

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/03SAVN120.pdf>

Ссылка для цитирования этой статьи:

Саинов М.П. Оценка работоспособности конструкций каменно-набросных плотин с бетонным экраном и массивом из «камнебетона» // Вестник Евразийской науки, 2020 №1, <https://esj.today/PDF/03SAVN120.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ.

For citation:

Sainov M.P. (2020). Assessment of workability of concrete faced rockfill dam structure sand mass of stoneconcrete. *The Eurasian Scientific Journal*, [online] 1(12). Available at: <https://esj.today/PDF/03SAVN120.pdf> (in Russian)

УДК 624.01; 627.8

ГРНТИ 67.03.03; 67.29.59

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

**Оценка работоспособности конструкций
каменно-набросных плотин с бетонным экраном
и массивом из «камнебетона»**

Аннотация. Введение. Некоторые исследователи продвигают идею о повышении надёжности каменно-набросных плотин с бетонным экраном путём устройства массивной подэкрановой зоны из «камнебетона», т. е. бетона, приготовленного по отдельной технологии. Их исследования показали, что данный материал обладает прочностью на сжатие около 2 МПа, а его модуль деформации составляет $5\div 7$ ГПа. Авторы идеи утверждают, что найденные ими оптимальные параметры подэкрановой зоны из «камнебетона» позволяют обеспечить прочность как самого экрана, так и подэкрановой зоны. Автором были выполнены расчёты по проверке этой дискуссионной идеи.

Материалы и методы. Расчёты проводились автором с помощью численного моделирования на примере плотины высотой 100 м. Моделировалось напряжённо-деформированное состояние (НДС) нескольких вариантов конструкции каменно-набросной плотины с бетонным экраном и массивной подэкрановой зоной из «камнебетона». При этом использовались конечные элементы высокой точности и учитывалась возможность проявления нелинейных эффектов на контакте элементов конструкции плотины между собой.

Результаты. Благодаря применению адекватной методики расчёта автор оценил реальные условия предлагаемой конструкции плотины. Показано, что упор массивной подэкрановой зоны из «камнебетона» в скальное основание вызывает в бетонном экране дополнительную растягивающую продольную силу. Это оказывает неблагоприятное влияние на трещинокость экрана, т. к. вызывает в нём высокие растягивающие напряжения. Зоны потери прочности возникают и в самой зоне из «камнебетона». Неблагоприятный эффект проявляется даже при тех существенно заниженных значениях жёсткости экрана и «камнебетона», которые использовали авторы идеи в своих расчётах.

Выводы. Идея о благоприятном влиянии устройства массивной подэкрановой зоны из «камнебетона» на надёжность бетонного экрана каменно-набросной плотины является опасным заблуждением.

Ключевые слова: каменно-набросная плотина с железобетонным экраном; «камнебетон»; напряжённо-деформированное состояние; прочность; подэкрановая зона

Введение

Одним распространённых и перспективных типов грунтовых плотин являются каменно-набросные плотины с железобетонным экраном (КНБЭ). Они обладают рядом несомненных преимуществ перед каменно-земляными плотинами [1; 2]. Максимальная высота КНБЭ уже достигла 233 м [3] и рассматриваются перспективы их применения в створах с высотой 300 м [4; 5]. Однако для реализации этих планов необходимо решить проблему с обеспечением надёжности противофильтрационного экрана. В научно-технической литературе описан ряд аварийных ситуаций, произошедших в бетонных экранах ряда сверхвысоких плотин [5–8].

Одной из задач современной гидротехники как науки является решение этой проблемы. Предлагаются разные пути её решения. Ряд исследователей (Рассказов Л.Н., Нгуен Тхань Дат, Бестужева А.С., Гадай Д.) выдвигают путь, заключающийся в применении в теле плотины так называемого «камнебетона», т. е. бетона, созданного по отдельной технологии путём проливки каменной наброски цементным раствором [9–11]. Предлагается устраивать из этого материала жёсткую зону под бетонным экраном.

