающий характер водосбора	Модуль стока для $Q$ Ср.Н.В. в л/сек с 1 га	Модуль стока для $Q_{год}$ Ср.В. в л/сек с 1 га
Равнинная местность.....	0,5— 2	4— 8
Холмистая местность.....	1 — 2	5— 12
Среднегористая местность.....	2 — 4	6— 16
Высокогорная местность .....	4 — 10	10— 30

## VII. УЧЕТ И ФОРМА ОПИСАНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ РЕК

**Кадастр водных сил.** Большие исследования по определению расходов воды в пределах бытовых вод вызваны, главным образом, необходимостью знать режим рек в целях использования их энергетических ресурсов. Последние находят окончательно выражение в форме так называемого кадастра водных сил, который служит одновременно и в статистическом и в водохозяйственном отношениях обзором запасов водной энергии на реках данной страны.

Возможность использования кадастра водных сил двоякая: во-первых, он своими статистическими данными помогает организовать на уже действующих гидростанциях планомерное потребление энергии и, во-вторых, представляет в наглядной форме гидрологическую основу для будущих установок.<sup>1</sup>

Кадастр служит также ценным вспомогательным средством для суждения о хозяйственной целесообразности сооружения той или иной силовой установки. Хозяйственная целесообразность должна оцениваться не только с точки зрения технической оправданности данного сооружения, но и с учетом интересов водного хозяйства страны в целом. С точки зрения регулируемого в народнохозяйственных интересах использования энергетических ресурсов, необходимо, по возможности, не допускать сооружения таких установок, которые используют только часть падения на том или ином участке реки, так как это могло бы воспрепятствовать использованию в дальнейшем в промежутке между построенными станциями неиспользованных участков с небольшим падением.

Кадастр водных сил должен в силу своего назначения служить источником необходимых данных для энергетического хозяйства, потому его задача заключается не только в инвентаризации наличных запасов воды, но и в приведении величин наблюдаемых падений (уклонов). В виду этого, наряду с гидрометрическими, большую роль играют и геодезические работы.

Кадастр водных сил составлен в ряде стран, например, в Швейцарии, США, Франции, Германии, Австрии, Финляндии, Швеции и т. д.

Планомерному изучению режима водотоков часто препятствуют пробелы в гидрометрических работах, а также то обстоятельство, что приходится, считаясь с фактическим использованием энергии, отдавать при обработке предпочтение тем участкам рек, которые требуют большего внимания с точки

<sup>1</sup> F. Schaffernak. Umschau auf dem Gebiete der Hydrologie. Z. d. österr. Ing. u. Arch. Ver. H. 22 u. 26, 1918; F. Jäger. Die theoretischen u. praktischen Grundlagen bei der Aufstellung von Wasserkraftkatastern. Deutsche Wasserwirtschaft, № 8 u. 9, Berlin 1932.

зрения частных хозяйственных интересов. При составлении кадастра водных сил необходимо предусматривать возможность дополнения его форм в отношении как данных по использованию энергии, так и материалов гидрологических исследований.

В случае гидросиловой установки в водоподводящий канал направляется обычно не полный расход воды  $Q$  реки, а некоторая часть его  $Q_e$ , представляющая рабочий или потребляемый расход воды. При составлении кадастра, однако, следует считать, что через гидростанцию проходит полный расход воды  $Q$  реки, так как в этом случае речь идет о наличной мощности реки, а не о проектных возможностях ее использования (рис. 327).

При условии превращения наличной на участке реки  $AB$  потенциальной энергии воды в гидросиловую энергию без потерь на трение, получается наличная мощность брутто реки на данном участке. Если  $H_B$  — абсолютная величина падения брутто в метрах и  $Q$  выражено в  $м^3/сек$ , то мощность выразится в виде:

$$L_B = 1000 QH_B \text{ в кт/сек}, \quad (237)$$

или

$$L_B = \frac{1000 QH_B}{75}, \text{ в л. с.} \quad (238)$$

и, наконец,

$$L_B = \frac{0,736 \cdot 1000 QH_B}{75} \approx 10 QH_B, \text{ в квт.} \quad (239)$$

Мощность нетто на валу турбины получается, если  $Q_e$  — потребляемый расход воды,  $H_N$  — используемая абсолютная величина падения, падение — нетто<sup>1</sup> и  $\eta$  — коэффициент полезного действия турбины, в виде:

$$L_N = 1000 \eta Q_e H_N, \text{ в кт/сек} \quad (240)$$

или

$$L_N = \frac{1000 \eta Q_e H_N}{75}, \text{ в л. с.} \quad (241)$$

При  $\eta = 0,75$

$$L_N = 10 Q_e H_N, \text{ в л. с.}$$

или

$$L_N = \frac{0,736 \eta 1000 Q_e H_N}{75} = 9,81 \eta Q_e H_N, \text{ в квт.} \quad (242)$$

При  $\eta = 0,75$

$$L_N = 7,4 Q_e H_N, \text{ в квт.}$$

<sup>1</sup>  $H_B - H_N$  равно потерянному высоте в водоподводящих сооружениях.

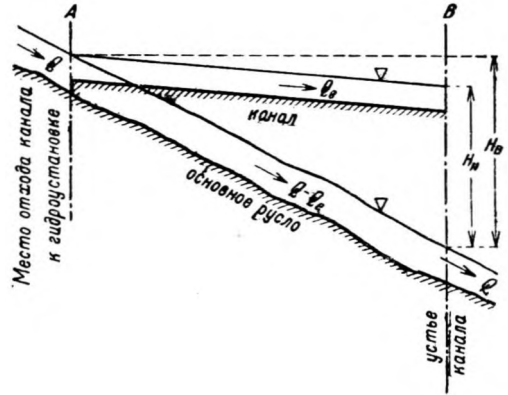


Рис. 327. Схема использования падения реки.  
 $H_B$  — абсолютное падение по основному руслу — падение брутто;  $H_N$  — абсолютное падение, используемое на гидростанции (падение нетто).



Почти во всех странах кадастр составляется из общей текстовой части, из таблиц, содержащих отвечающие специальным потребностям водного хозяйства обработанные данные измерений и подсчетов, и из графических приложений.

Текстовая часть содержит, наряду со схематической картой, обычно краткое описание орографических, гидрологических и морфологических условий водосбора. Принято также помещать указания о наиболее целесообразных путях использования наличной энергии, причем могут быть упомянуты заслуживающие внимания проекты.

Таблицы дают в наглядной форме сжатое изображение наличной и использованной водной энергии. Выше приведена табличная форма, принятая в австрийском кадастре водных сил (см. стр. 306). Таблицы содержат километраж, высотные отметки горизонтов воды над уровнем моря в характерных точках продольного профиля реки и соответствующие характерные расходы воды  $Q_{Н.Н.В.}$ ,  $Q_{год. Н.В.}$ ,  $Q_{год. Ср.В.}$  и  $Q_{10}$ . Далее они содержат вычисленные наличные мощности брутто при низких водах. Кроме того, приводятся данные об использованных расходах воды, полученных при этом мощностях и связанных с этим правовых условиях.

Графические приложения составляют самую существенную часть кадастра, так как, благодаря их наглядности, они могут быть лучше использованы. Поэтому во всех странах главное внимание уделяется им.

В Австрии графические приложения даны, в соответствии с подразделением кадастра, по отдельным речным участкам длиной в 20—30 км. Графические изображения содержат сверху гидрографическую схему речной сети, затем продольный профиль свободной поверхности воды на участке при низких водах с нанесенными в каждом пункте ожидаемыми низкими расходами воды, а также расходами воды, забираемыми отдельными гидросиловыми установками (рис. 328). В нижней части графика энергетические условия выражены в виде суммарных линий, причем между наличной и использованной энергией проводится резкое различие. Этот график является конечным результатом всех гидрометрических и прочих технических измерений, а также камеральных работ. Он дает сразу ответ на вопрос, где и в какой мере еще имеются пригодные для использования сосредоточенные падения. Вместе с тем такой график указывает путь к тому, как в интересах рационального водного хозяйства можно (посредством объединения речных участков для совместного использования) воспрепятствовать хищническому строительству гидростанций.

Другой род графического изображения заключается в так называемых высотных графиках расходов воды (рис. 329). По оси абсцисс отмечаются средние расходы воды главной реки и всех ее притоков в отдельных характерных пунктах, и для них наносятся соответствующие горизонты воды над уровнем моря. Оконтуренные площади представляют суммарную мощность—брутто реки при среднем расходе воды. Сравнение площадей между собою дает быстрый и наглядный обзор запасов энергии, принадлежащих отдельным участкам и рекам. Можно также сразу видеть, получается ли эта энергия в результате больших расходов воды или большого падения, а следовательно, должно ли ее использование производиться при помощи низко- или высоконапорных установок.

Составление кадастра водных сил требует производства таких гидрометрических и геодезических работ, которые выходят за пределы программы существующей гидрологической службы. Требуется увеличить число водомерных постов и створов, распространить их на мелкие притоки, быстро провести на них измерения. Вместо простого присоединения реперов к государственной нивелировочной сети безусловно необходима специальная продольная высотная съемка рек в целом, чтобы иметь возможность установить продольные профили свободной поверхности воды с достаточной степенью точности.

Гидрографическая схема

Условные обозначения:

- ⊙ - населенный пункт
- ⊙ - промышленные предприятия
- ⊙ - электрические ..
- ⊙ - химические ..

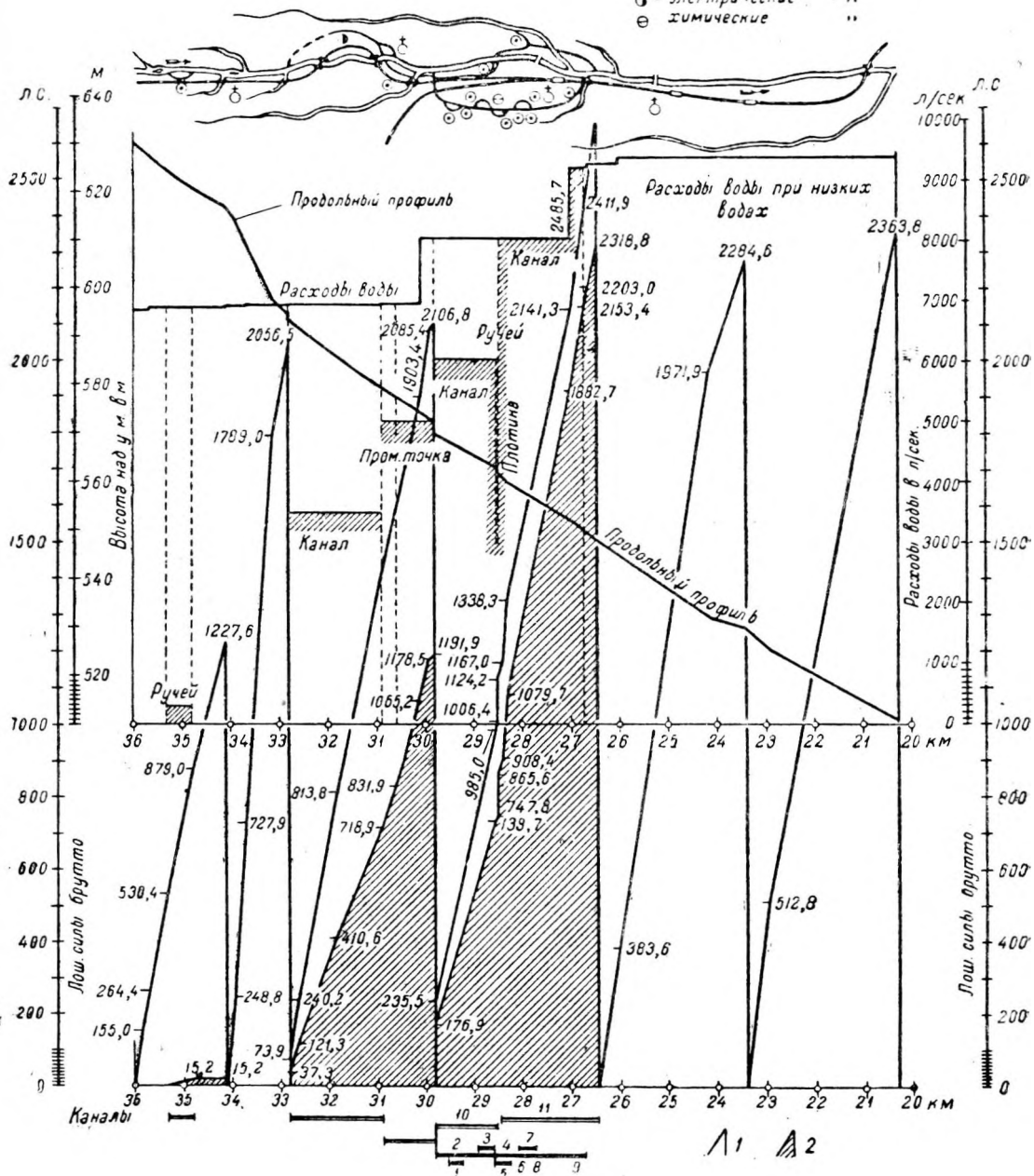


Рис. 328. Кадастр водных сил в изображении при помощи кривых суммарных мощностей

(1/2,2 нат. вел.).

Водные силы: 1—наличные; 2—использованные. Ординаты выражают максимум водных сил на используемых участках при низких водах.

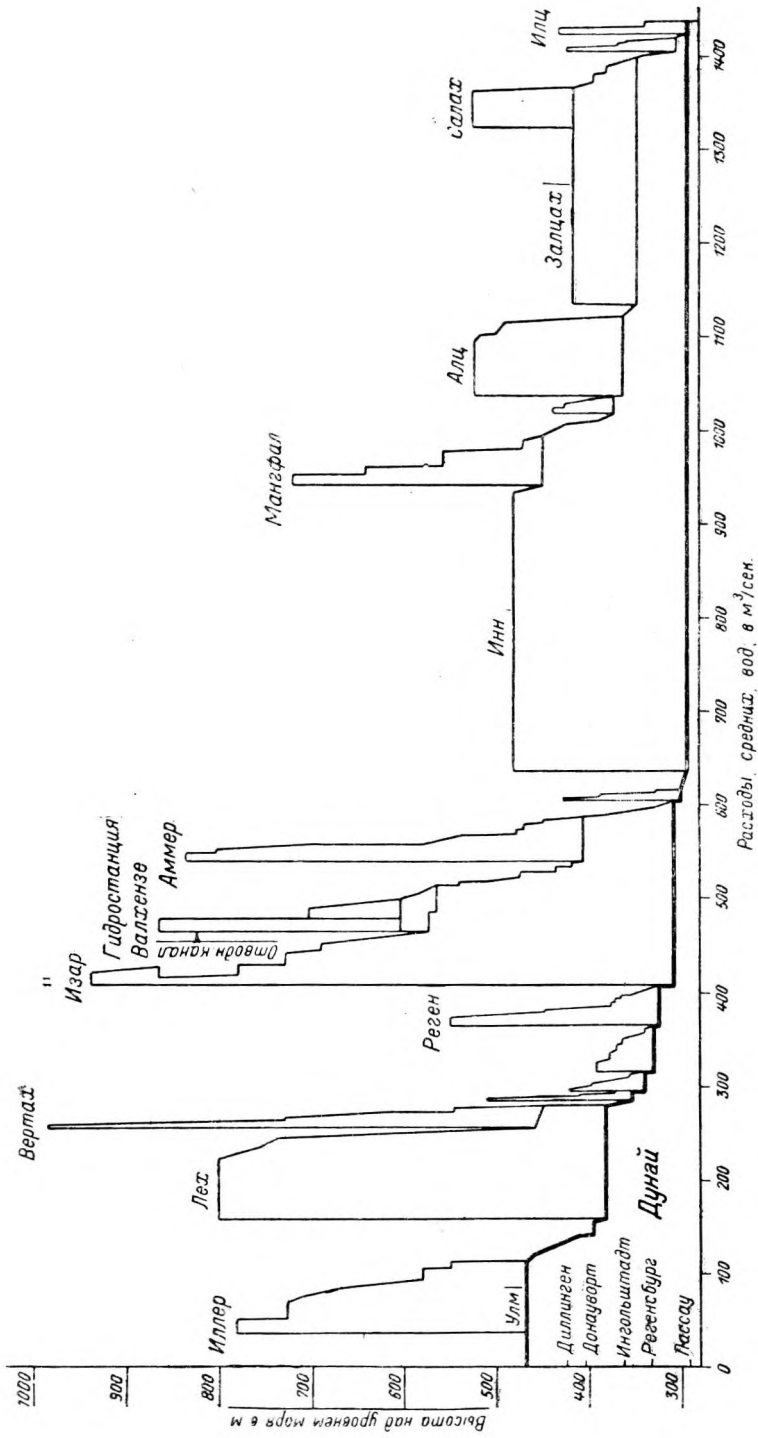


Рис. 329. Кадастр водных сил в изображении при помощи высотных графиков расходов воды.

Таким образом составление кадастра водных сил предполагает вначале производство объемистых и дорогих работ, причем получаемый свод данных остается неполным до тех пор, пока подобные гидрологические исследования отдельных бассейнов не получают всеобщего распространения и не будут выяснены все детали, с помощью которых можно будет составить окончательно представление об энергетических ресурсах водотоков.

**Характеристика годовой работы.** Для окончательной оценки энергетических возможностей того или иного водотока решающим является знание не только наличной мощности брутто и возможной для использования мощности нетто, но и предельной возможной годовой выработки энергии. Послед-

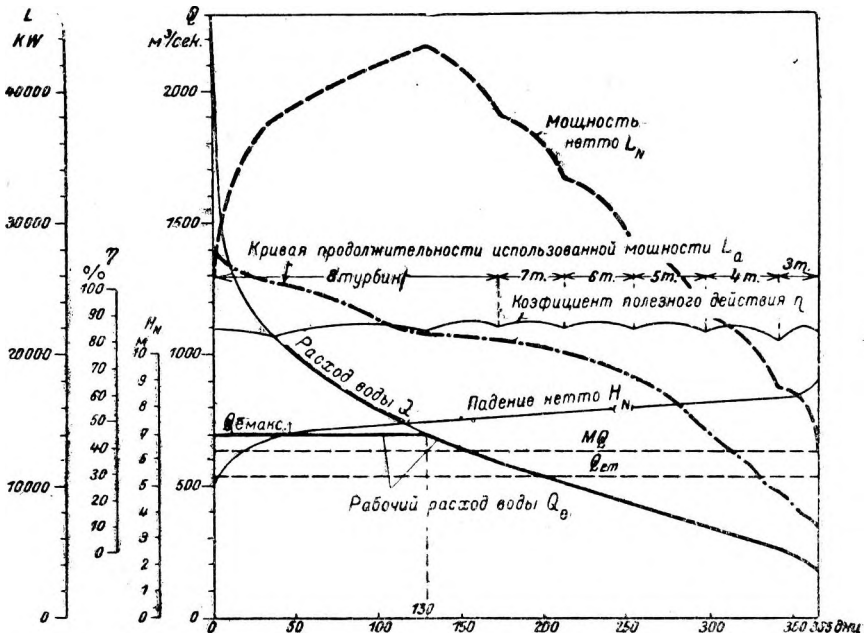


Рис. 330. Характеристика мощности и годовой работы гидросиловой установки при помощи кривых продолжительности.

няя зависит не только от естественного режима расходов воды, но и от того искусственного, зарегулированного режима, который может быть установлен на данном водотоке.

Особенно важную роль для энергетического хозяйства играет распределение производимой энергии во времени, служащее для выражения отдачи мощности потребителям. Представление об этом дает график, основанный на применении кривой продолжительности.

На рис. 330 представлен подобного рода наглядный график, позволяющий судить о распределении мощностей и работы (выработки) за гидрологический год. Если за основу взят средний год за многолетний период или, по меньшей мере, более или менее длинный ряд лет, то в результате получаются только средние значения, которые однако достаточны для проектирования. При эксплуатации и, следовательно, при распределении мощности существенное значение имеет, напротив, выработка энергии в отдельные и притом именно в ненормальные годы.

На графике изображают прежде всего кривую продолжительности расходов воды  $Q$  основного русла в месте забора воды для гидростанции. После установления величины расчетного расхода воды  $Q_{e, макс}$ , то есть того наибольшего потребляемого расхода воды, на который рассчитывается водо-

подводящий канал станции и которому отвечает пропускная способность турбин установки,—можно построить кривую продолжительности потребляемых расходов воды  $Q_e$ , проходящих по водоподводящему каналу. Наряду с этим изображают кривые продолжительности падения (напора) нетто  $H_N$ , зависящего от величины  $Q_e$ , и коэффициента полезного действия  $\eta$  агрегатов, причем последний опять-таки изменяется с открытием турбин. Так как мощность нетто  $L_N = 9,81\eta Q_e H_N$  в *квт*, то произведение из значений  $Q_e$ ,  $H_N$ ,  $\eta$ , отвечающих одной и той же продолжительности, и из коэффициента 9,81 даст каждый раз соответствующее значение  $L_N$ , в результате чего определится кривая продолжительности мощностей нетто, нанесенная на рисунке пунктиром. Площадь, ограниченная этой кривой и осями координат, дает, с учетом масштабов, годовую энергию (работу)

$$A_e = \sum_{t=0}^{8760 \text{ час.}} L_N \Delta t \text{ в } \text{квт}\cdot\text{ч}, \quad (243)$$

которая может быть получена при величине расчетного расхода воды  $Q_{e, \text{ макс.}}$ .

От нее отличается действительная годовая работа  $A_a = \sum_{t=0}^{8760 \text{ час.}} L_a \Delta t$ , величина

которой зависит от емкости потребителей. Отношение  $\frac{A_a}{A_e}$  называют коэффициентом использования.

Из прочих величин, характеризующих энергетические возможности водотока, употребляются средняя годовая мощность—нетто  $L_{N, m} = \frac{A_e}{8760}$  в *квт*;

далее средний коэффициент нагрузки реки  $\frac{Q_{e, m}}{Q_{\text{год Ср. В.}}}$  и средний коэффициент нагрузки станции  $\frac{Q_{e, m}}{Q_{e, \text{ макс.}}}$ , где  $Q_{e, m}$  — средний потребляемый расход воды, забираемый из основного русла реки.

## VIII. ПРОГНОЗ УРОВНЕЙ

Прогноз уровней в начале развития этого вопроса требовался только для высоких вод, для того чтобы можно было своевременно принимать надлежащие меры защиты против их разрушительного действия. Служба предупреждения распространялась прежде всего на угрожаемые со стороны высоких вод местности (населенные пункты), дамбы (защитные валы) или на обслуживающие судоходство перевалочные пункты и пристани.

Вскоре появилась потребность в прогнозе средних и низких уровней. Невозможно регулировать судоходство и проводить хозяйственно правильную эксплуатацию гидроустановок, не имея прогноза уровней. Судоходство нуждается в уровнях, так как на основании их определяются глубины по фарватеру и допустимая нагрузка судов. Составление гарантированного плана работы гидросиловых установок связано с прогнозом уровней постольку, поскольку при помощи уровней можно наперед определить ожидаемую на ближайший период мощность станций, а следовательно, их отдачу и, далее, примерные размеры потребного резерва за счет тепловых или других гидросиловых станций.

Смотря по тому, какая цель превалирует, говорят о прогнозе высоких или низких уровней. Оба прогноза могут быть долгосрочными и краткосрочными. Прогноз уровней может даваться на месяцы или еще дальше, — такой прогноз называют долгосрочным, или ограничиваться часами или днями, — в таком случае он будет краткосрочным.



Идеалом является прогноз на длительное время вперед, и к этому стремятся приблизиться даже ценою точности. Долгосрочный прогноз играет важную роль прежде всего для гидросиловых установок с водохранилищами. Дальнейшее распространение сети взаимно связанных в работе энергетических станций, охватывающих большие территориальные районы, требует прогноза на год и больше вперед. Краткосрочные прогнозы важны, в первую очередь, для гидросиловых установок без специальных возможностей по аккумулярованию воды, затем для службы оповещения о подъемах воды и, наконец, при судоходстве.

Прогноз уровней может опираться на различные гидрологические или метеорологические элементы наблюдений. По установлении связи между ними они дают в конечном результате величину ожидаемого уровня, а соответственно и расхода воды. Построение прогнозов происходит на основе осадков или уровней и расходов воды, причем могут помочь также наблюдения за состоянием погоды.

Развитие прогноза уровней, поэтому, тесно связано с предсказанием погоды в метеорологии. Пока метеорология в состоянии давать только краткосрочные предсказания и не может предсказать вперед хода осадков, прогноз уровней вынужден опираться, главным образом, на данные гидрологических наблюдений.

### 1. Способы краткосрочного прогноза

Способы краткосрочного прогноза являются в корне различными по своему построению в зависимости от того, имеется ли в виду водоток с небольшим водосбором и, в силу этого, с незначительным временем добегания, или большая река с весьма неоднородным в гидрологическом и морфологическом отношении водосбором.

Одним из крайних случаев является прогноз стока в канализационной сети какого-либо населенного пункта при помощи данных наблюдений над осадками и другим—прогноз уровней на больших реках, где режим расходов характеризуется кривыми расходов и временем пробега. Чем крупнее водоток и чем больше его протяжение, тем свободнее можно отказываться от прогнозов, основанных на ненадежнейших методах подсчета при помощи осадков и других метеорологических элементов наблюдений, и пользоваться зависимостями между уровнями или расходами воды на последовательно расположенных по длине реки водомерных постах.

Предпосылкой для доброкачества краткосрочного прогноза является целесообразная организация службы оповещений, которая бы обеспечивала быстрое сообщение первичных гидрологических и метеорологических данных наблюдений и строго проверенный выпуск самого прогноза.

При малых водосборах и протяжениях рек, то есть, примерно, в условиях гидросиловых установок, расположенных на большой высоте над уровнем моря, станции государственной гидрологической сети вряд ли окажутся в состоянии обслужить подобного рода прогнозы. Потребуется увеличить самую сеть пунктов наблюдений над осадками, уровнем, температурой и давлением воздуха и участить сроки наблюдений и информации. Особенно рекомендуется устанавливать приборы-самописцы и приборы, передающие наблюдения на расстояние.

Каким образом осуществляется правильное распределение пунктов наблюдений и связь с ними—показано на рис. 331 для службы прогнозов на р. Большая Мюль в Верхней Австрии.<sup>1</sup> Все наблюдения поступают в надлежащие сроки в сборный пункт *S*, расположение которого согласуется с суще-

<sup>1</sup> А. Кветенский. Wassermengenvorhersage im Kraftwerkbetrieb. Zeitschrift für Elektrotechnik und Maschinenbau, Н. 17. 1928.

ствующими возможностями в отношении телефонной и телеграфной связи. При сборном пункте помещается метеорологическая станция с самопишущим барометром, термометром и психрометром. Из этого центрального пункта прогнозы после их составления сообщаются в управление эксплуатацией силовых станций в Р.

Для рек с большим водосбором и протяжением организация службы оповещения об уровнях воды осуществляется подобным же образом, причем прогнозы обычно разрабатываются в нескольких сборных пунктах. Если прогнозы должны служить судоходству и защите от высоких вод, то оповещение, естественно, должно распространяться на все важнейшие речные пункты.

Для связи служат телефоны, а в последнее время и радио. При правильном взаимодействии всех звеньев службы оповещения, она в состоянии в отношении уровней отвечать любой практической потребности как в части срока оповещения, так и точности сообщаемых данных.

На рис. 332 приведен пример широко разветвленной сети службы оповещения об уровнях воды и прогнозов на р. Дунае в Верхней Австрии.<sup>1</sup> Она в целесообразной форме объединяет автоматическую и неавтоматическую передачу наблюдений и прогнозов.

К телефонной сети присоединено 60 пунктов специально для передачи уровней. Группировка станций показана на рис. 332 линиями со стрелками.

Сеть автоматической передачи распадается на шесть независимых друг от друга кольцевых линий, которые включают все представляющие интерес австрийские водомерные посты на Дунае и на его более крупных притоках. Электрические автоматы-передатчики передают уровни специальным приемникам в Линце и Вене, которые регистрируют уровни по ступеням через 2 см. Регистрация уровней автоматическим путем производится через каждые два часа, а посредственным путем может быть произведена в любой момент.

