

Напряжённо-деформированное состояние грунтовой плотины с глиноцементобетонной диафрагмой и зоной из камнебетона

Бестужева А. С.¹, кандидат техн. наук, доцент,

Тарасов А. А.², аспирант (Московский государственный строительный университет)

Проведён анализ факторов, влияющих на напряжённо-деформированное состояние (НДС) каменных плотин с диафрагмой из глиноцементобетона (ГЦБД) при расчётах в ПК PLAXIS. Рассмотрены такие факторы, как схема строительства плотины, инструменты моделирования диафрагмы (Soil, Plate), учёт проскальзывания на контакте между диафрагмой и переходными зонами и др. Проведено исследование НДС каменной плотины с разными составами ГЦБД, сделаны выводы о целесообразности устройства в высоких (свыше 100 м) плотинах упрочнённой цементом зоны из камнебетона с низовой грани диафрагмы. Методами факторного анализа проведён поиск оптимальной конструкции плотины с ГЦБД и зоной из камнебетона.

Ключевые слова: грунтовые плотины, камнебетон, глиноцементобетон, буросекущие сваи, стена в грунте, факторный анализ.

The stress-strain state of ground dams with a clay-cement-concrete diaphragms and a zone made of ground concrete

Bestugeva A. S.¹, Ph. D. in Engineering Science, Associate Professor,

Tarasov A. A.², Post-Graduate Student (Moscow State University of Civil Engineering)

The analysis of factors affecting the stress-strain state (VAT) of stone dams with a diaphragm made of clay cement concrete (G CBD) during calculations in the PC PLAXIS is carried out. Factors such as: dam construction scheme, diaphragm modeling tools (Soil, Plate), accounting for slippage at the contact between the diaphragm and transition zones, etc. are considered. A study of the VAT of a stone dam with different compositions of CSD was carried out, conclusions were drawn about the feasibility of installing a ground concrete zone from the lower face of the diaphragm in high (over 100 m) dams. The method of factor analysis were used to search for the optimal design of a dam with a GCB and a zone made of ground concrete.

Keywords: ground dams with diaphragms, stone-concrete, clay-cement-concrete, drilling piles, diaphragm wall.

Конструкции каменных плотин с диафрагмами являются одними из самых экономичных типов плотин за счёт максимально обжатого профиля и минимального объёма противодиффузионного элемента (ПФЭ). В отличие от традиционных асфальтобетонных диафрагм, которые возводятся совместно с отсыпкой плотины и требуют специальных технологий по укладке и уплотнению ПФЭ, устройство “стены в грунте” из буросекущихся свай позволяет ускорить процесс за счёт строительства “стены в грунте” очередями по мере протекания и стабилизации строительных осадок грунтовой насыпи. Однако вопросы совместной работы упорных призм плотины и элементов в виде свайной “стены в грунте” остаются одними из самых сложных ввиду их неравномерного деформирования не только под собственным весом, но и при восприятии давления воды со стороны верхнего бьефа, что проявляется в явлениях трещинообразо-

вания со стороны напорной грани ПФЭ. Свайные технологии имеют большую популярность в гражданском строительстве, в последние годы есть опыт их применения для создания ПФЭ в перемычках и теле грунтовых плотин [1, 2].

Основной проблемой буросекущихся свай, устраиваемых по технологии “стена в грунте”, являются неизбежные отклонения этих свай от вертикали, что ограничивает глубину устройства буросекущихся свай в 30 – 40 м [3, 4]. Устройство свай происходит по заранее смонтированным форшактам, которые служат направляющими для установки бурового оборудования. Для плотины высотой 100 м предложено устройство ПФЭ из буросекущихся свай в три очереди с увеличивающейся по глубине толщиной. Материалом для диафрагмы принят глиноцементобетон, деформативные и прочностные свойства которого для разных составов были исследованы в лаборатории НОЦ “Геотехника” НИУ МГСУ и обработаны с представлением расчётных номограмм в работах Л. Н. Рассказова и А. В. Радзинского [5, 6]. Фильтрационные свойства этого ма-

¹ alex.bestu@mail.ru

² tarasovalexandralex@mail.ru

териала исследовались в лаборатории ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева и представлены в работах С. В. Сольского, Р. Н. Орищука и др. [7, 13, 14].

В данной работе приведены результаты исследований напряжённо-деформированного состояния (НДС) каменной плотины с диафрагмой из глиноцементобетона, моделирование плотины проводилось в ПК PLAXIS2D с целью исследования влияния различных факторов расчётной схемы плотины на ее напряжённо-деформированное состояние.

Методы и построение решения. Одним из наиболее значимых факторов при расчётах грунтовых плотин является использование математической “модели грунта”, описывающей характер деформирования грунтов и материалов на различных этапах строительства. Наиболее близкой по описанию для насыпного гравийно-галечникового грунта тела плотины рассмотрена модель упругопластической среды с упрочнением (HS), связывающая параметры прочности материала с его напряжённым состоянием. Для моделирования напряжённо-деформированного состояния глиноцементобетонной диафрагмы (ГЦБД) и низовой переходной зоны из камнебетона с учётом экспериментальных данных по свойствам материалов может быть использована нелинейная модель идеальной упругопластической среды с условием прочности Кулона — Мора (МС).

Надёжность высокой каменной плотины с ПФЭ в виде ГЦБД, сооружаемой в плотине методом буросекущихся свай, всецело зависит от деформативных и прочностных свойств диафрагмы. В Рекомендациях [7] отмечается, что оптимальные показатели ГЦБ смесей при возведении ПФЭ в теле и основании грунтовых плотин должны соответствовать следующим характеристикам материала: прочность на сжатие $1,0 \text{ МПа} \leq R_{28} \leq 2,0 \text{ МПа}$, модуль деформации около 50 МПа. Вместе с тем все испытания с образцами ГЦБ, проведённые в НИУ МГСУ, не дали таких низких деформативных характеристик материала и были не ниже 90 МПа, достигая по некоторым составам 1000 МПа и более [5]. При этом в стабилметрических испытаниях с разным боковым обжатием образцов глиноцементобетона в диапазоне от 0,25 до 1 МПа были получены зависимости вида

$$R_{сж} = R_{пр} + A \cdot \sigma_3, \quad (1)$$

где $R_{сж}$ — расчётное сопротивление на сжатие; $A \approx 2,0 \dots 2,5$ — коэффициент бокового обжатия [5, 6]; σ_3 — боковое обжатие; $R_{пр}$ — призмная прочность.