На самом деле идея о создании бетонной подэкрановой подготовки не является новой. В конструкциях современных КНБЭ экран укладывают на бордюрные блоки из малоцементного бетона [12–13]. Впервые эта технология была применена на плотине Ita в 1999 г. [14]. Есть и другой пример. В 1996 г. в Албании была построена плотина Bovilla высотой 81,6 м, в которой комбинированный бетонно-полимерный экран был уложен на слой грунтоцемента [15].

Отличием предложений Рассказова Л.Н. и др. является то, что они предлагают выполнять подэкрановую зону довольно широкой, чтобы обеспечить возможность её ремонта путём цементации. Идея устройства жёсткой широкой подэкрановой зоны имеет аналогии в истории строительства КНБЭ. В первых КНБЭ подэкрановая зона выполнялась из сухой каменной кладки, однако это не гарантировало бетонному экрану трещиностойкость [2]. Исследования, выполненные Нгуен Тхань Дат [9] и автором [10; 16], показали, что опирание жёсткой подэкрановой зоны на скальное основание создаёт в ней неблагоприятное напряжённо-деформированное состояние (НДС). Это объясняется сложными изгибными деформациями жёсткой конструкции, состоящей из ПЭЗ и экрана. Они вызывают в БЭ значительные растягивающие напряжения, превышающие прочность бетона на растяжение. Для борьбы с этим явлением автор предлагал изменить схему статической работы жёсткой ПЭЗ.

Однако Бестужева А.С. и Гадай Д. продолжают продвигать идею с устройством жёсткой подэкрановой зоны с большой шириной. Ими выполнены подробные исследования деформативных и прочностных свойств «камнебетона» [17]. Они показали, что модуль линейной деформации «камнебетона» в зависимости от его состава составляет $6 \div 7$ ГПа, а кубиковая прочность «камнебетона» составляет около 2 МПа.

Ими также были выполнены исследования НДС КНБЭ с подэкрановой зоной из «камнебетона». Эти результаты отражены в диссертации и автореферате диссертации Д. Гадае [18; 19]. Д. Гадай утверждает, что «Исследования напряжено-деформированного состояния плотин с железобетонным экраном и подэкрановой зоной из «камнебетона» показывают, что

наличие подэкрановой зоны благотворно сказывается на напряженном состоянии плотины, уменьшая как максимальные сжимающие, так и растягивающие напряжения в экране». Это утверждение основано на результатах выполненного исследования НДС плотины высотой 100 м с различной шириной подэкрановой зоны из «камнебетона». Д. Гадай рекомендует выполнять ширину подэкрановой зоны по основанию, равной $1/5$ от ширины основания плотины, т. е. порядка 75 м.

Эти утверждения входят в противоречие с результатами, полученными автором в [10; 16]. Однако, следует отметить, что в исследованиях Бестужева А.С. и Гадай Д. (далее для краткости «оппоненты») принимали модуль линейной деформации бетона равным 5000 МПа, а «камнебетона» – 200 МПа [18]. Эти расчётные значения не имеют необходимого обоснования. В соответствии с СП 63.13330.2012¹ модуль деформации бетона класса В30 в зависимости при кратковременном действии нагрузок составляет около 30 ГПа, а при длительном действии снижается ориентировочно до 12 ГПа. Это значение как минимум в 2 раза больше, чем принятые оппонентами.

Значения модуля «камнебетона», использованные оппонентами в расчётах, как минимум на порядок ниже тех, которые получены ими же в результате экспериментальных исследований [17]. Более того, значение 200 МПа находится в пределах интервала значений модуля деформации каменной наброски, который получен в результате натурных измерений прогибов БЭ каменно-набросных плотин [20; 21]. Таким образом, при исследованиях НДС плотины, выполненных оппонентами, были искажены исходные данные.

Чтобы дать реальную оценку работоспособности НДС плотины с железобетонным экраном и подэкрановой зоной из «камнебетона», автором были выполнены специальные исследования, результаты которых описаны в данной статье.

Материалы и методы

Исследования НДС проводились автором с помощью численного моделирования методом конечных элементов. Рассматривалась плотина высотой 100 м с заложением откосов 1,7. Толщина бетонного экрана принималась переменной по высоте: сверху она была принята равной 1 м, а снизу 1,6 м.

