

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

2020, №3, Том 12 / 2020, No 3, Vol 12 <https://esj.today/issue-3-2020.html>

URL статьи: <https://esj.today/PDF/45SAVN320.pdf>

Ссылка для цитирования этой статьи:

Котов Ф.В., Саинов М.П. Роль контактного взаимодействия в формировании напряжённо-деформированного состояния грунтовых плотин с бетонным экраном и жёсткой подэкрановой зоной // Вестник Евразийской науки, 2020 №3, <https://esj.today/PDF/45SAVN320.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ.

For citation:

Kotov F.V., Sainov M.P. (2020). Role of contact interaction in formation of stress-strain state of embankment dams with concrete faces and rigid supporting zones. *The Eurasian Scientific Journal*, [online] 3(12). Available at: <https://esj.today/PDF/45SAVN320.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: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=675643

Саинов Михаил Петрович

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

Доцент кафедры «Гидравлики и гидротехнического строительства»

Кандидат технических наук, доцент

E-mail: mp_sainov@mail.ru

РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=427608

**Роль контактного взаимодействия в формировании
напряжённо-деформированного состояния грунтовых
плотин с бетонным экраном и жёсткой подэкрановой зоной**

Аннотация. Введение. Ряд авторов в качестве способа повышения надёжности высоких каменно-набросных плотин с бетонным экраном предлагают выполнять подэкрановую (опорную) зону из грунтоцементобетона (укатанного) бетона. Считается, что, уменьшив прогибы экрана, можно обеспечить его прочность. Однако авторы идеи исходят из того, что экран работает только на изгиб и не учитывают, что опасность представляют также силы, действующие вдоль экрана, а также то, что сама жёсткая подэкрановая зона может потерять свою прочность.

Материалы и методы. Для проверки выводов о благоприятном влиянии жёсткой подэкрановой зоны на надёжность бетонного экрана были проведены исследования напряжённо-деформированного состояния (НДС). Расчёты проводились методом конечных элементов. Их особенностью являлось то, что были учтены особенности контактного взаимодействия жёсткой подэкрановой зоны с основанием и экраном, которые не учитывают другие авторы. Исследования проводились на примере плотины высотой 100 м с учётом последовательности возведения плотины и наполнения водохранилища. Выполнялось сравнение НДС бетонного экрана для варианта традиционной конструкции плотины и варианта

с широкой подэкрановой зоной. Во втором варианте ширина подэкрановой зоны принималась равной 37 м.

Результаты. Результаты численного моделирования показали, что устройство широкой и жёсткой подэкрановой зоны действительно уменьшает прогибы экрана на 30 %, однако это не влечёт за собой улучшение НДС экрана. Изгиб подэкрановой зоны вызывает появление в экране значительных растягивающих продольных сил и напряжений. Избежать потери прочности экрана можно путём снижения трения между экраном и подэкрановой зоной.

Выводы. Трение между экраном и подэкрановой зоной играет важнейшую роль в формировании НДС бетонного экрана. Однако даже при наличии скользящего слоя НДС бетонного экрана, расположенного на жёсткой подэкрановой зоне, является менее благоприятным, чем в традиционной конструкции плотины. Основным способом обеспечения прочности экрана является снижение деформируемости каменной наброски.

Ключевые слова: каменно-набросная плотина с бетонным экраном; напряжённно-деформированное состояние; подэкрановая зона; грунтоцементобетон; прочность

Введение

В настоящее время единственным типом грунтовых плотин с негрунтовым противодиффузионным элементом (ПФЭ), пригодным для строительства гидроузлов сверхвысокого напора (более 150 м) являются каменно-набросные плотины с бетонным экраном (КНПБЭ). Вследствие наличия на ряде КНПБЭ ситуаций с повреждением бетонных экранов (БЭ) [1; 2] актуальным является вопрос о повышении надёжности этих ПФЭ.

Некоторые российские исследователи, Рассказов Л.Н. [3], Ляпичев Ю.П. [4], Бестужева А.С., Гадай Д. [5–7] и др., предлагают способ повышения безопасности БЭ, заключающийся в устройстве подэкрановой (или опорной) зоны из жёсткого материала. В качестве такого материала может быть использован щебенистый грунт, упрочнённый цементным раствором, который называют «камнебетоном» или грунтоцементобетоном, или же укатанный бетон.

Следует подчеркнуть, что предложенный способ не является новым. Например, в плотине Bovilla (1996 г.) под полимеро-бетонным экраном выполнена подготовка [8] из низкоцементного бетона. С 2000 г. практически во всех КНПБЭ поверхность верхового откоса под экраном формируется из бордюрных блоков, выполненных из малоцементного бетона [9]. Такая конструкция КНПБЭ к настоящему времени стала уже традиционной.

Отличием предложений авторов [3–7] является то, что они предлагают выполнять жёсткой подэкрановую подготовку более широкой. Ляпичев Ю.П. в [4] говорит о том, что им «...разработан новый эффективный метод снижения на 40–55 % прогиба экрана путем включения опорной зоны УБ толщиной 6–3 м вместо верховой подэкрановой переходной зоны гравия» и что это «...новый эффективный метод повышения их безопасности...».

Авторы [4–7] для подтверждения своих теорий с помощью численного моделирования выполнили исследования напряжённно-деформированного состояния (НДС) конструкции плотины с БЭ, имеющей подэкрановую зону (ПЭЗ) из грунтоцементобетона. По их результатам ими были сделаны выводы о том, что устройство ПЭЗ не только позволит повысить безопасность КНПБЭ, но и улучшит НДС БЭ. В [7] Гадай Д. утверждает: «Упрочнённый цементно-песчаным раствором щебень, названный «камнебетоном», снижает деформируемость подэкрановой зоны, улучшая тем самым напряжённно-деформированное состояние экрана».