Полученные зависимости позволяют констатировать, что прочностные свойства ГЦБ как материала связаны не только с различием в составе

фракционных и связующих материалов композита, но также и с условиями работы диафрагмы в массиве грунта, которые во многом определяются соотношением жёсткостей материалов ПФЭ и упорной призмы. При небольших модулях деформации ГЦБД (ниже модуля деформации призмы) возникает эффект “зависания” ГЦБД на призмах, что подтверждается при опытных откопках свайных “стен в грунте” [3]; при этом в материале диафрагмы возникает опасность трещинообразования и требуется подбор специальной (дополнительной) верховой переходной зоны, например, как предлагается в работах ВНИИГ [7] по условию самозалечивания трещин. С другой стороны, при увеличении жёсткости глиноцементобетона диафрагма выступает в роли концентратора напряжений и встаёт вопрос о выполнении условий прочности материала диафрагмы на сжатие. Таким образом, при численных исследованиях оказывается, что существует некоторый, довольно узкий диапазон деформативных свойств для материала ГЦБД, в рамках которого могли бы удовлетворяться одновременно оба условия прочности: устойчивость на трещинообразование с напорной грани диафрагмы и запас прочности на сжатие вблизи основания диафрагмы. Для выполнения условий прочности на растяжение предлагается использовать ГЦБД с более жёсткими составами по сравнению с теми, которые рекомендуются в работах [7], а для повышения прочности материала на сжатие предлагается с низовой грани ПФЭ устройство упрочнённой зоны из камнебетона. Камнебетон – конгломерат, полученный за счёт гравитационной проливки щебенистого (галечникового) грунта цементно-песчаным раствором с добавкой пластификатора; лабораторные исследования этого материала были проведены в НИУ МГСУ и представлены в работах [8 – 10].

Устройство упрочнённой зоны из камнебетона с низовой грани диафрагмы [11] предназначено для решения нескольких задач: во-первых, менее деформируемый (по сравнению с упорной призмой) материал — камнебетон, расположенный с низовой грани диафрагмы, способствует увеличению давления бокового обжатия в диафрагме, что согласно (1) повышает расчётное сопротивление на сжатие материала диафрагмы; во-вторых, наличие упорной зоны из камнебетона приведёт к снижению максимальных напряжений в диафрагме за счёт перераспределения напряжения между совместно работающими элементами; в-третьих, упорная зона из камнебетона способствует решению важнейшей проблемы плотин с ГЦБД — высоких градиентов напора в диафрагме [12]. Коэффициент фильтрации камнебетона выше, чем у глиноцементобетона, и на несколько порядков ниже, чем в материале упорных призм, что создаёт зонирование поперечного

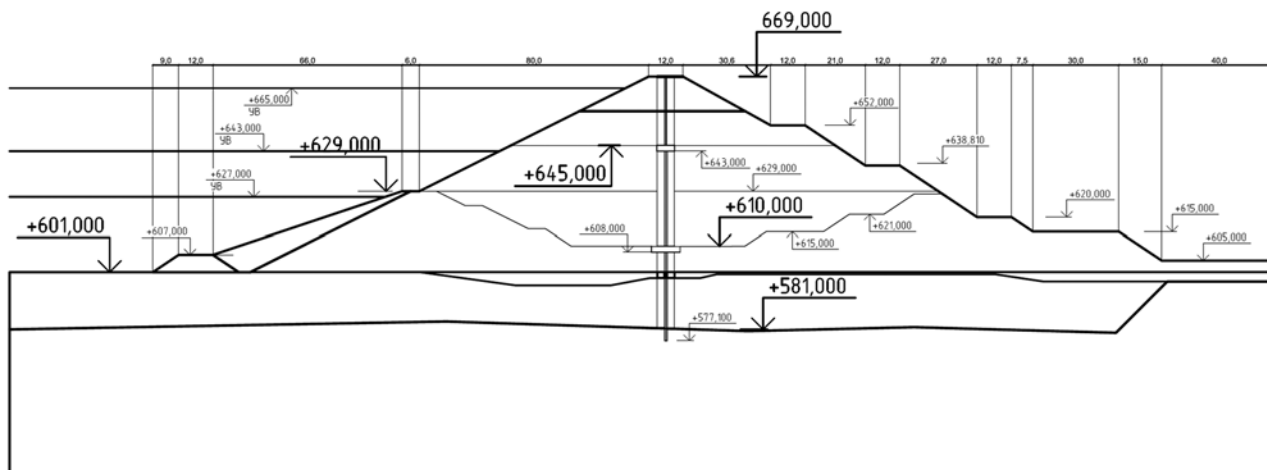


Рис. 1. Профиль Гоцатлинской грунтовой плотины

профиля плотины по коэффициенту фильтрации и включает камнебетон в область фильтрационного движения потока, снижая тем самым действующий градиент напора в диафрагме. Наконец, упрочнённая зона из камнебетона с низовой грани диафрагмы может быть выполнена достаточно широкой для размещения в ней потерн, позволяющих вести ремонтно-восстановительные работы в диафрагме без необходимости сработки водохранилища.

Для поиска наиболее экономичного решения при устройстве в плотине низовой переходной зоны из камнебетона проведены численные исследования в рамках факторного анализа [13]. Оптимальный вариант конструкции плотины выбирается на основе согласованного оптимума — минимальной стоимости плотины и выполнения всех условий работоспособности, в качестве которых рассматриваются условия прочности материала ГЦБД и условия прочности самого камнебетона во всём массиве элементов.

Решения и анализ результатов. Каменная плотина Гоцатлинской ГЭС является насыпной плотинной с упорными призмами из гравийно-галечнико-

вого грунта, высотой до 69,0 м, с противофильтрационным элементом в виде глиноцементобетонной диафрагмы (ГЦБД), которая имеет переменную по высоте толщину и возводится в три яруса. Она выполнена в виде буросекущихся свай диаметром 1,2 м с шагом 1,0 м на верхнем ярусе плотины и с шагом до 0,85 м на нижнем ярусе плотины. На отметках подошвы плотины ПФЭ выполнен в виде “стены в грунте”, перерезающей аллювиальное основание с заделкой в скальное основание. В скальном основании выполнена цементационная завеса. Исходные данные для расчёта приняты согласно работам, проведённым во ВНИИГ им Б. Е. Веденеева в 2016 г. [14]. Профиль Гоцатлинской плотины представлен на рис. 1. Максимальный напор на диафрагму составляет 64,0 м.