В сборных пунктах в Линце и Вене прогнозы составляются на каждые 24 часа вперед. Эти прогнозы передаются затем в групповые центры (посты), которые уже распространяют их в пределах своих районов, пользуясь телефоном, телеграфом, курьерами и сигнализацией, что дает возможность в течение 20 мин. поставить все угрожаемые пункты в известность об ожидаемом подъеме воды. В последнее время и в этом случае применяется радиопередача.

<sup>1</sup> F. Rosenauer. Die Wasserstandsvorhersagen für die oberösterreichische Donaustrücke. Die Wasserwirtschaft, № 8 Wien 1926. Некоторые сведения относительно развития службы оповещения о подъеме уровней на Дунае и притоках помещены в die Wasserwirtschaft, № 36, Wien 1930.

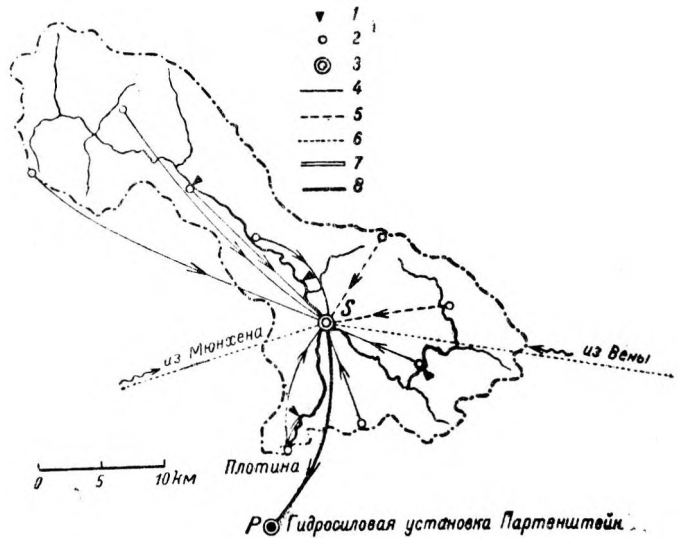


Рис. 331. Организация службы оповещения для прогноза уровней воды при малом водосборе на р. Большая Мюль в Верхней Австрии.

1—водомерный пост; 2—дождемер; 3—сборный пункт; 4—телефонная или телеграфная связь; 5—курьерская связь; 6—передача метеорологических сведений по радио; 7—передатчик уровня; 8—прогноз.

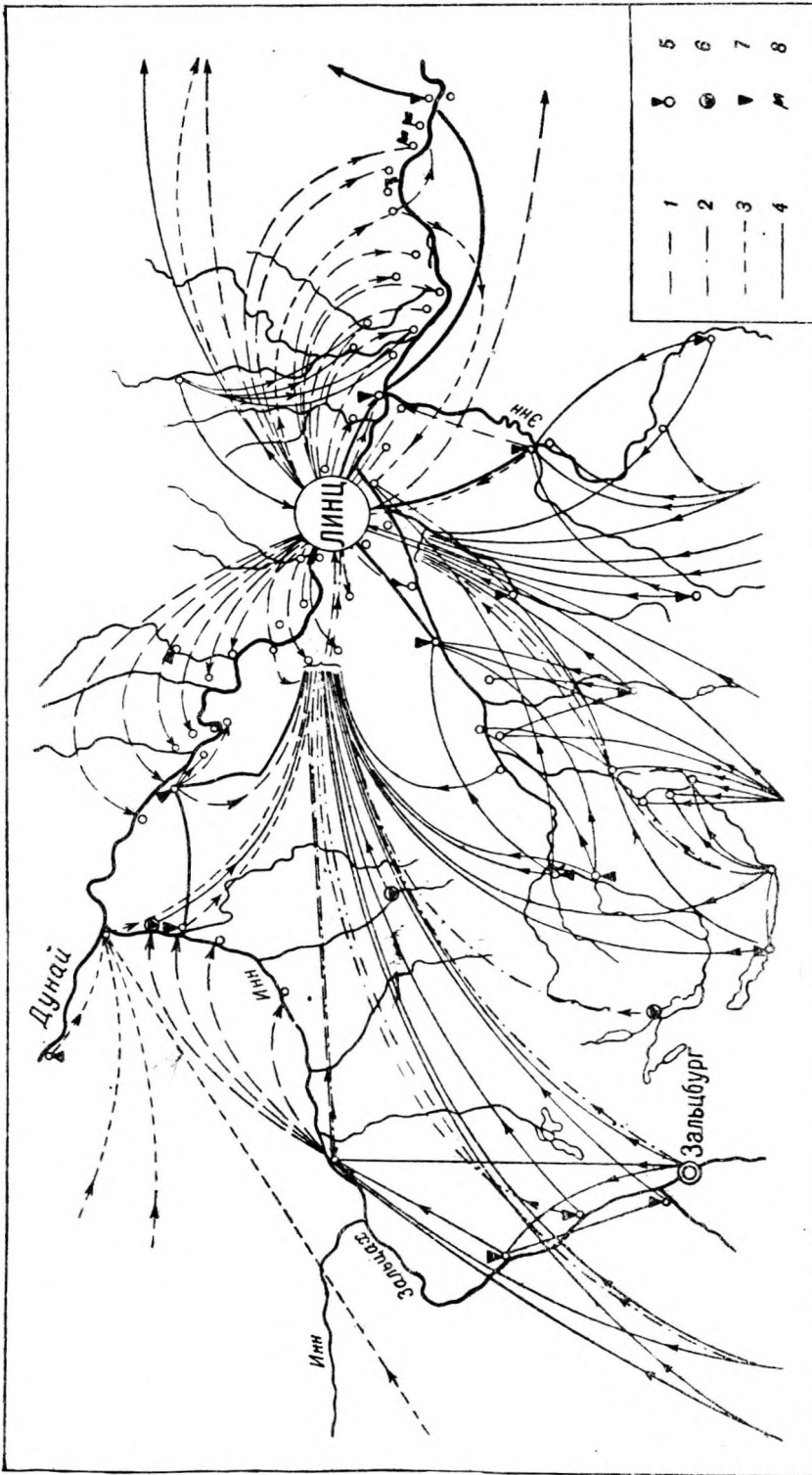


Рис. 332. Организация службы оповещения для прогноза уровня воды при большом водосборе на р. Дунай в Верхней Австрии.

1—оповещение о польеме воды по телеграфу; 2—то же по телефону; 3—ежедневные сообщения по телеграфу; 4—то же по телефону; 5—водомерный пост; 6—метеорологическая станция; 7—лимниграф с передатчиком; 8—сигнализация польема воды.

**Краткосрочные прогнозы, основанные на данных об осадках.** Попытки использовать одни только осадки в качестве основы для краткосрочных прогнозов в более или менее крупных водосборах не дали удовлетворительных результатов.

Многообразные изменения, которым подвергаются осадки в процессе их стока по местности, аккумуляция их в снеговом покрове и в грунтовых водах, влияние температуры воздуха требуют, наряду с наблюдениями над выпадением осадков, учета хода стока (исключая из рассмотрения влияние последующих осадков) и влияния температуры воздуха на процесс снего-



Рис. 333. Водосбор р. Мур.

таяния. Способ, который, по крайней мере, в некоторой части удовлетворяет этим требованиям и допускает построение теоретического графика, заключается в следующем.<sup>1</sup>

Приращение  $\Delta Q$  расхода воды в некотором речном профиле составляется из изменения  $\Delta Q_R$ , обусловленного дождевым стоком, и из изменения  $\Delta Q_T$ , вызванного талыми водами. После прекращения усиливающих сток атмосферных явлений и перехода через пик, спад принимает закономерный характер по кривой падения расхода воды в бездождное время.

Определение величин отдельных приращений  $\Delta Q_R$  и  $\Delta Q_T$  (как зависимых от осадков и соответственно от температуры воздуха) производится на основе данных наблюдений над стоком дождевых и талых вод с применением теории корреляции и кривых падения расходов воды в бездождное время.

Так для прогноза расходов воды р. Мур в створе водомерного поста Пернег в Штирии служба наблюдений и оповещения имела следующую организацию. Из шести наблюдательных станций—три (Тамсвег, Брук и Мюрццуслаге) расположены в долине и три (Штолцалпе, Неймаркт и Земмеринг) — на горных склонах или в ущельях. Тамсвег, Штолцалпе и Неймаркт учитывают осадки, приносимые северо-западными ветрами, остальные—ветрами восточной четверти. Площадь водосбора поделена между станциями (рис. 333, границы показаны пунктиром) с таким расчетом, чтобы ход осадков в пределах каждой частной площади, примерно, соответствовал их ходу на соответствующей наблюдательной станции. Частные площади составляют от всей площади водосбора для Земмеринга 10%, Тамсвега и Мюрццуслаге по 13%, Брука и Неймаркта по 20% и Штолцалпе 24%.

На основе многолетних наблюдений были исследованы и обнаружены линейные корреляционные зависимости между наблюдаемыми на отдельных станциях величинами осадков и изменением  $\Delta Q_R$  расхода воды р. Мур

<sup>1</sup> R. B r a t s c h k o . Die Ganglinie der Mur als Funktion der Witterung im Einzugsgebiete. Die Wasserwirtschaft № 13, Wien 1928.

у Брука. Прямые, выражающие эти зависимости, приведены на рис. 334. Они сведены в три группы по различному характеру осадков и состоянию почвы.

Таким же образом были получены зависимости между температурами, наблюдаемыми на отдельных станциях, и изменением  $\Delta Q_R$  расхода воды

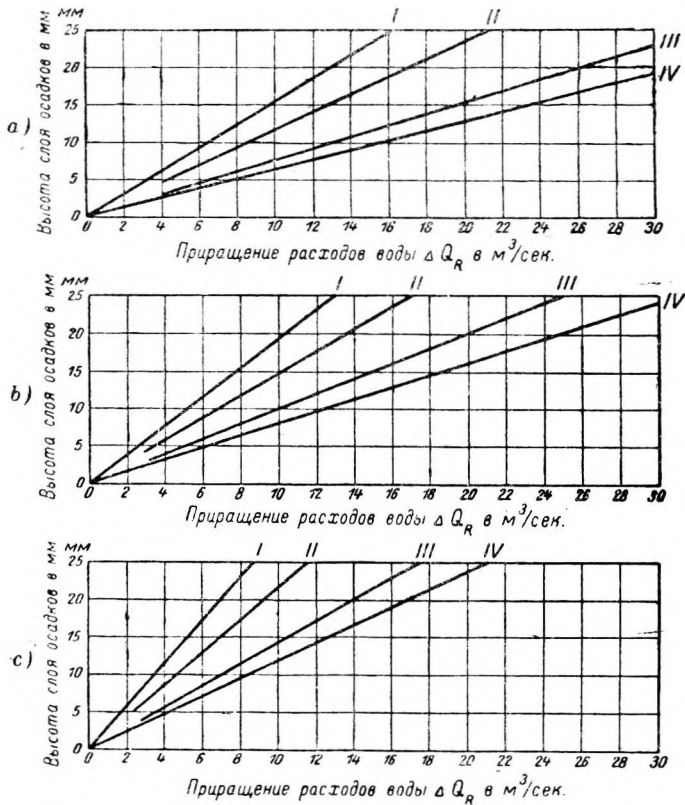


Рис. 334. Вычисление приращений расходов воды в створе водомерного поста Брук на р. Мур на основе данных об осадках, но способу Братчко.

*I*—Земмеринг; *II*—Тамсвег, Мюрцушлаг; *III*—Неймаркт, Брук; *IV*—Штолцалпе.  
*a*—после дождей, захвативших весь район данной станции при непокрытой снегом почве или лежалом снега (во все времена года) или после дождя со снегом, выпавшего на свободную от снега почву (осенью для станций в долинах, также и весной после схода снега); *b*—после дождя со снегом на лежалый снег (большая часть весной) или после дождя на промерзшую не покрытую снегом почву (поздняя осень, в бесснежные зимы, для станций в долинах, также весной после схода снега); *c*—дождь умеренной силы на сильно высохшую почву (позднее лето, осень) или шквалистые и ливневые дожди, захватившие только часть района данной станции.

р. Мур у Брука за счет стока талых вод. Эти зависимости могут быть сведены в две группы, смотря по характеру снегового покрова (рис. 335). Форма кривых падения расхода воды меняется в зависимости от погоды, а именно в зависимости от того, наступил мороз или нет, не было снега вовсе или лежал снег свежеевыпавший или старый. В результате получилось три различных кривых спада дождевого паводка, две кривых спада талых вод и одна кривая спада расходов, вызванного замерзанием (рис. 336).

Ниже приведен пример составления прогноза.

В период с 14 по 25 февраля 1928 г. за дождевым паводком последовал паводок талых вод. Дождь перемежался со снегопадом. Граница старого снега проходила на высоте от 800 до 1500 м над уровнем моря. Было при-

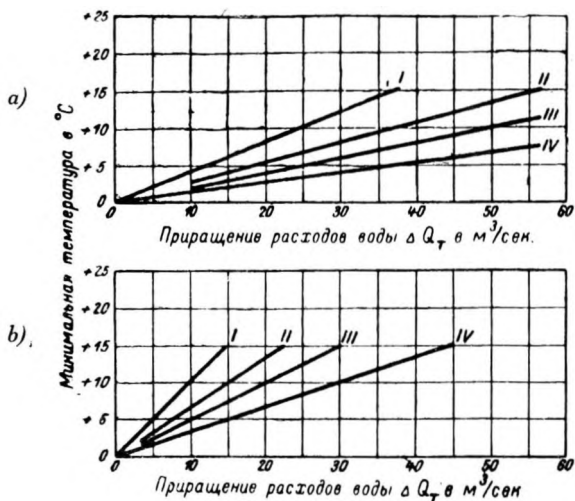


Рис. 335. Вычисление приращений расходов воды  $\Delta Q_T$  в створе водомерного поста Брук на р. Мур на основе температурных данных, по способу Братчко.

I—Тамсвег, Мюрцушлаг; II—Брук, Зсмеринг; III—Неймаркт; IV—Штолцалле.

a—свежий снег, выпавший на не покрытую снегом почву при одновременном дожде (конец лета, осень, весна); b—свежий снег, выпавший на лежалый снег (зима, весна).

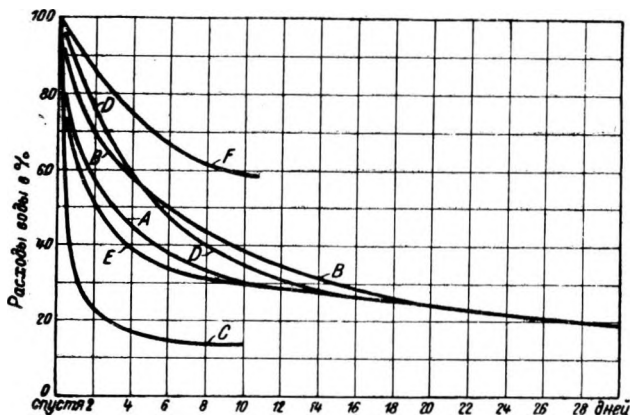


Рис. 336. Кривые падения расхода воды в бездождное время для водомерного поста Брук на р. Мур (по Братчко).

*A*—после дождя или дождя и снега на свободную от снега почву (весна, лето, осень) или после дождя или дождя и снега на лежалый снег при наступившем морозе (зима, весна); *B*—после дождя или дождя и снега на лежалый снег при минимальных температурах от  $0^{\circ}$  (весна) или после продолжительного дождя со снегом в горной местности на свободную от снега почву (конец лета, осень); *C*—после дождя на замерзшую не покрытую снегом почву при наступлении сильного мороза (поздняя осень, бес-снежные зимы); *D*—после таяния при лежалом снеге или свежем снеге, выпавшем на лежалый снег в результате стаивания снега или наступления мороза (зима, весна); *E*—после таяния при свежем снеге, выпавшем на не покрытую снегом почву, в результате продолжающегося схода снега (осень, а для долин также и весна); *F*—после резкого похолодания, при температурах ниже  $-10^{\circ}$  при быстром промерзании притоков и образовании ледяного покрова на главной реке.

нято, что в районе горных станций лежит сплошь старый снеговой покров, а в районе долинных станций им покрыта половина поверхности.

Сообщение 14 февраля 1928 г. в 7 час.

Тамсвег . . . . .	5 мм	по рис. 334a	6 м <sup>3</sup> /сек
Штолцалпе . . . . .	2 "	" " " 334b	2 "
Неймаркт . . . . .	—	" " " 334a	—
Брук . . . . .	5 "	" " " 334a	7 "
Мюрццуслаг . . . . .	11 "	" " " 334a	10 "
Земмеринг (снегопад)			

$$Q_R = 25 \text{ м}^3/\text{сек}$$

$$\text{Расход воды до начала осадков} \dots\dots 49 \text{ м}^3/\text{сек}$$

$$\text{Расход воды 14 февраля в 19 час.} \dots\dots 74 \text{ м}^3/\text{сек}$$

Сообщение 15 февраля 1928 г. в 7 час.

Тамсвег . . . . .	15 мм	+1° по рис. 334a	13 м <sup>3</sup>	—
Штолцалпе . . . . .	9 "	" " " 335a	2 "	15 м <sup>3</sup> /сек
			12 "	12 "
Неймаркт . . . . .	7 "	" " " 334a	9 "	9 "
			21 "	—
Брук . . . . .	16 "	+3° " " 335b	2 "	23 "
			19 "	—
Мюрццуслаг . . . . .	22 "	+1° " " 334a	1 "	20 "
			8 "	8 "
Земмеринг . . . . .	15 "	" " " 334b	8 "	8 "

$$Q_R + Q_T = 87 \text{ м}^3/\text{сек}$$

$$\text{Сток предыдущего дня} \dots\dots\dots 74 \cdot 0,8 = 59 \text{ м}^3/\text{сек}$$

$$\text{Расход воды 15 февраля в 19 час.} \dots\dots\dots 146 \text{ м}^3/\text{сек}$$

Сообщение 16 февраля 1928 г. в 7 час.

Тамсвег . . . . .	12 мм	+3° по рис. 334a	11 м <sup>3</sup>	18 м <sup>3</sup> /сек
Штолцалпе . . . . .			7 "	
Неймаркт . . . . .	5 "	— " " 334b	11 "	11 "
			5 "	+2° " " 334a
Брук . . . . .	10 "	+3° " " 335b	13 "	18 "
			5 "	18 "
Мюрццуслаг . . . . .	16 "	+2° " " 334a	14 "	16 "
			2 "	16 "
Земмеринг . . . . .	17 "	— " " 334a	10 "	10 "

$$Q_R + Q_T = 85 \text{ м}^3/\text{сек}$$

$$\text{Сток предыдущего дня} \dots\dots\dots 146 \cdot 0,8 = 117 \text{ м}^3/\text{сек}$$

$$\text{Расход воды 16 февраля в 19 час.} \dots\dots\dots 202 \text{ м}^3/\text{сек}$$

Сообщение 17 февраля 1928 г. в 7 час.

Тамсвег . . . . .	—			
Штолцалпе . . . . .	1 мм	по рис. 334b	1 м <sup>3</sup>	1 м <sup>3</sup> /сек
Неймаркт . . . . .	—	" " " 334a	1 "	2 "
Брук . . . . .	1 "	+1° " " 335b	1 "	2 "
			2 "	3 "
Мюрццуслаг . . . . .	2 "	+1° " " 334a	1 "	3 "
			1 "	2 "
Земмеринг . . . . .	2 "	+2° " " 334b	1 "	2 "
			1 "	2 "

$$Q_R + Q_T = 8 \text{ м}^3/\text{сек}$$

$$\text{Сток предыдущего дня} \dots\dots\dots 202 \cdot 0,8 = 162 \text{ м}^3/\text{сек}$$

$$\text{Расход воды 17 февраля в 19 час.} \dots\dots\dots 170 \text{ м}^3/\text{сек}$$



Сообщение 18 февраля 1928 г. в 7 час.:

Тамсвег . . . . .	снегопад	
Штолдапе . . . . .	"	
Неймаркт . . . . .	"	
Брук . . . . .	5 мм по рис. 334а	7 м <sup>3</sup> /сек
Мюрдшулаг . . . . .	5 " " " 334а	5 "
Земмеринг . . . . .	4 " " " 334б	2 "
		$Q_R + Q_T = 14 \text{ м}^3/\text{сек}$
Сток предыдущего дня . . . . .	170 · 0,8 = 136 м <sup>3</sup> /сек	
Расход воды 18 февраля в 19 час . . . . .	150 м <sup>3</sup> /сек	

Следующие дни принесли только небольшие снегопады и мороз.

Падение расхода воды после прекращения осадков согласно кривой А на рис. 336.

Через 1 день . . . . .	150 × 0,69 = 103 м <sup>3</sup> /сек
" 2 дня . . . . .	150 × 0,58 = 87 "
" 3 дня . . . . .	150 × 0,50 = 75 "
" 4 дня . . . . .	150 × 0,45 = 68 "
" 5 дней . . . . .	150 × 0,41 = 62 "
" 6 дней . . . . .	150 × 0,37 = 56 "
" 7 дней . . . . .	150 × 0,35 = 53 "

На рис. 337 приведены вычисленная и наблюдаемая кривые колебания уровня воды на водомерном посту в Бруке. Несмотря на сложные метеорологические условия, они совпадают в общем хорошо, что говорит в пользу применимости указанного способа.

Данный способ может быть усовершенствован путем удлинения срока прогноза при условии, если оказывается возможным предсказать на более длительный срок вперед не только выпадение осадков, но и их количество.

Это удалось осуществить при прогнозах для гидросиловой установки Пернег на основе следующего рассуждения и данных опыта.<sup>1</sup> Для того чтобы в бассейне р. Мур выпали осадки, должна сначала установиться такая погода, при которой в известных пунктах Европы и на запад от Испании господствует высокое атмосферное давление, а в Верхней Италии—низкое. Напротив, можно рассчитывать на ясную и сухую погоду в рассматриваемом бассейне, если высокое давление располагается над Средней Европой и Советским Союзом, а низкое—над Западной и Северо-Западной Европой. По изобатам и изотермам ежедневных карт погоды можно предсказать погоду, но не количество ожидаемых осадков. Это последнее удается приблизительно предугадать, изучая сообщения о давлении и температуре воздуха, поступающие с определенных избранных станций в указанных выше районах. В дополнение к этому ежедневно устанавливаются разности атмосферных давлений  $\Delta B$ , а равно разности температур воздуха  $\Delta T$  тех станций, которые, с одной стороны, располагаются в области, обуславливающей при высоком давлении преимущественно сухую погоду в бассейне р. Мура, а с другой

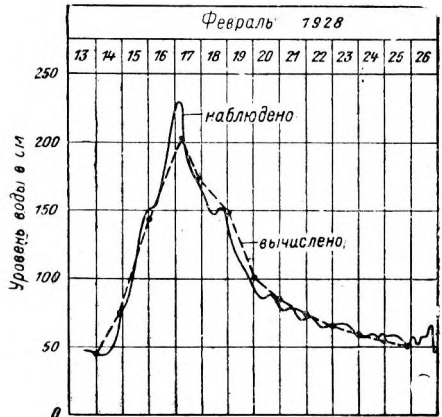


Рис. 337. Наблюдаемые и прогнозируемые по способу Братчко уровни р. Мур у Брука.

<sup>1</sup> R. Bratschko. Versuch einer kurzfristigen Niederschlagsvorhersage. Die Wasserwirtschaft, Nr. 16, Wien 1933.

находятся в области, вызывающей при высоком давлении выпадение осадков в том же бассейне.

Судя по наблюдениям,  $\Delta B$  тем больше, чем мощнее и распространеннее область высокого давления в восточном направлении и чем суше притекающий в бассейн р. Мура воздух. В то же время  $\Delta B$  становится тем меньше, чем интенсивнее повышается давление в западной четверти и чем влажнее воздух, поступающий в бассейн р. Мура. Если притекающие массы воздуха обладают температурой, существенно отличной от той, которую имеет вытесняемый ими воздух, то выпадают осадки.

Значения  $\Delta B$  и  $\Delta T$  были взяты для небольшого числа станций, выбранных из числа других после продолжительных пробных расчетов. Эти значения вычислялись за отдельные дни минувшего отрезка времени, наносились

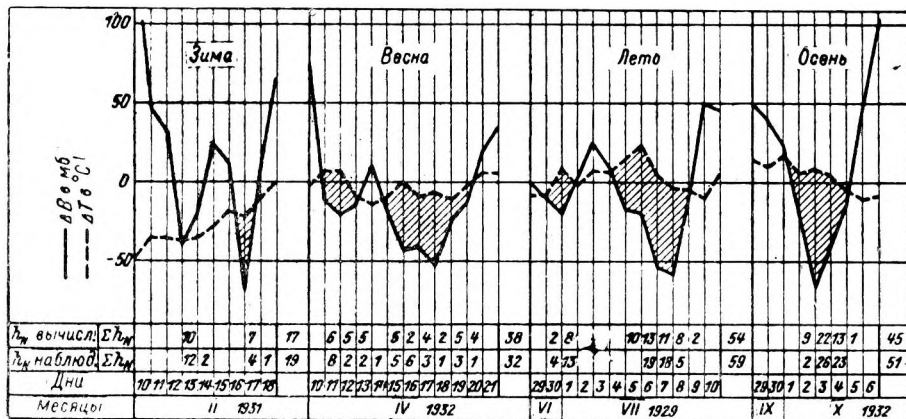


Рис. 338. Хронологический график  $\Delta B$  и  $\Delta T$ .

в виде графика и приводились в связь с выпадением осадков. При этом  $1 \text{ мб}$  и  $1^\circ$  температуры выражались через одну и ту же масштабную единицу. Оказалось, что осадки выпадают в течение ближайших 24 часов после того, как нисходящая кривая  $\Delta B$  пересечет кривую  $\Delta T$ , то есть значения  $\Delta B$  станут отрицательными, и вновь прекращаются в течение следующих 24 часов после того, как  $\Delta B$  опять превысит  $\Delta T$ , то есть примет положительные значения (рис. 338).

Величина ожидаемого суточного количества осадков вычисляется из выражения:

$$h_N = a\Delta B + b\Delta T + c, \quad (244)$$

причем коэффициенты  $a$ ,  $b$  и  $c$  этого выражения вычисляются по способу корреляции на основе ряда выпадений осадков, наблюдаемых в минувшее время на избранных станциях. Для подбора коэффициентов служит табл. 42.

Таблица 42

Коэффициенты  $a$ ,  $b$  и  $c$ , служащие для определения  $h_N$ , и вероятная ошибка  $h_N$

Время года	Весна		Лето		Осень		Зима	
	> 0	< 0	> 0	< 0	> 0	< 0	> 0	< 0
$\Delta T$ .....	> 0	< 0	> 0	< 0	> 0	< 0	> 0	< 0
$a$ .....	0,12	0,06	-0,12	-0,15	-0,22	-0,14	—	-0,05
$b$ .....	0,18	0,17	0,38	-0,25	0,73	-0,54	—	-0,25
$c$ .....	6,5	4,3	2,0	-1,7	0,7	-4,2	—	-1,7
Вероятная ошибка $h_N$ , в мм.....	0,7	0,6	2,1	0,9	2,1	1,9	—	1,8
Вероятная ошибка $h_N$ в %.....	16	16	25	23	17	28	—	34

На рис. 338 приведены значения наблюдаемых и вычисленных суточных осадков, откуда можно судить о точности, получающейся при применении указанных коэффициентов.

**Краткосрочные прогнозы по уровням воды** (прогнозы уровня на водомерных постах). Эти прогнозы могут составляться или по эмпирическим формулам, или при помощи кривых связи между уровнями и графиков пробега.

Краткосрочные прогнозы по эмпирическим формулам. Этого рода прогнозы опираются на применение эмпирических зависимостей, построенных на основе данных многолетних наблюдений. Пользоваться такими зависимостями просто, но хорошие результаты они дают только при устойчивом стоянии уровня и не очень высоких подъемах.

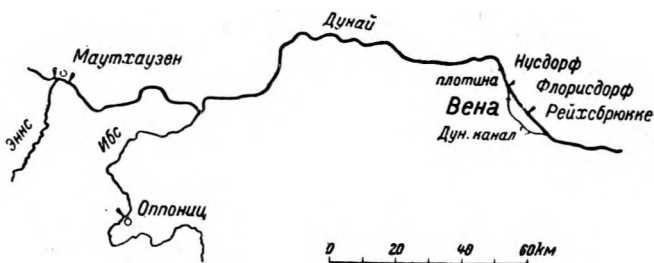


Рис. 339. Схематическая карта к прогнозу уровней на р. Дунае у Вены-Рейхсбрюкке.