Однако выводы, сделанные в [4–7], могут быть подвергнуты сомнению или опровергнуты. Авторы данной статьи ведут полемику, которая отражена в работах [3; 10; 11].

Во-первых, нельзя согласиться с утверждением Ляпичева Ю.П. о значительном уменьшении прогиба экрана за счёт устройства относительно тонкой (3–5 % от высоты плотины), но жёсткой опорной плиты. Наши исследования показали, что опорная плита, как и БЭ, может лишь сглаживать прогибы экрана, но их величина в основном определяется деформациями каменной наброски тела плотины.

Во-вторых, в [3; 10] авторами статьи было показано, что устройство жёсткой подэкрановой зоны (ПЭЗ) может иметь негативные последствия для НДС БЭ. Оно может вызывать появление в нижней части БЭ значительных растягивающих продольных сил и привести к потере прочности бетона на растяжение. Это происходит в случае, если ПЭЗ является довольно массивной и опирается на скальное основание. В [3; 11] авторами статьи с целью снижения деформаций изгиба ПЭЗ было предложено опирать её на наклонную поверхность и обеспечить возможность её скольжение по шву для выравнивания прогибов. При этом ПЭЗ получается довольно узкой.

Результаты, полученные в [4–7] можно объяснить ошибками и неточностями, допущенными их авторами при выполнении численного моделирования НДС КНПБЭ. Рассмотрим их.

1. Указанные авторы не осуществляли детального моделирования работы самого экрана. Бестужева А.С. и Гадай Д. для моделирования экрана применяли простые конечные элементы, которые, как показано в работах [12; 13], не позволяют получить гладкие функции распределения напряжений в жёсткой и тонкостенной изгибаемой конструкции. А Ляпичев Ю.П. в исследованиях [4] вовсе не моделировал работу БЭ.

2. В состав конечно-элементной модели не включалось основание плотины, оно считалось абсолютно жёстким. Несмотря на то, что деформации скального основания действительно малы, не учёт его реальной жёсткости мог вызвать некоторое искажение в НДС грунтоцементобетонной ПЭЗ.

3. В исследованиях [3; 4; 10] не учитывалась возможность проявления нелинейных эффектов при контактом воздействии жёстких элементов конструкции между собой – контакты между ПЭЗ, БЭ и скальным основанием считались абсолютно прочными. Между тем, на контактах возможны такие эффекты как проскальзывание и отрыв. Из результатов натурных измерений известно, что периметральный шов, отделяющий экран от его основания, как правило, раскрывается.

Отдельно следует отметить, что в современных плотинах бетонный экран отделяется от бетонной подготовки слоем битумной эмульсии. Её назначение состоит в обеспечении движения БЭ относительно ПЭЗ. Наши исследования НДС КНПБЭ показали, что снижение контактного трения может играть существенную роль в формировании НДС БЭ [14]. Логично предположить, что на НДС плотин с ПЭЗ из грунтоцементобетона (ГЦБ) трение также будет играть большую роль. В работах [4–7; 10; 11] наличие скользящего слоя не учитывалась, поэтому для выявления роли трения требуются дополнительные исследования.

В данной статье описываются результаты исследования НДС каменно-набросной плотины с бетонным экраном и подэкрановой зоной из грунтоцементобетона с учётом особенностей контактного взаимодействия между ними, а также с основанием. Они позволяют дать оценку эффективности применения ПЭЗ из грунтоцементобетона.

Материалы и методы.

Расчёты проводились на примере абстрактной плотины высотой 100 м, рассмотренной Бестужевой А.С. и Гадаем Д. в своих исследованиях [5–7]. Откосы плотины выполнены с заложением 1,7. Бетонный экран плотины имеет переменную толщину: она изменяется от 1 м на гребне до 1,6 м у основания.

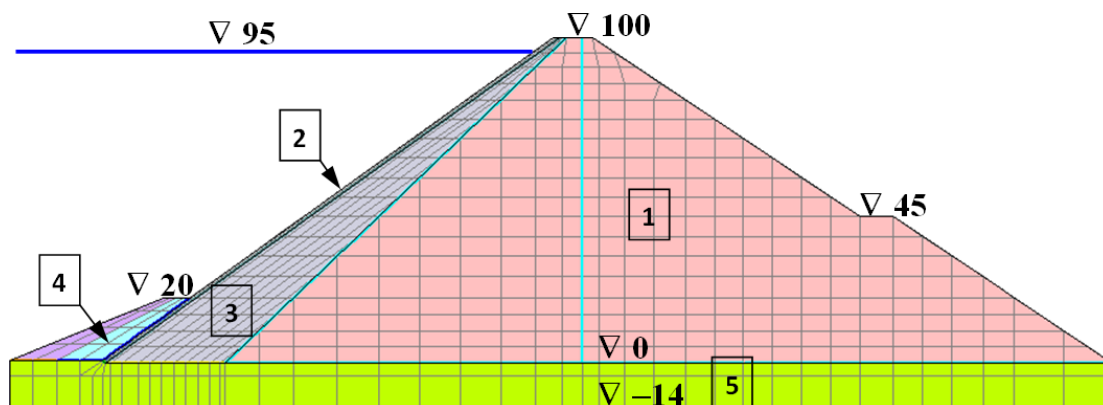
Рассматривались два варианта конструкции плотины. Вариант №1 соответствует традиционной конструкции плотины, в которой ПЭЗ выполняется из щебенистого грунта, а под экраном выполняется подготовка в виде бордюрных блоков из малоцементного бетона. Для данного варианта геометрия плотины является неудачной: низовое ребро экрана опирается непосредственно на скалу, что не обеспечивает возможность появления контурного прогиба экрана, т. е. прогиба в периметральном шве.