Физико-механические характеристики грунтов основания и тела плотины принимались согласно работам [15, 16], представлены в табл. 1.

Моделирование этапов строительства плотины. Строительство плотин является длительным процессом, в течение которого реализуются не только упругие и пластические, но и реологические

Т а б л и ц а 1

Физико-механические свойства основания и тела плотины

Наименование	Объёмный вес, т/м ³	Модуль деформации, МПа	Коэффициент Пуассона	Коэффициент трения	Сцепление, МПа
Упорные призмы	2,17	65,0	0,27	0,75	0,02
Диафрагма	1,93	76,0	0,30	0,78	0,32
“Стена в грунте”	2,0	60,0	0,23	-	-
Экран из супеси	2,13	30,0	0,3	0,48	0,015
Скальное основание	2,59	3000	0,27	0,70	0,15
Аллювий основание	2,27	50,0	0,3	0,68	0,00

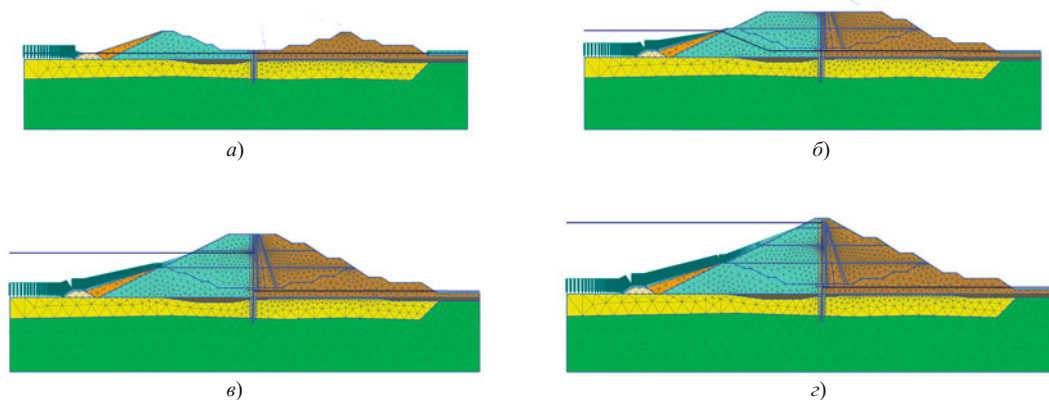


Рис. 2. Этапы возведения плотины: а – 6-й этап; б – 12-й этап; в – 18-й этап; з – 24-й этап

свойства грунтов, и учёт схемы строительства по этапам является обязательным элементом численного исследования грунтовых плотин. Поскольку основные осадки грунтовых насыпей протекают уже на этапах строительства и компенсированы вновь отсыпаемым грунтом, то можно считать, что осадка на момент начала новой фазы строительства равна нулю. Дальнейшие осадки на этом ярусе будут вызваны только весом вышележащей толщи. Для отражения истории формирования напряжённого состояния плотины в интерфейсе ПК задаются “фазы строительства”, количество которых влияет на точность представления результатов расчётов по осадкам и смещениям плотины. Для грунтовых насыпей в интерфейсе Plaxis существует также возможность обнуления перемещений на этапах.

При определении НДС плотины учитывалась этапность возведения плотины и наполнения водохранилища, для чего были рассмотрены схемы строительства в 12 и 24 этапа, представленные на рис. 2, а – з. Для учёта эффекта от досыпки грунта в характере распределения перемещений были рассмотрены два варианта. В первом варианте осадки на этапе включают осадки нижерасположенного слоя от собственного веса, и по мере строительства эти осадки накапливаются. Полученная эпюра имеет максимум на гребне плотины — 0,87 м. Во втором варианте на момент отсыпки нового слоя осадки предыдущего этапа обнуляются, так как эти осадки досыпаются новым грунтом. К концу строи-

тельства получена ступенчатая эпюра с максимумом смещений в нижней трети плотины 0,65 м. Для уточнения характера эпюры был проведён расчёт с увеличенным в 2 раза числом этапов строительства (24 этапа), что представлено на рис. 3, а. Характер эпюры стал более ровным и логичным. Максимальная осадка при этом составила 0,53 м. Максимальные суммарные горизонтальные смещения плотины в сторону нижнего бьефа для всех трёх задач практически равны и составляют 0,28 м (рис. 3, б).

Инструменты моделирования диафрагмы.

Моделирование тонкостенного противодиффузионного элемента в теле плотины встречает множество сложностей, таких, например, как выбор типа расчётного элемента в виде элементов “Soil” или “Plate”, каждый из которых имеет свои специфические свойства, позволяющие оценить условие прочности материала, а также учёт возможного проскальзывания грунта вдоль отвесных стен ПФЭ, что не всегда адекватно описывается рекомендуемыми параметрами прочности контактного элемента. Были рассмотрены варианты моделирования диафрагмы при помощи двух типов элементов: Plate (плита) и Soil(грунт).

Геометрические параметры “стены в грунте”, возводимой в теле плотины по типу буросекущих свай, с учётом изменения толщины стены по высоте представлены на рис. 4. Момент сопротивления свай с шагом 0,85/1,0 м составляет соответственно 0,142/0,111 м³, площадь поперечного сечения свай

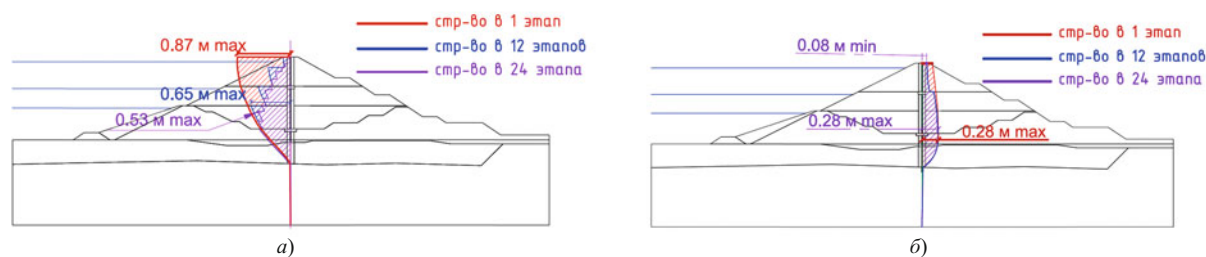


Рис. 3. Эпюры деформаций грунтовой плотины:

а – вертикальные осадки; б – горизонтальные смещения

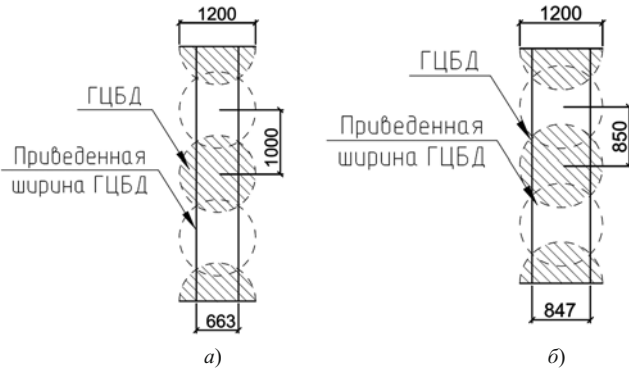


Рис. 4. Геометрические параметры “стены в грунте”: а – при шаге свай до 1,0 м; б – при шаге свай до 0,85 м

с диаметром 0,85/1,0 м составляет соответственно 0,847/0,663 м². Результаты расчётов с разными инструментами для моделирования диафрагмы представлены на рис. 5. Поскольку для элемента Plate результаты расчёта представлены в виде продольных сил и эпюр моментов, то напряжения в основании диафрагмы на уровне нижней форшахты могут быть получены по формулам внецентренного сжатия

$$\sigma_{1,3} = \frac{N}{A} \pm \frac{M}{W}. \quad (2)$$

При моделировании диафрагмы инструментом Soil (модель МС) максимальные напряжения составили 1,85 МПа, при моделировании Plate продоль-

ные усилия составили 0,7 кН, а изгибающий момент 15,7 кН м, что даёт максимальное напряжение по формуле (2) 0,93 МПа. Результаты, полученные с помощью моделирования через инструмент Soil, сопоставимы с результатами других авторов [14], и в дальнейших исследованиях используется инструмент Soil для моделирования работы ГЦБД.

Моделирование контакта между “стеной в грунте” и грунтом. Согласно п.5.33 СП 23.13330.2018 расчётное значение коэффициента трения на контакте негрунтового сооружения с грунтовым основанием в случае отсутствия прямых определений назначается не более 2/3. При расчётах были рассмотрены два варианта: с наличием контактного элемента (согласно рекомендациям СП) и без него. Результаты расчётов представлены на рис. 6. Получено, что учёт проскальзывания вызывает концентрацию напряжения в диафрагме и в основании плотины на глубине 55 м от НПУ максимальные напряжения составляют 2,2 МПа. При отсутствии контактного элемента и невозможности проскальзывания напряжение в том же сечении с напорной грани диафрагмы уменьшается до 1,95 МПа, что, тем не менее, превышает среднее напряжение в диафрагме на глубине 59 м от гребня и не создаёт опасности зависания диафрагмы на переходных зонах.

Таким образом, на основе вышеизложенного в дальнейших расчётах учёт проскальзывания в кон-

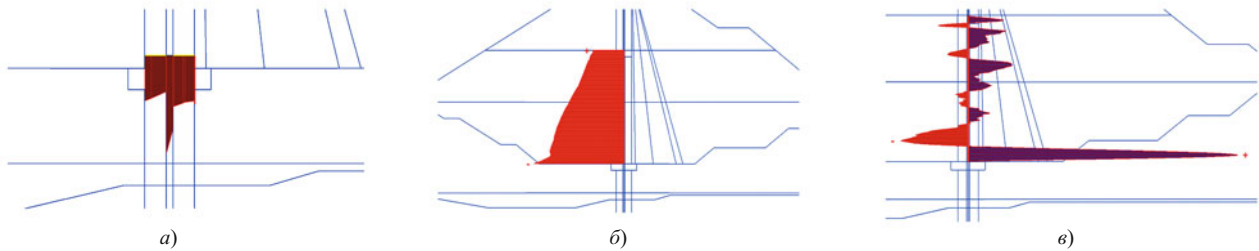


Рис. 5. Напряжённое состояние диафрагмы при различных инструментах моделирования: а – Soil: $\sigma_1^{\max} = 1,85$ МПа; б – Plate: $N = 700$ кН; в – Plate: $M = 15,7$ кН · м

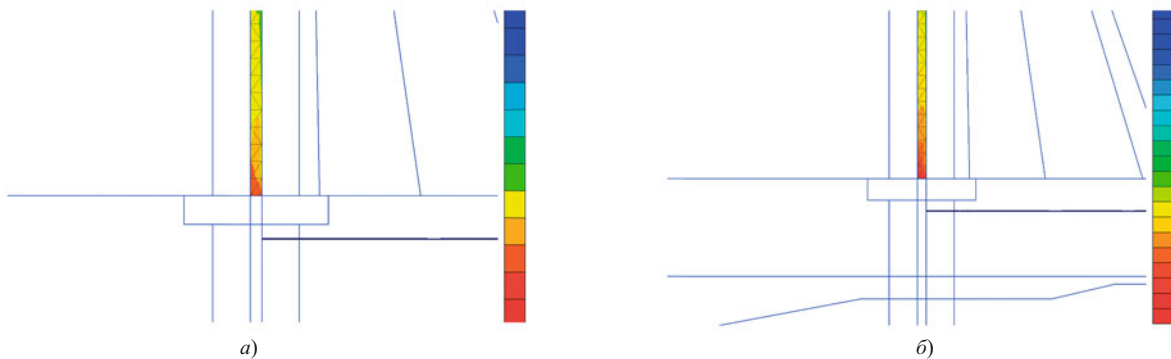


Рис. 6. Вертикальные напряжения в основании ГЦБД: а – с учётом проскальзывания ($\sigma_1^{\max} = 2,02$ МПа); б – без учёта проскальзывания ($\sigma_1^{\max} = 1,95$ МПа)

