

Вестник Евразийской науки / The Eurasian Scientific Journal <https://esj.today>

2020, №1, Том 12 / 2020, No 1, Vol 12 <https://esj.today/issue-1-2020.html>

URL статьи: <https://esj.today/PDF/39SAVN120.pdf>

Ссылка для цитирования этой статьи:

Котов Ф.В. Работоспособность каменно-набросной плотины с центральной бетонной призмой и асфальтобетонной диафрагмой внутри // Вестник Евразийской науки, 2020 №1, <https://esj.today/PDF/39SAVN120.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ.

For citation:

Kotov F.V. (2020). Workability of a rockfill dam with a central concrete prism and an internal asphalt concrete diaphragm. *The Eurasian Scientific Journal*, [online] 1(12). Available at: <https://esj.today/PDF/39SAVN120.pdf> (in Russian)

УДК 624.01; 627.8

ГРНТИ 67.03.03; 67.29.59

Котов Филипп Викторович

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет»
Москва, Россия

Старший преподаватель кафедры «Гидравлики и гидротехнического строительства»

E-mail: filipp_net@mail.ru

РИНЦ: http://elibrary.ru/author_profile.asp?id=675643

Работоспособность каменно-набросной плотины с центральной бетонной призмой и асфальтобетонной диафрагмой внутри

Аннотация. Введение. В настоящее время рассматриваются различные варианты конструкций грунтовых плотин с массивными противифльтрационными элементами из цементосодержащих материалов. Данная статья посвящена исследованию напряжённо-деформированного состояния (НДС) сверхвысокой грунтовой плотины с массивным центральной бетонной призмой (бетонным ядром), которое разделено на две части асфальтобетонной диафрагмой. Основная часть бетонной призмы отделена от фундамента горизонтальным швом.

Материалы и методы. Исследование проводилось методом конечных элементов на примере плотины высотой 235 м. При расчётах НДС учитывалась последовательность возведения плотины и наполнения водохранилища. Исследование проводилось для двух вариантов материала жёсткого ядра (бетон или грунтоцементобетон) и трёх вариантов деформируемости каменной наброски. Всего были рассмотрены 6 вариантов сочетаний деформативных свойств каменной наброски и материала ядра.

Результаты. Расчёты НДС показали, в рассматриваемой конструкции асфальтобетонная диафрагма играет роль широкого вертикального шва. Разрезающий шов обеспечивает относительную независимость деформаций двух частей центральной бетонной призмы. Тем не менее, в конструкции центральной бетонной призмы могут возникать высокие растягивающие и сжимающие напряжения, создающие риск потери прочности материала. Ещё большую опасность для надёжности конструкции представляет раскрытие шва между основной частью бетонной призмы и её фундаментом, между фундаментом и скальным основанием. Они происходят на значительной длине.

Выводы. Рассмотренная конструкция плотины с центральной бетонной призмой обладает рядом недостатков, которые не позволяют рекомендовать их для применения в

сверхвысоких плотинах. Однако использованные в ней конструктивные решения позволяют решать техническую проблему обеспечения герметичности массивной жёсткой противofильтрационной конструкции. Они могут быть использованы в дальнейшем при разработке новых конструкций грунтовыми плотинами с массивными противofильтрационными элементами из цементосодержащих материалов.

Ключевые слова: каменно-набросная плотина; массивный противofильтрационный элемент; бетонное ядро; асфальтобетонная диафрагма; напряжённо-деформированное состояние; грунтоцементобетон

Введение

Важной задачей гидротехники как науки является разработка способов повышения надёжности грунтовых плотин, особенно сверхвысоких. Одним из направлений решения этой задачи является разработка новых конструктивных решений каменно-набросных плотин с массивными противofильтрационными элементами (ПФЭ) из негрунтовых материалов. В качестве последних предлагаются использовать материалы на основе цемента: бетон и различные грунтоцементные смеси.

Существуют различные варианты использования в грунтовых плотинах массивных ПФЭ из цементосодержащих материалов [1]. Однако, опыт их применения отсутствует, они являются лишь перспективными разработками (часто для условий строительства Канкунской плотины). Конструктивно массивные ПФЭ из цементосодержащих материалов представляют собой либо ядра (призмы), либо экраны.

Можно выделить следующие виды ПФЭ из цементосодержащих материалов.

1. *Массивные экраны из грунтоцементобетона (или «камнебетона»), используемые как способ повышения надёжности классических конструкций каменно-набросных с бетонным экраном.* Конструкция плотины с бетонным экраном и подэкрановой зоной из грунтоцементобетона была предложена Л.Н. Рассказовым [2] и развивается его последователями. Наши исследования НДС конструкции подобной плотины показали, что она обладает рядом недостатков [3]. В случае деформаций изгиба сложного характера в конструкции подэкрановой зоны и самого бетонного экрана могут возникать высокие растягивающие напряжения, которые приведут к нарушению их герметичности. А.С. Бестужева и Д. Гадай в результате исследований пришли к выводу о том, что для обеспечения прочности бетонного экрана верховая часть из грунтоцементобетона должна быть очень широкой и занимать не менее 30 % от объёма плотины [4; 5]. В этом случае применение массивного экрана из грунтоцементобетона становится экономически неэффективным. По этой причине коллективом с участием автора было предложено обеспечивать герметичность массивного грунтоцементобетонного экрана не с помощью бетонного экрана, а путём покрытия эластичной геомембраной [6; 7].

2. *Инъекционные завесы (ядра)*, которые выполняются путём цементации крупнообломочных грунтов. В [8] нами было исследовано НДС конструкции плотины с массивной многоярусной диафрагмой. Было показано, что прочность инъекционного ядра может быть обеспечена лишь при использовании для инъектирования глиноцементобетонных растворов, обеспечивающих уменьшение снижения его жёсткости. В [9; 10] предлагаются конструкции с комбинированным ПФЭ, частью которой является инъекционная завеса.

3. *Массивные ядра из укатанного бетона*. В Китае была реализована конструкция плотины Qixue высотой 164 м, предусматривающая выполнение ПФЭ в верхней части плотины в виде асфальтобетонной диафрагмы, а в нижней части – в виде бетонного массива [11]. Строительство этой плотины было завершено только в 2017 г., но её проект послужил основой для разработки во ВНИИГ аналогичных вариантов для применения в Канкунской плотине [1].

В 2010 г. Ф.В. Корчевским был предложен вариант конструкции сверхвысокой плотины с бетонным ядром на всю высоту [12]. Конструкция предусматривает разрезку бетонного ядра горизонтальными швами на отдельные блоки, а также устройство противоточной экранной из асфальтобетона. Однако исследование автора [13] показало недостаточную надёжность такой конструкции. В ней возникают высокие растягивающие напряжения.