В варианте №2 в плотине устроена широкая ПЭЗ из грунтоцементобетона. Её ширина понизу составляет 37 м.

В конечно-элементную модель был включён блок скального основания (рис. 1). Общее количество конечных элементов в модели составило 644. Использовались конечные элементы высокого порядка, с кубической аппроксимацией перемещений внутри элемента, поэтому количество степеней свободы в ней – 5958.

Модуль линейной деформации бетона экрана в соответствии с СП 63.13330.2012¹ принимался равным 30 ГПа. Модуль линейной деформации грунтоцементобетона (и бетонной подготовки) по результатам исследований [6; 15] принимался равным 5 ГПа. Коэффициент Пуассона обоих материалов принимался равным соответственно 0,2.

Расчёты проводились для широкого диапазона значений модуля деформаций каменной наброски E_k , который был установлен по результатам обработки результатов измерений деформаций реальных плотин [16–19]. Рассматривались четыре варианта значений E_k : вариант «А» – 50 МПа, вариант «В» – 100 МПа, вариант «С» – 200 МПа, вариант «D» – 400 МПа. Коэффициент Пуассона каменной наброски принимался равным 0,27.



1 – упорная призма из каменной наброски; 2 – бетонный экран; 3 – подэкранный блок из грунтоцементобетона; 4 – защитная призма; 5 – скальное основание. Цветными линиями обозначены контактные элементы

Рисунок 1. Конечно-элементная модель плотины (составлена авторами)

Исследования проводились для двух вариантов свойств контакта между бетоном и «камнебетоном». Вариант «а» соответствует прочному, жёсткому контакту. Касательная жёсткость K_t контакта в этом случае была принята равной 200 МПа/м. Вариант «б»

¹ СП 63.13330.2012 Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 52-01-2003.

соответствует устройству слоя битумной эмульсии между БЭ и ПЭЗ. В этом случае $K_t = 20$ МПа.

Всего было рассмотрено 16 вариантов. Они обозначены в следующем виде: «1А.а». Первая цифра соответствует варианту конструкции плотины, буквенные обозначения – соответственно вариантам свойств каменной наброски и контакта.

Расчёты НДС плотины проводились на нагрузки от собственного веса и гидростатического давления. В соответствии с требованиями СП 39.13330.2012² учитывалась последовательность возведения плотины и наполнения водохранилища. Принималось, что сначала послойно возводится тело плотины, потом укладывается бетонный экран, а затем осуществляется постепенное заполнение водохранилища. Было рассмотрено 38 расчётных этапа.

Результаты

Анализ проводился на момент завершения наполнения водохранилища.

На рисунках 2–8 показаны результаты расчёта НДС для двух крайних вариантов диапазона изменения модуля деформации каменной наброски: варианта А и D.

Деформации экрана можно оценить по двум компонентам перемещений экрана: U_n и U_t . Перемещения U_n – это прогибы экрана (рис. 2), т. е. перемещения в направлении перпендикулярном к верховому откосу, перемещения U_t – продольные перемещения экрана (рис. 3), т. е. перемещения в направлении вдоль откоса.

Форма графика прогибов U_n определяет деформации поперечного изгиба. Она зависит от жёсткости подэкрановой зоны. Если она мала (варианты серии 1), то прогибы плавно изменяются по высоте, достигая максимума примерно посередине глубины водохранилища (рис. 2). Экран испытывает изгиб в сторону нижнего бьефа, за исключением самой верхней части. При наличии массивной ПЭЗ из грунтоцементобетона (варианты серии 2) прогибы в нижней части экрана резко снижаются, поэтому своего максимума они достигают в зоне гребня плотины.

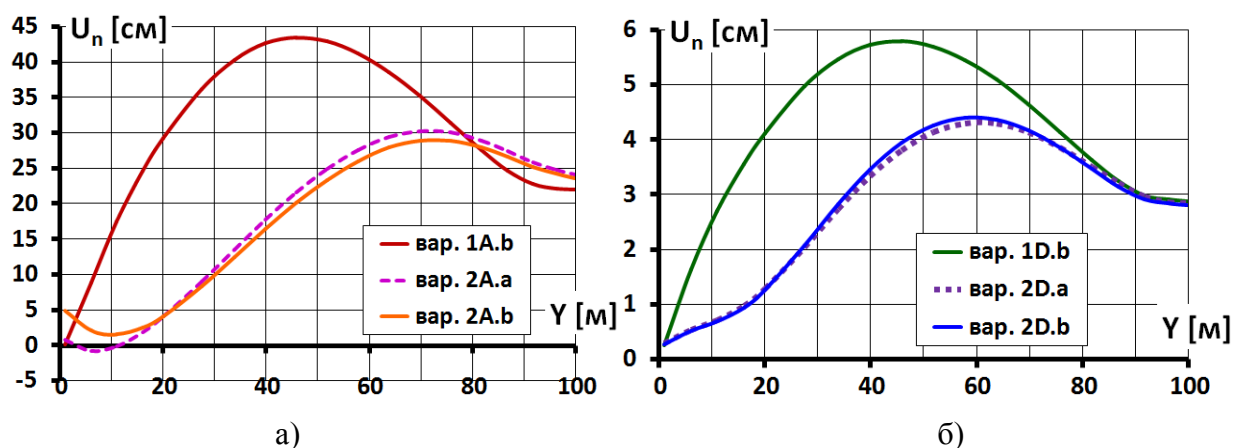


Рисунок 2. Распределение по высоте прогибов экрана в различных вариантах:
а – при модуле каменной наброски $E_k = 50$ МПа; б – при $E_k = 400$ МПа (получено авторами)

² СП 39.13330.2012. Плотины из грунтовых материалов. Актуализированная редакция СНиП 2.06.05-84*.
– Москва. ФАУ «ФЦС», 2012. – 86 с.