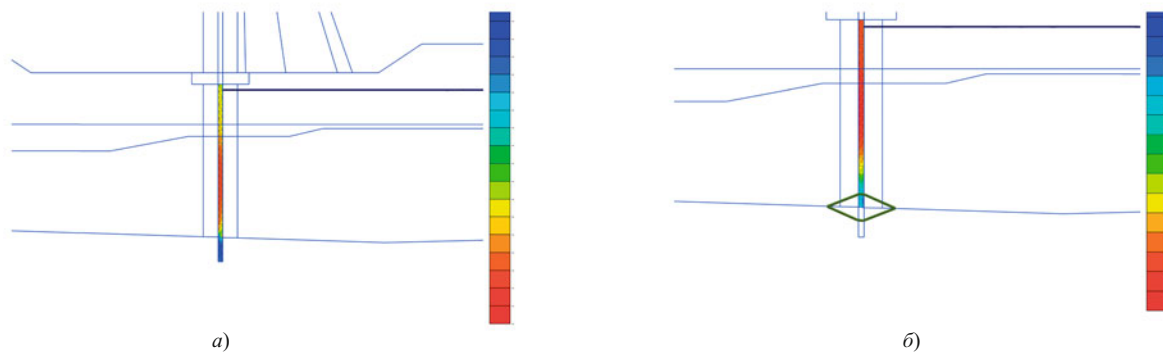


Рис. 7. Напряжения на контакте “стены в грунте” и основания: а – “заделка”: $\sigma_1^{\max} = 2,0$ МПа; б – свободное опирание: $\sigma_1^{\max} = 0,7$ МПа

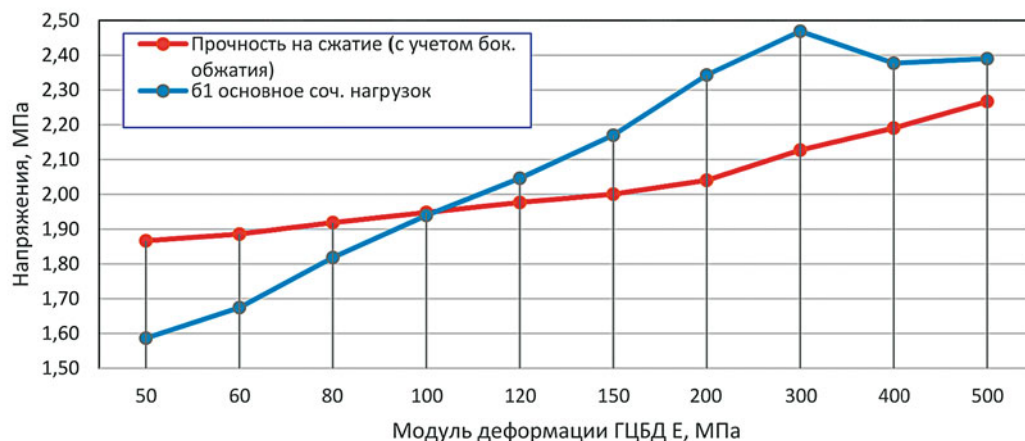


Рис. 8. Напряжения σ_1^{\max} при изменении модуля деформации ГЦБД (без зоны из камнебетона)

тактном элементе между ГЦБД и переходными зонами определяет наихудшие условия работы диафрагмы с точки зрения концентрации в ней сжимающих напряжений.

Моделирование сопряжения диафрагмы со скальным основанием. Устройство свайной “стены в грунте” в теле плотины часто требует устрой-

ства сопрягающей “стены в грунте” в водопроницаемом основании и решения вопроса об организации контакта “стены” со скальным основанием по схеме либо свободного опирания, либо заделки. Параметры работоспособности “стены в грунте” во втором случае будут существенно зависеть от пластических свойств ГЦБД и её гибкости

Т а б л и ц а 2

Сравнение напряжений по вариантам расчётов

Номер варианта	Вариант 1. Без КБ		Вариант 2. Ширина КБ 3 м		Вариант 3. Ширина КБ 10 м	
	ГЦБД	КБ	ГЦБД	КБ	ГЦБД	КБ
Наименование показателей	ГЦБД	КБ	ГЦБД	КБ	ГЦБД	КБ
Модуль деформации E, МПа	120	100	120	100	120	100
Кубиковая прочность, МПа	0,73	0,62	0,73	0,62	0,73	0,62
Призменная прочность, МПа	0,6	0,51	0,6	0,51	0,6	0,51
Прочность на сжатие (с учётом бок. обжатия), МПа	1,98	1,39	2,2	1,39	2,16	1,38
Вертикальные напряжения σ_{yy} , МПа	2,04	1,30	1,63	1,30	1,56	1,37
Горизонтальные напряжения σ_{xx} , МПа	0,69	0,88	0,8	0,88	0,78	0,87
Главные напряжения σ_1 , МПа	2,05	1,39	1,66	1,39	1,63	1,45

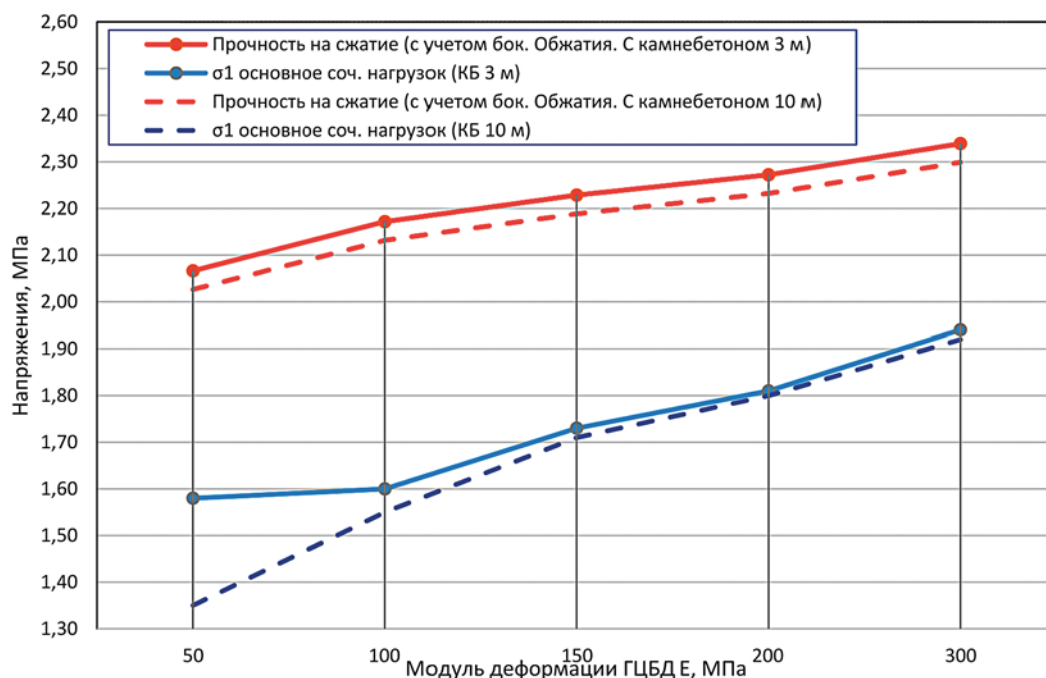


Рис. 9. Напряжения σ_1^{\max} при изменении модуля деформации ГЦБД (с зоной из камнебетона шириной 3 и 10 м)