Так, например, прогноз уровня для водомерного поста Вена-Рейхсбрюкке на р. Дунае дается на 24 часа вперед по следующим данным. К уровню предыдущего дня алгебраически прибавляется изменение уровня р. Дуная  $\Delta h_{p, I}$  перед его вступлением на территорию Нижней Австрии, изменения уровня притоков в Нижней Австрии  $\Delta h_{p, II}$  и влияние  $\Delta h_{p, III}$ , которое оказывает на уровень состояние плотины Нусдорф, запирающей Дунайский канал (рис. 339). Для указанных слагаемых получились очень простые эмпирические правила, которые позволяют вычислять их значения по изменениям уровня на постоянных водомерных постах. На основании исследований,  $\Delta h_{p, I}$  равняется среднему арифметическому из изменений уровня на обоих водомерных постах у Маутхаузена, расположенных выше и ниже впадения р. Эннса,  $\Delta h_{p, II}$  равняется одной четверти от величины изменения уровня на водомерном посту р. Ибс в Опониц и  $\Delta h_{p, III}$  в случае закрытия плотины в Дунайском канале равняется

$$\frac{\Delta h_{p, I} + \Delta h_{p, II}}{6}.$$

Краткосрочные прогнозы при помощи кривых связи уровней и графиков пробега. Прогнозы по эмпирическим зависимостям неполноценны вследствие необходимости частой оценки паводков талых вод и быстро нарастающих подъемов при наступлении высоких вод. Ввиду этого, чтобы найти способ большей точности, применимый при всяких условиях, надо исходить из кривых связи соответственных уровней и их графиков пробега.

Проще всего этого рода прогнозы уровня строятся в тех случаях, когда влияние притоков на движение в главном потоке столь незначительно, что им возможно пренебречь, то есть когда волна паводка главной реки (первичная волна паводка) определяет режим уровней реки. В этом случае по графику колебания уровня  $\Delta h_{p, A} = f_1(t)$  в пункте  $A$ , расположенном выше по реке, можно следующим образом получить график в пункте  $B$ , расположенном ниже по реке (рис. 340).<sup>1</sup>

Пусть ход уровня на водомерном посту  $A$  характеризуется графиком  $L_A$ . Взяв с этого графика уровень воды  $\Delta h_{p, A}$ , прежде всего определяют по зара-

<sup>1</sup> M. v. T e i n Die Anschwellung im Rhein, ihre Fortpflanzung im Strome nach Mass und Zeit unter der Einwirkung der Nebenflüsse. Berlin 1897.

нее установленной кривой связи соответственных уровней соответственный уровень  $h_{P, B}$  на водомерном посту  $B$  и одновременно по кривой пробега между обоими постами  $A$  и  $B$  время пробега  $\Delta t_{A-B}$  для уровня  $h_{P, A}$ . Если теперь графически (рис. 363, а) отложить в направлении оси  $t$  отрезок  $CD = \Delta t_{(A-B)}$  и от  $D$  вверх  $BD = h_{P, B}$ , то точка  $B$  будет принадлежать графику  $L_B$  нижнего водомерного поста  $B$ . Установить ход этого последнего графика можно, повторяя указанные действия для ряда точек, взятых с графика  $L_A$ .

Соответствие восстановленного таким образом графика действительному ходу уровня зависит, в первую очередь, от надежности кривой пробега уровня. Определение пробега становится ненадежным, если интенсивность изменения уровня значительна, а колебание уровня велико. Далее, ни в коем случае не является бесспорно установленным, что время пробега для переходных уровней, и именно на спаде, идентично времени пробега соответственных уровней. При этом, однако, оказывается, что графики для располо-

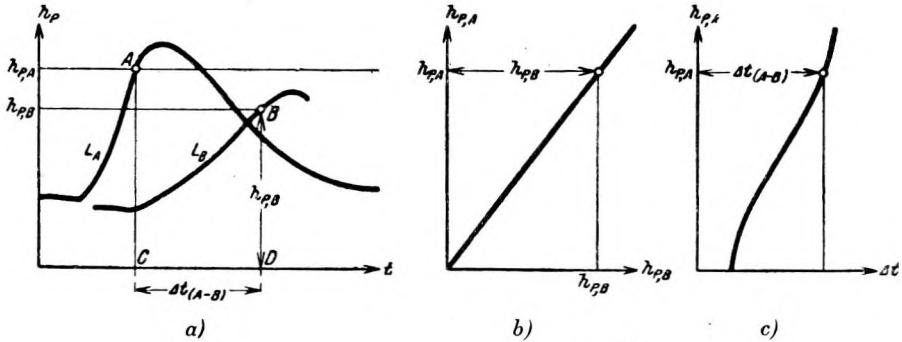


Рис. 340. Построение хронологического графика  $h_{P, B} = f_b(t)$ , по хронологическому графику  $h_{P, A} = f_a(t)$  для первичной паводковой волны.

а) графики уровней; б) кривая связи соответственных уровней; в) кривая пробега для первичной паводковой волны.

женных ниже по реке водомерных постов, построенные согласно указанному выше способу и по данным непосредственных наблюдений, совпадают тем лучше (также и на спаде уровня), чем больше характер паводка приближается к состоянию первичной волны и чем спокойнее происходит изменение уровня.

Если нельзя пренебречь влиянием притоков, когда к первичной паводковой волне присоединяется еще целый ряд вторичных паводковых волн, которые поступают из притоков, тогда первая волна деформируется при проходе мимо устьев притоков, причем изменение ее выражается всегда в повышении уровня на соответственном водомерном посту.

Если первоначально представить себе, что в главную реку впадает только один приток, то влияние его на ход уровня главной реки может быть выражено при помощи графиков уровня на водомерных постах  $A$  и  $B$  главной реки (рис. 341). Пусть  $L_A$  и  $L_B$  графики колебания уровня на водомерных постах выше и ниже впадения притока (рис. 342); тогда влияние притока на уровень воды на водомерном посту  $B$  главной реки можно выразить через  $h_{P, B} - h_{P, B'} = BB' = \Delta h_{P, B}$ .<sup>1</sup> При этом  $B'$  определяют по времени пробега  $\Delta t_{(A-B)}$  подобным же образом, как и на рис. 340, то есть так, как будто бы имела место одна первичная паводковая волна по главной реке. Если проделать построение для достаточно большого числа уровней и соеди-

<sup>1</sup> Это будет справедливо только в том случае, если пост  $A$  находится вне подпора от притока. В противном случае линия  $L_A$ , являясь производной не только первичной паводковой волны, но и волны поступающей из притока, сдвинется вверх и построение по ней линии  $L_B$  будет неточным. (Прим. пер.)

нить между собою все полученные точки  $B'$ , то можно провести ясное разделение между графиком  $L_B$  и графиком  $L_{B'}$ , определяемым одной первичной паводковой волной главной реки. Таким образом при помощи этого способа в любое время определима разность уровней  $\Delta h_{P, B}$  на нижнем посту, относящаяся за счет паводковой волны притока.

Теперь надлежит найти тот уровень воды на водомерном посту  $N$  притока, который вызывает определенное повышение уровня  $\Delta h_{P, B}$  на водомерном посту  $B$  главной реки. Эта задача требует для своего решения сначала установления времени пробега для уровней притока. Для этого, добавляя устьевую станцию  $M$ , разделяют участок от  $N$  до  $B$  на две части и получают полное время пробега  $\Delta t_{(N-B)}$  путем суммирования времени пробега от  $N$  до  $M$ , то есть в пределах притока и времени пробега от  $M$  до  $B$  уже по главной реке. Результат вычисления полного времени пробега изображен на рис. 343, *f*.

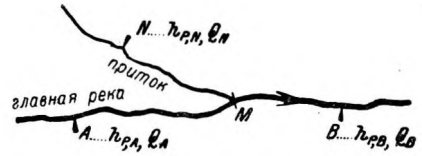


Рис. 341.

Вслед за этим надлежит определить тот уровень на водомерном посту  $N$  притока, который доходит до водомерного поста  $B$  главной реки одновременно с уровнем воды  $\Delta h_{P, A}$  водомерного поста  $A$ .

Для этого необходимо построить вспомогательный график  $L_{N'}$ , который получается из графика колебания уровня  $L_N$  на водомерном посту  $N$  сдвигом уровней на соответствующее особое для каждого из них время полного пробега  $\Delta t_{(N-B)}$  (рис. 343, *d*).

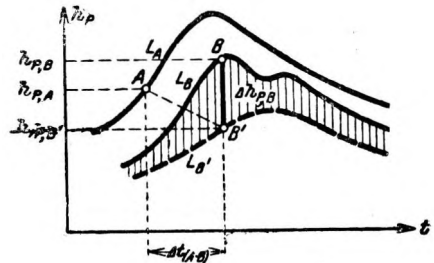


Рис. 342. Определение изменений уровня  $\Delta h_{P, B}$ , которые обуславливаются на водомерном посту  $B$  влиянием со стороны притока.

Далее должна быть известна зависимость между повышением уровня  $\Delta h_{P, B}$  главной реки и уровнем  $h_{P, N}$  на притоке. Она может быть установлена на основе данных многолетних наблюдений. Для этого наносят при различных значениях уровня воды  $h_{P, AI}$ ,  $h_{P, AII}$  и т. д. главной реки, которые естественно влияют на искомую зависимость, соответственные уровни  $h_{P, NI}$ ,  $h_{P, NII}$  . . . и  $\Delta h_{P, B}$ . Таким образом может быть получена серия кривых (прямых)  $\Delta h_{P, B} = f(h_{P, N}, h_{P, A})$  (рис. 343).

Установление уровня воды для нижнего водомерного поста главной реки по сопряженным уровням на верхнем посту главной реки и на водомерном посту на притоке получается в следующем виде (см. рис. 343). Наносят данные графики колебания уровня на верхнем посту  $L_A$  и на притоке  $L_N$  один над другим и помещают серию кривых  $\Delta h_{P, B} = f(h_{P, N}, h_{P, A})$  на одной высоте с графиком притока. Тогда уровню  $h_{P, AI}$ , в случае наличия только первичной паводковой волны на нижнем посту  $B$ , соответствовал бы уровень  $h_{P, BI}$  с наступлением его позже на промежуток времени, равный времени пробега  $\Delta t_{(AI-BI)}$ . Одновременно с этим с притока доходит до  $B$  уровень  $h_{P, NI}$  ( $B'_I - N'_I - N_I$ ). Этому уровню по кривой связи  $h_{P, AI}$  соответствует искомое значение  $h_{P, BI}$ . Его откладывают вверх от точки  $B'_I$  и получают в результате искомую точку  $B_I$  графика  $L_B$  нижнего поста главной реки.

При помощи этого способа можно построить по отдельным точкам график колебания уровня на расположенном ниже по течению водомерном посту. Применяя его при переходе от одного водомерного поста к другому, можно осуществлять прогноз уровня на участках реки со значительным протяжением.

Иногда упрощают описанный способ прогноза, принимая время добегания для всех уровней одного и того же водомерного поста, независимо от их

высоты, одинаковым. Такого рода прогноз, страдая, разумеется, большими погрешностями, находит однако применение благодаря своей простоте.

Прогноз, основанный на данных водомерных наблюдений, может быть изменен еще в том направлении, что определяют не самые уровни, а предполагаемые их изменения.

Если движение речного потока носит установившийся характер, то действительно уравнение объемных величин:

$$Q_B = Q_A + Q_N. \quad (245)$$

Если движение неустановившееся, то уравнение остается приближенно верным при условии, что входящие в него расходы воды можно рассматривать как сравнимые. В обоих случаях расходы воды  $Q_A$ ,  $Q_B$  и  $Q_N$  следует брать

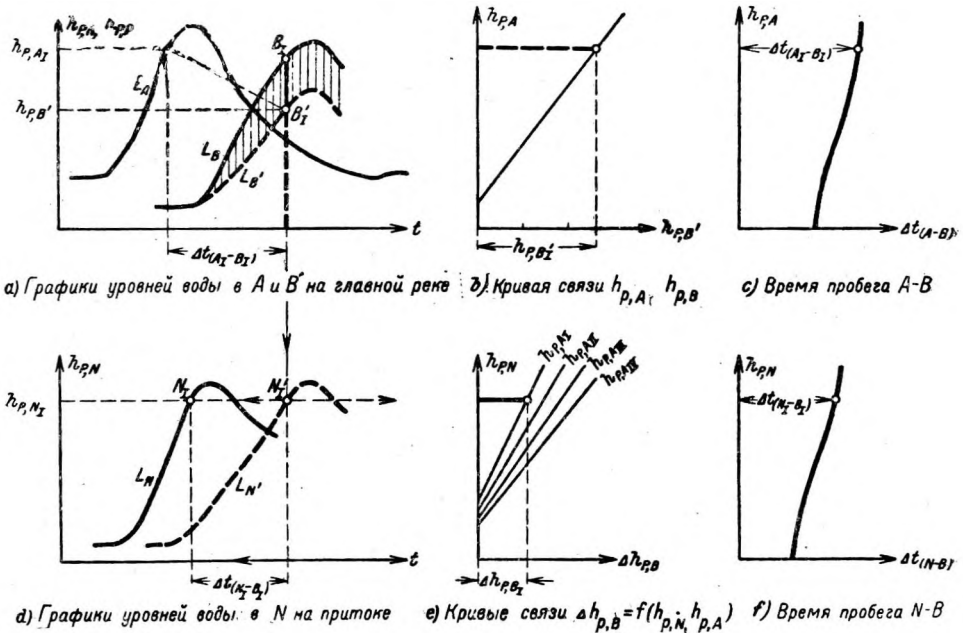


Рис. 343. Построение графика  $h_{p,B} = f_b(t)$  по графику  $h_{p,A} = f_a(t)$  для первичной паводковой волны и по графику  $h_{p,N} = f_n(t)$  для вторичной паводковой волны.

с графиков колебания расходов воды в А, В и N для тех моментов времени  $t_A$ ,  $t_B$  и  $t_N$  которые, учитывая время пробега  $\Delta t_{(A-B)}$  и  $\Delta t_{(N-B)}$ , удовлетворяют условиям:

$$\left. \begin{aligned} t_A &= t_B - \Delta t_{(A-B)} \\ t_N &= t_B - \Delta t_{(N-B)} \end{aligned} \right\} \quad (246)$$

При известных кривых расходов воды  $Q_A = f_a(h_{p,A})$ ,  $Q_B = f_b(h_{p,B})$  и  $Q_N = f_n(h_{p,N})$ , уравнение (245) может быть преобразовано в следующее:

$$f_b(h_{p,B}) = f_a(h_{p,A}) + f_n(h_{p,N}).$$

Применение этого уравнения к двум следующим один за другим уровням воды дает:

$$f_2(h_{p,B} - h_{p,B'}, h_{p,B}) = f_1(h_{p,A}' - h_{p,A}'', h_{p,A}) + f_3(h_{p,N}' - h_{p,N}'', h_{p,N}).$$

Обозначая изменение уровня  $h_{P'} - h_{P''} = \Delta h_P$ , получаем, что

$$f_2(\Delta h_{P,B}, h_{P,B}) = f_1(\Delta h_{P,A}, h_{P,A}) + f_3(\Delta h_{P,N}, h_{P,N}).$$

Указанная зависимость может быть при известных обстоятельствах приведена к простому виду:

$$\Delta h_{P,B} = a_1 \Delta h_{P,A} + a_2 \Delta h_{P,N}, \quad (247)$$

где  $a_1$  и  $a_2$  подлежат определению на основе многолетних наблюдений. Этим дано простое правило прогноза.<sup>1</sup> Практически его можно применять, пользуясь номограммами.

На рис. 344 приведен пример прогноза уровня для р. Мур в Штирии.

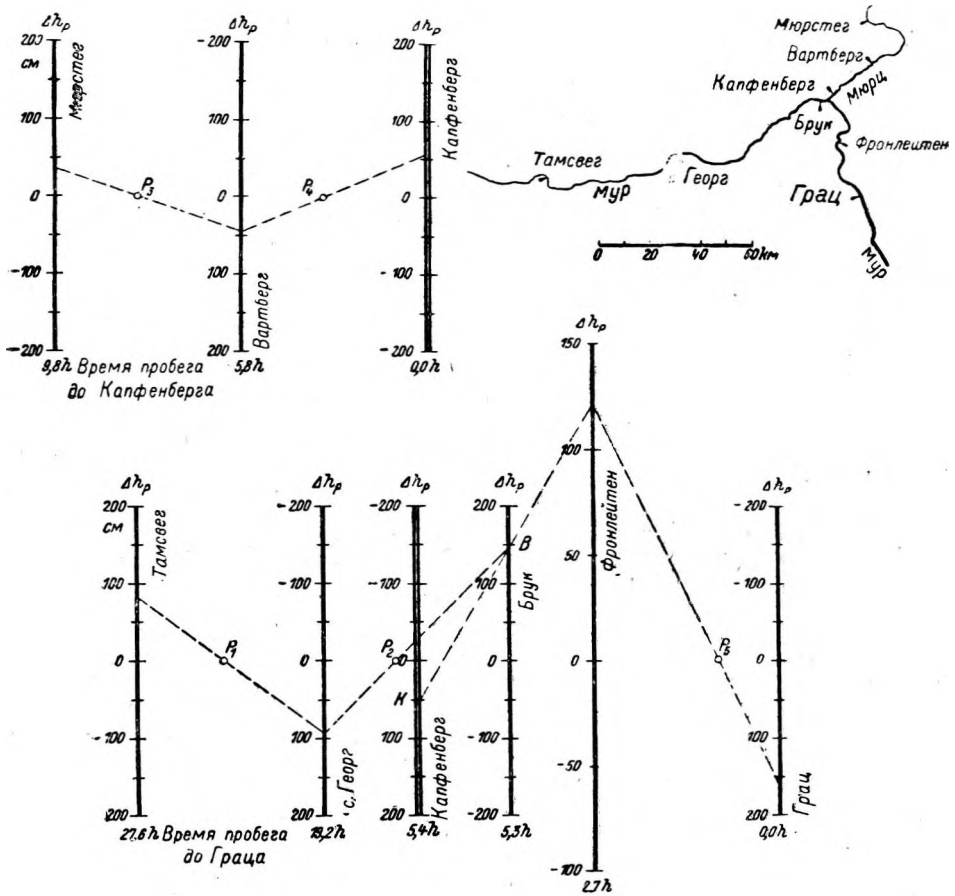


Рис. 344. Номограмма для прогноза изменения уровня воды на рр Мюрц и Мур (по Рейтцу).

Тамсвег сообщает:

$$\left. \begin{array}{l} 18 \times 19^h \dots \dots \dots + 30 \\ 19 \times 7^h \dots \dots \dots + 112 \end{array} \right\} \Delta h_P = + 82 \text{ см}$$

<sup>1</sup> E. M a i l l e t. Comptes rendus des séances de l'Academie des Sciences, P. 1033, Paris 1901; I. K o z e n y. Die Wasserführung der Flüsse. Leipzig 1920.

Линия, проведенная через точки  $P_1$  и  $P_2$  отсекает на шкалах  $h_p$  для Тамсвега, Сан-Георга и Брук соответственные значения изменений уровня:

Сан-Георг.....+ 94 см  
 Брук.....+145 см 20 X около 5<sup>h</sup>.

Мюрстег сообщает:

19 X 7<sup>h</sup>.....+106  
 19 X 19<sup>h</sup> .....+143 }  $\Delta h_p = + 37 \text{ см}$

Линия, проведенная через точки  $P_3$  и  $P_4$  отсекает следующие изменения уровня:

Вартберг.....+44 см  
 Капфенберг..... + 57 см 20 X около 5<sup>h</sup>

При помощи линии  $KBP_5$  получаются в результате следующие изменения уровня:

Фронлейтен.....+ 122 см  
 Грац.....+ 165 см 20 X около 10<sup>h</sup>

Этот способ упрощается еще более, если  $\Delta t_{(A-B)} = \Delta t_{(N-B)}$ , так как в этом случае для расхода воды в  $B$ , наступающего спустя промежуток времени  $\Delta t_{(A-B)}$ , опять действительно выражение  $Q_B = Q_A - Q_N$  при условии, что  $Q_A$  и  $Q_N$  расходы воды, определенные в одно и то же время.

Руководствуясь последним, в Чехословакии производится прогноз уровня р. Эльбы в Течене по уровням в Брандейзе на р. Эльбе, в Праге на р. Мол-



Рис. 345. Прогноз уровней воды на р. Эльбе в Чехословакии.

даве и в Лауне на р. Эггере (рис. 345). Зависимость расходов воды получается весьма простой, так как время пробега от всех трех верхних станций в среднем, примерно, одинаково, а именно 24 часа. Расход воды в Течене, который наступит через 24 часа после подъема уровня, находят, добавляя с заштрихованного промежуточного водосбора к суммарному расходу воды в Брандейзе, Праге и Лауне еще 10% на приточность. Процесс составления прогноза заключается в том, что на сборный пункт в Праге по телеграфу поступают сообщения об уровне воды в Брандейзе, Праге и Лауне; на сборном пункте, пользуясь кривыми расходов воды, определяют расходы воды,

соответствующие сообщенным уровням, суммируют эти расходы между собою и добавляют к сумме еще 10%. По полученному таким способом суммарному расходу воды в Течене определяют по кривой расходов воды для Течена ожидаемый там уровень.

Точность краткосрочных прогнозов различна, в зависимости от применяемого способа прогноза и его срока. Так, например, уровень р. Эльбы в Германии (при прогнозе по данным наблюдений на водомерных постах и при сроке на 6 дней вперед) предсказывается с точностью до 20 см, уровень р. Эльбы в Чехословакии—на 1—2 дня вперед с точностью в среднем около 5 см, уровень р. Дуная в Австрии—на 1 день вперед с ошибкой, составляющей для большого числа случаев в среднем 3 см.



## 2. Способы долгосрочного прогноза

Способы долгосрочного прогноза могут быть, в свою очередь, разделены на способы, использующие данные наблюдений над осадками как в соединении с метеорологическими наблюдениями, так и без них, и на способы, основанные на данных водомерных наблюдений. При этом для первой группы прогнозу уровней может предшествовать прогноз осадков, причем гидрологический прогноз использует употребительные в метеорологии методы.

**Долгосрочные прогнозы, основанные на данных об осадках.** Способ, применимый для прогнозирования величин средних месячных расходов воды, получается при помощи кривой падения расходов воды в бездождное время.<sup>1</sup> При этом исходят не из отдельных кривых падения расхода воды, как в аналогичном способе краткосрочных прогнозов, а из средней кривой падения расхода воды в бездождное время, что является в данном случае достаточным, вследствие приближенного характера этого метода.

При введении в качестве измерителя, вместо объемных величин, соответствующих значений высот в миллиметрах, получают ожидаемую месячную высоту слоя стока из выражения:

$$h_A = h_A' + ch_N + \psi s. \quad (248)$$

Здесь  $L_A$  обозначает ту высоту слоя стока, которая получилась бы при отсутствии в течение всего месяца жидких осадков,  $ch_N$ —высоту слоя, обусловленного выпадением жидких осадков  $h_N$ , мм и  $\psi s$  — высоту слоя стока, образовавшуюся благодаря стаиванию за месяц снегового слоя толщиной  $x$ . Согласно построению уравнения,  $c$  является коэффициентом стока, а  $\psi$  — коэффициентом, в котором учтены и водный эквивалент снегового покрова и коэффициент стока. Значения коэффициентов  $c$  и  $\psi$  выводятся на основе многолетнего ряда наблюдений, пользуясь методом наименьших квадратов.

Затем по кривой падения расхода воды в бездождное время определяют величину того суммарного расхода (притока)  $F_w$ , который поступает в реку в следующем месяце за счет грунтовых вод. Для этого на чертеже кривой падения расхода воды в бездождное время строят интегральную или суммарную кривую (рис. 321), ординаты которой обозначают расход воды

$$\text{в последний день предыдущего месяца, а абсциссы—величину } \frac{F_w}{30 \times 86\,400},$$

то есть средний расход воды  $Q_m$  в последующем месяце. Соответствующая величина слоя стока получается из выражения

$$h_A' = \frac{30 \times 86\,400 Q_m}{\text{площадь водосбора в км}^2 \times 10^9}.$$

В табл. 43 (стр. 328) приведены уравнения для прогнозирования средней месячной величины слоя стока или расхода воды с бассейна р. Мур у Фронлейтена.

Средняя ошибка высоты слоя стока, вычисленной по указанным в табл. 43 уравнениям при известной величине осадков, получается в среднем за двенадцать месяцев равной 14,4%.

Второй способ прогноза, также опирающийся на данные наблюдений над осадками, применяется при помощи теории корреляции.

При построении этого способа исходят из мысли установить связь между осадками и стоком таким образом, чтобы для какого-то месяца, для которого определяется величина стока, учитывать осадки за те месяцы,

<sup>1</sup> W. v. Kesslitz. Über verschiedene Methoden zur Vorausberechnung von Monatsmitteln der Wasserführung österreichischer Alpenflüsse. Die Wasserwirtschaft, № 7, 8 u. 9. Wien 1928.

**Вычисление среднемесячной величины слоя стока р. Мур у Фронлейтена при помощи  
кривой падения расхода воды в бездождное время**

Месяц	Слой стока в мм	Расход воды в м <sup>3</sup> /сек	Средняя ошибка в %
Январь	$h_A = h'_A + 0,172h_N$ .....	$h_A \times 2,45$	14,3
Февраль	$h_A = h'_A + 0,146h_N$ .....	$h_A \times 2,71$	19,5
Март	$h_A = h'_A + 0,233h_N + 0,0106h'_N$ .....	$h_A \times 2,45$	14,3
Апрель	$h_A = h'_A + 0,450h_N + 0,988h'_N$ .....	$h_A \times 2,53$	16,7
Май	$h_A = h'_A + 0,571h_N + 0,266h'_N$ .....	$h_A \times 2,45$	17,5
Июнь	$h_A = h'_A + 0,328h_N$ .....	$h_A \times 2,53$	15,2
Июль	$h_A = h'_A + 0,222h_N$ .....	$h_A \times 2,45$	11,7
Август	$h_A = h'_A + 0,149h_N$ .....	$h_A \times 2,45$	13,0
Сентябрь	$h_A = h'_A + 0,265h_N$ .....	$h_A \times 2,53$	17,7
Октябрь	$h_A = h'_A + 0,228h_N$ .....	$h_A \times 2,45$	11,0
Ноябрь	$h_A = h'_A + 0,211h_N$ .....	$h_A \times 2,53$	9,1
Декабрь	$h_A = h'_A + 0,139h_N$ .....	$h_A \times 2,45$	13,0

Т а б л и ц а 44

**Вычисление средней за месяц высоты слоя стока р. Мур у Фронлейтена**

Месяц	Высота слоя стока в мм	Расход воды в м <sup>3</sup> /сек	Коэффи- циент корре- ляции	Средняя ошибка в %
Январь	$h_A = - 5,0 + 0,093h_N$ (IX—I).....	$h_A \times 2,45$	0,810	19,0
Февраль	$h_A = + 15,1 + 0,143h_N$ (XII).....	$h_A \times 2,71$	0,773	10,4
Март	$h_A = + 14,1 + 0,078h_N$ (X—II).....	$h_A \times 2,45$	0,624	14,4
Апрель	$h_A = - 1,6 + 0,192h_N$ (X—III).....	$h_A \times 2,53$	0,621	18,8
Май	$h_A = - 100,0 + 0,675h_N$ (XI—IV).....	$h_A \times 2,45$	0,790	22,0
Июнь	$h_A = - 64,5 + 0,322h_N$ (XII—VI).....	$h_A \times 2,53$	0,774	15,6
Июль	$h_A = - 24,4 + 0,278h_N$ (V—VII).....	$h_A \times 2,45$	0,882	11,0
Август	$h_A = - 32,9 + 0,240h_N$ (VI—VIII).....	$h_A \times 2,45$	0,824	11,5
Сентябрь	$h_A = - 62,1 + 0,249h_N$ (VI—IX).....	$h_A \times 2,53$	0,854	13,8
Октябрь	$h_A = - 10,0 + 0,197h_N$ (VIII—X).....	$h_A \times 2,45$	0,800	13,1
Ноябрь	$h_A = + 3,6 + 0,150h_N$ (IX—XI).....	$h_A \times 2,53$	0,841	12,5
Декабрь	$h_A = + 10,8 + 0,182h_N$ (XI—XII).....	$h_A \times 2,45$	0,885	12,0

которые имеют наибольшее влияние на сток данного месяца. Такими месяцами являются обычно несколько предыдущих и сам рассматриваемый месяц. Математически эта мысль находит обычно выражение в форме уравнения:

$$h_A = a + b \sum h_N, \quad (249)$$

где  $h_A$  — искомая месячная высота слоя стока и  $\sum h_N$  — суммарная высота слоя осадков для той группы месяцев, для которой коэффициент корреляции в отношении  $h_A$  достигает максимальной величины.