Сравнение максимальных прогибов экрана показало, что в вариантах серии 2 они на 25÷32 %, чем в вариантах серии 1 (рис. 4а). Таким образом, устройство ПЭЗ действительно снижает прогибы экрана, но для того, чтобы снизить их на треть, она должна быть достаточно массивной. Это опровергает выводы, сделанные в [4].

Однако нельзя сказать, что их уменьшение способствует улучшению НДС БЭ. На рис. 2 хорошо заметно, что нижняя часть экрана испытывает интенсивные деформации изгиба в сторону верхнего бьефа. Сложный характер деформаций изгиба экрана является неблагоприятным.

Интерес представляют величины и характер распределения продольных перемещений U_t экрана (рис. 3). Во всех вариантах значения U_t – положительные, т. е. направлены от подошвы к гребню откоса. Это говорит о раскрытии периметрального шва. Величина раскрытия периметрального шва в основном определяется только деформируемостью каменной наброски и мало зависит от иных факторов. Она довольно велика: при $E_k = 50$ МПа составляет около 5 см (рис. 3а).

Форма графика U_t говорит о наличии в экране продольных линейных деформаций и сил. Для вариантов конструкции №1 (тонкая ПЭЗ) характерно относительно равномерное распределение продольных перемещений по высоте (рис.3). Можно отметить, что в нижней части продольные перемещения нарастают по высоте, что говорит о наличии деформаций удлинения (растяжения). Напротив, в нижней части U_t снижаются, что говорит о деформациях сжатия. В варианте 1 характеристики трения на контакте между БЭ и ПЭЗ не имеют заметного влияния на распределение и величину продольных перемещений.

В вариантах конструкции №2 (массивная ПЭЗ) распределение по высоте U_t более неравномерное. Соответственно, линейные деформации удлинения-укорачивания экрана больше по величине, чем в конструкции №1. Их величина зависит от трения между экраном и ПЭЗ. При жёстком контакте (варианты серии «2.а») линейные деформации очень велики. Опасность представляют деформации продольного удлинения в нижней части экрана, т. к. они вызывают растяжение бетона. Использование скользящего слоя (варианты серии «2.б») позволяет значительно уменьшить линейные деформации экрана, однако они много выше, чем при тонкой ПЭЗ (вариант №1).

Таким образом, роль контактного трения в формировании НДС экрана плотины с широкой жёсткой ПЭЗ существенно выше, чем в традиционной конструкции.

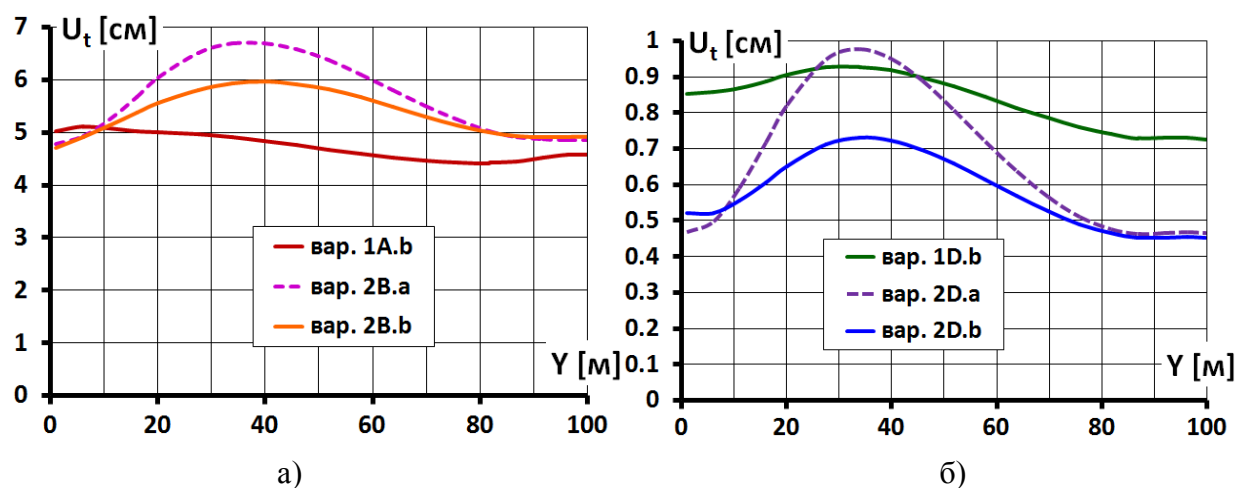


Рисунок 3. Распределение продольных перемещений экрана в различных вариантах:
а – при модуле каменной наброски $E_k = 50$ МПа; б – при $E_k = 400$ МПа (получено авторами)