как конструкции. Рассмотрены два варианта: свободное опирание и заделка. Результаты расчётов представлены на рис. 7. Характерным и ожидаемым отличием в работе диафрагмы по двум расчётным вариантам является снижение прогибов диафрагмы при свободном опирании. Общие деформации на уровне подошвы плотины составляют около 0,57 м для обоих вариантов, однако за счёт свободного смещения основания сваи во втором варианте величина прогиба диафрагмы на 0,12 м меньше, чем в первом, соответственно меньше и напряжения — 0,7 МПа против 2,0 МПа при жёсткой заделке.

Изменение свойств ГЦБД. В расчётах исследовался диапазон изменения модуля деформации ГЦБД от 90 до 300 МПа. Согласно экспериментальным данным, изменение модуля деформации диафрагмы было сопряжено также с изменением ряда физико-механических и прочностных характеристик материала. Расчёты НДС при основном сочетании нагрузок были проведены с целью оценки прочности на сжатие ГЦБД в теле плотины [5, 6]. Полученные результаты (рис. 8) показывают, что при увеличении модуля деформации ГЦБД свыше 105 МПа условия прочности для материала диафрагмы не выполняются. Напомним, что в экс-

Т а б л и ц а 3

Характеристики ГЦБД и камнебетона для уровней варьирования

Название	ГЦБ			Камнебетон		
	-1	0	+1	-1	0	+1
Уровни варьирования	-1	0	+1	-1	0	+1
Объёмный вес материала, т/м ³	1,87	2,05	2,13	2,05	2,08	2,1
Коэффициент пористости	0,3	0,26	0,21	0,27	0,24	0,22
Модуль деформации, МПа	120	160	200	150	225	250
Призмённая прочность, МПа	0,6	0,64	0,67	1,08	1,58	2,08
Коэффициент Пуассона	0,33	0,31	0,28	0,3	0,28	0,27
Удельное сцепление, МПа	0,32			0,0001		
Угол внутреннего трения, град	38			42		
Коэффициент фильтрации, м/сут	$2 \cdot 10^{-2}$			1		

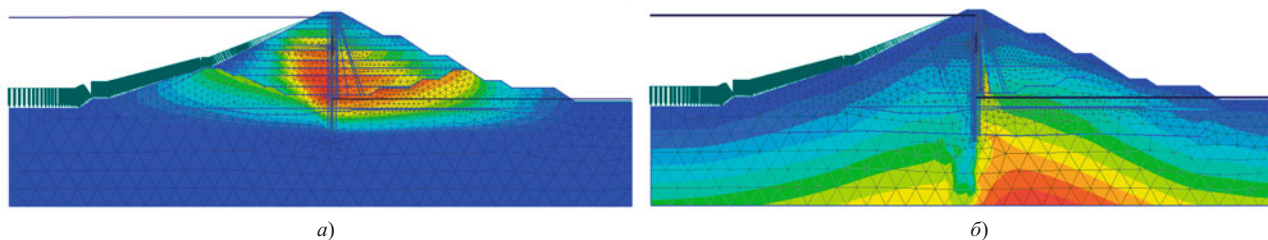


Рис. 10. Напряжённо-деформированное состояние плотины с диафрагмой и зоной из камнебетона: *а* – общие деформации $\Sigma S_{\max} = 0,63$ м; *б* – главные напряжения $\sigma_1^{\max} = 2,3$ МПа

периментах А. В. Радзинского [17, табл. 2.9] с разными составами глиноцементобетона для диафрагмы Гоцатлинской ГЭС из рассматриваемых девяти составов только один имел модуль деформации около 90 МПа, все остальные были существенно выше.

Для выполнения условий прочности в ГЦБД при использовании более жёстких составов ($E > 100$ МПа) в конструкции плотины с низовой грани диафрагмы предлагается устройство упрочнённой зоны из камнебетона, чему и посвящены следующие разделы исследований.

Применение упрочнённой зоны из камнебетона. Исследования НДС плотины с ГЦБД и упрочнённой зоной из камнебетона при модулях деформации для диафрагмы $E = 120$ МПа, для камнебетона $E = 100$ МПа были выполнены для двух вариантов: первый — с минимальной толщиной упрочнённой зоны из камнебетона 3 м, второй — с шириной камнебетона 10 м по основанию зоны на уровне нижней форшахты. На гребне плотины ширина зоны из камнебетона составляла 3 м для обоих вариантов. Характеристики камнебетона принимались согласно [8 – 11], их значения представлены в табл. 2, там же представлены результаты расчётов

НДС плотины для трёх вариантов расчёта, в том числе и без использования камнебетона.

Получено, что наличие узкой зоны из камнебетона немного увеличивает расчётное сопротивление на сжатие материала ГЦБД с 1,98 до 2,2 МПа, при широкой зоне прочность на сжатие немного снижается до 2,16 МПа, что объясняется общим снижением уровня сжимающих напряжений в диафрагме при вовлечении в работу камнебетона. Максимальные сжимающие напряжения в диафрагме σ_1 при устройстве узкой зоны из камнебетона снижаются с 2,05 до 1,66 МПа, а при широкой — до 1,63 МПа.

Таким образом, на примере расчёта с фиксированными свойствами материалов диафрагмы и камнебетона было получено, что напряжённое состояние диафрагмы улучшается как с точки зрения снижения в ней максимальных напряжений, так и с точки зрения повышения расчётного сопротивления материала диафрагмы на сжатие за счёт увеличения давления отпора со стороны низовой упрочнённой зоны.