Тем не менее, разрабатываются и иные варианты конструкции сверхвысокой плотины с бетонным ядром. Например, Л.Н. Рассказовым было предложено выполнять ПФЭ в виде асфальтобетонной диафрагмы, окружённой инъекционной завесой [14].

А специалистами ВНИИГ была предложена конструкция ПФЭ, совмещающего в себе бетонное ядро (центральную бетонную призму) и асфальтобетонную диафрагму. Она предусматривает, что основная часть ПФЭ отделяется от фундамента горизонтальным скользящим швом. НДС данной конструкции исследуется в рассматриваемой статье.

Материалы и методы

Исследование предложенной конструкции ПФЭ проводилось для плотины Канкунской ГЭС, которая имеет высоту 235 м. Принималось, что массивная центральная бетонная призма (ЦБП) или ядро может быть выполнено из укатанного бетона или грунтоцементобетона. Грунтоцементобетон представляет собой каменную наброску, упрочнённую пролитым цементом.

Конструкция ЦБП имеет несимметричную форму, её ширина поверху составляет 8,8 м, а понизу – 89,5 м. Она заглублена в скальное основание на 15 м в виде фундаментной плиты с зубом. От фундамента основной объём ядра отделён горизонтальным швом с битумным заполнением. Внутри ЦБП на высоту 232 м (выше дна) выполняется асфальтобетонная диафрагма (АФД), её толщина поверху составляет 1,2 м, понизу – 2,7 м. На самой нижней отметке диафрагма удалена от напорной грани ЦБП на 26,3 м.

Исследование НДС плотины проводилось методом конечных элементов с помощью вычислительной программы, составленной к.т.н. Саиновым М.П. [15]. Конечно-элементная модель включает в себя как саму плотину, так и блок скального основания глубиной 150 м.

В модели 1408 конечных элементов (рис. 1). Для моделирования возможности проявления нелинейных эффектов (проскальзывание, отлипание) на контактах между элементами конструкции плотины использовались контактные конечные элементы. Они устраивались между элементами конструкции ядра с телом плотины, с диафрагмой, со скальным основанием, а также моделировали горизонтальный шов. Все конечные элементы модели имеют квадратичную степень аппроксимации перемещений, что позволило повысить точность расчётов. Общее количество степеней свободы в модели составило 7944.

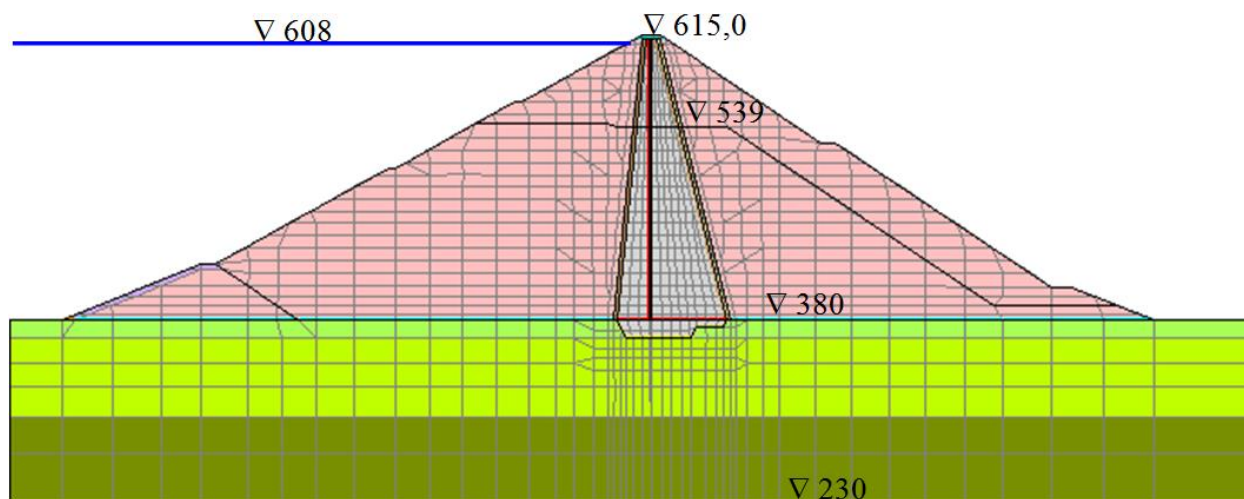


Рисунок 1. Конечно-элементная модель рассматриваемой конструкции плотины (составлена автором)

Расчёт НДС проводился на нагрузки от собственного веса и давления воды на ЦБП. На подошву ядра было приложено фильтрационное и взвешивающее противодействие. Предусматривалось, что в скальном основании выполняется инъекционная завеса.

При исследованиях НДС плотины была воспроизведена последовательность возведения плотины и наполнения водохранилища. Расчётная схема поэтапности принималась аналогично принятой в [13]. Принималось, что плотина возводится в две очереди. Первая очередь имеет высоту 162 м. Учитывая, что район Канкунской ГЭС характеризуется суровыми климатическими условиями, принималось, что бетонное ядро возводится только в тёплое время года, а каменная наброска отсыпается в любое время. Ядро возводится в течение 7 тёплых сезонов.

Для моделирования деформирования бетона использовалась упругая модель, а для моделирования остальных материалов (скального основания, грунтов и асфальтобетона плотины) – линейная модель с возможностью потери прочности на растяжение. Деформируемость описывалась модулем линейной деформации E и коэффициентом Пуассона ν .

Для моделирования контактов использовалась модель с возможностью потери прочности на растяжение или сдвиг. Деформируемость контакта описывалась нормальной E_n и касательной E_t жёсткостью. Для описания прочности на сдвиг использовалась модель Кулона с двумя параметрами: угол внутреннего трения φ и удельное сцепление c .

Расчёты проводились для трёх вариантов деформативных свойств каменной наброски и двух вариантов свойств материала ЦБП. Модули деформации E_k каменной наброски соответствуют широкому диапазону деформируемости каменной наброски, который установлен в [16] по результатам натурных измерений реальных плотин [17; 18]. В качестве материала ЦБП рассматривались бетон (вариант № А) и грунтоцементобетон (вариант № В).

Всего были рассмотрены 6 вариантов сочетаний свойств каменной наброски и материала ЦБП. Они маркируются двойным обозначением, например, № 2А. Цифра обозначает номер варианта свойств каменной наброски, а буква – вариант материала бетонного ядра.

Расчётные деформативные свойства материалов указаны в табл. 1, а контактов – в табл. 2.