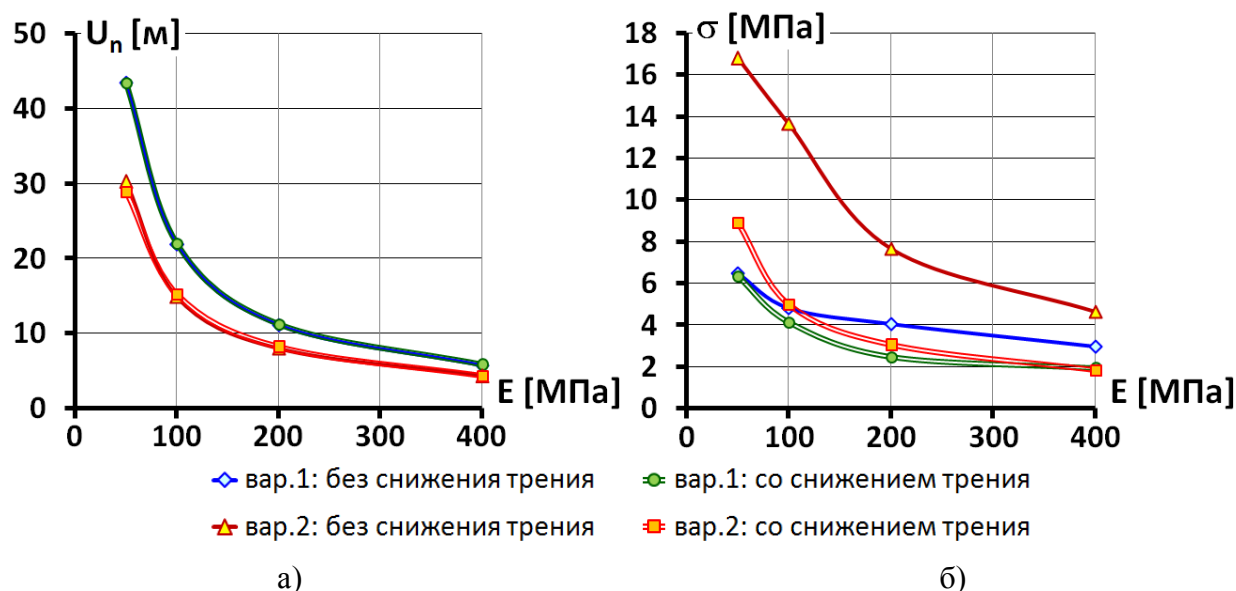


Рисунок 4. Изменение в зависимости модуля каменной наброски параметров напряжённо-деформированного состояния бетонного экрана для различных вариантов конструкции плотины (получено авторами)

Это видно из анализа напряжённого состояния экрана, полученного для разных вариантов. На рис. 5, 6 в виде графиков показано распределение по высоте экрана продольных напряжений, т. е. напряжений, действующих в направлении вдоль откоса. На рис. 4б показано изменение максимальных значений растягивающих напряжений в экране в зависимости от модуля каменной наброски для различных вариантов конструкции плотины.

Во всех вариантах напряжённое состояние верхней и нижней частей экрана различается. В верхней части экрана (выше $\nabla 35$ м) продольные напряжения как правило сжимающие, а в нижней – растягивающие. Растягивающие напряжения являются следствием не только изгиба, но и действием растягивающей продольной силы.

Интенсивность растягивающих напряжений зависит от всех трёх рассмотренных факторов: толщина ПЭЗ, модуль деформации каменной наброски и характеристики трения.

В плотинах традиционной конструкции (с тонкой ПЭЗ) растягивающие напряжения возникают на низовой грани экрана. Своего максимума они достигают на $\nabla 5 \div \nabla 10$ м (рис. 5, 6). Растяжение достигает высоких значений, особенно при низком модуле каменной наброски ($E_k = 50$ МПа). Снижение трения на контакте с ПЭЗ (варианты серии «1.б») позволяет несколько снизить растягивающие напряжения, однако в варианте №1.А.б это снижение происходит на локальном участке и не влияет на максимальные значения.

Таким образом, в традиционной конструкции антифрикционные мероприятия оказывают благоприятное влияние на НДС БЭ, но всё же основным способом регулирования НДС БЭ является снижение деформируемости каменной наброски. Сочетание этих двух факторов позволяет добиться в варианте №1.Д.б снижения растягивающих напряжений до расчётного сопротивления бетона на растяжение (рис. 6, 4б). Во всех остальных вариантах прочность бетона не обеспечивается, что подтверждает вывод о недостаточной безопасности традиционной конструкции КНПБЭ.

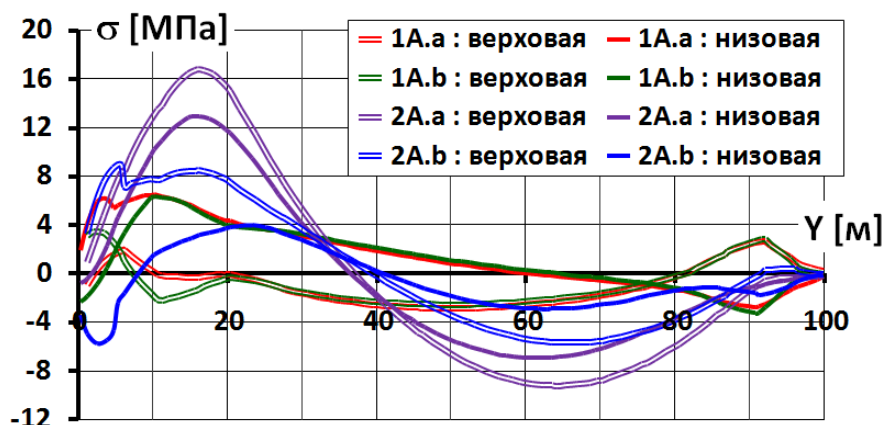


Рисунок 5. Распределение по высоте продольных напряжений на гранях экрана в вариантах серии «А» (при модуле каменной наброски 50 МПа) (получено авторами)

Однако вариант №2 (широкая ПЭЗ) характеризуется ещё более неблагоприятным напряжённым состоянием, чем вариант №1 (тонкая ПЭЗ). Для конструкции с широкой ПЭЗ характерно то, что на верховой грани растягивающие напряжения больше, чем на низовой.

Самые высокие растягивающие напряжения в экране характерны для вариантов серии «2.а», в которых широкая ПЭЗ жёстко связана с экраном. Они многократно превышают прочность бетона на растяжение. Например, в варианте 2А.а они превышают 16 МПа (рис. 5)! Таким образом, устройство широкой ПЭЗ из грунтоцементобетона вопреки утверждениям Бестужева А.С. и Гадея Д. вовсе не всегда улучшает НДС БЭ.