Согласно указанному, с помощью методов теории корреляции выведены уравнения связи для р. Мур у Фронлейтена на основе данных об осадках за период с 1900 по 1919 г. Эти уравнения приведены в табл. 44, причем римскими цифрами обозначены месяцы, за которые надлежит учитывать осадки.

Средняя ошибка вычисленных высот слоя стока составляет в среднем за двенадцать месяцев 14,5%, то есть она приблизительно равна ошибке, получившейся при вычислении по способу, основанному на кривой падения расхода воды в бездождное время. Это означает, что для данного водосбора с его величиною в 6553 км<sup>2</sup> оба способа прогноза, примерно, одинаковы по точности. Исследования с водосборами меньшей площади показали, что по точности предпочтение следует отдавать первому способу.

Применение уравнений, выведенных на основании только что рассмотренных методов, предполагает, что высота слоя осадков за тот месяц, для которого устанавливается прогноз, уже известна. Поэтому ближайшая задача должна состоять в том, чтобы прогнозировать осадки на некоторый определенный отрезок времени.

При этом нельзя ограничиться приближенной оценкой осадков, так как тогда при вычислении  $h_A$  можно рассчитывать только на грубо приближенные результаты. В первую очередь это относится к тем месяцам, где осадки имеют решающее влияние на величину стока. Надо, следовательно, опять обращаться за помощью к статистическому методу. При этом можно поступать подобно тому, как и при краткосрочных прогнозах осадков, связывая состояние погоды в исследуемом бассейне с состоянием погоды в отдаленных центрах действия.

Метеорологические исследования показали, что на земном шаре существуют области, где состояние погоды за предыдущие месяцы влияет на последующее развитие погоды в весьма отдаленных от них районах. Связь этих явлений уловима при помощи корреляции. Необходимо только отдавать себе ясный отчет в том, что таким образом можно предсказать лишь общее состояние погоды. Местные ливни, конечно, не могут быть предугаданы на основе изучения центров действия, и поэтому для такого рода явлений могут иметь место большие расхождения между данными наблюдений и теоретическим расчетом. Из упомянутых центров действия для Средней Европы имеют значение область пониженного давления в Исландии, Азорский максимум и Сибирские максимум и минимум.

Была сделана попытка применить на деле приведенное выше рассуждение. Было принято, что достаточно характеризующими указанные области являются данные наблюдений метеорологических станций Стиккисхолм в Исландии (65°5' с. ш. и 22°46' з. д.) и Ла Корунья в Испании (43°22' с. ш. и 8°25' з. д.). Наблюдения над атмосферным давлением и температурой на этих станциях были приведены в корреляционную связь с наблюдениями над осадками в бассейне р. Мур (рис. 278).

Так как в этом случае речь идет о построении корреляционных связей трех признаков совокупности погоды, а именно осадков, атмосферного давления и температуры воздуха, то следует обратиться к методу неполной корреляции

в том же виде, как он применяется в метеорологии для корреляции атмосферного давления в полярных областях.<sup>1</sup>

Если обозначить, как и выше, через  $h_N$  — высоту слоя осадков за искомый месяц в миллиметрах, через  $B_m$  — среднее месячное значение из пиков показаний барометра в миллиметрах, через  $T_m$  — среднюю месячную температуру воздуха в градусах Цельсия, причем  $B_m$  и  $T_m$  относятся к станции, выбранной в области центра действия, то уравнение регрессии может быть написано в виде:

$$h_N = a_1 + a_2 B_m + a_3 T_m. \quad (250)$$

Вывод корреляционных связей производился эмпирическим путем, причем отклонения высоты слоя осадков от среднего значения ставились (месяц от месяца) в связь сначала с аномалиями атмосферного давления и затем с аномалиями температуры на выбранной станции центра действия. Такое сопоставление продолжалось, пока не получался достаточно высокий коэффициент корреляции. Это исследование распространялось на прошедший период, продолжительностью не более чем в двенадцать месяцев. В уравнениях, приведенных в табл. 45, римские цифры обозначают те группы месяцев, при учете которых получается наиболее высокий коэффициент корреляции, то есть можно ожидать получения наиболее точных значений  $h_N$ .

Таблица 45

**Вычисление месячных осадков для бассейна р. Мур у Фронлейтена при помощи корреляционного метода**

Месяц	Высота слоя осадков в мм	$B_m$ и $T_m$ из дачных за группу месяцев ..... предшествующего года по станции .....	Коэффициент корреляции	Средняя ошибка в %
Январь	$h_N = -68,0 + 2,21B_m$ .....	III Стиккисхолм	0,60	33
Февраль	$h_N = -126,9 + 16,9T_m$ .....	VII »	0,50	39
Март	$h_N = +362,2 - 2,63B_m$ .....	VI—VII »	—0,48	25
Апрель	$h_N = -171,8 + 4,53B_m - 7,17T_m$ .....	IV »	0,68	23
Май	$h_N = +433,8 - 5,93T_m$ .....	VII »	—0,61	16
Июнь	$h_N = +257,9 - 3,245B_m$ .....	I »	—0,54	18
Июль	$h_N = +243,6 - 1,42B_m - 7,29T_m$ .....	II—III »	0,56	23
Август	$h_N = +113,3 + 15,47T_m$ .....	IV »	0,51	26
Сентябрь	$h_N = +128,0 + 12,5T_m$ .....	II »	0,51	28
Октябрь	$h_N = +70,5 + 2,4B_m - 14,12T_m$ .....	VII—VIII »	0,75	26
Ноябрь	$h_N = 272,9 - 4,53B_m$ .....	I »	—0,54	37
Декабрь	$h_N = +56,7 + 2,21B_m - 12,96T_m$ .....	XII Ла-Корунья	0,59	33

Средняя ошибка результатов вычислений колеблется около 25%, а коэффициент корреляции—около 0,57. Ввиду этого прогноз на основе полученных зависимостей можно рассматривать только как грубое приближение, которое,

<sup>1</sup> E. C z u B e z. Die statistischen Forschungsmethoden. Wien 1921; F. M. E x n e r. Monatliche Luftdruck und Temperaturanomalien auf der Erde und Korrelationen des Luftdruckes auf anderer Orte. Sitzungsbericht der Akademie der Wissenschaften. Math. naturw. Klasse, H. 7 u. 8, Wien 1924.

однако, за отсутствием других возможностей, может быть в некоторой степени использовано при эксплуатации гидросиловых установок.

Относительно точности долгосрочных прогнозов пока имеется мало данных; ниже приводится один пример.

Для р. Мур у Фронлейтена за месяцы с января по сентябрь 1933 г. были вычислены при помощи корреляционного метода высоты слоя осадков за каждый месяц и, пользуясь кривой падения расходов воды в бездождное время, средние месячные расходы воды. В табл. 46 дано сопоставление этих прогнозируемых значений с фактически наблюдаемыми данными.

Таблица 46

**Результаты прогноза месячных осадков в бассейне р. Мур и средних месячных расходов стока у Фронлейтен**

		Январь	Февраль	Март	Апрель	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Среднее
Высота слоя осадков за месяц в мм	вычисленная	48	29	49	62	73	83	113	130	113	—
	наблюденная	25	41	28	61	97	109	119	121	113	—
	ошибка в %	92	—29	75	2	—25	—24	—5	7	0	+10
Средний месячный расход стока в м <sup>3</sup> /сек	вычисленный	47	49	62	1	170	187	158	141	136	—
	наблюденный	41	58	59	100	167	168	147	143	120	—
	ошибка в %	15	—16	5	—	2	11	7	—1	13	+4

Пример служит интересным свидетельством того, что прогноз осадков за январь—сентябрь 1933 г. оказалось возможным дать со средней ошибкой +10%, а прогноз стока за те же месяцы с ошибкой +4%.

**Долгосрочные прогнозы по уровням воды.** При описании способов сглаживания кривых в качестве примера их применения был приведен анализ графика колебания уровня воды для водомерного поста Фронлейтен на р. Мур (рис. 237). При этом оказалось, что является вполне возможным разложить этот график, на первый взгляд отличающийся незакономерным ходом, на ряд отдельных колебаний периодического характера. Рассмотренный пример также показал, что после выделения из первоначального графика процессов с периодическим характером колебаний получается линия с совершенно незакономерным ходом изменений.

Способ сглаживания приводил к полному разложению графика на элементарные волны только в тех случаях, где режим речного потока обусловлен более простыми климатическими и метеорологическими факторами, чем то имеет место для бассейна р- Мур с его альпийским характером <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Произвести вычисления оказалось невозможным из-за отсутствия снегомерных наблюдений.

<sup>2</sup> A. Wallen. Les previsions des niveaux d'eau et des debits en Suède; A. Streiff. On the investigation of cycle and the relation of the Brückner and solar cycles. Monthly Weather review, U. S. A., 1926.

Теперь, если подобного рода глубокий анализ оказывается возможным, то и обратно должно быть возможно путем синтеза элементарных волн, шаг за шагом, восстановить первоначальный график и отсюда вывести прогноз для хода уровня воды на будущее время (рис. 346). Из этого рассуждения не следует, однако, делать вывод, что таким способом можно осуществить прогноз на длительный период времени вперед. Опыт показал, что даже при

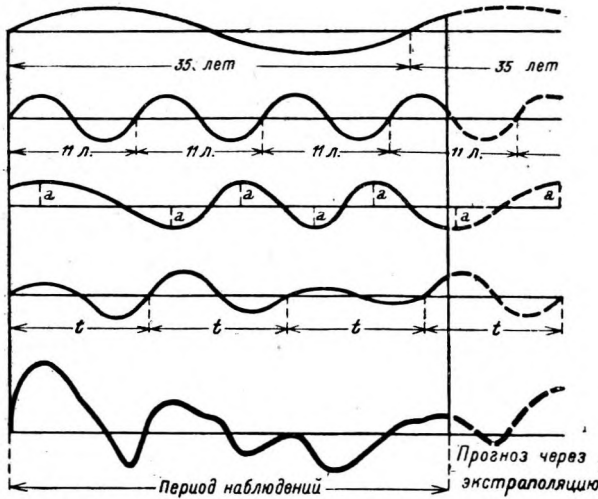


Рис. 346. Аналитико-синтетический прогноз при помощи способа сглаживания по Валлену и Штрейфу.

Волны полученные путем анализа:

- a) 35-летний Брюкнеровский период
- в) 11-летний период солнечных пятен
- с) волны разной длины и равной амплитуды колебаний
- д) волны одинаковой длины и с разной амплитудой колебаний

Синтез:

- e) волны разной длины и амплитуды колебаний

самых благоприятных обстоятельствах анализа приводят к отдельным волнистым линиям, которые обладают или

различными длинами волн или амплитудами разной величины. Поэтому необходимо в некоторых случаях повторять анализ для того, чтобы уловить характер изменения формы элементарных волн. Прогноз окажется тогда возможным только в более узких пределах длин волн и их амплитуд, принимаемых за постоянные.<sup>1</sup>

Прогнозы этого рода до сих пор привели к успеху только на некоторых реках Северной Америки и Швеции, где имеет место сток с озерных бассейнов. В этих случаях вследствие аккумуляции стока происходит такое его выравнивание, что волны с коротким периодом действия, вызванные местного характера ливнями, исчезают, а волны с более длинными периодами, большей частью космического происхождения, могут быть легче выделены при анализе.

Таким образом долгосрочные прогнозы по уровням, так же как и прогнозы, основанные на связи с метеорологическими центрами действия, следует пока что рассматривать как задачу не решенную, однако дальнейшее изучение и развитие обоих способов следует рекомендовать.

## IX. ИСКУССТВЕННОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ НА РЕЖИМ ВОДНОГО ПОТОКА

До сих пор рассматривались гидрологические процессы при естественном состоянии водного потока. Любое искусственное воздействие на характер водосбора или водную сеть превращает естественный режим в искусственный.

<sup>1</sup> A. Kvetinsky. u. Maschinenbau, N. 17, 1928.

Wassermengenvorhersage im Kraftwerksbetrieb. Z. f. Elektrotechnik

Подобного рода воздействия, поскольку они касаются гидротехники, распадаются на следующие категории:

- 1) изменение осадков, испарения и просачивания в грунт;
- 2) изменение расхода воды путем забора воды из главной реки или подачи воды в нее;
- 3) изменение уровня воды вследствие изменений поперечных сечений вдоль по реке, вызванных гидротехническими сооружениями;
- 4) изменение режима расхода воды посредством включения или выключения водохранилищ.

## 1. Изменение осадков, испарения и просачивания в грунт

Известны попытки вызвать изменение осадков (как в отношении их характера, так и количества) посредством стрельбы в воздух и других подобных мероприятий. Однако при этом были достигнуты только незначительные результаты. Мысль образовать в воздухе центры конденсации и тем самым усилить конденсацию водяного пара путем ионизации воздуха при помощи электрических волн большой частоты привела к опытам широкого размаха, организованным в природных условиях.<sup>1</sup> Приведут ли эти опыты к ценному в практическом отношении решению задачи о воздействии на осадки,—покажет будущее.

Изменения в величине испарения и просачивания в грунт вызываются в широких пределах посредством перемен в растительном покрове. Особое значение здесь имеет влияние леса. К мнению, обычно принимаемому за бесспорное, что сплошная вырубка леса, вследствие вызываемого ею понижения испарения и просачивания, служит причиной увеличения максимальных расходов воды, следует все же относиться критически. Благоприятное влияние леса как на водное хозяйство вообще, так и на условия прохода максимальных вод, вызывается не только факторами физического порядка, но нередко, и притом в преобладающей степени, также и механическими воздействиями. Шероховатая поверхность лесной почвы оказывает куда большее сопротивление стоку, чем голые и сравнительно гладкие склоны, и способность ее к задержанию влаги больше, чем у незалесенной почвы. Параллельное действие обоих этих факторов может способствовать снижению максимального расхода воды.<sup>2</sup>

С другой стороны, не следует упускать из виду, что в некоторых, правда редких случаях влияние леса может оказаться отрицательным. Широкое изучение этого вопроса в США показало, что в западных областях страны леса вследствие их снегоаккумулирующей способности, влияют на сток в неблагоприятную сторону. Задерживающийся в лесу снежный покров стаивает лишь под влиянием теплого летнего дождя, причем таяние протекает так быстро, что им могут быть вызваны катастрофические паводки.

Дать цифровую характеристику величины изменений, вызванных этими механическими, физическими или климатическими переменами, вследствие многообразного характера водосборов, в настоящее время не представляется возможным.

<sup>1</sup> Одной низкой температуры недостаточно, чтобы вызвать конденсацию. В воздухе должны находиться центры конденсации, объектами которых могут служить частицы пыли, а также ионизированные молекулы воздуха.

<sup>2</sup> Engels. Handbuch des Wasserbaues, Leipzig 1923; F. Schaffernak. Neuere Anschauungen über den Einfluss des Waldes auf die Wasserstandsverhältnisse der Gewässer Österr. Wochenschrift f. d. öffentl. Baudienst H. 22, 1912; содержит рассмотрение работы Хиттенден (H. M. Chittenden) в Transactions of the American Society of Civil Engineers, Paper № 1098—об отношении лесов и водохранилищ к стоку, учитывая в особенности судоходные реки.

## 2. Изменение расхода воды путем ее забора из водотока или подачи в него

Изменение расхода воды путем ее забора из водотока или подачи в него, в отношении влияния этого воздействия на естественный режим, поддается расчету. В первую очередь это относится к забору воды в том виде, как он производится для использования воды в целях получения гидроэнергии. Здесь он часто обуславливает изменения режима на многокилометровых участках рек и может вызвать стойкие морфологические изменения в русле. Именно это последнее обстоятельство оправдывает приводимые ниже исследования, так как они образуют первую ступень к дальнейшим морфологическим исследованиям.

Из главной реки в ее сечении, совпадающем с началом обходных или деривационных сооружений, забирается некоторый переменный по величине расход воды  $Q_e$ , который затем отдается реке обратно в ее сечении, совпадающем с концом обходных сооружений (рис. 347). Благодаря этому на

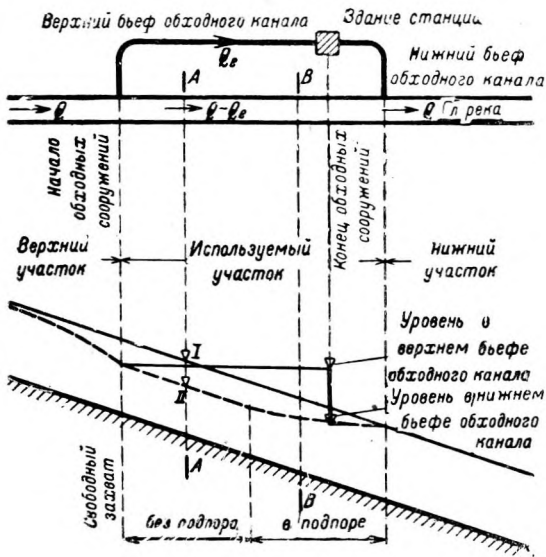


Рис. 347. Изменение естественного режима реки путем забора воды.

главной реке наступают изменения по отношению к естественным условиям в ее состоянии I как в величине расхода воды, так и в положении уровня. Расход воды на участке реки между началом и выходом обходных сооружений, то есть на используемом ее участке, во время эксплуатации гидроустановки снижается с  $Q$  до  $Q - Q_e$ . Уровни на верхнем и на используемом участках реки понижаются с  $\nabla I$  до  $\nabla II$ , в то время как на нижнем участке они остаются без изменения. При этом на некотором протяжении используемого участка уровень находится в подпоре от уровня, устанавливающегося в месте выхода обходных сооружений обратно в реку. На верхнем участке реки положение уровня определяется или

положением гребня плотины или при свободном захвате воды (как на рис. 347) пониженным положением уровня на используемом участке. Изменения уровня и расхода воды вместе определяют размеры изменений режима. Если подпор распространяется только на незначительную часть используемого участка, то уровень воды  $h_p(Q - Q_e)$ , соответствующий положению  $\nabla II$ , может быть получен непосредственно по кривой расходов воды, построенной для прежнего состояния используемого участка. Искомый уровень должен в таком случае соответствовать по кривой расходов воды расходу  $Q - Q_e$ . Если подпором пренебрегать нельзя, то уровень воды определяется, исходя из уровня в сечении, совпадающем с выходом обходных сооружений в реку, по обычным формулам для построения кривых свободной поверхности воды в подпертом состоянии.<sup>1</sup> Точно так же уровень на верхнем участке следует определять исходя из уровня в сечении реки, совпадающем с началом обходных сооружений.

<sup>1</sup> Schaffernak. Neue Grundlagen für die Berechnung der Geschiebeführung in Flussläufen. Leipzig 1922.



Определение изменения режима расходов воды в свободном от подпора сечении  $A$  используемого участка состоит в следующем.

Допустимый секундный забор воды  $Q_e$  определяется исходя не только из естественного режима используемого водотока, но также и из других соображений. Условия, определяющие его величину, могут быть основаны на требованиях судоходства, сплава, учете интересов рыболовства и санитарных требованиях на подлежащем использованию участке.

Допустимый забор воды будет изменяться по величине вместе с величиною расхода воды в водотоке. Зависимость их между собою правильнее всего выражать посредством кривой остаточных расходов воды  $Q-Q_e$ .<sup>1</sup> Эта кривая вычерчивается в той же системе координат, что и основная кривая расходов воды  $Q=f(h_p)$  (рис. 348). Для этого наносят для каждого уровня воды расход воды, уменьшенный на величину допустимого секундного забора воды  $Q_e$ , то есть расход воды  $Q-Q_e$ .

Если естественный режим определяется кривою продолжительности стояния уровней  $I$  и кривою расходов воды  $Q=f(h_p)$ , то задача состоит в построении кривой продолжительности стояния уровней  $II$  после забора воды  $Q_e$  таким образом, чтобы уровни воды до и после забора воды обладали одинаковой продолжительностью. Линия  $CDEFG$  выходит из точки  $C$ , определяемой уровнем  $h_{p, I}$ , идет через  $D$  к  $E$ —точке пересечения с кривою  $Q-Q_e$ . Так как на используемом участке после забора расхода воды  $Q_e$  остается только расход воды  $Q-Q_e$ , то точке  $F$  пересечения с кривою расходов воды  $Q$  соответствует новый уровень  $h_{p, II}$ . Точка  $B$  пересечения перпендикуляров с осями координат из  $F$  и  $C$  дает точку новой кривой продолжительности, так как уровни  $h_{p, I}$  и  $h_{p, II}$  соответствующие точкам  $C$  и  $B$  имеют одинаковую продолжительность  $T$ . Новая кривая продолжительности стояния уровней может быть определена таким способом поточно.

По кривой продолжительности стояния уровней и кривым  $Q$  и  $Q-Q_e$  можно далее при помощи линий  $CPHK$  и  $CPELMN$  построить кривые продолжительности расходов воды до забора воды и после забора ее (см. рис. 348, внизу).

В результате такого построения можно непосредственно по чертежу получить объем воды, забранный для питания гидросиловой установки.

В том случае, когда требуется определить изменение режима для сечения  $B$  (см. рис. 347), где еще сказывается подпор от уровня в выходном сечении реки, следует учитывать, что кривая расходов воды для этого сечения при состоянии  $II$  изменилась против состояния  $I$ . Эта новая кривая расходов воды может быть определена только по отдельным точкам, причем

<sup>1</sup> Кривая остаточных расходов воды  $Q-Q_e$  является всего лишь графическим изображением уменьшения расходов воды, служащим в качестве вспомогательной линии при построении кривой продолжительности. Она не представляет функциональной зависимости между расходом и уровнем воды. (Прим. пер.)

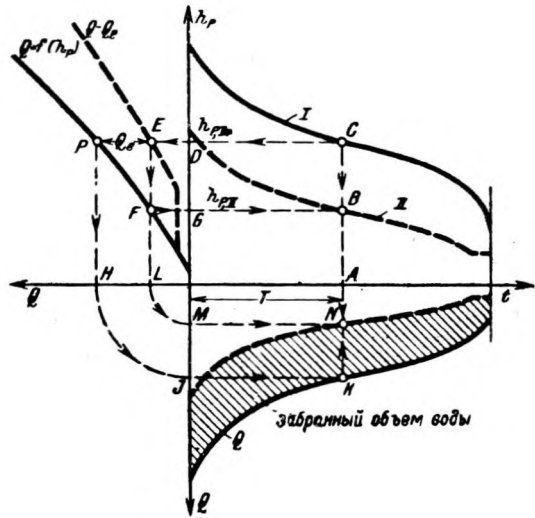


Рис. 348. Установление изменения режима при заборе воды.

для каждой из них при помощи независимого вычисления подпертого уровня по формулам для кривых подпора. Кривая продолжительности расходов воды для сечения  $B$  остается такою же, как и для сечения  $A$ , так как через оба сечения в течение равных промежутков времени протекают одинаковые по величине расходы воды  $Q = Q_e$ . Кривая продолжительности стояния уровней при заборе воды для сечения  $B$  может быть получена из кривой продолжительности расходов воды при заборе воды для сечения  $A$  и из новой кривой расходов воды в сечении  $B$ .

### 3. Изменение уровня воды в результате речных выправительных работ

Общие изменения русла при выправительных работах заключаются обычно в их сужении. Этим стремятся достичь больших судоходных глубин путем повышения уровня или усиления движения наносов и тем самым углубления регулируемого участка.

Сужение производится при помощи струнаправляющих сооружений (продольных дамб) или при помощи бун (попереч-

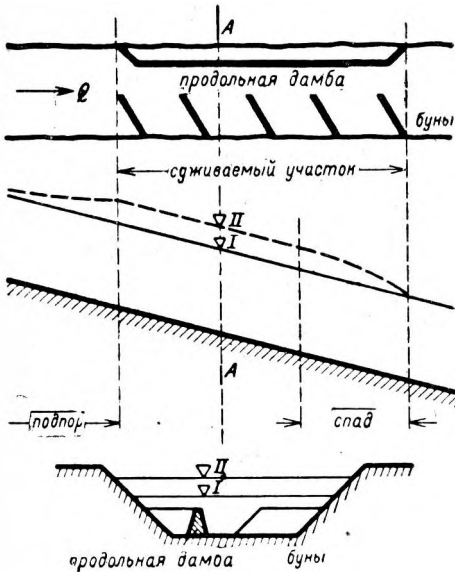


Рис. 349. Изменение режима посредством выправительных сооружений.

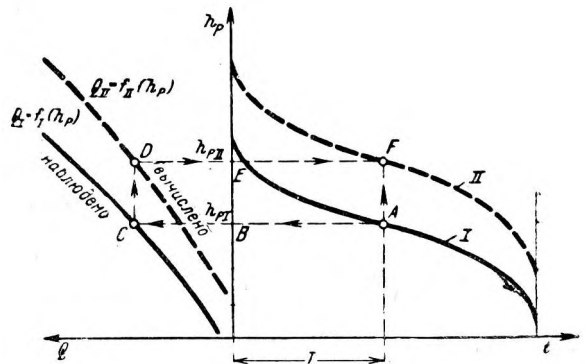


Рис. 350. Определение изменения режима в результате сужения русла.

ных дамб) (рис. 349). При одинаковом, в среднем, поперечном сечении (а такое предположение является в большинстве случаев допустимым), на большем протяжении суживаемого участка уровень воды при поднятии устанавливается параллельно своему прежнему положению, а по концам участка образуются подпор и спад.<sup>1</sup>

Новый режим при изображении его в некотором поперечном сечении  $A$  может быть опять выражен посредством изменения кривой продолжительности стояния уровня  $I$  (рис. 350). Для этого необходимо располагать новой кривой расходов воды  $Q = f_{II}(h_p)$ , которая определяется сужением русла выправительными сооружениями. Она может быть получена только путем вычислений при помощи эмпирических скоростных формул.

Для этого при прежнем поперечном сечении, соответствующей ему кривой расходов воды  $Q_I = f_I(h_p)$  и известном уклоне свободной поверхности воды вычисляют по какой-либо из эмпирических скоростных формул коэффициент шероховатости русла для ряда расходов воды и получают таким путем кривую зависимости коэффициента шероховатости от уровня воды. Кривая

<sup>1</sup> F. Schaffernak. Die Wirkungen des Ausbaues von Grosswasserkraftanlagen auf das Flussregime. Die Wasserwirtschaft, № 15 u. 16, 1924.



Однако и выключение аккумулирующих воду пространств, например площадей, затопляемых при разливах рек, представляет существенное значение

для режима рек, ибо вследствие этого мероприятия могут не только возрасти самые подъемы высоких вод, но и увеличиться быстрота передвижения паводковых волн (пиков паводка). Совместное влияние обоих явлений может сказаться неблагоприятно на условиях для защиты от катастрофических подъемов воды. Поэтому всяким широким мероприятиям по выключению заливаемых площадей (пойм), путем сооружения защитных дамб, должно предшествовать исследование вероятного воздействия их на режим реки.

Выключение и выключение водохранилищ представляет во всяком случае очень сильное воздействие на режим водного потока, а следовательно, и на режим движения наносов речной системы. По этой причине вопросы аккумуляции воды занимают в гидрологии большое место.

Систематизированное построение этой важной части гидрологии начинается с исследований процессов накопления воды в природе.

Для характеристики процесса задержания воды в стоячем водоеме на рис. 352 даны графики притока  $Q_z = f_1(t)$  и стока воды  $Q_a = f_2(t)$  для Траунского озера в Верхней Австрии за время паводка в июле—августе 1897 г. Сдвиг во времени графика стока по отношению к графику притока ясно говорит о выравнивающем действии водоема на речной сток. В результате, максимальный расход притока  $Q_{z, \max} = 1375 \text{ м}^3/\text{сек.}$ , понижается при стоке до величины  $Q_{a, \max} = 955 \text{ м}^3/\text{сек.}$

Для аккумуляции воды в стоячем водоеме, то есть для озерного аккумуляции, особенно характерным является то, что вершина графика стока приходится на точку пересечения  $B$  этого графика с графиком притока.