Таблица 1

Параметры модели материалов сплошной среды

Наименование материала	E [МПа]	ν	плотность ρ [т/м ³]
Каменная наброска (вариант №1)	84	0,25	2,0
Каменная наброска (вариант №2)	168	0,25	2,0
Каменная наброска (вариант №3)	332	0,25	2,0
Бетон (вариант №А)	20000	0,2	2,4
Грунтоцементобетон (вариант №В)	5000	0,2	2,4
Песчаный грунт переходных зон	58	0,25	1,70
Асфальтобетон	25	0,4	2,35
Верхний слой скального основания	3500	0,25	2,55
Средний слой скального основания	5000	0,25	2,55
Нижний слой скального основания	10000	0,25	2,55

Таблица 2

Параметры модели контактов

Положение контакта	E_n , МПа/м	E_t , МПа/м	φ	c , кПа
бетон – камень, скала – камень	2000	800	40°	0
бетон – асфальтобетон	2000	800	22°	30
бетон – песок	2000	800	36°	0
шов в бетонной конструкции	10000	2000	42°	30
бетон – скала	10000	2000	42°	280

При оценке работоспособности рассматриваемой конструкции плотины принималось, что для создания ЦБП в варианте № А используется бетон класса В 20. В соответствии с СП 41.13330.2012¹ расчётное сопротивление бетона по предельным состояниям первой группы составляет: на сжатие 11,7 МПа и на растяжение 0,9 МПа. Прочность грунтоцементобетона на сжатие принималась равной 2,5 МПа.

Результаты

Результаты расчётов НДС плотины показаны на рис. 2–6 и в табл. 3 для момента завершения наполнения водохранилища до НПУ.

Расчёты показали, что плотина, в т. ч. центральная бетонная призма (ЦБП), испытывает значительные горизонтальные смещения в сторону нижнего бьефа. Своего максимума они достигают на гребне плотины первой очереди. При этом величина максимального смещения ЦБП не пропорциональна значению модуля линейной деформации каменной наброски. Она составила: в варианте № 1А – 94 см (рис. 2), в варианте № 2А – 66 см, в варианте № 3А – 51 см (рис. 3). Это говорит о том, что несмотря на наличие горизонтального шва ЦБП почти самостоятельно воспринимает гидростатическое давление. Чем выше деформируемость каменной наброски, тем бóльшая доля гидростатического давления воспринимается ЦБП и тем меньшая доля передаётся каменной наброске.

Чем выше жёсткость материала ЦБП, тем ниже смещения плотины. В вариантах серии «В» (грунтоцементобетон) смещения на 20÷30 % больше, чем в вариантах серии «А» (бетон). В варианте № 1В максимальное смещение ЦБП составило 113 см, в варианте № 2В – 83,3 см, в варианте № 3В – 65,4 см (табл. 3).

¹ СП 41.13330.2012. Бетонные и железобетонные конструкции гидротехнических сооружений. Актуализированная редакция СНиП 2.06.08-87. – М.: ФАУ «ФЦС», 2012. – 67 с.

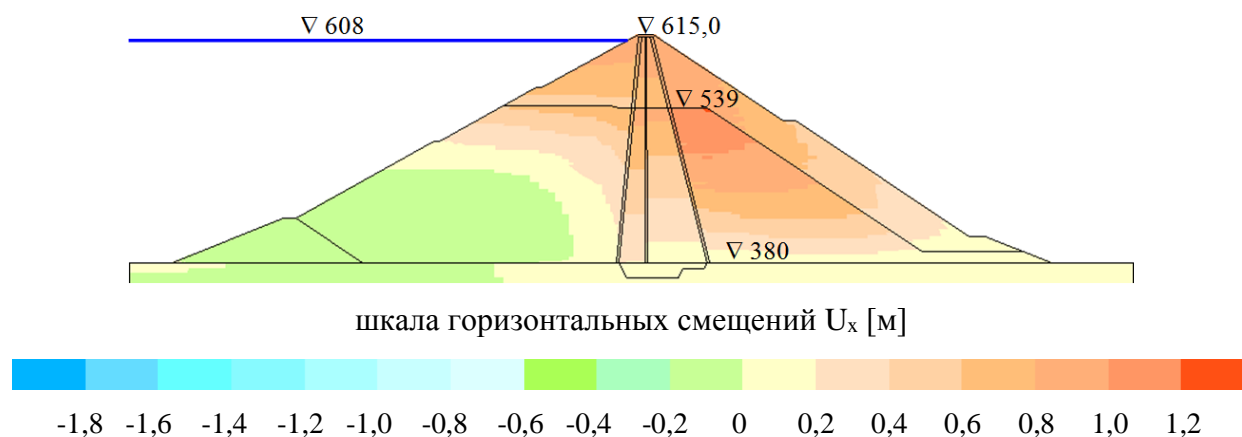


Рисунок 2. Смещения плотины в варианте № 1А (получены автором)

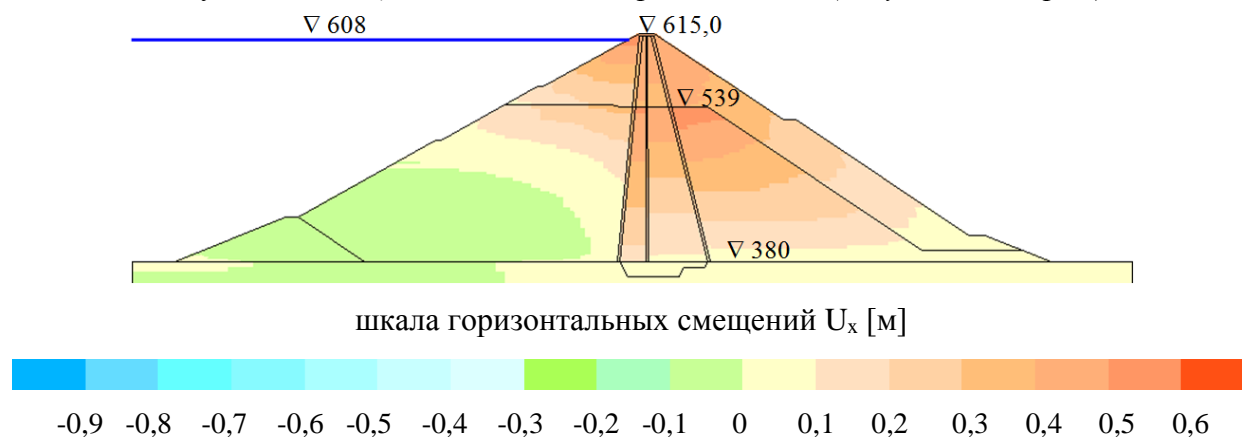


Рисунок 3. Смещения плотины в варианте № 3А (получены автором)

Исследования показали, что наличие в плотине массивной жёсткой конструкции оказывает сильное влияние на НДС каменной наброски. В зоне примыкания к бетонному ядру в каменной наброске возникают значительные касательные напряжения. На определённых этапах происходит проскальзывание тела плотины относительно бетонного ядра. Тем не менее, наблюдается ярко выраженный эффект «зависания» каменной наброски на бетонном ядре (ЦБП).