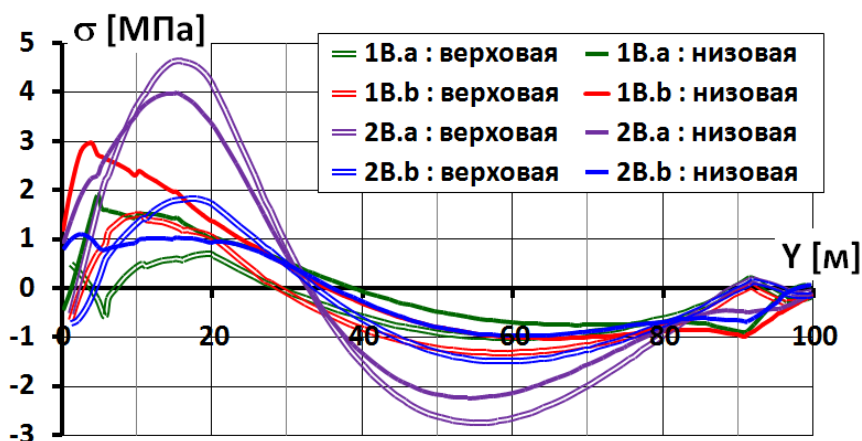


Рисунок 6. Распределение по высоте продольных напряжений на гранях экрана в вариантах серии «В» (при модуле каменной наброски 400 МПа) (получено авторами)

Нами было установлено, что снижение трения на контакте между БЭ и ПЭЗ (варианты серии «2.б») позволяет существенно, примерно в 2 раза снизить растягивающие напряжения в экране. Скольжение экрана относительно ПЭЗ ведёт к уменьшению растягивающей продольной силы, но к некоторому увеличению изгибающего момента в экране.

Тем не менее, в вариантах серии «2.б» уровень растягивающих напряжений в экране как правило выше, чем в вариантах серии «1.б» (рис. 5, 6, 4б). Только в варианте 2.В.б растягивающие напряжения снижаются до расчётного сопротивления бетона на растяжение.

Таким образом, конструкция плотины с жёсткой широкой ПЭЗ даже при применении антифрикционных мероприятий не обеспечивает более благоприятного НДС экрана по сравнению с традиционной. Однако при этом она дороже, т. к. стоимость грунтоцементобетона выше стоимости каменной наброски.

Кроме того, у конструкции с широкой жёсткой ПЭЗ есть ещё один недостаток. Он заключается в неблагоприятном НДС самой ПЭЗ, а также контакта ПЭЗ со скальным основанием.

Нами было показано, что жёсткая ПЭЗ работает как консоль, закреплённая в скальное основание [3]. Под действием гидростатического давления её нижняя часть испытывает сильные деформации изгиба. При изгибе верховая грань ПЭЗ испытывает растяжение, а низовая – сжатие. При этом возможны нарушения на контакте ПЭЗ с основанием. Полученные расчётом параметры НДС ПЭЗ показаны на рис. 7, 8, в табл. 1.

Таблица 1

Параметры НДС широкой подэкрановой зоны (вариант №2)

Модуль деформации каменной наброски [МПа]	50	100	200	400
Максимальное значение σ_1 [МПа]	3,5	2,6	1,2	0,7
Минимальное значение σ_3 [МПа]	-29,6	-17,8	-11,7	-7,3
Длина зоны нарушений [м] (раскрытие/сдвиг)	31 (р)	22 (р)	19 (с)	5 (с)
Максимальное раскрытие шва [мм]	33	25	-	-

При $E_k < 100$ МПа происходит раскрытие контакта ПЭЗ со скалой. В варианте 2А.а раскрытие достигает 3,3 см, а максимальная длина зоны раскрытия достигает 31 м, что составляет 84 % от общей ширины подошвы ПЭЗ.

При раскрытии контакта низовое ребро ПЭЗ вдавливаются в скальное основание, при этом в этой области концентрируются высокие сжимающие напряжения. В варианте 2А.а они достигают 29,6 МПа (рис. 7б). Следует ожидать потери прочности грунтоцементобетона на сжатие.

Опасность представляют также растягивающие напряжения в самой подэкрановой зоне. В варианте 2А (при $E_k = 50$ МПа) верховая часть ПЭЗ испытывает растяжение по всей её высоте. Они достигают 3,5 МПа (рис. 7а), что намного выше прочности грунтоцементобетона на растяжение, можно ожидать нарушения его сплошности.

Конечно, при перечисленных угрозах такая конструкция не может считаться надёжной, следует ожидать, что её противофильтрационная функция будет нарушена. Это опровергает утверждение [4; 7], что устройство ПЭЗ из грунтоцементобетона повышает безопасность плотины.