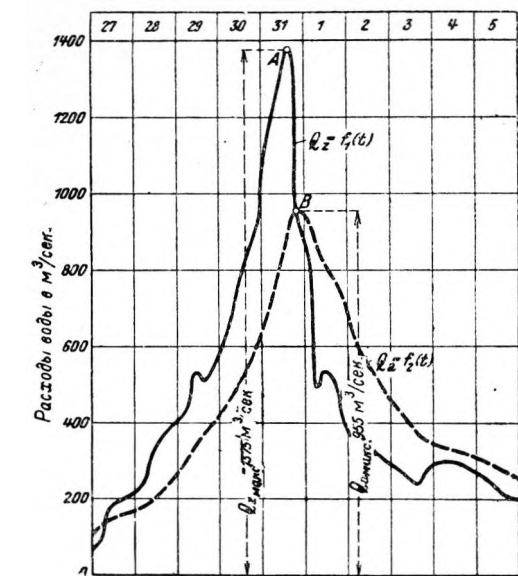


Рис. 352. Графики притока и стока воды Траунского озера за время паводка в июле—августе 1897 г.

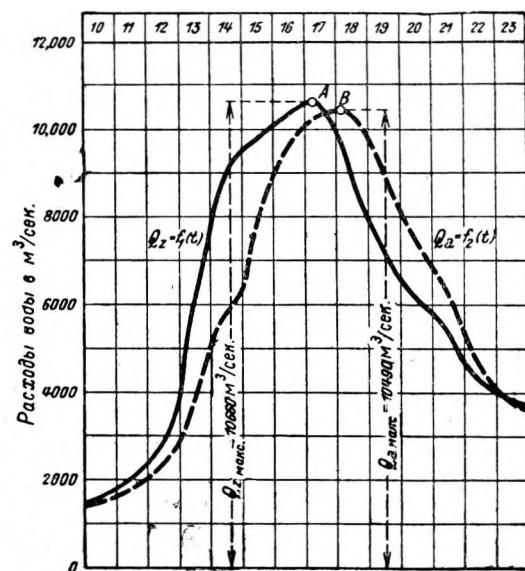


Рис. 353. Графики притока и стока воды Тулнерского водоема за время паводка в сентябре 1899 г.

При рассмотрении графика расходов воды речного потока на участке с исключительно большим расширением русла также обнаруживается понижение величины максимального притока. Так, например, максимальный расход воды р. Дуная в сентябре 1899 г., благодаря заливаемой площади Тулнер—

ского водоема, понизился с 10660 до 10490 м<sup>3</sup>/сек. Однако, в противоположность озерному аккумулярованию, вершина графика стока не лежит здесь на пересечении с линией графика притока (рис. 353). Поэтому при графических изображениях речное аккумулярование легко отличить от озерного.

Явление аккумулярования воды представляет собой случай неустановившегося движения воды. Поэтому полное решение задач, связанных с этим явлением, возможно только при учете времени пробега расходов или уровней воды. Однако при рассмотрении неустановившегося движения воды в речных потоках с несоставными поперечными сечениями обнаружилось, как затруднительно определять время пробега. В случае речных потоков с составными поперечными сечениями определение времени пробега будет еще затруд-

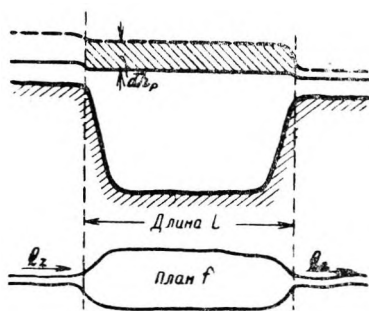


Рис. 354. Длина  $L$  аккумулярующего воду водоема.

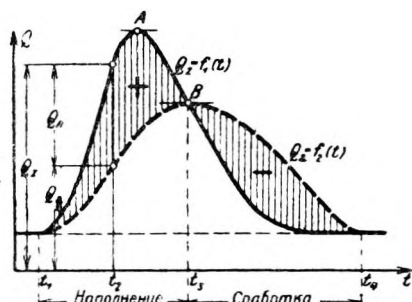


Рис. 355. Графики расхода притока  $Q_z$  и расхода стока  $Q_a$  при аккумуляровании воды в стоячем водоеме.

нительнее, вследствие различия в величине и скорости течения в главном русле и на пойме. В силу этого рассчитывать на точные результаты можно при решении только тех задач по аккумулярованию воды, где время пробега можно не учитывать.

Если при исследовании процесса аккумулярования воды принять, что при наполнении водоема-аккумулятора уровень воды остается все время в горизонтальном положении, то есть что каждое изменение его  $\Delta h_p$  сопровождается параллельным поднятием зеркала воды  $f$  (рис. 354), причем  $Q_z$  — приточный расход воды и  $Q_a$  — расход стока для одного и того же момента времени, то можно написать, что

$$(Q_z - Q_a) dt = f dh_p. \quad (251)$$

Это уравнение выражает, что разность объемов притока и стока равняется объему воды, аккумулярованному в водоеме. Если через  $Q_R = Q_z - Q_a$  обозначить расход воды, аккумулярующийся в водоеме в единицу времени, то получается, что

$$Q_R = f \frac{dh_p}{dt}. \quad (252)$$

Графики притока и стока пересекаются в момент  $t_3$  (рис. 355) и для этого момента

$$Q_z = Q_a, \text{ откуда } Q_R = 0.$$

Отсюда следуют равенства:

$$f \frac{dh_p}{dt} = 0 \quad \text{и} \quad \frac{dh_p}{dt} = 0.$$

Так как изменения положения уровня в водоеме-аккумуляторе и в поперечном сечении в истоке из него одинаковы по величине, то для  $\frac{dh_p}{dt} = 0$  имеем:

$$\frac{dQ}{dt} = 0. \quad (253)$$

Тем самым получается, что максимальный расход стока  $Q_{a, \text{ макс}}$  наступает в тот же самый момент времени  $t_3$ , когда на графике пересекаются линии притока и стока. Вершина графика стока приходится, таким образом, на график притока.

Это исследование, произведенное при условии параллельного своему прежнему положению поднятия горизонтальной площади зеркала воды в водоеме-аккумуляторе, приводит, следовательно, к тому же заключению (рис. 355), что и при характеристике процесса аккумуляирования воды в стоячем водоеме (см. рис. 352). Глубокие естественные озера, а также искусственные водохранилища, в которых скорость течения воды очень мала, допускают тем самым подобные предположения, вследствие чего почти все водохранилища, служащие для погашения пика паводка и для использования водной энергии могут исследоваться на основе процесса при озерном аккумуляировании.

Задачи речного аккумуляирования, возникающие при выключении пойменных пространств (путем обвалования), пытались решать на основе данных о времени пробега расходов воды, определявшихся эмпирическим путем. Опыт оказался мало удачным. Поэтому в дальнейшем будут рассмотрены задачи только с аккумуляированием озерного характера.

При решении задач озерного аккумуляирования исходным будет служить уравнение:

$$(Q_z - Q_a) \Delta t = f \Delta h_p = \Delta V, \quad (254)$$

отнесенное к изменениям конечной величины.

В нем в общем виде:

$$Q_z = f_1(t), \quad (255)$$

$$Q_a(t) = f_2(t), \quad (256)$$

$$Q_a(h_p) = f_3(h_p), \quad (257)$$

$$h_p = f_4(t), \quad (258)$$

$$f = f_5(h_p), \quad (259)$$

$$V = f_6(h_p). \quad (260)$$

В встречающихся на практике случаях  $f = f_5(h_p)$  — кривая площадей зеркал, а отсюда и  $V = f_6(h_p)$  — кривая объемов, — всегда известны, так как величина и форма естественного или искусственного водохранилища определяются их морфологическими, геологическими или соответственно строительными условиями.

$Q_z$  в своей зависимости от природных условий стока на водосборе и в русле водотока может быть выражен только в функции от времени.

$Q_a$ , напротив, если поперечный профиль устойчив во времени и уровень в нем не искажен воздействием каких-либо факторов, может быть выражен непосредственно в функции от  $h_p$ , а так как уровень  $h_p$  сам зависит от  $t$ , то косвенным образом и в функции от  $t$ .<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Hydrographisches Zentralbüro Wien, Einfluss einer eventuellen Eindämmung des Tullner Beckens auf die Stromverhältnisse der Donau. Wien 1903.

<sup>2</sup> В дальнейшем  $Q_a = f_2(t)$  и  $Q_a = f_3(h_p)$  будет сокращенно обозначаться  $Q_a(t)$  и  $Q_a(h_p)$ .

Если, например, уравнения (255), (257) и (259) известны из наблюдений, съемок или соответственно выражены в виде формулы и если их подставляют в общего вида уравнение (254), то получается уравнение:

$$[f_1(t) - f_3(h_p)] \Delta t = f_5(h_p) \Delta h_p.$$

Отсюда получается  $h_p$  в функции от времени  $h_p = f_4(t)$ , то есть уравнение (258). В соединении с уравнением (257) получают после исключения  $h_p$  уравнение (256),  $Q_a(t) = f_2(t)$ . После этого все элементы —  $Q_z$ ,  $Q_a(t)$ ,  $Q_a(h_p)$  и  $h_p$  известны и задача решена. Следовательно, из четырех уравнений (255), (256), (257) и (258) каждый раз должны быть известны два, чтобы можно было при помощи уравнения (254) определить и остальные два.

Число возможных задач, при условии устойчивого с неизменным уровнем поперечного сечения русла в месте выхода водотока из водохранилища, получается как число сочетаний второго класса из четырех элементов

$Q_z$ ,  $Q_a(t)$ ,  $Q_a(h_p)$  и  $h_p$  равным  $(4/2) = 6$ .

Это следующие задачи:

Дано:	Являются искомыми:
1. $Q_z, Q_a(t)$ ;	$Q_a(h_p), h_p$ ;
2. $Q_z, h_p$ ;	$Q_a(t), Q_a(h_p)$ ;
3. $Q_a(t), h_p$ ;	$Q_z, Q_a(h_p)$ ;
4. $Q_a(t), Q_a(h_p)$ ;	$Q_z, h_p$ ;
5. $h_p, Q_a(h_p)$ ;	$Q_z, Q_a(t)$ ;
6. $Q_z, Q_a(h_p)$ ;	$Q_a(t), h_p$ .

Из перечисленных задач три первые содержат исследование существующего естественного состояния, а три последние—расчет будущего искусственно измененного состояния, которое дается поперечными сечениями иной формы при неизменяемом уровне. Вторая группа задач предполагает, следовательно, решение первых.

Если теперь сток происходит через произвольно изменяемое сечение, например через отверстие, регулируемое посредством клапана, задвижки и т. д., то  $Q_a$  зависит одновременно от  $t$  и от  $h_p$  и уравнения (256) и (257) сливаются в уравнение:

$$Q_a = f_7(h_p, t), \quad (261)$$

а общее уравнение (254) принимает вид:

$$[f_1(t) - f_7(h_p, t)] \Delta t = f_5(h_p) \Delta h_p$$

В этом случае каждый раз из трех уравнений (255), (258) и (261) должны быть даны два, чтобы можно было с помощью общего уравнения вычислить

третье. Поэтому здесь вообще возможны  $(3/1) = 3$  задачи.

Практическое значение имеет только тот случай, когда даны  $Q_z = f_1(t)$  и  $Q_a = f_7(h_p, t)$ . Он приводит к ответу на вопрос, каким образом при известном водохранилище привести естественный приток  $Q_z = f_1(t)$  в соответствие со стоком  $Q_a = f_2(t)$ .

Сюда относится ряд задач,<sup>1</sup> которые рассматривают:

7. Паводковые водохранилища (водохранилища-гасители паводка) и снижение катастрофического расхода воды.

8. Водоохранилища как аккумуляторы энергии с суточным, недельным, сезонным, годовым и многолетним выравниванием стока.

9. Водоохранилища с насосными установками (гидравлические аккумуляторы энергии).

10. Водоохранилища с глубокой сливной призмой и с получением энергии при учете высотного положения уровня в водохранилище.

Все указанные десять задач решаются с помощью графиков, интегральных кривых и интегральных кривых разности.

**Способ с применением хронологических графиков.** Этот способ применяется реже, чем остальные, так как он является более трудоемким.<sup>2</sup> Поэтому ниже он будет рассмотрен (для ознакомления с его сущностью) в приложении только к более часто встречающимся задачам.

*Задача 1.* Дано:  $Q_z$  и  $Q_a(t)$ . Требуется определить:  $Q_a(h_p)$  и  $h_p$ .

Из рис. 356, а, можно для любого момента времени определить аккумулирующийся расход воды  $Q_R = Q_z - Q_a$ . На рис. 356, б, дан график колебания этого расхода, причем выделено состояние в момент времени  $t_2$ .

Выражение  $\sum_{t_1}^{t_2} Q_R \Delta t$  дает изменение объема водохранилища с

начала аккумулирования в момент  $t_1$  и до момента  $t_2$ . Хронологический график изменения объема изображен на рис. 356, с. Нанося накопленный

объем  $\sum_{t_1}^{t_2} Q_R \Delta t$  на данную кривую

объемов водохранилища  $V = f_6(h_p)$  (рис. 356, д) получают, следуя на рисунке за линией  $ABCDE$ , соответ-

ственный накопленному объему уровень воды  $h_{p2}$ . Повторяя указанный прием, строят график колебания уровня воды в водохранилище  $h_p = f_4(t)$  (рис. 356, е). В заключение, связывая уровни  $h_{p2}$  и  $Q_{a,2}$ , находят кривую расходов воды  $Q_a = f_3(h_p)$  (рис. 356, д).

<sup>1</sup> Задачи занумерованы в порядке продолжения приведенных выше.

<sup>2</sup> Этот способ был разработан Гарлакером. См. L. P o l i a k. Die Seeretentionen. Z. d. österr. Ing. u. Arch. Vereines, H. 50, 1895.

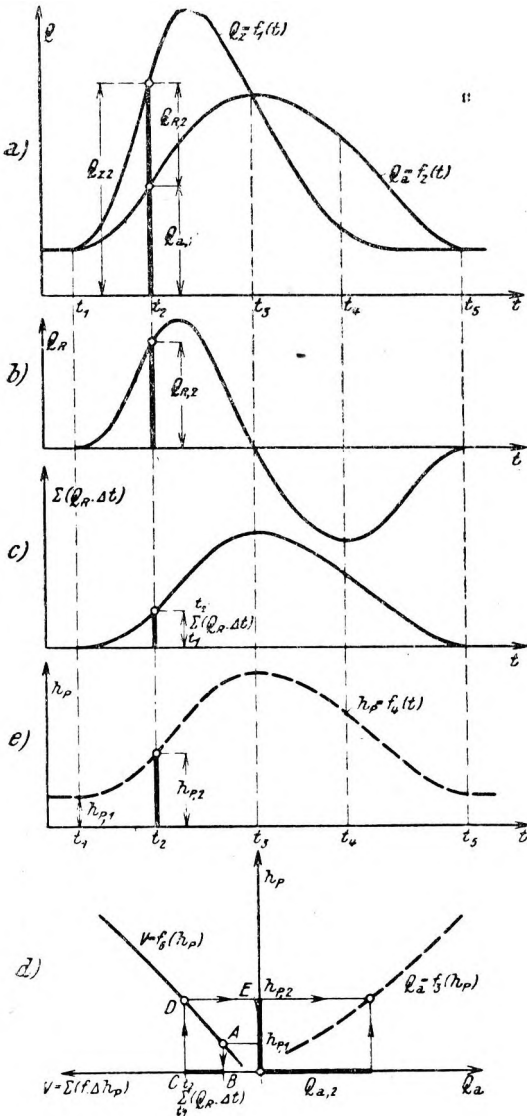


Рис. 356.



Задача 5. Дано:  $h_p$  и  $Q_a(h_p)$ . Требуется определить:  $Q_z$  и  $Q_a(t)$ .  
 Как как согласно уравнению (254):

$$Q_z = Q_a + f \frac{\Delta h_p}{\Delta t} \quad \text{и} \quad \frac{\Delta h_p}{\Delta t} = \operatorname{tg} \alpha,$$

то, следовательно;

$$Q_z = Q_a + f \operatorname{tg} \alpha.$$

Для решения проводят линию  $A_1 A_2 A_3 A_4 A_5$  и откладывают вниз от  $A_5$  отрезок  $A_5 A_6 = f \operatorname{tg} \alpha$ , причем  $\operatorname{tg} \alpha$  берут с графика  $h_p$ . В результате получается точка  $A_6$  (рис. 357). Точка  $A_6$  принадлежит искомому хронологическому графику  $Q_z$ , а точка  $A_5$  — искомому хронологическому графику  $Q_a$ .

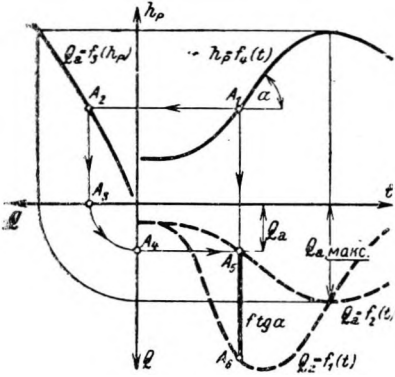


Рис. 357.

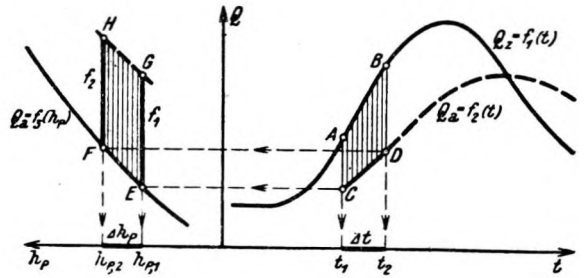


Рис. 358.

Задача 6. Дано:  $Q_z$  и  $Q_a(h_p)$ . Требуется определить:  $Q_a(t)$  и  $h_p$ .

Эту задачу можно решить при помощи зависимости, полученной из уравнения (254), когда

$$\sum_{t_1}^{t_2} (Q_z - Q_a) \Delta t = \sum_{t_1}^{t_2} Q_k \Delta t = \sum_{h_{p,1}}^{h_{p,2}} f \Delta h_p.$$

Если  $AB$  — отрезок данного хронологического графика притока  $Q_z$  и  $C$  известная точка искомого графика стока  $Q_a$ , то другая точка этого графика определяется следующим образом (рис. 358): предположительно намечают положение этой точки в  $D$ , проектируют отрезок  $CD$  на кривую  $Q_a(h_p)$  и таким путем получают соответствующее отрезку времени  $\Delta t$  колебание уровня  $\Delta h_p$ . Откладывая площади зеркала водохранилища  $f_1$  и  $f_2$ , соответствующие моментам времени  $t_1$  и  $t_2$ , в любом масштабе вверх от точек  $E$  и  $F$

получают площадь  $EFGH$ , выражающую величину объема воды  $\sum_{h_{p,1}}^{h_{p,2}} f \Delta h_p$ ,

заключенного между уровнями  $h_{p,1}$  и  $h_{p,2}$ . Площадь  $ABCD$  выражает величину

$\sum_{t_1}^{t_2} Q_R \Delta t$ . Теперь, если точка  $D$  выбрана правильно, в результате

вычисления площадей  $ABCD$  и  $EFGH$  (с учетом масштабов), должны получиться равные значения. Задачу можно решить только путем приближения.

После определения  $Q_a = f_3(h_p)$  задача 6 сводится к задаче 1.

Способы с применением интегральных кривых. Эти способы пользуются самым широким применением, так как дают наглядные, прямые и простые решения, быстро приводят к цели, и отличаются компактностью.

Интегральные кривые применялись для решения задач по аккумулярованию стока различным образом. Ниже мы будем придерживаться расчета, при котором все десять перечисленных выше задач решаются однородно.<sup>1</sup>

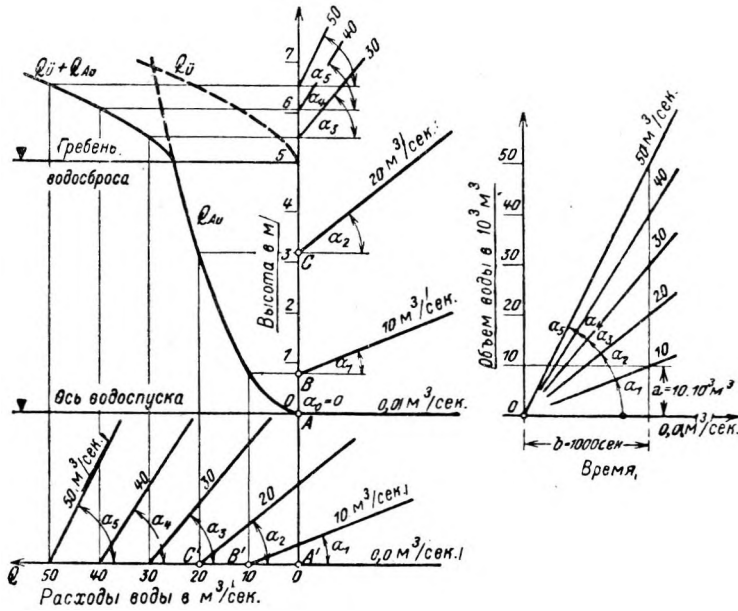


Рис. 359. Выражение кривой расходов воды для интегральной кривой в масштабе тангенсов.

$Q_{LH}$  — кривая расходов воды через водоспускное отверстие;  
 $Q_{ij}$  — кривая расходов воды через водосброс.

Применяя способы интегральной кривой, следует прежде всего выразить кривую расходов воды в масштабе тангенсов. Для этого изображают расходы воды  $Q$ , соответствующие отдельным  $h_p$ , посредством лучей, направленных

под углами  $\alpha = \text{arctg } Q$  (рис. 359). Сток может при известных обстоятельствах состояться из нескольких расходов воды, которые следует в таких случаях суммировать и выразить через средство единой кривой расходов воды.

В примере, изображенном на рис. 360, расход воды составляет из истечения через отверстия  $Q_{LH}$  и перелива через гребень водосброса (при совершенном перепаде)  $Q_{ij}$  водоудержательной плотины.

При ширине перелива  $B = 6$  м и коэффициенте расхода  $\mu_1 = 0,65$ , уравнение переливающегося расхода воды получается в виде:

$$Q_{ij} = \frac{2}{3} \mu_1 B \sqrt{2g} h^{\frac{3}{2}} = 11,52 h^{\frac{3}{2}}.$$

<sup>1</sup> J. Kozeny. Die Wasserführung der Flüsse. Wien. 1920; A. Schoklisch. Graphische Hydraulik (Шоклич. Графическая гидравлика, в русском переводе); R. Tillmann. Über neuere Verfahren der Graphischen Hydraulik als Hilfsmittel im Entwerfen von Wasserkraftanlagen. Die Wasserkraft, H. 1, 2, 7 u. 9, 1921; A. L u d i n. Bedarf u. Angebot. Berlin 1932.

Истечение  $Q_{Au}$  происходило через четыре круглой формы отверстия диаметром  $D = 1 \text{ м}$  при коэффициенте расхода  $\mu_2 = 0,8$ . Уравнение истечения через отверстия получается в форме:

$$Q_{Au} = 4 \frac{D^2 \pi}{4} \mu_2 \sqrt{2g} H^{\frac{1}{2}} = 11,2 H^{\frac{1}{2}}.$$

Пользуясь этими уравнениями, можно построить кривую расходов воды для суммарного стока  $Q_{Au} + Q_{\bar{U}}$ .

Масштаб тангенсов интегральных кривых построен на рис. 359 по правилам, изложенным во 2-й главе, в масштабе  $b = 1000 \text{ сек.}$  для времени и  $a = 10\,000 \text{ м}^3$  для суммарных расходов воды. Лучи, наклоненные под углами  $\alpha_1, \alpha_2$ , выражают соответственно расходы воды  $10, 20, \dots \text{ м}^3/\text{сек.}$  Если перенести эти лучи параллельно самим себе в точки  $B, C, \dots$  на оси  $h_p$  кривой расходов воды  $10, 20, \dots \text{ м}^3/\text{сек.}$  то получается кривая расходов воды, выраженная в масштабе тангенсов. При некоторых исследованиях является, однако, более целесообразным проводить эти лучи через точки  $B', C', \dots$  оси  $Q$ .

Далее строятся интегральные кривые притока и стока по одному из способов, указанных во 2-й главе. Из рис. 361, на котором изображены кривые притока и стока за время паводка, можно извлечь следующее.

Для любого момента времени  $t$  касательная к интегральной кривой притока в точке  $C'$  дает  $\text{tg} \alpha_z = Q_z$  и к интегральной кривой стока в точке  $C''$  —  $\text{tg} \alpha_a = Q_a$ . Для этого момента времени секундный аккумулируемый расход воды равняется  $Q_R = Q_z - Q_a = \text{tg} \alpha_z - \text{tg} \alpha_a$ . Суммарный аккумулированный расход воды за время от  $t_a$  до  $t$ , равный наполнению водохранилища  $V$ , составляет

$$\sum_{t_a}^t Q_R \Delta t = C' C''.$$

К моменту времени  $t_1 - Q_z$  достигает максимального значения  $Q_{z \text{ макс.}}$ , интегральная кривая притока в точке  $A'$  — своего кульминационного пункта и угол касательной к кривой в этой точке — максимального значения. В момент времени  $t_2$  интегральная кривая стока в точке  $B''$  достигает своего кульминационного пункта, а так как в это время  $Q_z = Q_a$  то касательная к кривой притока в  $B'$  параллельна касательной к кривой стока в кульминационной точке  $B''$ . Аккумулированный в период времени с  $t_a$  до  $t_2$  объем воды выражается отрезком  $B'B''$  и дает максимальное значение  $V_{\text{макс.}}$  накопления воды в водохранилище. Начиная с момента  $t_2$  накопленный объем убывает; тем самым момент, соответствующий максимальному накоплению воды в водохранилище  $V_{\text{макс.}}$  выраженному максимальной разностью ординат интегральных.

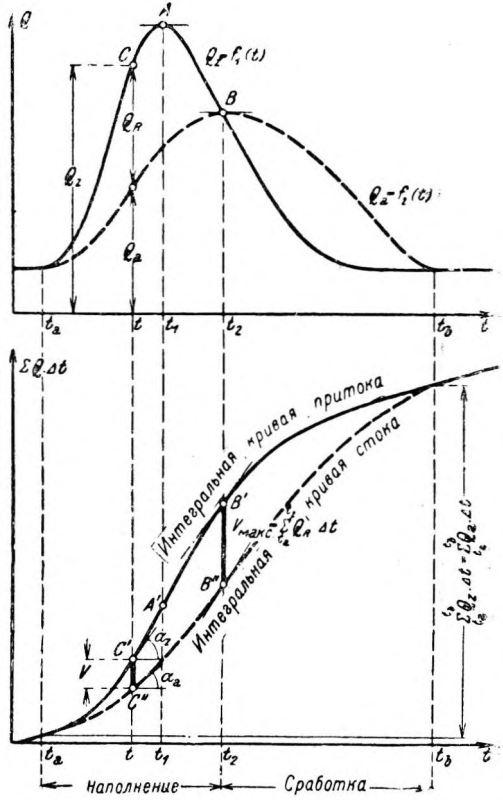


Рис. 361.

кривых притока и стока, представляет собою границу между периодами наполнения и сработки водохранилища.

Как отсюда видно, знание интегральных кривых притока и стока дает возможность получать по ним все те искомые элементы, которые иначе пришлось бы с большей затратой труда определять по графикам.

*Задача 1.* Дано  $Q_z$  и  $Q_a(t)$ . Требуется определить:  $Q_a(h_p)$  и  $h_p$ .