Результаты расчётов по проверке условий работы диафрагмы при средней ширине зоны из камнебетона 10 м на всём диапазоне изменения свойств

Т а б л и ц а 4

Матрица планирования эксперимента

№ расч. схемы	ГЦБД	КБ	ширина КБ	x_1x_2	x_1x_3	x_2x_3	$x_1x_2x_3$	Функции откликов				
								$\sigma_{\text{верт}}^{\text{ГЦБД}}$, МПа	$R_{\text{сж}}^{\text{ГЦБД}}$, МПа	$\sigma_{\text{верт}}^{\text{КБ}}$, МПа	$R_{\text{сж}}^{\text{КБ}}$, МПа	$\Sigma_{\text{ГЦБД+КБ}}$ млн. руб
1	+	+	+	+	+	+	+	1,34	2,33	1,86	3,03	779,800
2	-	+	+	-	-	+	-	1,27	2,20	1,89	2,98	765,520
3	+	-	+	-	+	-	-	1,57	2,25	1,55	1,96	612,360
4	-	-	+	+	-	-	+	1,43	2,16	1,54	1,97	598,080
5	+	+	-	+	-	-	-	1,59	2,25	1,95	2,08	615,160
6	-	+	-	-	+	-	+	1,47	2,15	1,93	2,08	600,880
7	+	-	-	-	-	+	+	1,67	2,27	1,62	1,08	537,880
8	-	-	-	+	+	+	-	1,57	2,09	1,62	1,08	523,600
9	+	+	+	+	+	+	+	1,39	2,26	1,92	1,58	629,160

ГЦБД (по аналогии с графиками на рис. 8) представлены на рис. 9. На графиках видно, что в отличие от предыдущего расчёта при использовании камнебетона главные напряжения на всём диапазоне изменения свойств ГЦБД удовлетворяют условию прочности для материала диафрагмы.

Оптимизация конструкции плотины с ГЦБД. Все вышеприведённые результаты расчётов касались исследований по одному изменяемому параметру: по жёсткости диафрагмы, по ширине зоны камнебетона, по наличию-отсутствию проскальзывания и т.п., что позволяет оценить влияние варьируемого фактора в “чистом” виде, но оценить работу конструкции с учётом одновременного изменения нескольких факторов, в том числе с учётом их взаимодействия, возможно только методами факторного анализа на воображаемом факторном пространстве. В качестве завершения данной работы методом факторного анализа был проведён поиск оптимальной конструкции плотины с ГЦБД и с упорочнённой зоной из камнебетона. Оптимальной считается наиболее экономичная по стоимости конструкция, отвечающая при этом всем требованиям по прочности материалов. Теоретические основы метода оптимизации конструкций гидротехнических сооружений изложены в [13].

В качестве факторов варьирования были приняты (табл. 3):

модуль деформации ГЦБД (x_1), изменяющийся от 120 до 200 МПа;

модуль деформации КБ (x_2), изменяющийся от 150 до 250 МПа;

ширина зоны из КБ (x_3), изменяющаяся от 3 до 10 м.

В качестве функций откликов рассматривались параметры работоспособности плотины: главные напряжения в диафрагме и в камнебетоне. Для уравнений регрессии был принят квазилинейный полином с числом слагаемых 2^N , где N — число варьируемых факторов. Матрица планирования полнофакторного эксперимента с результатами расчётов представлена в табл. 4. Для каждой расчётной схемы были проведены расчёты НДС плотины, определены максимальные напряжения в диафрагме и камнебетоне, рассчитаны значения расчётного сопротивления материала согласно (1), полученные значения занесены в табл. 4. Зависимости призмной прочности камнебетона от его состава приняты согласно [18]. Стоимости плотин рассчитаны с учётом изменения составов ГЦБД и КБ по вариантам на основе данных о рыночной стоимости материалов: цемента, песка, щебня, бентонитовой глины. Таким образом, на основе расчётов, результаты которых занесены в табл. 4, определены коэффициенты для уравнений регрессии [13]. Проверка адекватности построенных функций для центра фактор-

ного пространства (9-я расчётная схема) составила около 8,3 %. Ниже представлены полученные уравнения регрессии:

1. Целевое уравнение стоимости конструкции (у.е.):

$$V(x_1, x_2, x_3) = 629,2 + 7,14x_1 + 61,18x_2 + 59,78x_3 + 22,54x_2x_3$$

2. Напряжение в диафрагме и низовой зоне из камнебетона (МПа):

$$\begin{cases} \sigma^{\text{ГЦБД}}(x_1, x_2, x_3) = 1,49 + 0,05x_1 - 0,07x_2 - \\ 0,09x_3 - 0,03x_2x_3 - 0,01(x_1x_2 + x_1x_2x_3) \\ \sigma^{\text{КБ}}(x_1, x_2, x_3) = 1,75 + 0,16x_2 - \\ - 0,04x_3 - 0,01x_1x_2x_3. \end{cases}$$

3. Прочность материалов ГЦБД и камнебетона (МПа):

$$\begin{cases} R_{\text{сж}}^{\text{ГЦБД}}(x_1, x_2, x_3) = 2,21 + 0,06x_1 + \\ + 0,02(x_2 + x_3 + x_1x_2x_3) - 0,01(x_1x_2 + x_1x_3 - x_2x_3) \\ R_{\text{сж}}^{\text{КБ}}(x_1, x_2, x_3) = 2,03 + 0,51x_2 + \\ + 0,45x_3 + 0,01(x_1x_2 + x_2x_3 + x_1x_2x_3). \end{cases}$$

На основе построенных уравнений регрессии был произведён поиск оптимального решения в ПК Mathcad согласно условиям прочности для материалов плотины [19]:

$$\begin{cases} \gamma_{lc} \sigma^{\text{ГЦБД}}(x_1, x_2, x_3) < \frac{1}{\gamma_n} R_{\text{сж}}^{\text{ГЦБД}}(x_1, x_2, x_3) \\ \gamma_{lc} \sigma^{\text{КАМ}}(x_1, x_2, x_3) < \frac{1}{\gamma_n} R_{\text{сж}}^{\text{КБ}}(x_1, x_2, x_3), \end{cases} \quad (3)$$

где γ_{lc} и γ_n при расчётах по 1-й группе предельных состояний в период нормальной эксплуатации для сооружений 1 класса по ответственности принимаются равными 1 и 1,25 соответственно.

Решение системы уравнений и неравенств в среде Mathcad представляется в виде нормированных значений факторов для оптимального решения

$$\text{Minimize}(V, x_1, x_2, x_3) = \begin{pmatrix} -1 \\ -1 \\ 0,12 \end{pmatrix}. \quad (5)$$

Полученное решение соответствует оптимальным (в выбранном факторном пространстве) параметрам плотины с модулем деформации диафрагмы 120 МПа и шириной зоны из камнебетона с низовой грани диафрагмы около 7 м. Полученное решение подтверждает возможность увеличения жёсткости ГЦБД при условии устройства с низовой

границы диафрагмы упрочнённой зоны из камнебетона. Напряжённо-деформированное состояние плотины с ГЦБД для оптимального решения представлено на рис. 10.