При составлении конечно-элементной модели учитывались важные особенности работы конструкции плотины, выполненной из жёсткого материала. Во-первых, учитывалось, что основание плотины имеет конечную жёсткость. В модель был введён блок скального основания толщиной 14 м с модулем деформации 5000 МПа. Во-вторых, учитывалась возможность проявления нелинейных эффектов на контактах жёстких конструкций между собой, а также с грунтовым массивом. Для этого использовались специальные контактные конечные элементы. Они позволяют воспроизвести возможность нарушения прочности контакта на растяжение или сдвиг. Контакт между бетоном и «камнебетоном» принимался довольно прочным: угол внутреннего трения 40° , удельной сцепление 0,2 МПа. В-третьих, для моделирования очень сложного характера работы жёсткого тонкостенного экрана в модели плотины использовались конечные элементы высокого порядка. Использовались конечные элементы с кубической степенью аппроксимации перемещений. Общее количество конечных элементов составило 644 (рис. 1), а количество степеней свободы в ней – 5958.

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

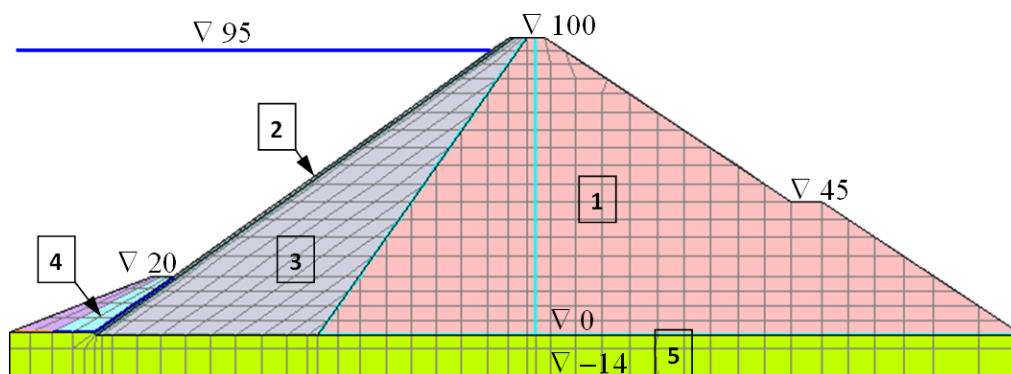


Рисунок 1. Конечно-элементная модель плотины для варианта №3 (составлена автором)

В отличие от оппонентов, автором более детально было проанализировано НДС бетонного экрана и подэкрановой зоны из «камнебетона». В частности, анализ проводился по главным напряжениям, а не по осевым, анализировались не только сжимающие, но растягивающие главные напряжения.

Перечисленные особенности отличают исследования, выполненные автором, от исследований, выполненных А.С. Бестужевой и Д. Гадаем. Они более точно отражают работу рассматриваемой конструкции плотины, а также обеспечивают необходимую адекватность и точность результатов численного моделирования.

Кроме того, имелись ещё два важных отличия:

1. Автор для выполнения исследований использовал метод конечных элементов в его традиционной, классической постановке. Оппоненты применяли метод локальных вариаций, который, как показали исследования автора, не всегда обеспечивает точность получаемых решений [22].

2. Оппоненты проводили расчёты с учётом нелинейности деформирования каменной наброски, использовалась модель Л.Н. Рассказова [23]. Т.к. параметры модели, принятые оппонентами в расчёте, автору неизвестны, то при расчётах использовалась модель линейного деформирования каменной наброски. Параметры модели деформирования были приняты таким образом, чтобы обеспечить максимально близкие по величине значения перемещений экрана и тела плотины. Модуль линейной деформации каменной наброски был принят равным 50 МПа, а коэффициент Пуассона – 0,27.

В обоих случаях расчёты проводились на нагрузки от собственного веса и гидростатического давления, а также учитывалась последовательность возведения плотины и наполнения водохранилища. В исследованиях, выполненных автором, принималось, что сначала послойно возводится тело плотины, затем укладывается бетонный экран. Только потом осуществляется постепенное заполнение водохранилища. Было рассмотрено 38 расчётных этапа.