Для любого момента времени  $t_A$ ,  $A_1$  и  $A_2$  являются известными точками интегральных кривых притока и стока (рис. 362). Луч, проведенный из  $A_1$

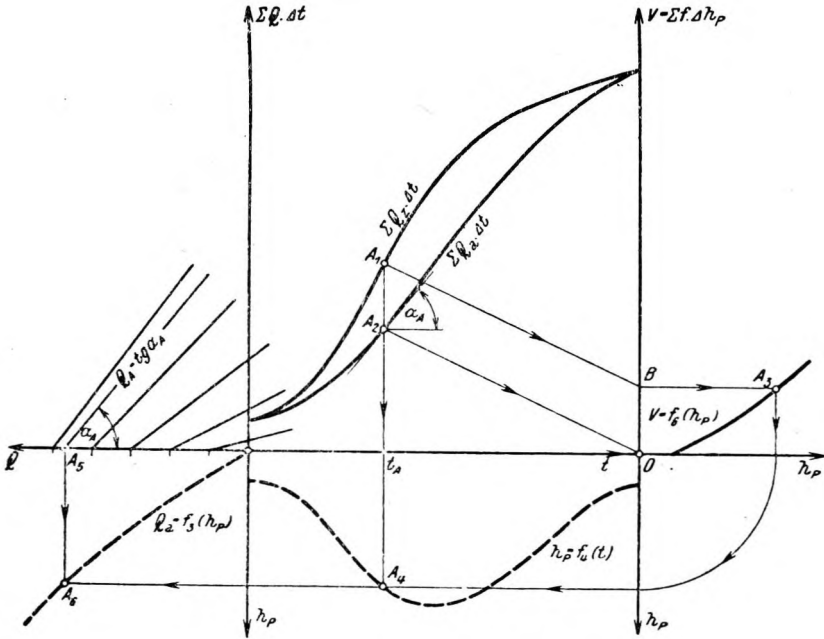


Рис. 362.

параллельно  $A_2O$ , дает вспомогательную точку  $B$ .<sup>1</sup> При помощи известной кривой объемов водохранилища  $V = f_6(h_p)$  пересечение линии  $A_1BA_3A_4$  с перпендикуляром к оси  $t$ , опущенным из  $A_2$ , дает точку  $A_4$  искомого графика колебания уровня воды  $h_p = f_4(t)$ .

Луч в масштабе тангенсов, параллельный касательной к интегральной кривой стока в точке  $A_2$ , наклоненный под углом  $\alpha_A$  проходит через точку  $A_5$  оси  $Q$  и дает тем самым расход воды  $Q_a$ . Точка  $A_6$  пересечения перпендикуляров к осям координат через  $A_4$  и  $A_5$  является точкой искомой кривой  $Q_a = f_3(h_p)$ . Такой точечный способ определения дает в конце концов кривые  $h_p = f_4(t)$  и  $Q_a = f_3(h_p)$ .

*Задача 2.* Дано  $Q_z$  и  $h_p$ . Требуется определить  $Q_a(t)$  и  $Q_a(h_p)$ .

Для любого момента времени  $t_A$ ,  $A_1$  и  $A_3$  являются известными точками графика колебания уровня и интегральной кривой притока. Линия  $A_1A_2A_3$  дает вспомогательную точку  $B$ . Луч, проведенный через  $O$  параллельно к

<sup>1</sup> Перенесение объема  $V$  или  $\Delta V$  с интегральных кривых на ось  $V = \sum f \Delta h$  или обратно производится в данной задаче, как и в остальных задачах, решаемых посредством интегральных кривых, параллельными линиями. Стрелки указывают направление переноса. Тем самым дается только представление о ходе построения. В действительности перенос производится при помощи масштабной линейки или циркуля, так как это и проще и точнее.





секундный сток получится при помощи линии  $B_1B_2B_3$  равным  $Q_B = \text{tg}\alpha_B$ . Средний секундный сток в период с  $t_A$  до  $t_B$ .

$$Q_m = \frac{Q_A + Q_B}{2} = \frac{\text{tg}\alpha_A + \text{tg}\alpha_B}{2} = \text{tg}\alpha_m$$

берется с масштаба тангенсов. Если провести луч из  $A_1$  под углом  $\alpha_m$ , то пересечение этого луча с перпендикуляром к оси  $t$  из точки  $B_1$  даст точку

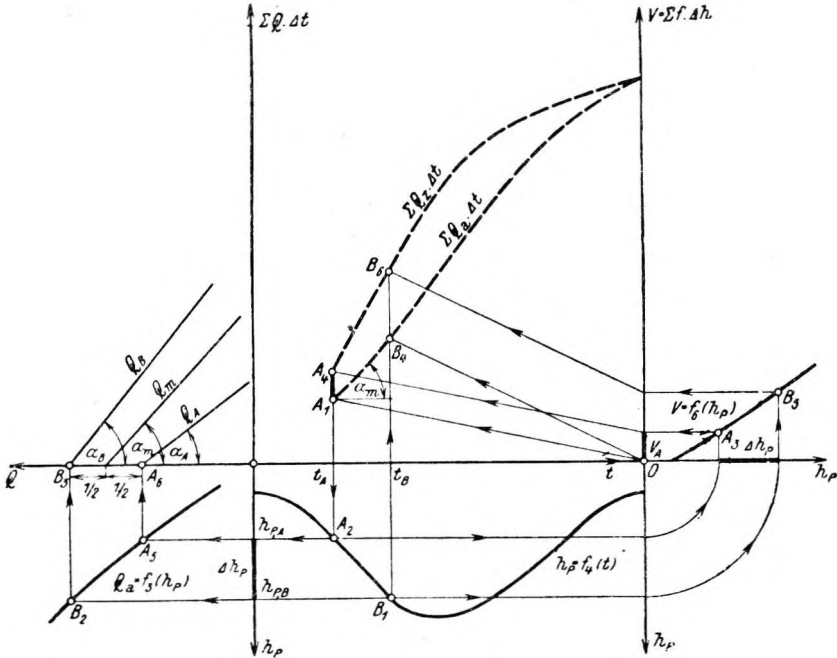


Рис. 366.

искомой интегральной кривой стока. При помощи линии  $B_1B_5B_6$  откладывается, вверх от  $B_4$  объем водохранилища, соответствующий высоте уровня  $h_{p, B}$  и этим определяется точка  $B_6$  интегральной кривой притока.  $A_1B_4$  и  $A_4B_6$  являются тем самым отрезками интегральных кривых стока и притока. При повторении этого приема получают путем наращивания новых отрезков искомые кривые.

**Задача 6.** Дано  $Q_z$  и  $Q_a(h_p)$ . Требуется определить  $Q_a(t)$  и  $h_p$ .

Эта задача разрешима только в том случае, если в какой-нибудь момент времени  $t_A$  известны условия аккумулярования воды в водохранилище. Они могут быть даны или стоком  $Q_a$  в момент  $t_A$  или объемом водохранилища  $V_A$ , или соответствующим этому объему уровнем воды  $h_{p, A}$ . Наиболее целесообразным является исходить от уровня  $h_{p, A}$ . На рис. 367 точка  $A_1$  дана в качестве начальной точки искомого графика колебания уровня. Исходя от  $A_1$  через точку  $A_2$  можно придти к вспомогательной точке  $H_1$ . Луч, проведенный из  $O$  параллельно  $H_1A_3$ , дает в пересечении с перпендикуляром из  $A_1$  начальную точку  $A_4$  искомой интегральной кривой стока. Для решения

этих задач является целесообразным исходить от задаваемой величины колебания уровня. Задаваясь колебанием уровня  $\Delta h_p$ , получают, что к неизвест-

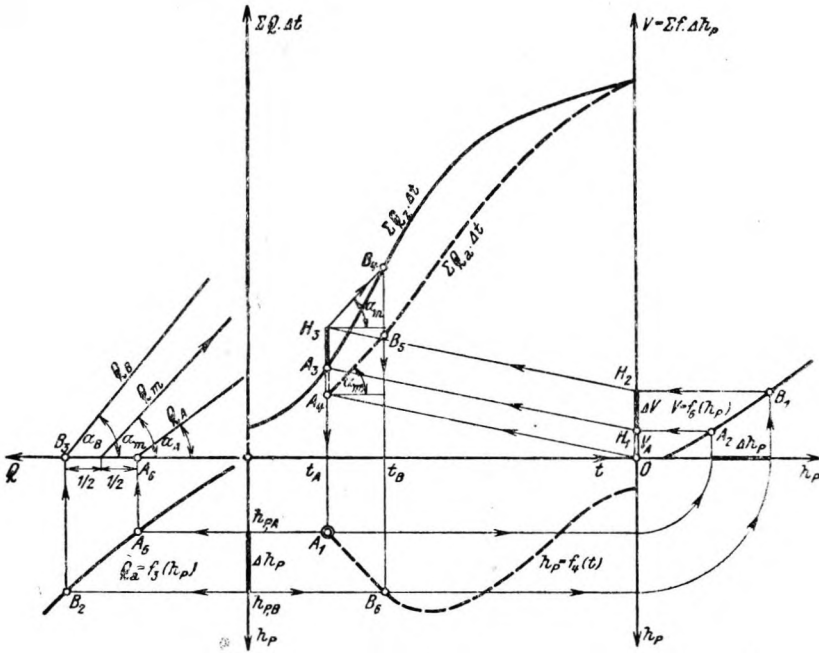


Рис. 367.

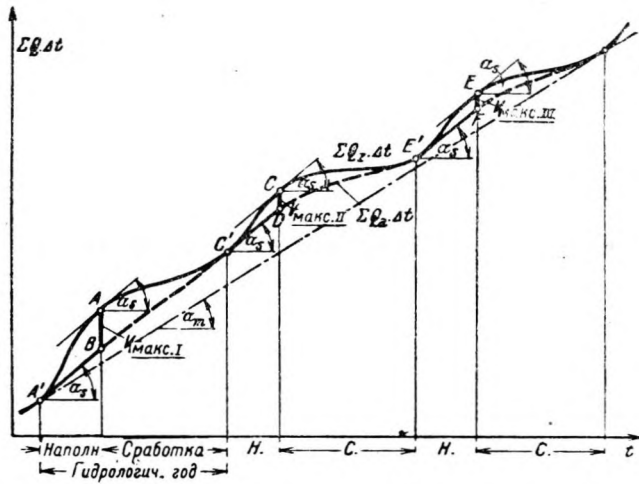


Рис. 368. Водохозяйственный план водохранилища, служащего для погашения пиков паводков.

ному еще моменту времени  $t_B$  уровень в водохранилище достигнет положения  $\Delta h_{p, B}$ . Секундный сток, соответствующий уровням  $\Delta h_{p, A}$  и  $\Delta h_{p, B}$  или мо-



ментам времени  $t_A$  и  $t_B$ ,  $Q_A = \operatorname{tg} \alpha_A$  и  $Q_B = \operatorname{tg} \alpha_B$  может быть получен по масштабу тангенсов. Средний секундный сток за период  $t_A - t_B$  составляет тогда

$$Q_m = \frac{Q_A + Q_B}{2} = \frac{\operatorname{tg} \alpha_A + \operatorname{tg} \alpha_B}{2} = \operatorname{tg} \alpha_m.$$

Теперь задача заключается в определении точки  $B_5$  интегральной кривой стока таким образом, чтобы отрезок кривой  $A_4B_5$  был наклонен под углом  $\alpha_m$  и объем водохранилища  $V_A + \Delta V$ , соответствующий уровню  $h_{p, B}$ , был наполнен к моменту времени  $t_B$ . Для этого при помощи линии  $B_2B_1H_2H_3$  откладывают дополнительный объем  $\Delta V$  над  $A_3$  и получают таким образом вспомогательную точку  $H_3$ . Луч, проведенный из  $H_3$  под углом  $\alpha_m$  дает на интегральной кривой притока точку  $B_4$ , а вместе с тем и время  $t_B$ . Если теперь провести луч под углом  $\alpha_m$  также и через  $A_4$  то он пересечет перпендикуляр к оси  $t$ , опущенный из  $B_4$ , в точке  $B_5$  искомой интегральной кривой стока. Пересечение перпендикуляров к координатным осям из  $B_2$  и  $B_3$  дает точку  $B_6$  искомого графика колебания уровня.

*Задача 7.* Действие водохранилища, служащего для погашения пика паводка.

Если на реке находится водохранилище, служащее для погашения пика паводка, причем требуется, чтобы расход воды ниже водохранилища не превышал величины  $Q_{a, s}$ , то угол наклона интегральной кривой стока из водохранилища не должен быть больше  $\alpha_s = \operatorname{arctg} Q_{a, s}$  (рис. 368).

Потребные объемы водохранилища  $V_{\text{макс. I}}$ ,  $V_{\text{макс. II}}$  ... определяются вертикальными отрезками  $AB$ ,  $CD$ , представляющими разности по ординате между точками  $A$ ,  $C$ ,  $E$ ... касательных, проведенных под углом  $\alpha_s$  к интегральной кривой притока, и точками  $A'$ ,  $C'$ ,  $E'$ . Если расход воды не должен никогда превышать катастрофического расхода воды  $Q_{a, s}$ , то объем водохранилища должен быть равен или больше наибольшего из полученных  $V_{\text{макс. I}}$ , то есть в рассматриваемом случае —  $V_{\text{макс. I}}$ .

*Задача 8.* Действие регулирующего водохранилища.

1. *Водохранилище с суточным регулированием.* При десятичасовой работе с 8 до 18 час. наполнение водохранилища происходит с 18 до 8 час. (рис. 369). В это время  $Q_a$  может быть равно нулю, и тогда интегральная кривая стока при наполнении будет выражаться прямой, параллельной оси  $t$ . Во время сработки с 8 до 18 час. интегральная кривая стока имеет наклон  $\alpha_a$ , а  $\operatorname{tg} \alpha_a$  выражает предельный возможный секундный сток  $Q_a$ . Для осуществления подобного рода водохозяйственного плана требуется объем водохранилища, выражающийся отрезком  $BC$ .

Из рис. 369 следует

$$Q_a = \frac{24}{10} Q_z = 2,4 Q_z \text{ м}^3/\text{сек}$$

и далее

$$V_{\text{макс.}} = 14 \times 60 \times 60 Q_z = 50\,400 Q_z \text{ м}^3.$$

2. *Водохранилище с недельным регулированием.* Возможность накопления воды у гидроустановок имеет место обычно в период перерыва в работе, с полудня в субботу до утра в понедельник (рис. 370). Определение предельного среднего стока и потребного объема водохранилища производится, примерно, так же, как и для водохранилища с суточным регулированием.

Если при расчете объема водохранилища за основу принимается секундный приток  $Q_z$ , соответствующий низкому и устойчивому стоянию вод, то в течение года при более высоком стоянии уровня все расходы воды, не помещающиеся в водохранилище, будут сбрасываться через водосбросные сооружения непосредственно в основное русло реки. Суточное регулирование стока при разработке водохозяйственного плана водохранилища с недельным регулированием не имеет значения, если речь идет только об определении величины среднего секундного стока  $Q_a$  за дни работы станции, а следовательно, сработки водохранилища.

В период наполнения с полудня в субботу до утра в понедельник интегральная кривая стока параллельна оси  $t$ . В период работы с утра

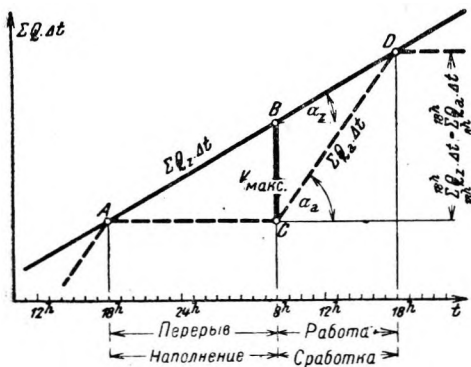


Рис. 369. Водохозяйственный план водохранилища для суточного регулирования.

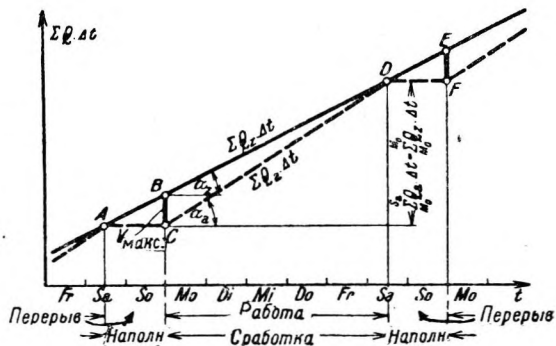


Рис. 370. Водохозяйственный план водохранилища для недельного регулирования.

понедельника до полудня в субботу она направлена вверх под углом  $\alpha_a$ . Предельный средний секундный сток составляет в силу этого

$$Q_a = \operatorname{tg} \alpha_a.$$

Из рис. 370 следует:

$$Q_a = \frac{7}{5,5} Q_z = 1,27 Q_z \text{ м}^3/\text{сек.}$$

и далее

$$V_{\text{макс.}} = 1,5 \times 24 \times 60 \times 60 Q_z = 129\,600 Q_z \text{ м}^3.$$

3. *Водохранилище с сезонным регулированием.* Регулирующее действие сезонного водохранилища распространяется на более длительные отрезки времени в течение года. Главной целью здесь является преобразование фактической энергии потока в идеальную энергию, которая имела бы в наличии и в то время, когда при естественном режиме наблюдается недостаток энергии. При этом отдача энергии может быть совсем кратковременной, составлять только доли часов, но также растягиваться и на более продолжительное время. В таких случаях говорят о покрытии (или снятии) пиков графика нагрузки и называют станции с такого рода работой—пиковыми станциями (см. рис. 302). Гидросиловые установки, участвующие в подаче энергии электрическим дорогам, имеют исключительно высокие пики нагрузки, часто во много раз превышающие обычную нагрузку.

Повышенная подача энергии в примерно одинаковом все время количестве может, однако, распространяться и на более продолжительные отрезки времени, например на целые зимние периоды, то есть на то время, когда гидростанции производят недостаточно энергии. Гидросиловые установки

с водохранилищами, обеспечивающими подобного рода выравнивание стока и производимой энергии, называют зимними пиковыми станциями.

У сезонных водохранилищ, с объемом  $V_{\text{макс.}}$  большим, чем объем, потребный для осуществления годового регулирования, получается водохозяйственный план,<sup>1</sup> изображенный на рис. 371.

К данной интегральной кривой притока проводят параллельно, на расстоянии  $V_{\text{макс.}}$ , вспомогательную интегральную кривую, обозначенную на рисунке тонким пунктиром. Любая, направленная вверх линия внутри обеих интегральных кривых представляет возможную интегральную кривую стока. Чтобы найти водохозяйственно наиболее выгодное решение, проводят интегральную кривую стока так, чтобы она наилучшим образом соответствовала по-

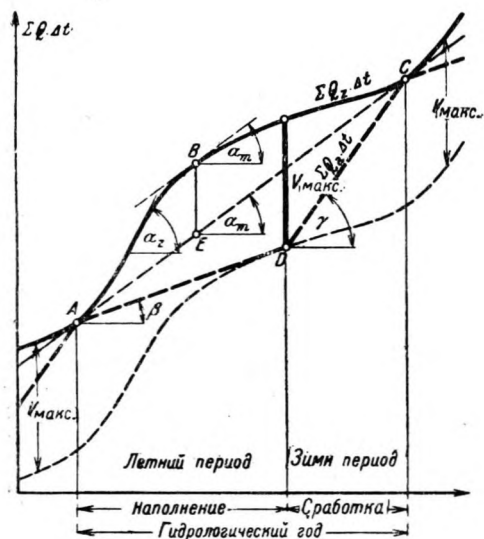


Рис. 371. Водохозяйственный план для сезонного водохранилища в тех случаях, когда объем водохранилища больше потребного для годового регулирования.

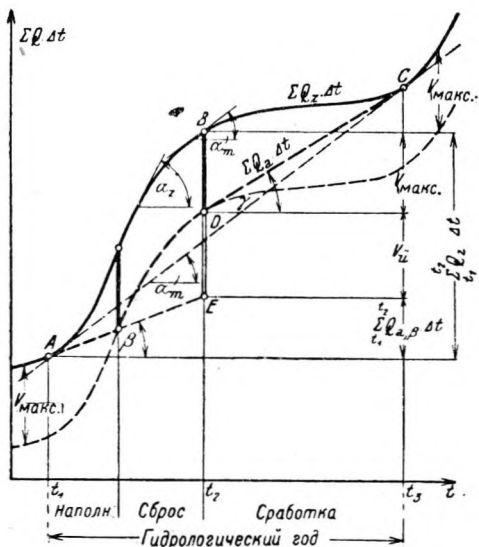


Рис. 372. Водохозяйственный план для сезонного водохранилища в тех случаях, когда объем водохранилища меньше потребного для годового регулирования.

ставленным условиям относительно покрытия пиков, как по продолжительности, так и по величине.

На рис. 371 решение задачи заключается в получении максимального постоянного расхода воды  $Q_{a,\gamma} = \text{tg}\gamma$  в течение возможно более продолжительного времени за зимний период. В результате, при совершенной сработке водохранилища, получается вынужденный средний расход воды  $Q_{a,\beta} = \text{tg}\beta$  в течение летнего периода.

Если объем сезонного водохранилища  $V_{\text{макс.}}$  меньше того объема, который был бы нужен для осуществления годового регулирования, тогда водохозяйственный план получается в том виде, как он изображен на рис. 372. Согласно этому плану, из суммарного притока за период  $t_1 - t_2$  часть

$$\sum_{t_1}^{t_2} Q_{a,\beta} \Delta t$$

была бы использована на гидростанции,  $V_{\text{макс.}}$  аккумулировалось бы в водохранилище и  $V_{\text{сб}}$  было бы отведено сбросными сооружениями.

<sup>1</sup> Водохозяйственный план представляет собственно кривую потребления воды. (Прим. пер.)

Из рассмотрения этого плана следует, что в период с  $t_1$  до  $t_2$  расход воды  $Q_{a, \beta}$  при наличии спроса на энергию может быть безусловно повышен до  $Q_{a, \gamma}$  так как расчет турбин должен производиться на этот последний, зимний, рабочий расход. Если же спрос на энергию летом отсутствует, получаемая дополнительно энергия теряет свою ценность.

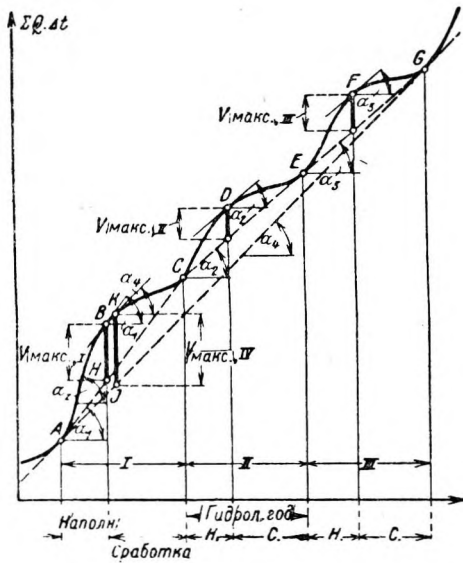


Рис. 373. Водохозяйственный план для водохранилища с годичным и многолетним регулированием стока.

4. *Водохранилище с годичным и многолетним регулированием.* Полное годовичное регулирование, то есть возможность использования постоянным расходом без потерь на сбросы всего притока за каждый отдельный год требует в отдельные годы периода лет I—III наличия водохранилищ с объемами  $V_{макс. I}$ ,  $V_{макс. II}$  и  $V_{макс. III}$ . Тем самым, для обеспечения годовичного регулирования в течение ряда лет, водохранилище должно иметь наибольший объем в сравнении с объемами, потребными в отдельные годы, то есть для примера, приведенного на рис. 373, оно должно обладать объемом  $V_{макс. I}$ .

Если, однако, в течение периода I—III должна быть обеспечена отдача среднего постоянного для всего периода расхода воды, тогда водохранилище должно обладать способностью полного регулирования стока за весь период. Для этого требуется объем  $V_{макс. IV}$  обеспечивающий средний потребляемый расход воды  $Q_a = tg\alpha_4$ .

Задача 9. Действие водохранилища с насосной установкой. При установках для водоснабжения, питающихся за счет грунто-

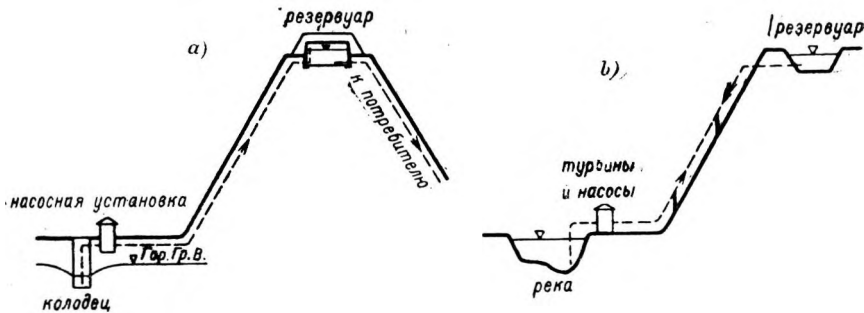


Рис. 374.

а) схема насосной установки и резервуара для водоснабжения; б) схема насосной установки и резервуара для гидростанции.

вых вод, вода перед подачей в сеть накачивается насосами в аккумулирующий воду высотный резервуар. Для гидросиловых установок также устраиваются высотные резервуары (рис. 374), причем часто больших размеров. Обычно накачивание воды в резервуар производится в ночные часы, когда

гидросиловые установки (при насосной станции или посторонние) располагают дешевой сбросовой энергией. В пиковые часы водохранилище срабатывается, причем трубопровод, служивший для накачивания воды, превращается в напорный трубопровод для турбин. Насос и двигатель могут быть насажены на одном валу с турбиной, причем, благодаря соответствующему электрическому оборудованию, при переключении на турбину двигатель превращается в генератор. Общий коэффициент полезного действия подобного рода агрегатов удалось довести примерно до 50%.

Водохозяйственный план водохранилища с насосной установкой строится следующим образом. К интегральной кривой стока  $Q_{st}$ , которая получается или из расхода воды, поступающего в распределительную сеть по водоснабжению, или из отдачи воды на гидростанцию, работающую при сильно меняющейся нагрузке, добавляется интегральная кривая притока  $Q_z$ .

Если, как показано на рис. 375, предусматривается работа в течение 8 часов с двухчасовым перерывом с 12 до 14 час., и наполнение совершенно сработанного водохранилища должно начинаться в 8 час. и быть законченным в 18 час., то насосная установка должна обеспечить за это время требуемое наполнение водохранилища. Так как водохранилище может быть сработано только в 8 час. следующего дня, то объем воды, израсходованный за истекшие 24 часа, должен быть восполнен в течение 8 часов. В силу этого  $\operatorname{tg} \alpha_z = 3 \operatorname{tg} \beta$ , и интегральная кривая притока принимает вид, показанный на рис. 375 толстой пунктирной чертой.

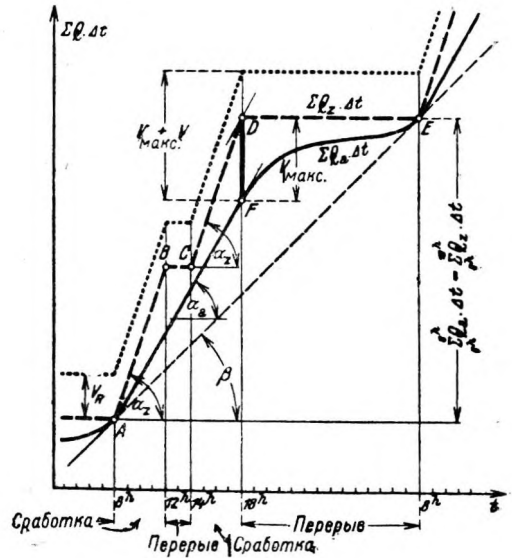


Рис. 375. Водохозяйственный план водохранилища с насосным аккумулярованием.

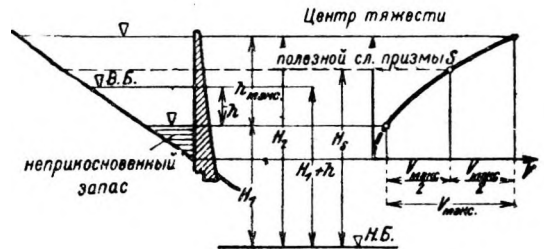


Рис. 376. Положение по высоте и кривая объемов водохранилища с глубокой сливной призмой.

Потребный объем водохранилища получается как наибольшая разность  $V_{\max}$  по вертикали между интегральными кривыми притока и стока. В случае необходимости предусмотреть в водохранилище на непредвиденные расходы резерв воды в объеме  $V_R$ , интегральная кривая притока перемещается в положение, показанное точечным пунктиром, причем объем водохранилища в этом случае составит  $V_{\max} + V_R$ .