Выводы

1. Расчёты напряжённо-деформированного состояния плотины в ПК Plaxih показали, что учёт большего числа фаз строительства и обнуление вертикальных перемещений на фазах строительства придают эпюре вертикальных осадок плотины более ровный и совпадающий с натурными данными характер.

2. Проскальзывание в контактном элементе между ГЦБД и переходными зонами при расчётах может учитываться по-разному. Для ГЦБД с низкими модулями деформации, ниже, чем для упорных призм, наилучшими условиями работы будет являться учёт “зависания” диафрагм на упорных призмах (опасность трещинообразования), что следует предусмотреть в недопущении или минимальном проскальзывании диафрагмы вдоль переходных зон. Для “жёстких” диафрагм учёт проскальзывания грунта по боковым граням диафрагмы вызывает в последней концентрацию напряжений, что также следует учесть в расчёте.

3. Применение камнебетона в грунтовых плотинах с ГЦБД может быть рекомендовано для высоких плотин (более 100 м), требующих более жёстких составов для материалов ГЦБД. В этом случае устройство с низовой грани диафрагмы зоны из камнебетона оказывает положительное влияние на НДС диафрагмы, которое выражается в следующем:

за счёт совместной работы материалов диафрагмы и камнебетона происходит снижение максимальных напряжений в диафрагме на 8 – 15 % в зависимости от ширины зоны камнебетона;

увеличение бокового обжатия в диафрагме увеличивает расчётное сопротивление на сжатие для материала ГЦБД почти на 20 %.

4. Пониженная фильтрационная проницаемость (коэффициент фильтрации) камнебетона, отличающаяся от проницаемости упорной призмы более чем на 2 порядка, создаёт условия для работы камнебетона в качестве второй линии противифльтрационной защиты плотины совместно со “стеной в грунте” из буросекущихся свай, снижая тем самым действующий градиент напора на ГЦБД, что представляется актуальным и перспективным для дальнейших исследований.

Список литературы

1. Кудрин К. П., Королёв В. М., Аргал Э. С., Соловьёва Е. В., Смирнов О. Е., Радзинский А. В. Использование инновационных решений при создании противифльтрационной

диафрагмы в перемычке Нижне-Бурейской ГЭС // Гидротехническое строительство. 2014. № 7. С. 22 – 28.

2. Кудрин К. П., Королёв В. М., Аргал Э. С., Соловьёва Е. В. Технология создания противифльтрационного элемента в грунтовой плотине Нижне-Бурейской ГЭС // Гидротехническое строительство. 2020. № 1. С. 88 – 98.

3. Аргал Э. С., Королёв В. М. О некоторых свойствах глиноцементобетона и особенностях работы стены в грунте в теле плотины // Гидротехническое строительство. 2019. № 5. С. 10 – 19.

4. Королёв В. М., Смирнов О. Е., Аргал Э. С., Радзинский А. В. Новое в создании противифльтрационного элемента в теле грунтовой плотины // Гидротехническое строительство. 2013. № 8. С. 2 – 9.

5. Рассказов Л. Н., Радзинский А. В., Саинов М. П. Выбор состава глиноцементобетона при создании “стены в грунте” // Гидротехническое строительство. 2014. № 3. С. 16 – 24.

6. Рассказов Л. Н., Радзинский А. В., Саинов М. П. К прочности глиноцементобетона // Гидротехническое строительство. 2014. № 8. С. 26 – 28.

7. СП 310.02.НТ-2017. Рекомендации по проектированию, расчётам и возведению противифльтрационного элемента из глиноцементобетонных буросекущихся свай. — Санкт-Петербург, 2017. — 118 с.

8. Бестужева А. С. Камнебетон как материал для подэкрановой зоны плотины с железобетонным экраном // Научное обозрение. 2015. № 23. С. 75 – 79.

9. Бестужева А. С., Буканов Г. Н. Камнебетон в строительстве плотин // Гидротехническое строительство. 2016. № 10. С. 34 – 38.

10. Бестужева А. С., Гадай Д. Поиск оптимального состава и исследования специального материала для подэкрановой зоны плотины с железобетонным экраном // Гидротехническое строительство. 2018. № 10. С. 40 – 48.

11. Бестужева А. С., Цитурский И. Л., Гадай Д. Методика подбора состава и технология создания материала “камнебетон” // Гидротехническое строительство. 2019. № 11. С. 22 – 27.

12. Анахаев К. Н., Бестужева А. С., Анахаева Х. К. Фильтрационный расчёт геофизической “стены в грунте” из буросекущихся свай // Гидротехническое строительство. 2022. № 8. С. 6 – 14.

13. Рассказов Л. Н. и др. Гидротехнические сооружения (речные) [Текст]: Учебник для вузов — в 2 ч. / Под ред. Л. Н. Рассказова. — Изд. 2-е, испр. и доп. — М.: Изд-во АСВ, 2011.

14. Прокопович В. С., Величко А. С., Орищук Р. Н. Напряжённо-деформационное состояние земляной плотины с глиноцементобетонной диафрагмой (на примере земляной плотины Гоцатлинской ГЭС) // Известия ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева. 2016. Т. 282. С. 87 – 98.

15. Сольский С. В., Легина Е. Е., Орищук Р. Н., Васильева З. Г., Величко А. С. Анализ влияния компонентов глиноцементобетона на его характеристики // Вестник МГСУ. 2016. Т. 10. С. 80 – 93.

16. Сольский С. В., Лопатина М. Г., Легина Е. Е., Орлова Н. Л., Орищук Р. Н. Результаты лабораторных исследований фильтрационных характеристик глиноцементобетона // Гидротехническое строительство. 2016. № 8. С. 36 – 41.

17. Радзинский А. В. Надёжность грунтовых плотин с противифльтрационным элементом в виде “стены в грунте”: Дисс. ... канд. техн. наук. НИУ МГСУ, 2014. — 128 с.

18. Гадай Д. Использование камнебетона в конструкциях плотин с железобетонным экраном: Дисс. ... канд. техн. наук. НИУ МГСУ, 2019. — 198 с.

19. СП 58.13330.2019. Гидротехнические сооружения. Основные положения.