Эффект «зависания» иллюстрируется тем фактом, что зона максимальных осадок низовой упорной призмы располагается на отдалении 30÷50 м от бетонного ядра (рис. 4, 5). Максимальная осадка низовой упорной призмы составила 165 см в варианте № 1А (рис. 4), в варианте № 2А – 84 см, в варианте № 3А – 45 см (рис. 5).

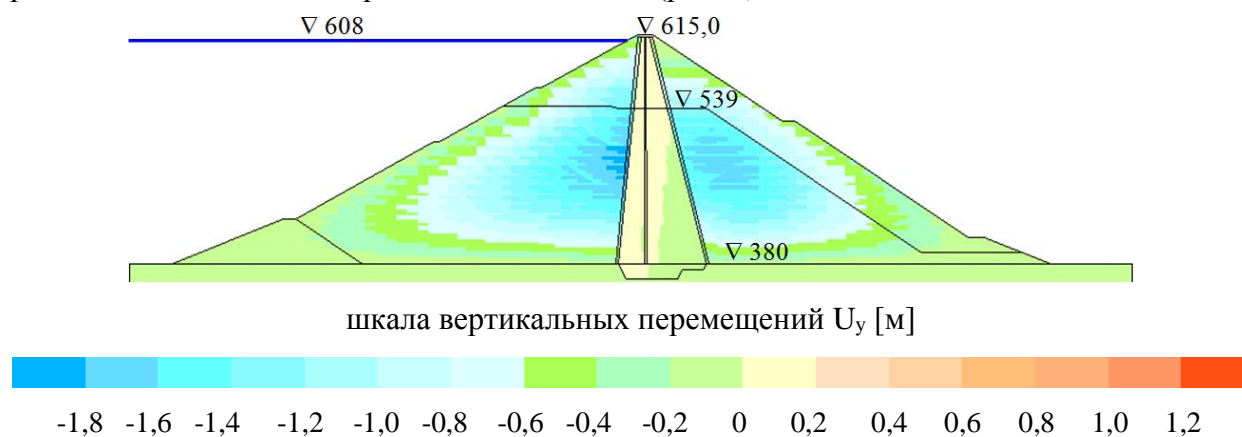


Рисунок 4. Вертикальные перемещения плотины в варианте № 1А (получены автором)

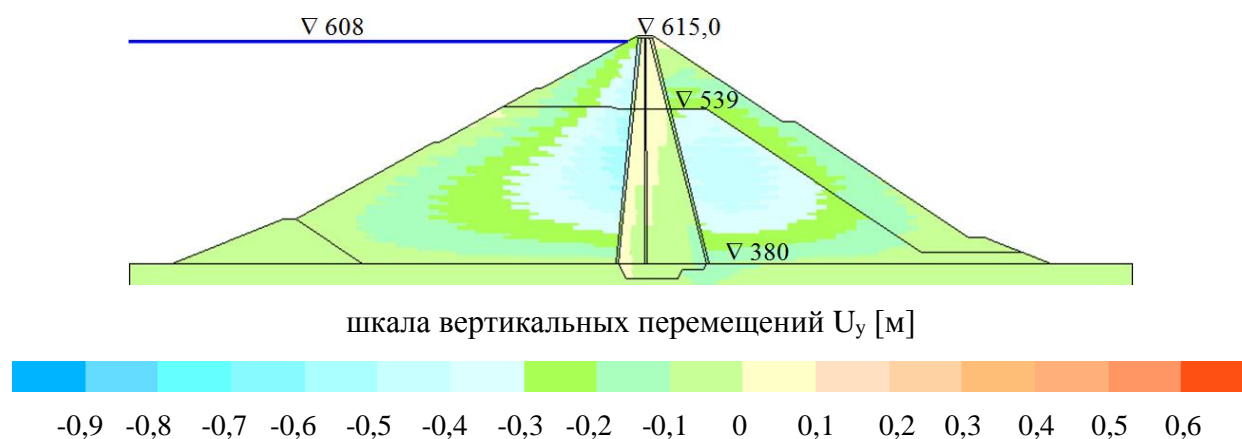


Рисунок 5. Вертикальные перемещения плотины в варианте № 3А (получены автором)

Эффект «зависания» каменной наброски также хорошо заметен на распределении вертикальных напряжений σ_y в теле плотины: вблизи ЦБП происходит снижение сжатия по σ_y (рис. 6, 7).

В верховой упорной призме из-за больших горизонтальных смещений ЦБП нормальные напряжения σ_x очень малы (рис. 8, 9). Это ведёт к уменьшению сдвиговой прочности на контакте между ЦБП и верховой упорной призмой. Из-за этого происходит проскальзывание на контакте. За счёт этого максимальные осадки верховой призмы больше, чем в низовой. В варианте № 1А максимальное значение осадок верховой призмы составило 183 см (рис. 4), в варианте № 2 – 105 см, в варианте № 3 – 53 см (рис. 5).

Сравнение рис. 8 и 9 показывает, что чем меньше соотношение жёсткости материала ЦБП и каменной наброски, тем бóльшая доля гидростатического давления передаётся на низовую упорную призму. В варианте № 3А (рис. 9) уровень сжатия по напряжениям σ_x больше, чем в варианте № 1А (рис. 8).