**Задача 10.** Действие водохранилища с глубокой сливной призмой.

При наличии водохранилища, мощность, получаемая на гидростанции, будет изменяться не только с величиною расхода воды  $Q_{st}$  но и с высотой уровня в водохранилище. Если водохранилище расположено очень высоко над уровнем воды в нижнем бьефе гидростанции, можно не учитывать изме-

нения падения (напора)  $H_1 + h$ , а при подсчете мощности вводить величину падения  $H_s$  от центра тяжести сливной призмы водохранилища (рис. 376). В этом случае мощность получается в виде:

$$L_N = 1000 \eta Q_a H_s,$$

откуда следует потребный расход воды

$$Q_a = \frac{1}{1000 \eta} \frac{1}{H_s} L_N. \quad (262)$$

Если водохранилище с глубокой сливной призмой расположено не особенно высоко над нижним бьефом гидростанции, необходимо учитывать колебания уровня в нем более точным образом. Мощность нетто в этом случае равна

$$L_N = 1000 \eta Q_a (H_1 + h),$$

а необходимый расход воды

$$Q_a = \frac{1}{1000 \eta} \cdot \frac{L_N}{H_1 + h}, \quad (263)$$

где  $H_1$  — высота уровня, соответствующего верхней поверхности так называемого неприкосновенного запаса или резерва воды в водохранилище,  $h$  — высота уровня над этой поверхностью в каждый данный момент времени.

В рассматриваемой задаче вопрос может ставиться, примерно, так: каков должен быть, при известной высоте расположения водохранилища, тот наименьший объем, который бы обеспечил заданный график нагрузки, если при этом будет учитываться изменение уровня в водохранилище.

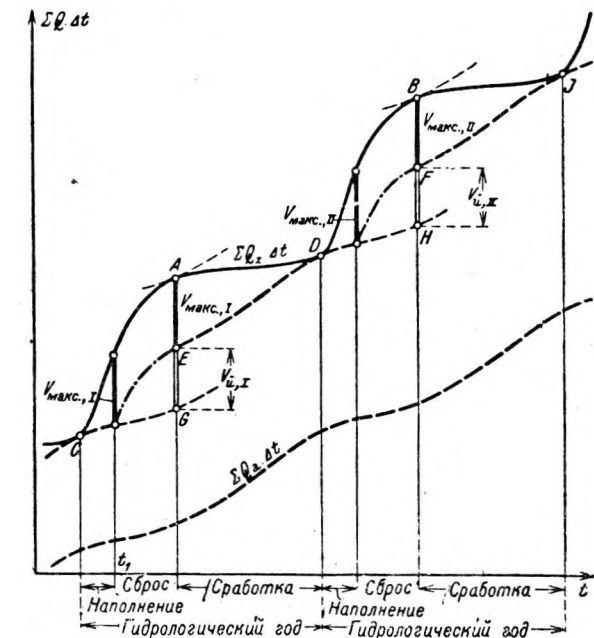


Рис. 377. Водохозяйственный план водохранилища с глубокой сливной призмой при приближенном способе учета колебания уровня в водохранилище.

1. *Приближенный учет колебания уровня в водохранилище.* Определяют по графику заданной мощности  $L_N$  с помощью уравнения (262) график потребных расходов воды  $Q_a$ , причем для определения  $H_s$  сначала задаются некоторым объемом водохранилища. После этого определяют интегральную кривую стока. Затем наносят интегральные кривые притока и стока в прямоугольной системе координат  $\Sigma Q \Delta t$ ,  $t$ , причем интегральная кривая стока, располагаясь абсолютно точно в отношении оси  $t$ , должна по отношению к оси  $\Sigma Q \Delta t$  занимать только относительно точное положение (рис. 377).

Теперь интегральную кривую  $Q_a$  передвигают параллельно самой себе в направлении оси ординат до тех пор, пока отрезки ее не будут касаться интегральной кривой  $Q_s$ , частью в точках  $C, D, I$  ее минимумов и частью

в ее максимумах  $A$  и  $B$ . Разности ординат  $\overline{AE}$ ,  $\overline{BF}$  и т. д. дадут потребные объемы водохранилища  $V_{\text{макс. I}}$ ,  $V_{\text{макс. II}}$  и т. д. По полученным значениям объемов водохранилища уточняют значения  $H_s$  и повторяют описанный графический прием решения до тех пор, пока получаемые значения  $V_{\text{макс.}}$  не

совпадут с принятыми объемами водохранилища. Положим, что задача решена. Тогда  $\overline{EG}$ ,  $\overline{FH}$  и т. д. представляют теряемые объемы воды  $V_{U, I} V$  и т. д. Начало сброса, то есть время, когда неиспользуемая вода начинает протекать через сбросные сооружения, определится моментом наполнения водохранилища при одновременном превышении притока над используемым стоком. На рис. 377 начало сброса для первого периода наполнения водохранилища приходится на момент времени  $t_1$ .

2. Точный учет колебания уровня в водохранилище. Так как в данном случае  $Q_a = \frac{1}{1000\eta} \cdot \frac{L_N}{H_1 + h}$ , то  $Q_a$  зависит от  $L_N$  и  $h$ ; поэтому необходимо по графику заданной мощности (рис. 378, А) построить интегральные кривые потребления  $Q_a$  при различных уровнях А поверхности воды в водохранилище. Это показано на рис. 378, с.

Задача в основном решается тем же приемом, что и в предыдущем примере. Однако здесь приложение интегральной кривой  $Q_a$  к кривой  $Q_z$  должно производиться таким образом, чтобы для каждого данного периода времени брался только тот отрезок и из той интегральной кривой  $Q_a$ , которая отвечает установившемуся в это время в водохранилище уровню воды. Ход решения задачи постепенный, как показано на рис. 378, а.

Сначала переносят кривую  $Q_a$ , отвечающую наименьшему напору  $H_1$ , параллельно самой себе до тех пор, пока она не коснется интегральной кривой  $Q_z$  в точках  $A_1$  и  $M_1$ . В этих местах  $\text{tg}\alpha_z = \text{tg}\alpha_a = \text{tg}\alpha_3$  и  $Q_z = Q_a$ . Моменты  $t_a$  и  $t_b$  означают время начала наполнения водохранилища, то есть конец его сработки. Начиная с  $t_A$ , поскольку  $Q_z > Q_a$  уровень воды в водохранилище повышается, причем достигает к неизвестному времени  $t_1$ , предположительно, высоты  $H_1 + h_1$  при соответственном увеличении объема водохранилища на  $\Delta V_1$ . Интегральная кривая стока или потребления в момент времени  $t_A$  отвечает интегральной кривой  $Q_a$  для  $H_1$  и в момент времени  $t_1$  интегральной кривой  $Q_a$  для  $H_1 + h_1$  (рис. 378, с). В силу этого интегральная кривая стока за период с  $t_A$  до  $t_1$  будет проходить по середине между указанными двумя интегральными кривыми  $Q_a$ . Если нанести эту промежуточную интегральную кривую на кальку и передвигать ее параллельно первоначальному положению до совмещения с точкой  $G_1$  (рис. 378, а), то в пересечении ее с интегральной кривой притока получится точка  $B_1$ , абсцисса которой дает время  $t_1$ , когда уровень поверхности зеркала водохранилища достигнет высоты  $H_1 + h_1$ . Проведя такой же отрезок этой промежуточной кривой через точку  $A_1$ , получают в пересечении его с ординатой через  $B_1$  точку  $B_2$  искомой интегральной кривой стока. Такого рода прием повторяется для точек  $C_1$  и  $C_2$  и для дальнейших точек, и получаемая при этом линия образует нижнюю ветвь интегральной кривой стока. Эта ветвь приходится на период наполнения водохранилища. В пересечении линии  $A_1 O H_1 A_2$  с ординатой из  $t_A$  получается точка  $A_2$  графика колебания уровня в водохранилище. Таким же образом получают точки  $B_5$  и  $C_5$  этого графика.

Верхняя ветвь интегральной кривой стока строится от точки  $M_1$  в обратном направлении. В момент времени  $t_b$ , соответствующий точке  $M_1$ , водохранилище полностью сработано,  $Q_z = Q_a$  и высота уровня в водохранилище  $H_1$ . Интегральная кривая стока в  $M_1$  представляет интегральную кривую  $Q_a$  для уровня  $H_1$ . В какой-то предыдущий, пока еще неизвестный момент времени  $t_3$  уровень в водохранилище был  $H_1 + h_1$  и интегральная кривая стока являлась интегральной кривой  $Q_a$  для уровня  $H_1 + h_1$ . Переноса соответственный отрезок промежуточной интегральной кривой между интегральными кривыми для  $H_1$  и  $H_1 + h_1$  параллельно самому себе в точку  $C_3$ ,

получают таким способом точку  $N_1$  и время  $t_3$ , когда уровень в водохранилище достиг высоты  $H_1 + h_1$ .

Так же, исходя из  $M_1$ , получают точку  $N_2$  интегральной кривой стока.

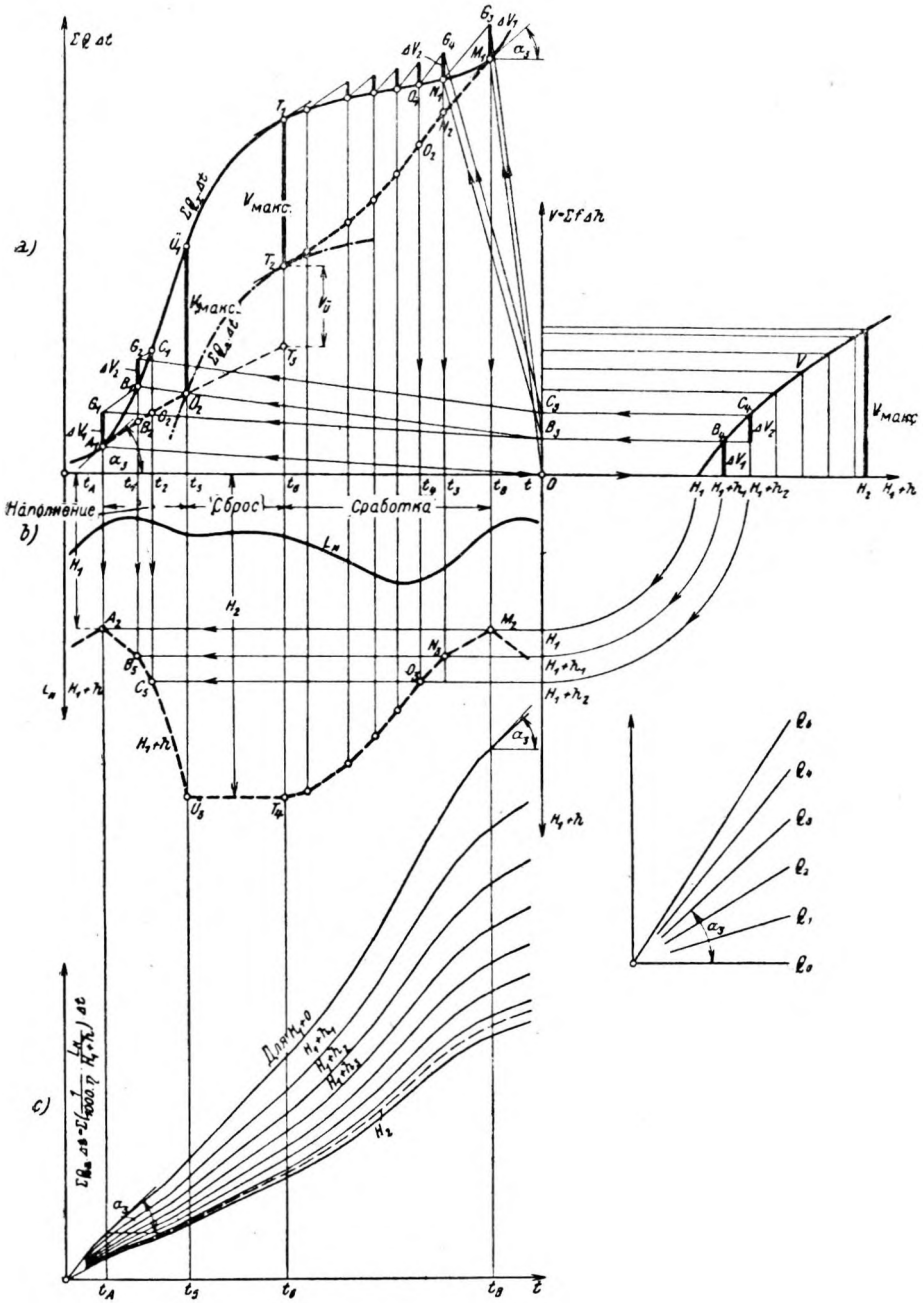


Рис. 378. Водохозяйственный план водохранилища с глубокой сливной призмой при точном способе учета колебания уровня в водохранилище.

Прием применяется дальше для возрастающих уровней  $H_1 + h$ , причем получаются все более плоские отрезки интегральной кривой. В момент  $t_6$ .



интегральная кривая для уровня  $H_2$  касательна к интегральной кривой притока в точке  $T_1$  и, следовательно, здесь опять  $Q_z = Q_a$ , а водохранилище наполнено. Отрезок  $T_1T_2 = V_{\text{макс}}$  представляет в соответствующем масштабе потребный для обеспечения заданной мощности объем водохранилища.

Если провести интегральную кривую притока параллельно ее  $V_2$  с себе от точки  $T_2$  в направлении оси ординат, то точкой пересечения ее  $V_2$  с нижней ветвью интегральной кривой стока определяется начальный момент  $t_5$

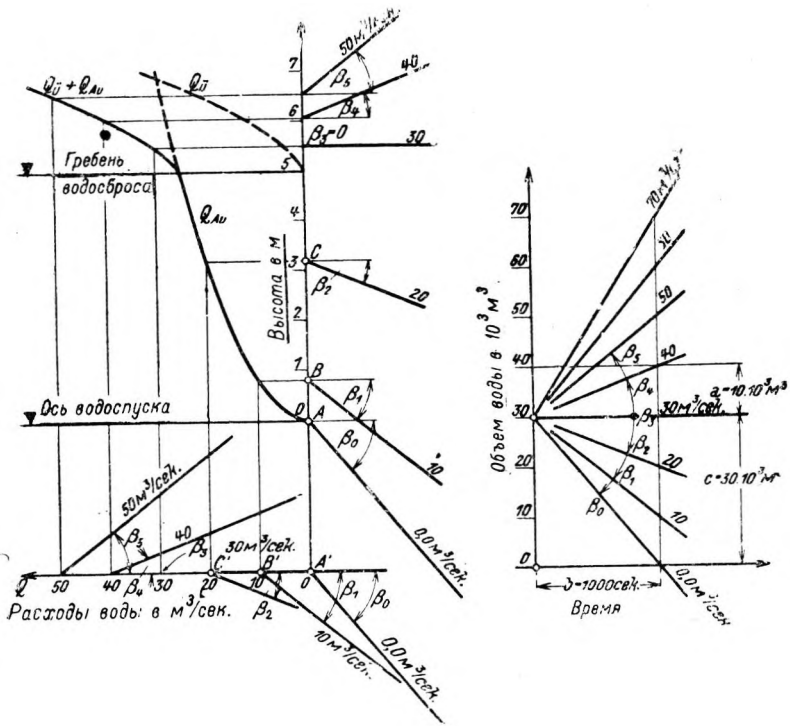


Рис. 379. Кривая расходов в масштабе тангенсов для интегральной кривой разности.

полного наполнения водохранилища. В промежуток времени от  $t_5$  до  $t_6$  происходит сброс излишков воды, так как приток  $Q_z$  в это время превышает потребляемый гидросиловой установкой расход воды  $Q_a$ . Если продолжить от  $\dot{U}_2$  соответствующий отрезок интегральной кривой  $Q_a$  для  $H_2$ , то он придет в  $T_3$ , и  $V_C$  представит объем сброса. Исходя из точек  $M_1$ ,  $N_1$  и  $O_1$  и пользуясь кривою объемов водохранилища, получают соответственные точки  $M_2$ ,  $N_3$  и  $O_3$  графика колебания уровня в водохранилище (рис. 378, б).

**Способ с применением интегральной кривой разности.** Этот способ устраняет недостатки, присущие обычным интегральным кривым, а именно малый масштаб, обусловленный размерами чертежа, и неточность отсчетов при сечении кривых линиями, направленными к ним под острыми углами. Последний недостаток особенно сказывается в задачах 6 и 10.

Приступая к этому способу, необходимо прежде всего построить в масштабе тангенсов кривую расходов воды. Для этого выбирают за единицу масштаба времени отрезок  $b = 1000 \text{ сек}$  и за единицу масштаба сумм отрезок  $a = 10 \times 10^3 \text{ м}^3$  (рис. 379). Величина  $C$ , которая вычисляется в соответствии со значением постоянной разности  $x_0$  получается в данном

случае равной  $C = 30 \times 10^3 \text{ м}^3$  при выбранном значении  $x_0 = 30 \text{ м}^3/\text{сек}$ . Лучи, наклоненные под углами  $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \dots$  выражают значения  $Q_z$ , соответствующие расходам воды  $0, 10, 20, \dots$   $\text{м}^3/\text{сек}$ . Если перенести эти лучи параллельно самим себе в точки  $A, B, C, \dots$  оси  $h_p$ , соответствующие значениям  $h_p$  с расходами воды  $0, 10, 20 \text{ м}^3/\text{сек}$ , то можно получить кривую расходов воды, выраженную в масштабе тангенсов. Для некоторых исследований является целесообразным проводить лучи через точки  $A', B', C', \dots$  оси  $Q$ .

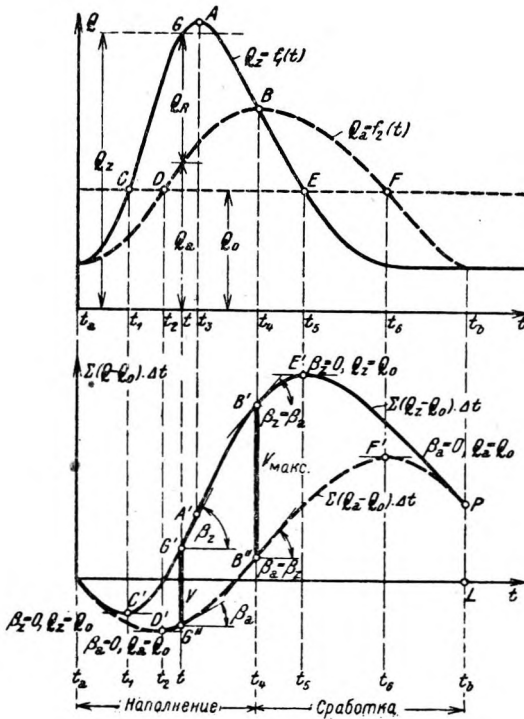


Рис. 383.

и подается, следовательно, определению непосредственно по тангенсам. Объем воды, аккумулированный за промежуток времени с  $t_a$  до  $t$ , равный, наполнению водохранилища  $V$ , составляет:

$$\sum_{t_a}^t Q_R \Delta t = \sum_{t_a}^t (Q_z - Q_a) \Delta t = \sum_{t_a}^t [(Q_z - Q_0) - (Q_a - Q_0)] \Delta t = \overline{G'G''}$$

$V$  достигает максимального значения  $V_{\text{макс}}$ , когда  $Q_z = Q_a$ , то есть в тот момент  $t$ , для которого  $\text{tg} \beta_z + Q_0 = \text{tg} \beta_a + Q_0$ , или  $\text{tg} \beta_z = \text{tg} \beta_a$  и  $\beta_z = \beta_a$ . Величина  $V_{\text{макс}}$  определяется и в данном случае наибольшей разницей ординат  $B'B''$  обеих интегральных кривых.

Приток за время с  $t_a$  до  $t_b$  составляет:

$$\begin{aligned} \sum_{t_a}^{t_b} Q_z \Delta t &= \sum_{t_a}^{t_b} [(Q_z - Q_0) \Delta t + Q_0 \Delta t] = \\ &= \sum_{t_a}^{t_b} (Q_z - Q_0) \Delta t + \sum_{t_a}^{t_b} Q_0 \Delta t = \overline{LP} + Q_0 (t_b - t_a). \end{aligned}$$

Таким образом интегральные кривые разности позволяют определять по ним все те величины, которые необходимы при рассмотрении вопросов аккумулярования воды, а, следовательно, пользуясь ими, можно решать указанные выше задачи с соблюдением такого же единства в методе и приемах, как и при обыкновенных интегральных кривых.

*Задача 1.* Дано  $Q_z$  и  $Q_a(t)$ . Требуется определить  $Q_a(h_p)$  и  $h_p$ .

В любое время  $t_A$   $A_1$  и  $A_2$  являются точками известных интегральных кривых ( $Q_z - Q_0$ ) и  $Q_a - Q_0$  (рис. 381). Так как кривая объемов водохранилища  $V = f_6(h_p)$  известна, то параллельное перемещение линии  $A_2O$  в поло-

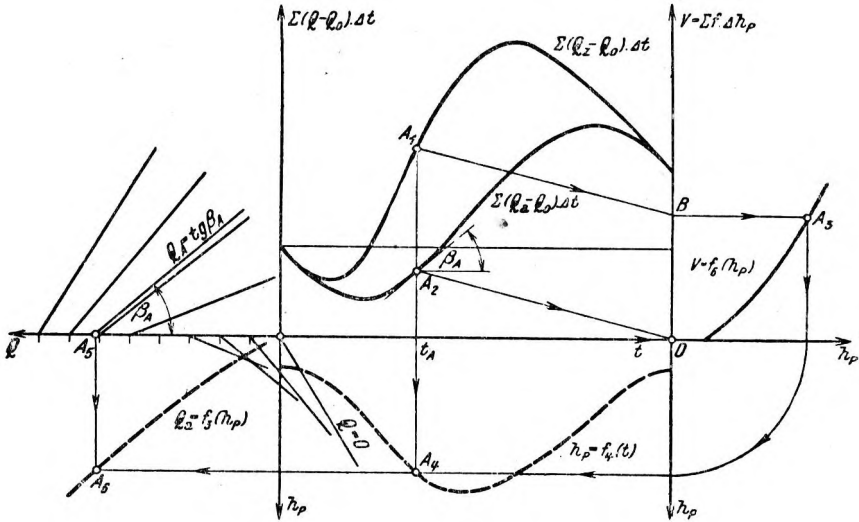


Рис. 381.

жении  $A_1B$  и пересечение линии  $A_1BA_3A_4$  с ординатой через  $t_A$  дают искомую точку  $A_4$  графика колебания уровня в водохранилище  $h_p = f_4(t)$ .

Угол наклона касательной в точке  $A_2$  к интегральной кривой ( $Q_a - Q_0$ ) составляет. Этому углу по масштабу тангенсов соответствует, характеризуемый точкой  $A_5$ , расход воды  $Q_A = \text{tg}\beta_A$ . Пересечение перпендикуляров к осям координат из точек  $A_4$  и  $A_5$  дает точку  $A_6$  искомой кривой  $Q_a = f_3(h_p)$ .

*Задача 2.* Дано  $Q_z$  и  $h_p$ . Требуется определить  $Q_a(t)$  и  $Q_a(h_p)$ .

Известны точки  $A_1$  графика уровней и  $A_3$  интегральной кривой ( $Q_z - Q_0$ ), расположенные на вертикали, проходящей через  $t_A$  (рис. 382). Линия  $A_1A_2A_3$  приводит к вспомогательной точке  $B$ , параллельное перемещение  $BA_3$  в положение  $OA_4$  и пересечение с вертикалью из  $t_A$  — к точке  $A_4$  интегральной кривой ( $Q_a - Q_0$ ), после чего настоящая задача сводится к задаче 1.

*Задача 3.* Дано  $Q_a(t)$  и  $h_p$ . Требуется определить  $Q_z$  и  $Q_a(h_p)$ .

Исходя из любой точки  $A_1$  графика уровней, получают при помощи линии  $A_1A_3$  вспомогательную точку  $B$  (рис. 383). Пересечение луча, проведенного через  $B$  параллельно  $OA_2$ , с вертикалью через  $A_1$  и  $A_2$  дает точку  $A_4$  интегральной кривой ( $Q_z - Q_0$ ), чем задача и в данном случае сводится к задаче 1.

Задача 4. Дано  $Q_a(t)$  и  $Q_a(h_p)$ . Требуется определить  $Q_z$  и  $h_p$ .

В любое время  $t_A$  секундный сток дан касательной в точке  $A_1$  интегральной кривой  $(Q_a - Q_0)$  (рис. 384). Угол  $\beta_A$ , перенесенный на масштаб тангенсов, дает точку  $A_2$  и далее точку  $A_3$  на кривой  $Q_a(h_p)$ .

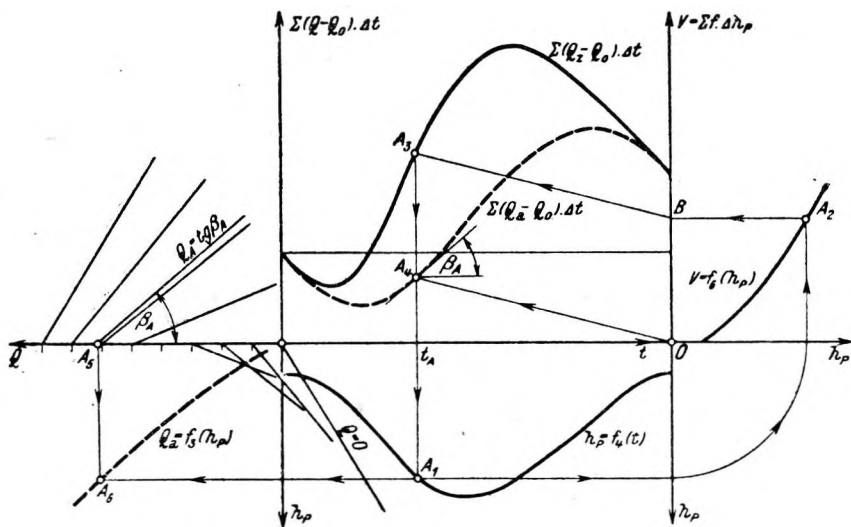


Рис. 382.

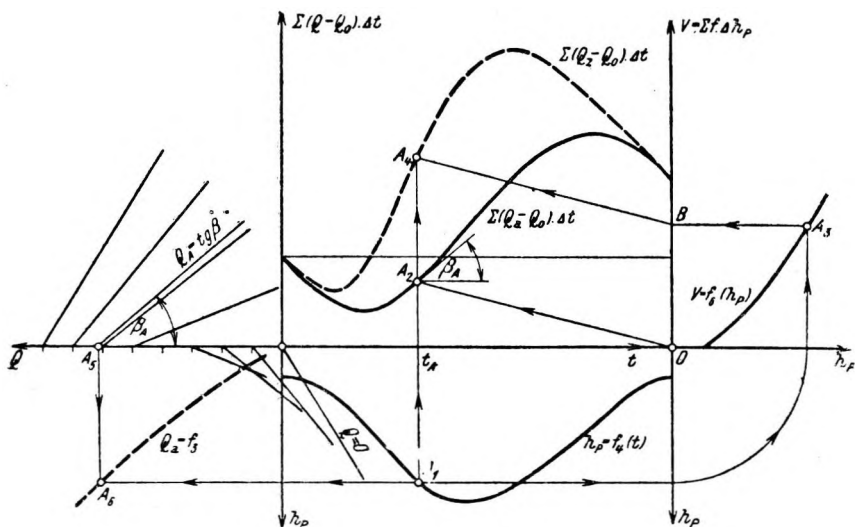


Рис. 383.

Пересечение перпендикуляров к осям координат из  $A_3$  и  $t_A$  дает в  $A_4$  точку искомого графика колебания уровня в водохранилище. При помощи

ломаной линии  $A_4A_5A_6$  от точки  $A_1$  вверх откладывается объем водохранилища, соответствующий уровню  $h_{p, A}$ . Получаемая в результате этого точка  $A_6$  принадлежит искомой интегральной кривой ( $Q_z - Q_0$ ).

Следующие задачи 5 и 6 решаются, как и в случае с обыкновенными интегральными кривыми, путем постепенного наращивания отрезков кривых.