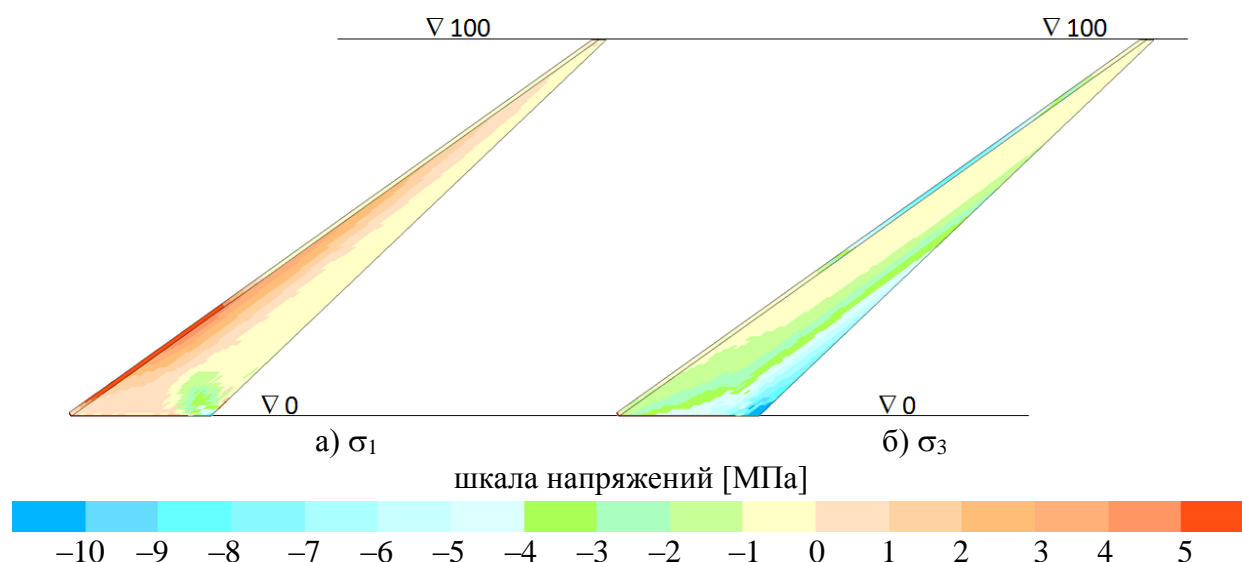


Рисунок 7. Распределение максимальных σ_1 и минимальных σ_3 главных напряжений в подэкрановой зоне при модуле каменной наброски $E_k = 50$ МПа (получено авторами)

Более благоприятное НДС имеет ПЭЗ только при резком снижении деформируемости каменной наброски. В варианте 2D (при $E_k = 400$ МПа) контакт со скалой не раскрывается, однако на длине 5 м наблюдаются сдвиговые нарушения. Сжимающие напряжения в ПЭЗ не превышают 7,3 МПа (рис.8б), а растягивающие – 0,7 МПа (рис. 8а). Можно ожидать, что зоны нарушений целостности ПЭЗ будут иметь локальные размеры.

Для обеспечения прочности грунтоцементобетона ПЭЗ можно рекомендовать модуль каменной наброски $E_k > 300$ МПа (табл. 1).

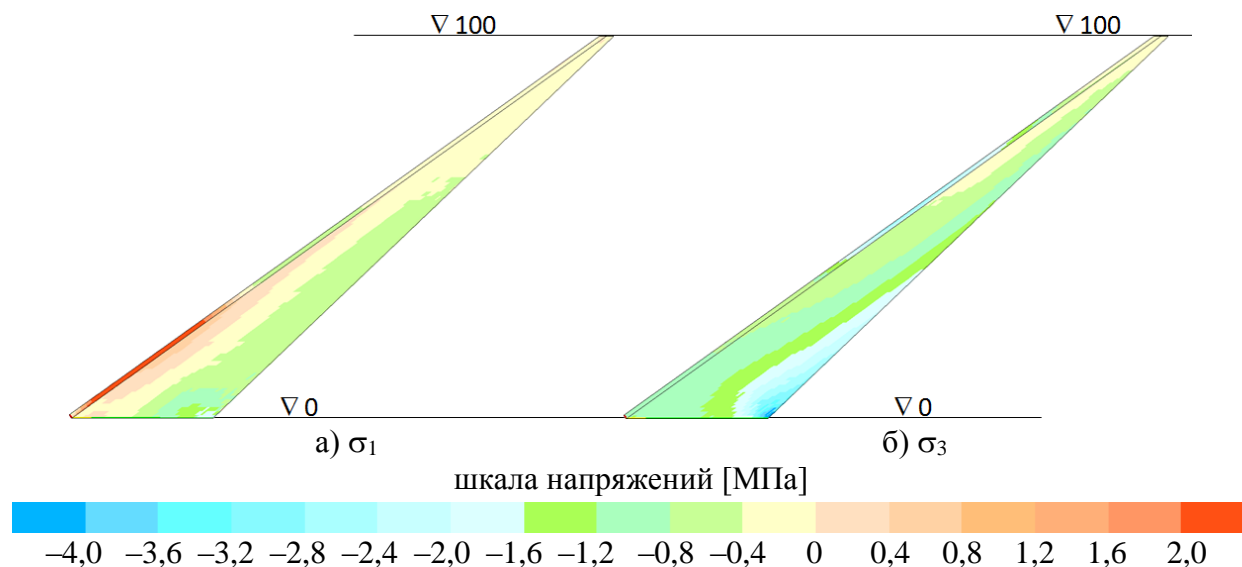


Рисунок 8. Распределение максимальных σ_1 и минимальных σ_3 главных напряжений в подэкрановой зоне при модуле каменной наброски $E_k = 400$ МПа (получено авторами)

Выводы

1. При расчётном обосновании грунтовых плотин с жёсткими конструкциями внутри необходимо соблюдать определённые правила численного моделирования, одним из которых является учёт особенностей контактного взаимодействия элементов конструкции между собой. Контакты могут служить ослаблением конструкции, на контактах могут проявляться нелинейные эффекты (проскальзывание, отрыв). Не учёт этого фактора может сильно исказить НДС плотины и не позволяет строить адекватные теории о работе конструкций.

2. Жёсткие конструкции в теле грунтовых плотин работают не только на изгиб, но испытывают другие виды деформаций, в т.ч. линейные. Уменьшение прогибов экрана грунтовой плотины не обязательно обеспечивает улучшение его напряжённого состояния. По этой причине утверждение, что устройство жёсткой подэкрановой зоны обеспечивает повышение безопасности экрана за счёт уменьшения его прогибов является неверным.