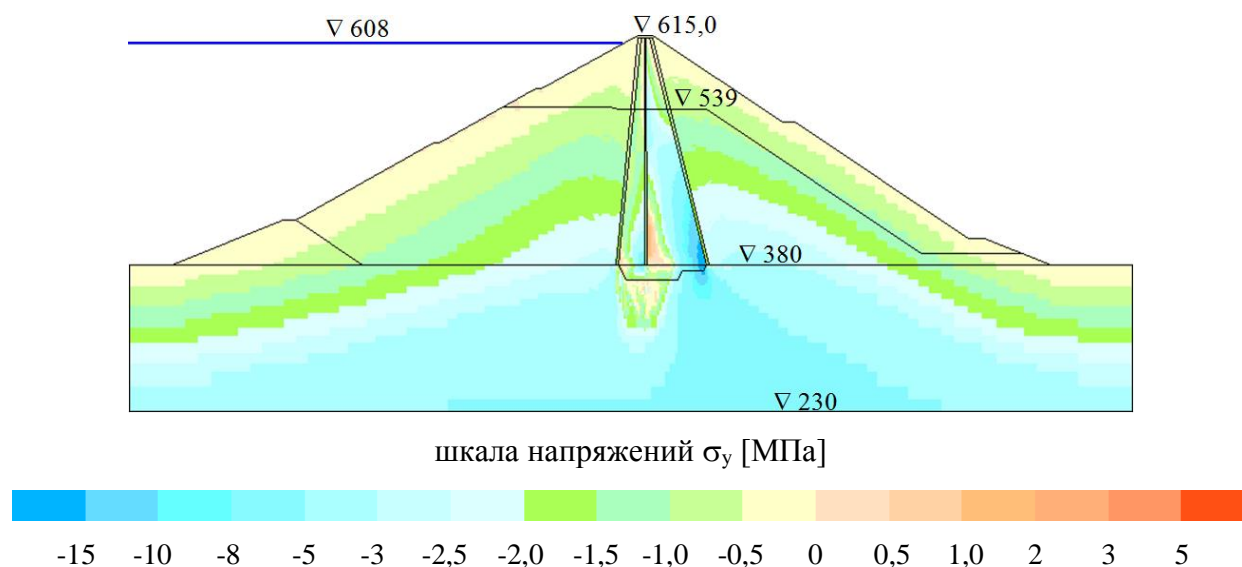


Рисунок 6. Вертикальные нормальные напряжения σ_y в плотине варианта № 1А (получены автором)

В условиях значительных перемещений ЦБП (ядро) находится в неблагоприятном напряжённом состоянии. Её НДС характеризуется наличием деформаций изгиба, а также сжимающей продольной силы.

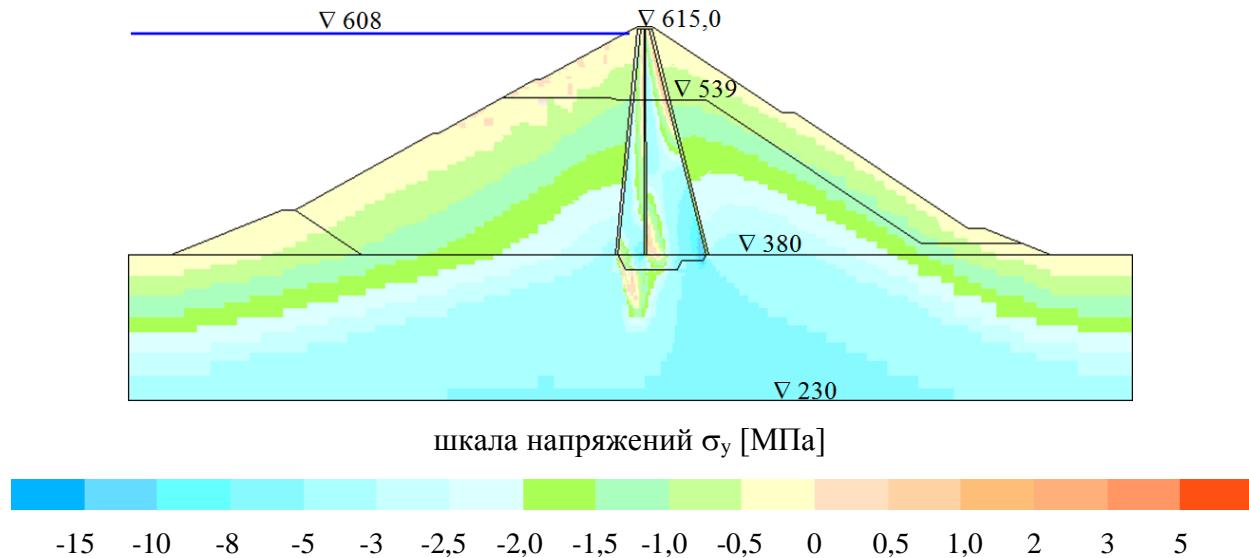


Рисунок 7. Вертикальные нормальные напряжения σ_y в плотине варианта № 3А (получены автором)

Сжимающая вертикальная (продольная) сила возникает в ЦБП от осадок каменной наброски и передаётся за счёт сил трения.

Деформации изгиба ЦБП имеют сложный характер. Верхняя часть ЦБП (выше $\nabla 497$ м) испытывает изгиб в сторону нижнего бьефа, а нижняя – в сторону верхнего бьефа.

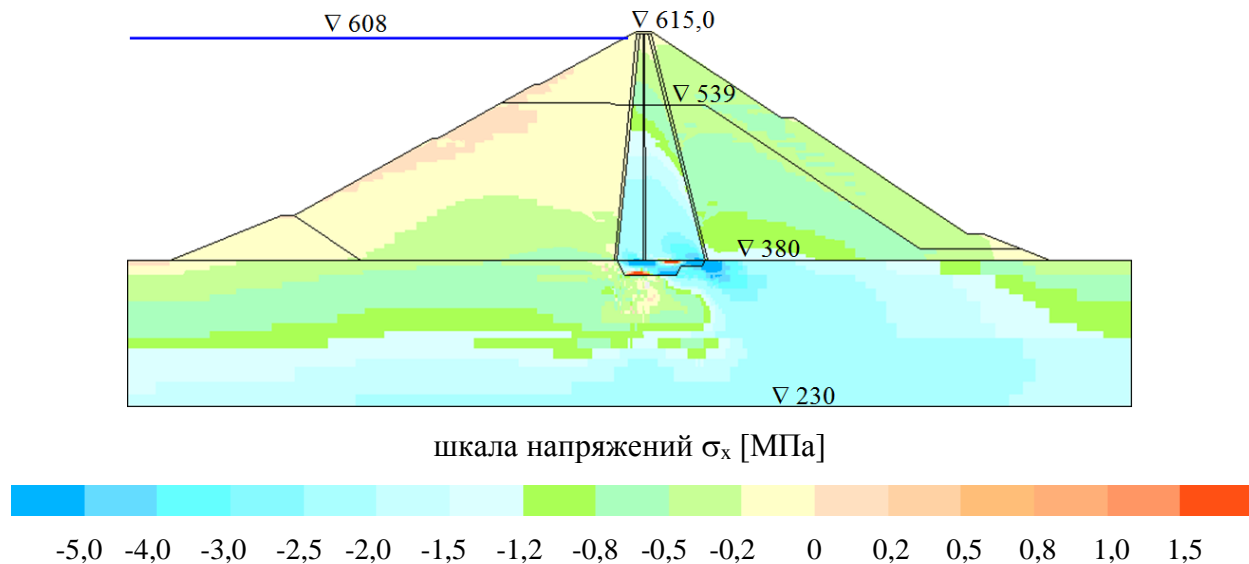


Рисунок 8. Горизонтальные нормальные напряжения σ_x в плотине варианта № 1А (получены автором)

Из-за разделения асфальтобетонной диафрагмой верховая и низовая части ЦБП работают отдельно друг от друга. Наличие «мягкой» (из асфальтобетона) прослойки между верховой и низовой частями ЦБП, а также наличие горизонтального шва позволяет им иметь разные перемещения. Расчёты зафиксировали, что низовая часть ЦБП сдвигается больше, чем верховая. В варианте № 1А разница смещений (по подошве) составляет 9 см, а осадок – 7,5 см.