**Задача 5.** Дано  $h_p$  и  $Q_a(h_p)$ . Требуется определить  $Q_z$  и  $Q_a(t)$ .

Для конечного результата определяющим является только взаимное положение интегральных кривых ( $Q_z - Q_0$ ) и ( $Q_a - Q_0$ ). Начальная точка  $A_1$ , исходя из которой начато построение интегральной кривой ( $Q_a - Q_0$ ), в данном случае выбрана произвольно (рис. 385). Вертикаль, проведенная через  $A_1$ , дает время  $t_A$  и уровень воды  $h_{p, A}$ , линия  $A_2A_5A_6$  — соответствующий этому

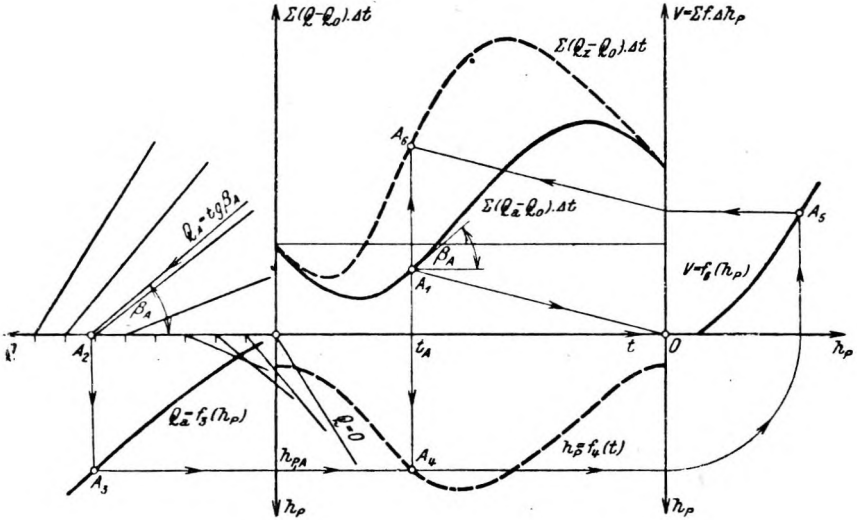


Рис. 384.

уровню расход воды  $Q_A = \text{tg} \beta_A$  и линия  $A_2A_3$  — объем наполнения водохранилища  $V_A$ . Теперь  $A_4$  — начальная точка интегральной кривой ( $Q_z - Q_0$ ). Интегральные кривые строятся и здесь при условии равных колебаний  $\Delta h_p$  уровня водохранилища. Ко времени  $t_B$  уровень в водохранилище достигает высоты  $h_{p, A} + \Delta h_p = h_{p, B}$  и линия  $B_1B_2B_3$  дает соответствующий новому уровню расход воды  $Q_B = \text{tg} \beta_B$ . Средний расход воды за промежуток времени  $t_A - t_B$  составляет

$$Q_m = \frac{Q_A + Q_B}{2} = \frac{\text{tg} \beta_A + \text{tg} \beta_B}{2} = \text{tg} \beta_m.$$

Это значение тангенса может быть взято по масштабу тангенсов. Луч, проведенный из  $A_1$  под углом  $\beta_m$ , пересекает вертикаль  $t_B$  в точке  $B_4$  искомой интегральной кривой ( $Q_a - Q_0$ ). Откладывая при помощи линии  $B_1B_5B_6$  (вверх от точки  $B_4$ ) объем водохранилища, соответствующий уровню  $h_{p, B}$ , получают в  $B_6$  точку интегральной кривой ( $Q_z - Q_0$ ). Нарастиванием следующих отрезков приходят в заключение к искомым интегральным кривым разности.

Задача 6. Дано  $Q_z$  и  $Q_a(h_p)$ . Требуется определить  $Q_a(t)$  и  $h_p$ .

Пусть условия аккумуляции воды в водохранилище даны уровнем  $h_{p,A}$  в момент времени  $t_A$  или же соответственно начальной точкой  $A_1$  искомого

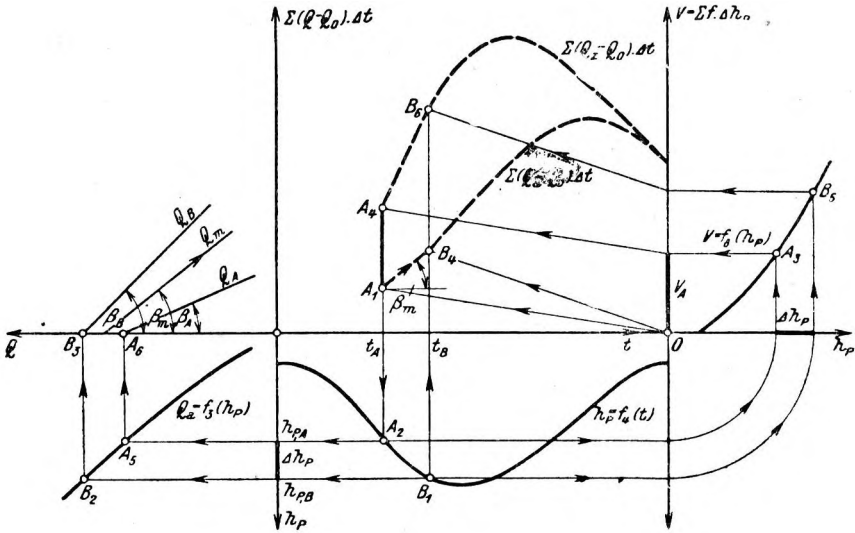


Рис. 385.

графика уровня (рис. 386). На линии  $A_1A_2A_3$  расположена вспомогательная точка  $H_1$ . При проведении из  $O$  линии параллельной  $H_1A_3$  объем водохранилища  $V_A$ , соответствующий уровню воды  $h_{p,A}$ , откладывается вертикально

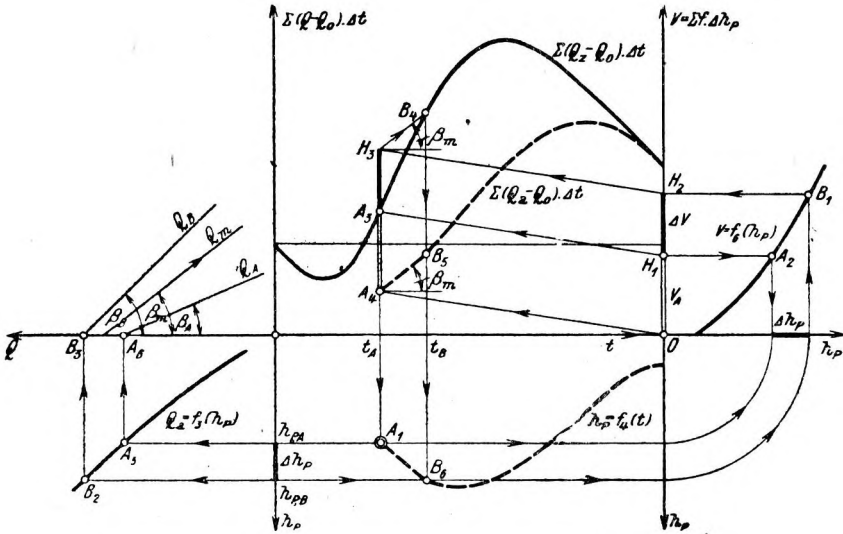


Рис. 386.

вниз от  $A_3$ , благодаря чему получается начальная точка  $A_4$  искомой интегральной кривой ( $Q_a - Q_0$ ). Теперь предположим, что уровень поднялся на  $\Delta h_p$  и достиг высоты  $h_{p,B}$ . Время, когда установится этот уровень, пока неизвестно. Расходы воды  $Q_A = \text{tg } \beta_A$  и  $Q_B = \text{tg } \beta_B$ , соответствующие уров-

ням  $h_{P, A}$  и  $h_{P, B}$  могут быть взяты по масштабу тангенсов, равно как и средний расход воды в виде равенства:

$$Q_m = \frac{Q_A + Q_B}{2} = \frac{\text{tg } \beta_A + \text{tg } \beta_B}{2} = \text{tg } \beta_m.$$

При помощи линии  $B_2B_1H_2H_3$  дополнительно накопленный объем водохранилища  $\Delta V$  откладывается от  $A_3$  по вертикали вверх, в результате чего получается вспомогательная точка  $H_3$ . Если теперь провести из  $H_3$  луч под углом  $\beta_m$ , то он пересечет интегральную кривую ( $Q_z - Q_0$ ) в точке  $B_4$ , абсцисса которой и будет искомым временем  $t_B$ . В свою очередь луч, проведенный через  $A_4$  под тем же углом  $\beta_m$ , даст в пересечении с вертикальной линией, проходящей через  $B_4$ , искомую точку  $B_5$  интегральной кривой ( $Q_a - Q_0$ ). Пересечение перпендикуляров из  $B_2$  и  $B_5$  к осям координат даст в заключение точку  $B_6$  графика колебания уровня в водохранилище.

Из числа остальных задач, в качестве примера, способом интегральных кривых разности, решена задача при несколько иной постановке вопроса (задача 10).

На рис. 387 проведены следующие исследования.

1. Может ли при заданном максимальном объеме водохранилища  $V_4$  покрываться существующая потребность в энергии единственно гидросиловой установкой, или для дополнительной выработки энергии необходимо располагать еще тепловой станцией?

2. Как велик должен быть объем водохранилища  $V_{\text{макс}}$ , чтобы покрывать потребность в энергии только при помощи гидросиловой установки?

Даны: хронологический график притока  $Q_z$ , хронологический график потребной мощности  $L_N$  и кривая объемов  $V = f(H)$  водохранилища. Если вычитаемое  $Q_0$  взять равным  $Q_0 = 10 \text{ м}^3/\text{сек}$ , то тем самым определится и интегральная кривая разности притока  $\Sigma(Q_z - Q_0) \Delta t$ .

Масштабы, принятые для интегральной кривой разности притока, определяют и масштаб тангенсов расходов воды. Масштаб для графика мощностей следует выбирать таким образом, чтобы при снесении с графика мощностей на масштаб тангенсов какой-либо мощности  $L_A$  можно было, путем простого построения, сразу получить расходы воды или значения тангенсов, соответствующие  $L_A$  и различным значениям напоров  $H$ .

Если за единицу масштаба мощностей будет взято  $L_N = 1000 \text{ НР} = 1000 \text{ кВт}$ , то этой единице при напоре  $H = 10 \text{ м}$  и коэффициенте полезного действия  $\eta = 0,75$  будет соответствовать расход воды

$$Q = \frac{L}{10 H} \frac{1000}{10 \cdot 10} =$$

$= 10 \text{ м}^3/\text{сек}$ , то есть в данном случае он будет по величине равен  $Q_0$ . Если в масштабе тангенсов нанести еще и напоры  $H$ , то отрезок  $L_{1000}$  на ординате  $H = 10 \text{ м}$  выражает единицу масштаба для хронологического графика мощностей (рис. 387).

Теперь, пользуясь единицей масштаба  $L_{1000}$ , строят график  $L_N$  заданной потребной мощности. Если затем отложить в масштабе тангенсов от нулевого луча вверх какое-либо значение мощности  $L_A$ , взятое с графика, и провести через верхнюю точку отложенного отрезка линию, параллельную нулевому лучу, то направления  $R_1 \dots R_5$  в пересечениях этой линии с ординатами, проведенными через различные значения напоров  $H_1 \dots H_5$  изобразят расходы воды  $Q_1 \dots Q_5$ , потребные для получения мощности  $L_A$  при соответственных напорах  $H_1 \dots H_5$ .

У имеющегося водохранилища наименьший используемый напор равняется  $H_1$  и соответствующий этому напору объем водохранилища представляет собою неприкосновенный запас. Напорам от  $H_1$  до  $H_5$  соответствуют

объемы от  $V_1$  до  $V_5$ . Если эти объемы отложить в масштабе от интегральной кривой разности притока, то получится ряд кривых, параллельно сдвинутых одна по отношению к другой на расстояния, определяемые масштабом  $V$ . Далее на эти кривые наносятся в виде засечек требуемые для каждой

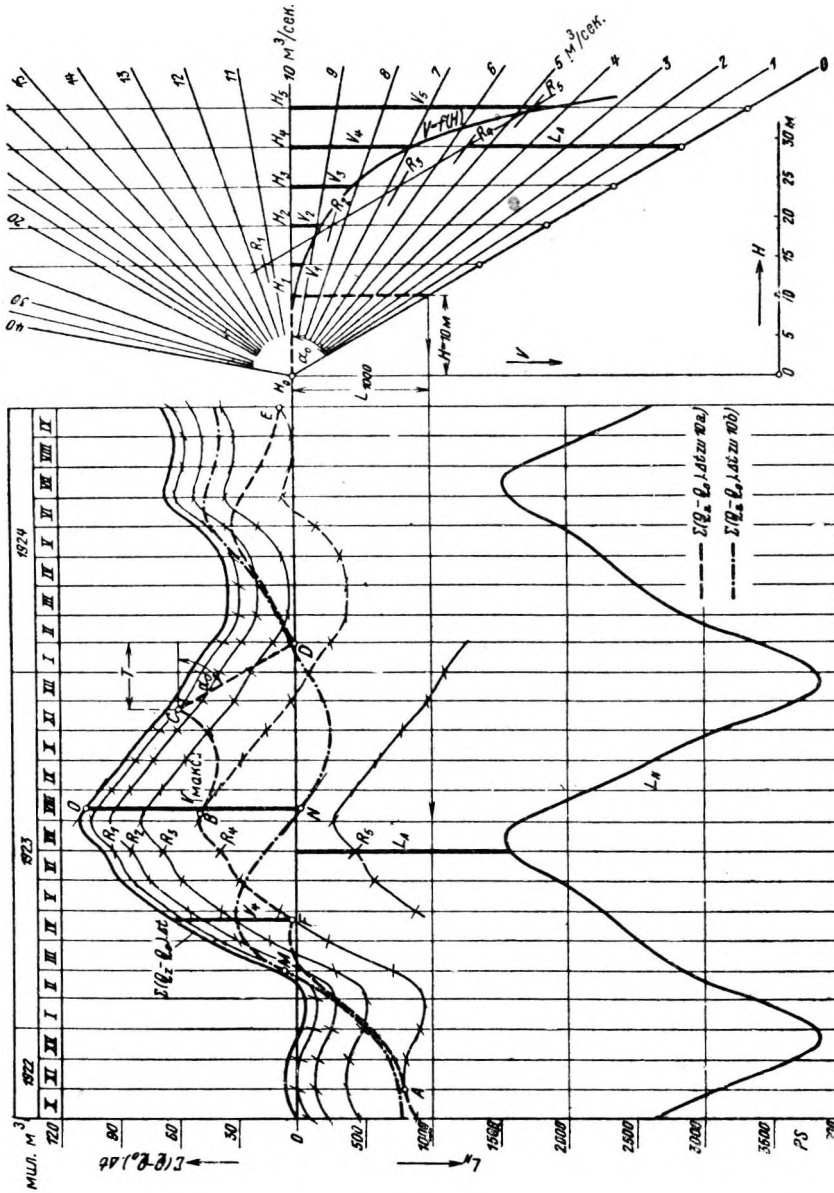


Рис. 387. Применение интегральной кривой разности для водохозяйственных расчетов водохранилища с годичным регулированием стока.

мощности  $L_N$  при различных напорах  $H_1...H_5$  расходы воды

$$Q = \frac{L_N}{10H} = \text{tg} \alpha.$$

1. Поскольку максимальный объем водохранилища составляет  $V_4$ , искомая интегральная кривая разности стока должна проходить между интегральной кривой разности притока и вспомогательной интегральной кривой, сдвинутой на величину  $V_4$ . Чтобы установить начальные и конечные точки интегральной кривой разности стока, следует искать эти точки на вспомогательной интегральной кривой, где  $Q_z = Q_a$  или  $\text{tg} \alpha_z = \text{tg} \alpha_a$  и  $\alpha_z = \alpha_a$ . Это имеет место-



там, где засечки являются касательными к вспомогательной интегральной кривой, то есть в точках  $A$  и  $B$ . Интегральная кривая разности стока строится, исходя из  $A$ , путем постепенной интерполяции между обозначенными засечками — направлениями расходов воды. В точке  $C$  водохранилище сработано до неприкосновенного запаса, и подача воды к турбинам прекращается. Поскольку забора воды больше не происходит, то есть  $Q_a = 0$ , то начиная с  $C$  интегральная кривая ( $Q_a - Q_0$ ) наклонена под углом  $\alpha_0$ .

Если в рассматриваемый двухлетний период времени расход воды должен полностью уравновешиваться притоком, то водохранилище должно иметь одинаковый объем в начале и в конце этого периода. В данном случае этот объем составляет  $V_4$ . Интегральная кривая ( $Q_a - Q_0$ ) должна согласно этому проходить через точку  $E$ . Исходя из  $E$  она строится в обратном направлении опять-таки при помощи интерполяции между направлениями расходов воды. В результате она пересечется с ветвью, наклоненной под углом  $\alpha_0$ , и точка пересечения  $D$  определит время вступления гидростанции вновь в работу на полную потребную мощность. За промежуток времени  $T$  потребность в энергии должна покрываться тепловой установкой, расчетная мощность которой дается максимальной потребной мощностью за это время.

2. В этой задаче следует начинать с построения интегральной кривой ( $Q_a - Q_0$ ) при наименьшем наполнении водохранилища  $V_1$ . В точке  $M$   $Q_z = Q_a$  водохранилище сработано вплоть до неприкосновенного запаса. Так как в дальнейшем  $Q_z > Q_a$ , то отсюда начинается наполнение водохранилища. В точке  $N$  опять  $Q_z = Q_a$ ; наполнение водохранилища достигло максимума, а отрезок  $\overline{NO}$  дает тот объем водохранилища, который необходим для обеспечения потребности в энергии путем работы одной гидросиловой установки.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

	Стр.
Предисловие .....	3
Введение	
Построение гидрологии .....	5
Область гидрологии.....	5
Баланс влаги на земле .....	6
Периодичность гидрологических и метеорологических процессов .....	7
Отношение гидрологии к морфологии рек.....	9

### Глава первая

#### Наблюдение и сбор гидрологических, метеорологических и морфологических данных

##### I. Осадки

Организация службы наблюдений над осадками.....	11
Производство наблюдений над осадками (омброметрия).....	12
Снегомерные посты.....	13
Суммарный дождемер—тотализатор .....	15
Обыкновенный дождемер—омброметр.....	17
Самопишущий дождемер—омброграф.....	19

##### II. Уровень воды

Организация речной водомерной службы.....	22
Производство водомерных наблюдений на реках.....	24
Водомерные колья или сваи.....	25
Водомерные рейки .....	25
Водомерные устройства с поплавком.....	26
Посты с самопишущими приборами—лимниграфы.....	28
Передаточные посты.....	33
Мерная игла.....	40
Измеритель уровня по мениску .....	41
Производство наблюдений над уровнем подземных вод.....	42

##### III. Сток

Определение величины поверхностного стока (гидрометрия) .....	45
Обозначение и определение величины поверхностного стока .....	45
1. Измерение расхода воды мерными баками.....	46
2. Измерение расхода воды при помощи опрокидывающихся сосудов.....	47
3. Определение расхода воды при помощи гидрометрической вертушки .....	47
Конструкция вертушки в деталях.....	48
Опускание гидрометрической вертушки в воду.....	54
Конструирование гидрометрической вертушки в целом .....	65
Дополнительные части оборудования гидрометрической вертушки .....	68
Теоретические основы измерений гидрометрической вертушкой.....	70
Тарировка гидрометрической вертушки.....	77
Коэффициент полезного действия вертушки.....	84
Методы полного вертушечного измерения.....	85
Метод сокращенного вертушечного измерения.....	93

	Стр.
Производство вертушечного измерения.....	94
Точность определения расхода воды при помощи гидрометрической вертушки .....	98
Дополнительные наблюдения и расчеты при определении расходов воды .....	100
4. Определение расхода воды при помощи напорной трубки.....	105
Основы способа измерения и тарировка напорной трубки .....	105
Приборы для отсчетов при измерениях напорными трубками .....	110
Производство измерений посредством напорных трубок и степень точности этих измерений .....	113
5. Определение расхода воды при помощи нагретой проволоки .....	114
6. Определение расхода воды при помощи поплавков.....	115
7. Определение расхода воды при помощи подвижного экрана.....	116
8. Определение расхода воды при помощи плавущего соляного раствора .....	119
9. Определение расхода воды по увеличению напора.....	121
10. Определение расхода воды при помощи смешения с соляным раствором....	124
Основы способа смешения.....	124
Производство определения расхода воды способом смешения.....	126
Точность определения расхода воды способом смешения .....	127
11. Определение расхода воды при помощи водослива.....	128
Основы способа измерения при помощи водослива.....	129
Производство определений расхода воды при помощи водослива и их точность .....	132
12. Определение расхода воды способом данаиды.....	134
Производство определений расхода воды способом данаиды и их точность .....	134
13. Определение расхода воды при помощи подпорных водомеров .....	136
Теоретические основы данного способа измерения .....	137
Производство определений расхода воды при помощи подпорных водомеров и их точность .....	140
Определение расхода воды подземных (грунтовых) вод.....	142
1. Определение расхода воды посредством установления действительной скорости течения грунтовых вод.....	145
2. Определение расхода воды через установление скорости фильтрации .....	147
Опытный колодец с откачкой воды.....	147
Опытный колодец с подкачкой воды.....	148
Лабораторное исследование .....	148
Применение эмпирических формул.....	150
<b>IV. Потери стока</b>	
Испарение .....	152
Испарение с больших водных поверхностей.....	153
Испарение в условиях суши.....	154
Испарение со снегового покрова .....	155
Фильтрация.....	157
Просачивание осадков.....	157
Искусственная фильтрация.....	157
<b>V. Температура</b>	
Температура воздуха .....	160
Температура воды.....	160
Температура почвы и сооружений.....	163
<b>VI. Атмосферное давление</b> .....	164
<b>VII. Влажность воздуха</b> .....	165
<b>VIII. Ветер</b> .....	166
<b>IX. Влекомые наносы</b>	
Описание материала, составляющего наносы.....	168
Мгновенный и суммарный расход влекомых наносов .....	171
<b>X. Взвешенные наносы</b>	
Мгновенный и суммарный расход взвешенных наносов.....	172
<b>XI. Лед</b>	
Лед глетчеров.....	177
Лед в стоячих водах .....	178
Лед в текучих водах.....	178

## Систематизация данных наблюдений и измерений

	Стр.
<b>I. Аналитическая статистика</b>	
1. Аналитико-статистическое исследование совокупности.....	182
Таблица распределения .....	183
Кривая частоты.....	183
Интегральная таблица.....	184
Статистические параметры.....	185
2. Корреляция двух признаков данной совокупности. Простая корреляция	188
Корреляционная таблица .....	189
Пол частот.....	189
Уравнение прямых регрессий .....	189
Коэффициент корреляции .....	194
3. Подбор кривых.....	198
Графический способ.....	199
Способ характерных точек.....	199
Способ осреднений.....	199
Способ наименьших квадратов.....	199
Способ моментов.....	200
4. Сглаживание неправильных линий и анализ сглаживания.....	201
5. Гармонический анализ и анализ периодограмм.....	203
<b>II. Графическая статистика</b>	
1. Графически-статистическая обработка ряда наблюденных значений .....	208
Хронологический график.....	208
Хронограмма.....	214
Преобразование хронологических графиков и хронограмм.....	217
2. Установление связей гидрологических явлений .....	227
Кривые связи между уровнями водомерных постов.....	228
Кривые расходов воды.....	229
3. Графическое изображение известных функциональных зависимостей .....	231
Изогеты и изогиины.....	232
Номограммы .....	232
Шкалы.....	233
Синоптические графики.....	234
<b>Глава третья</b>	
<b>Использование данных наблюдений и измерений для гидрологических и водохозяйственных расчетов</b>	
<b>I. Общая характеристика режима осадков</b>	
Распределение осадков .....	235
Анализ ливней.....	238
<b>II. Общая характеристика режима уровней воды речной системы</b>	
Устойчивость и неустойчивость речных профилей и речных участков.....	242
Изображение режима уровней при установившемся движении .....	248
Изображение режима уровней при неустановившемся движении.....	244
Классификация характерных уровней.....	256
<b>III. Общая характеристика режима стока речного бассейна</b>	
Распределение стока .....	258
Классификация характерных расходов воды.....	260
<b>IV. Характеристика потерь стока в речном бассейне</b>	
Уравнение водного баланса .....	261
Коэффициент стока.....	264
Зависимость между осадками и разностью осадков и стока .....	267
<b>V. Эмпирические формулы и уравнения, выражающие связь     между гидрологическими факторами</b>	
Эмпирические формулы для распределения скорости движения воды.....	269
Эмпирические формулы для средней скорости течения .....	272
Эмпирическое уравнение для кривой расходов воды.....	280

Эмпирические уравнения для кривых продолжительности расходов воды.....	281
Эмпирическое уравнение кривой падения расхода воды в бездождное время.....	283
Эмпирическое уравнение кривой пробега уровней воды.....	284
<b>VI. Установление расчетных расходов воды</b>	
Установление катастрофических расходов воды.....	286
1. Установление катастрофических расходов воды непосредственным путем.....	286
Расположение катастрофических расходов воды в порядке вероятности их наступления .....	287
Установление катастрофических расходов воды путем экстраполяции кривых расходов воды .....	289
Установление катастрофических расходов воды при помощи последовательного ряда кривых связи между уровнями на водомерных постах .....	290
2. Установление катастрофических расходов воды косвенным путем.....	293
Аналитический способ вычисления максимального стока по У. Пуппини.....	293
Эмпирические формулы для расчета максимального стока.....	297
Установление полезных расходов воды .....	300
1. Установление полезных расходов воды непосредственным путем.....	300
Установление зимних расходов воды .....	300
2. Установление полезных расходов воды косвенным путем.....	303
<b>VII. Учет и форма описания энергетических ресурсов рек</b>	
Кадастр водных сил.....	304
Характеристика годовой работы .....	310
<b>VIII. Прогноз уровней</b>	
1. Способы краткосрочного прогноза.....	312
Краткосрочные прогнозы, основанные на данных об осадках.....	315
Краткосрочные прогнозы по уровням воды (прогнозы уровня на водомерных постах) .....	321
2. Способы долгосрочного прогноза.....	327
Долгосрочные прогнозы, основанные на данных об осадках.....	327
Долгосрочные прогнозы по уровням воды.....	331
<b>IX. Искусственное воздействие на режим водного потока</b>	
1. Изменение осадков, испарения и просачивания в грунт.....	333
2. Изменение расхода воды путем ее забора из водотока или подачи в него.....	334
3. Изменение уровня воды в результате речных исправительных работ .....	336
4. Изменение расхода воды посредством включения или выключения водохранилищ .....	337
Способ с применением хронологических графиков.....	342
Способы с применением интегральных кривых.....	343
Способ с применением интегральной кривой разности.....	359

Ответственный редактор: *Д. Л. Соколовский.*  
Технический редактор *М. М. Ясногородская.*  
Корректор *Г. М. Митрофанов.*

Сдано в набор 21/V 1938 г. Подп. к печ. 13/X 1938 г.  
Формат бумаги 70X105<sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Колич. знак. в 1 печ.  
л. 53.824. Объем 45 авт. лист. Тираж 3000. Зак.  
№ 1493. Изд. 35. Леноблгорлит № 3742.

Тип. Госфиниздата им. Котлякова, Ленинград, ул.  
3-го Июля, 21.

# ЗАМЕЧЕННЫЕ ОПЕЧАТКИ

Напечатано

Должно быть

Стр.

Строка

$$\sqrt{\frac{a+bn}{2} + u_0(u_0 - a)}$$

$$\sqrt{\left(\frac{a+bn}{2}\right)^2 + u_0(u_0 - a)}$$

74

6 сверху

$$\frac{bu_m}{uF}$$

$$\frac{\Sigma(bu_m)}{u_f F}$$

104

19 снизу

$$\frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m z_{ij} (X_i - \bar{x})(Y_j - \bar{y})}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m z_{ij} (Y_j - \bar{y})^2}$$

$$\frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m z_{ij} (X_i - \bar{x})(Y_j - \bar{y})}{\sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n z_{ij} (Y_j - \bar{y})^2}$$

144

12 снизу

$$\frac{a_0}{2} = \sum_{n=1}^n \dots \dots \dots$$

$$\frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^n \dots \dots \dots$$

193

1 снизу

203

7 снизу

Шаффермак. Гидрология.