3. НДС бетонного экрана, расположенного на массивной жёсткой подэкрановой зоне, является крайне неблагоприятным. В формировании его НДС значительную роль играет трение между экраном и подэкрановой зоны. Уменьшение трения можно рекомендовать в качестве основного способа регулирования НДС бетонного экрана.

4. Важным недостатком конструкции каменно-набросной плотины с бетонным экраном и широкой жёсткой подэкрановой зоной является неблагоприятное НДС последней. Возможно нарушение прочности грунтоцементобетона на растяжение, сжатие, а также нарушения сохранности контакта между подэкрановой зоной и скальным основанием. По этой

причине предлагаемая конструкция плотины с массивной жёсткой подэкрановой зоной является менее надёжной, чем традиционной.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ma, H.Q., Cao K.M. Key technical problems of extra-high concrete faced rock-fill dam // Science in China. Series E: Technological Sciences. 2007. Vol.50(1). Pp. 20–33.
2. Саинов М.П., Затонских М.А. Повреждение железобетонных экранов каменно-набросных плотин: факты, возможные причины и способы предотвращения // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2019. № 10(73). С. 16–27.
3. 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.
4. Ляпичев Ю.П. Численные расчеты, проектирование и поведение каменно-насыпных плотин с железобетонными экранами при сейсмических воздействиях // Вестник МГСУ. 2020. Т. 15. Вып. 4. С. 569–584.
5. 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.
6. 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.
7. Гадай Д. Использование камнебетона в конструкциях грунтовых плотин с железобетонным экраном: автореферат дис. ... канд. техн. наук 05.23.07 / Гадай Дмитрий – М., 2019, 24 с. URL: http://mgsu.ru/science/Dissoveti/Zashita_dissert/gaday-dmitriy/Avtoreferat_GadaiD.pdf (дата обращения 01.01.2020)
8. Cazzuffi, D., Giroud, J.P., Scuero, A., Vascetti, G. Geosynthetic barriers systems for dams. 9th International Conference on Geosynthetics. Brazil. 2010. pp.115–163.
9. Радченко В.Г., Курнева Е.В., Ротченко Ю.Г. Современные технологии строительства каменнонабросных плотин с железобетонными экранами // Гидротехническое строительство. 2007. №10. С. 25–32.
10. Саинов М.П. Оценка работоспособности конструкций каменно-набросных плотин с бетонным экраном и массивом из «камнебетона» // Вестник Евразийской науки. 2020. №1. URL: <https://esj.today/PDF/03SAVN120.pdf> (дата обращения 01.01.2020).
11. 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.
12. Саинов М.П., Толстикова В.В., Фомичев А.А. Обоснование необходимости использования конечных элементов высокого порядка при численном моделировании работы жёстких тонкостенных конструкций в грунтовых плотинах // Известия Всероссийского научно-исследовательского института гидротехники им. Б.Е. Веденеева. 2017. Т.285. С. 15–19.

13. Саинов М.П. Особенности численного моделирования напряженно-деформированного состояния грунтовых плотин с тонкими противофильтрационными элементами // Вестник МГСУ. 2012. №10. С. 102–108.
14. Саинов М.П. Формирование и особенности напряженно-деформированного состояния бетонного экрана каменно-набросной плотины // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2020. № 87. (дата обращения 10.05.2020).
15. Peng, C., Guo D., Wang Q., Lu, Y. Application of extrusion-sidewall technology to the project of rock fill dam with face slab // Rock and Soil Mechanics. 2008. Vol.29. Pp. 201–203.
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 GS. 2005. 21(7). pp. 91–105.
18. Won, M.-S., Kim, Y.-S. A case study on the post-construction deformation of concrete face rockfill dams // Canadian Geotechnical Journal. 2008. 45. p. 845–852.
19. 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 // Géotechnique. 2018. 68(9). pp. 749–771.

Kotov Filipp Viktorovich

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

Sainov Mikhail Petrovich

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

Role of contact interaction in formation of stress-strain state of embankment dams with concrete faces and rigid supporting zones

Abstract. Introduction. For enhancing safety of high rockfill dams with concrete faces a number of authors propose to arrange a supporting zone of soil-cement concrete (RCC). It is considered that it is possible to provide the face strength by decreasing its bending. However, the authors of the idea are based on the fact that the face works only for bending and do not take into account that danger is presented by the forces acting along the face as well as the fact that the most rigid supporting zone may lose its strength.

Materials and methods. Stress-strain state (SSS) analysis was conducted to check the conclusions about the favorable effect of a rigid supporting zone on the concrete face safety. Analysis was conducted by the finite element method. Its specific feature is the fact that consideration was taken of peculiarities of contact interaction between the rigid supporting zone with the foundation and the face, which is not taken into account by other authors. Investigations were conducted on the example of a 100 m high dam with consideration of construction sequence and the reservoir impoundment. The concrete face SSS for the alternative with the traditional dam structure was compared with that of the alternative with a wide supporting zone. In the second alternative the width of the supporting zone was taken equal to 37 m.

Results. The results of numerical modeling showed that arrangement of a wide and rigid supporting zone really decreases bending of the face by 30 %, however, this does not improve the face SSS. Bending of the supporting zone causes appearance of considerable tensile longitudinal forces and stresses in the face. Loss of the face strength may be avoided by decreasing friction between the face and the supporting zone.

Conclusions. Friction between the face and the supporting zone plays a major role in formation of the concrete face SSS. However, even at arrangement of a sliding layer, the SSS of the concrete face located on a rigid supporting zone is less favorable than that of the traditional structure of the dam. The main way of providing the face strength is decrease of rockfill deformation.

Keywords: concrete faced rockfill dam; stress-strain state; supporting zone; soil-cement; strength