Таким образом, благодаря наличию АФД НДС частей ЦБП формируется отдельно. Зафиксировано, что в верховой и низовой частях ЦБП различаются величины вертикальной силы – в низовой части сжимающая сила существенно выше, чем в верховой. Это объясняется

тем, что на контакте верховой части ЦБП с каменной наброски происходит проскальзывание, а на контакте низовой части ЦБП – нет.

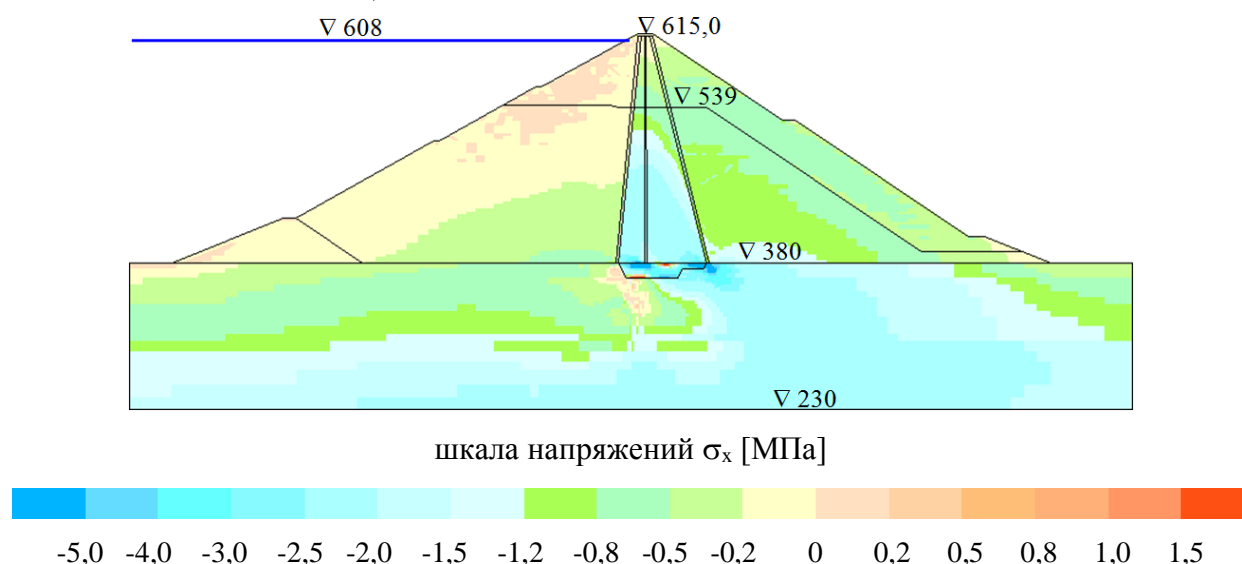


Рисунок 9. Горизонтальные нормальные напряжения σ_x в плотине варианта № 3А (получены автором)

По-разному, обе части воспринимают и деформации изгиба. Т. к. низовая часть имеет бóльшую толщину, чем верховая, то вызванные изгибом деформации-удлинения в ней выражены сильнее.

Деформации изгиба приводят к возникновению в ЦБП растягивающих напряжений σ_y , а также к раскрытию горизонтального шва, отделяющего её основную часть от фундаментной плиты. Растягивающие напряжения возникают в любом из рассмотренных вариантов (рис. 10). Можно отметить возможность образования в ЦБП трёх зон растяжения:

- Зона 1 располагается на низовой грани верхней половины низовой части ЦБП (рис. 10а–в).
- Зона 2 располагается на верховой грани нижней половины верховой части ЦБП.
- Зона 3 располагается на верховой грани нижней половины низовой части ЦБП.

Наиболее опасной является зона 3, в ней возникают наиболее значительные растягивающие напряжения σ_y (табл. 3). Однако при соблюдении определённых условий можно обеспечить прочность материала ЦБП на растяжение. В вариантах серии «А» (бетон) прочность на растяжение будет обеспечена при модуле каменной наброски $E_k > 350$ МПа, а в вариантах серии «В» при $E_k > 170$ МПа. Кроме того, образование трещин в низовой части ЦБП не вызовет разгерметизации ПФЭ, т. к. она защищена асфальтобетонной диафрагмой.

Таблица 3

Параметры НДС центральной бетонной призмы

Материал ЦБП	Бетон			Грунтоцементобетон		
	1А	2А	3А	1В	2В	3В
Максимальное смещение [см]	93,8	66,3	51,1	113	83,3	65,4
Максимум растягивающего напряжения σ_y [МПа] в нижней половине (зона 3)	2,4	1,8	1,0	1,3	0,9	0,6
Максимум сжимающего напряжения σ_y [МПа] в нижней части (зона 3)	25,2	19,7	15,4	20,9	15,9	13,2

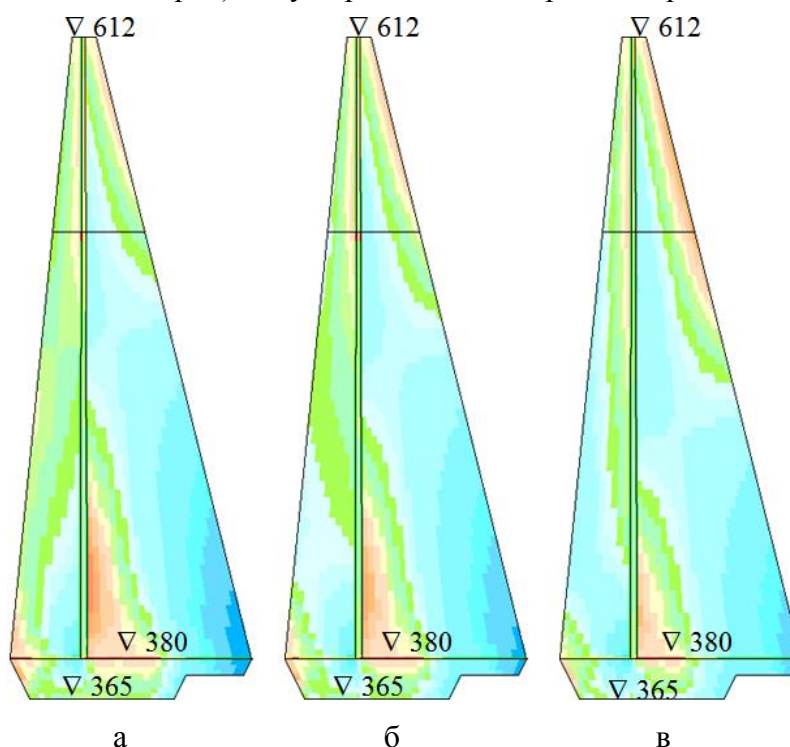
Материал ЦБП	Бетон			Грунтоцементобетон		
Максимум растягивающего напряжения σ_y [МПа] в верхней половине (зона 1)	0,5	0,8	1,4	0,3	0,2	0,2
Максимум растягивающего напряжения σ_x [МПа] в фундаментной плите (зона 1)	6,8	5,7	3,5	2,3	0,8	0,1
Максимум сжимающего напряжения σ_x в фундаментной плите [МПа]	24,1	18,4	15,9	16,8	12,2	12,4
Длина раскрытия верховой части шва [м]	8,3	5,5	-	-	-	-
Длина раскрытия низовой части шва [м]	27,5	22,9	16,2	18,2	10,6	10,6
Максимальное раскрытие [мм] низовой части шва	48	26	15,8	39	12,5	12,5
Длина раскрытия контакта с основанием [м]	36,8	28,4	15,9	24,3	20,5	15,9
Максимальное раскрытие [мм] контакта с основанием	141	120	105	190	150	143

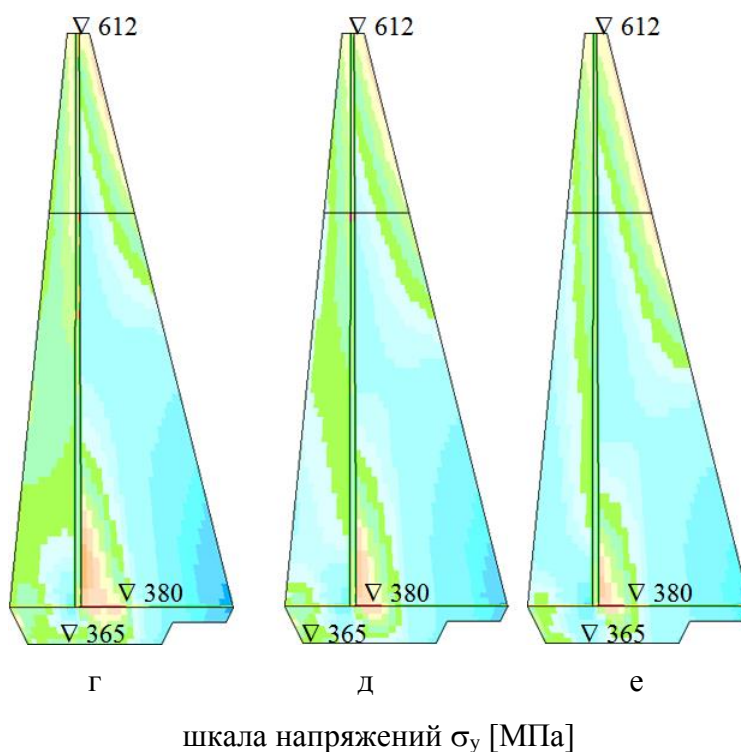
Таким образом, разделение ЦБП на две с помощью АФД оказывает благоприятное влияние на её НДС. При необходимом качестве уплотнения каменной наброски возможно обеспечение надёжности основной части ПФЭ. Это выгодно отличает рассмотренную конструкцию ЦБП от предложенной Ф.В. Корчевским [12].

Тем не менее, НДС рассматриваемой конструкция ПФЭ характеризуется рядом неблагоприятных эффектов.

Во-первых, в ЦБП возникают значительные сжимающие напряжения. В вариантах серии «А» сжимающие напряжения в большей части конструкции, за исключением зоны концентрации, не превышают прочность бетона на сжатие (11,5 МПа). В вариантах серии «В» сжимающие напряжения многократно превышают прочность грунтоцементобетона на сжатие (2,5 МПа).

Во-вторых, это раскрытие горизонтального шва между основной частью ЦБП и фундаментной плитой. Во всех вариантах шов раскрывается более, чем на 10 м (табл. 3, рис. 10). Это раскрытие может представлять большую опасность в случае проникновения воды с высоким напором. Можно предполагать, что устройство асфальтобетонной диафрагмы защитит контактный шов от проникновения воды, но наблюдаемые большие раскрытия шва (несколько десятков миллиметров) могут представлять серьёзный риск.





-15 -10 -8 -5 -3 -2,5 -2,0 -1,5 -1,0 -0,5 0 0,5 1,0 1,5 2 2,5

Красной линией показана зона раскрытия шва, зелёной линией – зона сохранения прочности шва

Рисунок 10. Вертикальные нормальные напряжения σ_y в центральной бетонной призме: а – № 1А; б – № 2А; в – № 3А; г – № 1В; д – № 2В; е – № 1В (получены автором)

В-третьих, неблагоприятное НДС имеет фундаментная плита ЦБП. Через трение по горизонтальному шву от основной части ЦБП на фундаментную плиту передаются значительные касательные (горизонтальные) усилия. Они вызывают появление в фундаментной плите растягивающих напряжений. Кроме того, фундаментная плита испытывает деформации изгиба. Во всех вариантах прочность материала фундаментной плиты нарушается либо на сжатие, либо на растяжение (табл. 3).

В-четвёртых, опасность представляет отрыв фундаментной плиты ЦБП от основания из-за расклинивающего действия фильтрационного противодействия. Во всех вариантах оно распространяется до оси цементационной завесы в скальном основании.

Данные явления создают риск развития процессов потери прочности и разгерметизации противofильтрационной защиты. Он имеется во всех вариантах. Поэтому рассматриваемую конструкцию нельзя считать надёжной.

Выводы

1. Рассмотренная конструкция с массивной центральной бетонной упорной призмой является более работоспособной конструкцией, чем конструкция с бетонным ядром, предложенная Ф.В. Корчевским. Это объясняется тем, что она имеет простую и несимметричную форму, а также более массивная. Благодаря наличию асфальтобетонной диафрагмы обеспечивается герметичность противofильтрационного элемента.

2. Однако рассмотренная конструкция не обладает необходимым уровнем надёжности. При горизонтальных смещениях в ЦБП возникают растягивающие напряжения, а сама она отрывается от основания. Раскрытие горизонтального шва на подошве несёт основную опасность для работоспособности конструкции ЦБП.

3. От осадок окружающего грунта на ЦБП испытывает вертикальные силы, вызывающие в ней значительные сжимающие напряжения. Величина этих напряжений не пропорциональна жёсткости материала ЦБП, а в основном определяется сопротивлением сдвигу на контакте ЦБП с телом плотины. По этой причине для улучшения НДС ЦБП требуется выполнять её из прочного материала и уменьшать трение на контакте ЦБП с телом плотины.

4. Используемые в рассмотренной конструкции конструктивные решения могут быть использованы в дальнейшем при разработке новых конструкций грунтовыми плотинами с массивными противофильтрационными элементами из цементосодержащих материалов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Саинов М.П., Котов Ф.В. Сравнение вариантов конструкции высокой каменной плотины в условиях Якутии // Вестник МГСУ. 2011. выпуск № 5. С. 30–35.
2. Рассказов Л.Н., Саинов М.П. Численные исследования надёжности высокой каменной плотины с железобетонным экраном и подэкрановой зоной из грунтоцементобетона // Гидротехническое строительство. 2012. № 2. С. 30–34.
3. Саинов М.П., Котов Ф.В. Разработка и обоснование конструкции каменной плотины с грунтоцементобетонным экраном для условий Крайнего Севера // Вестник МГСУ. 2013. № 3. С. 187–195.
4. Bestuzheva, A.S., Gadai, D.V. The search for the methods of factor analysis for an optimal design of earth-fill dams with stone-concrete support zone. Power Technology and Engineering. 2017. Vol.51. No.4. Pp. 385–389.
5. Bestuzheva, A.S., Gadai, D.V. Search for optimal composition and an investigation of special material for the near-face zone of a dam with reinforced concrete face. Power Technology and Engineering. 2019. Vol.52. No.6. Pp. 660–668.
6. Саинов М.П., Котов Ф.В. Напряженно-деформированное состояние двухслойного экрана каменнонабросной плотины, выполненного из железобетона и грунтоцементобетона // Вестник МГСУ. 2017. № 5. С. 506–511.
7. Саинов М.П., Анискин Н.А., Котов Ф.В. Каменная плотина с внутренним противофильтрационным экраном из грунтоцементобетона. Патент на изобретение RU 2523503 C1, 20.07.2014. Заявка № 2012158057/13 от 28.12.2012.
8. Саинов М.П., Котов Ф.В. Напряженно-деформированное состояние и работоспособность высокой грунтовой плотины с инъекционной завесой // Инженерно-строительный журнал. 2017. № 1(69). С. 44–55.
9. Заирова В.А., Филиппова Е.А., Орищук Р.Н., Созинов А.Д., Радченко С.В. Выбор противофильтрационного устройства в вариантах плотин Канкунского гидроузла // Гидротехническое строительство. 2010. № 2. С. 8–13.
10. Саинов М.П., Котов Ф.В., Назаров Н.В. Работоспособность сверхвысокой каменно-набросной плотины с противофильтрационным элементом в виде

- комбинации железобетонного экрана и инъекционной завесы // Инженерно-строительный журнал. 2018. № 3(79). С. 77–85.
11. Радченко В.Г., Абрамова Е.В. Самая высокая в мире каменно-набросная плотина с асфальтобетонной диафрагмой // Гидротехника. XXI век. 2018. № 2(34). С. 8–11.
 12. Корчевский Ф.В., Малышев А.М., Количко А.В., Орехов В.В. Канкунская ГЭС на р. Тимптон в Республике Саха (Якутия): вариант грунтовой плотины с ядром из укатанного бетона // Гидротехническое строительство. 2010. № 2. С. 11–22.
 13. Котов Ф.В. Работоспособность сверхвысокой каменно-набросной плотины с противофильтрационным элементом в виде бетонного ядра // Интернет-журнал Науковедение. 2017. Т.9. № 6. С. 75.
 14. Рассказов Л.Н., Смирнова М.В. К выбору типа грунтовой плотины // Гидротехническое строительство. 2014. № 2. С. 20–23.
 15. Саинов М.П. Вычислительная программа по расчету напряженно-деформированного состояния грунтовых плотин: опыт создания, методики и алгоритмы // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. 2013. Volume 9. Issue 4. С. 208–225.
 16. Сорока В.Б., Саинов М.П., Королев Д.В. Каменно-набросные плотины с железобетонным экраном: опыт исследований напряженно-деформированного состояния // Вестник МГСУ. 2019. Т.14. Вып.2. С. 207–224.
 17. Park, H.G., Kim, Y.-S., Seo, M.-W., Lim, H.-D. Settlement Behavior Characteristics of CFRD in Construction Period. Case of Daegok Dam // Journal of the Korean Geotechnical Society. September 2005. Vol.21. No.7. Pp. 91–105.
 18. Wen L., Chai J., Xu Z., Qin Y., Li Y. Junrui C. A statistical review of the behaviour of concrete face rockfill dams based on case histories. A statistical review of the behaviour of concrete-face rockfill dams based on case histories // Géotechnique. 2018. Vol.68. No.9. Pp. 749–771.

Kotov Filipp Viktorovich

Moscow state university of civil engineering (national research university), Moscow, Russia
E-mail: filipp_net@mail.ru

Workability of a rockfill dam with a central concrete prism and an internal asphalt concrete diaphragm

Abstract. Introduction. At present there considered various structural alternatives of embankment dams with massive seepage-control elements made of materials containing cement. This article deals with stress-strain state (SSS) of an ultra-high embankment dam with massive central concrete prism (concrete core) divided into two parts by an asphalt concrete diaphragm. The main part of the concrete prism is separated from the foundation by a horizontal joint.

Materials and methods. Studies were conducted with the aid of finite elements based on the example of a 235 m high dam. SSS analysis considered the sequence of dam construction and reservoir impoundment. Investigation was conducted for two alternatives of a rigid core material (concrete or soil-cement concrete) and three alternatives of rockfill deformation. Totally 6 alternatives of combinations of rockfill and core material deformation properties were considered.

Results. SSS analyses showed that in the considered structural design the asphalt concrete diaphragm acts as a wide vertical joint. The cutting joint provides relative independence of deformations of two parts of the central concrete prism. Nevertheless, in the structure of the central concrete prism there may occur high tensile and compressive stresses creating the risk of material strength loss. Ever more danger for structural safety is presented by opening of the joint between the main part of the concrete prism and its foundation, between the foundation and the rockfill base. They occur on a considerable length.

Conclusions. The considered structural design of a dam with a central concrete prism has a number of disadvantages which does not permit recommending it for use in ultra-high dams. However, the structural solutions used in it, allow solving the technical problem in providing water tightness of a massive rigid seepage-control structure. They may be used in future at elaboration of new structural designs of embankment dams with massive seepage-control elements made of materials containing cement.

Keywords: rockfill dam; massive seepage-control element; concrete core; asphalt concrete diaphragm; stress-strain state; soil-cement concrete