Также как и оппоненты, автор проводил расчёты для четырёх вариантов конструкции плотины. В первом варианте конструкции подэкрановая зона (ПЭЗ) из «камнебетона» отсутствует. Во втором её толщина понизу составляет 37 м, в третьем – 74 м, в четвёртом – 147 м.

Автором были рассмотрены два варианта сочетания деформативных свойств бетона и «камнебетона», которые указаны в табл. 1. «Камнебетон» и бетон принимались линейно деформируемыми материалами.

Таблица 1

Расчётные деформативные свойства бетона и «камнебетона»

Расчётный вариант	«Камнебетон»		Бетон экрана	
	модуль деформации [МПа]	коэффициент Пуассона	модуль деформации [ГПа]	коэффициент Пуассона
А	200	0,22	12	0,2
В	5000	0,20	30	0,2

Вариант «А» соответствует тому, который был рассмотрен оппонентами, но со значением модуля деформации бетона, соответствующим строительным нормам. Вариант «В» соответствует реальным значениям модулей деформации бетона (при кратковременном восприятии нагрузок) и «камнебетона».

Всего было рассмотрено 9 расчётных вариантов. Они обозначены двойным шифром, например «3А». Цифра обозначает ширину понизу зоны из «камнебетона», а буква – вариант деформативных свойств материалов.

Результаты

Результаты расчёта НДС всех вариантов конструкции плотины представлены на рис. 2–10 и в табл. 2. Для сравнения в табл. 3 приведены данные, полученные А.С. Бестужевой и Д. Гадаем [18; 19].

Сначала рассмотрим результаты расчёта НДС варианта №1А, в котором массив из «камнебетона» отсутствует. Анализ показывает, что из-за высокой деформируемости каменной наброски тело плотины имеет высокие осадки (рис. 2) и смещения (рис. 3). Максимальная осадка составляет 67,6 см, а максимальное горизонтальное смещение – 32,5 см. Эти значения несколько больше, чем те, которые получены оппонентами (табл. 3). Различие составляет соответственно 61 % и 14 %. Отличие результатов объясняется проявлением нелинейности каменной наброски, которую учитывали оппоненты. Тем не менее, отличия в перемещениях плотины не имеют существенного значения с точки зрения НДС бетонного экрана, т. к. оно формируется под действием гидростатического давления, а не под действием собственного веса плотины.

Таблица 2

Расчётные параметры НДС вариантов конструкции плотины, полученные автором

Номер варианта	1А	2А	3А	4А	1В	2В	3В	4В
максимальная осадка плотины (см)	67,6	68,3	66,7	48,8	67,2	67,2	59,6	46,7
максимальное смещение (см)	32,5	30,7	29,2	17,8	34,3	34,3	17,1	12,3
прогиб экрана (см)	44,9	34,7	23,7	12,7	28,6	28,6	12,9	1,2
максимум напряжения сжатия в экране (МПа)	1,9	3,1	2,4	1,3	3,1	9,2	2,8	0,8
максимум напряжения растяжения в экране (МПа)	4,3	6,6	4,4	2,8	6,5	16,8	13,1	0,9
максимальное сжимающее напряжение в подэкрановой зоне (МПа)	–	4,2	5,2	3,6	–	24,5	20,7	6,3
максимальное растягивающее напряжение в подэкрановой зоне (МПа)	–	0	0,1	–	–	3,5	4,7	0,2
Длина раскрытия контакта подэкрановой зоны от основания (м)	–	–	–	–	–	30,5	43	–
Раскрытие контакта подэкрановой зоны от основания (мм)	–	–	–	–	–	93	5	–

Таблица 3

Расчётные параметры НДС вариантов
конструкции плотины, полученные А.С. Бестужевой и Д. Гадаем

Номер варианта	1А	2А	3А	4А
максимальная осадка плотины (см)	41,9	40,1	38,5	29,8
максимальное смещение (см)	28,4	23,9	20,5	16,4
прогиб экрана (см)	48,7	38,8	32,4	27,1
максимальное напряжение сжатия в экране (МПа)	8,7	3,0	3,7	4,5
максимальное напряжение растяжения в экране (МПа)	–	1,9	1,1	–

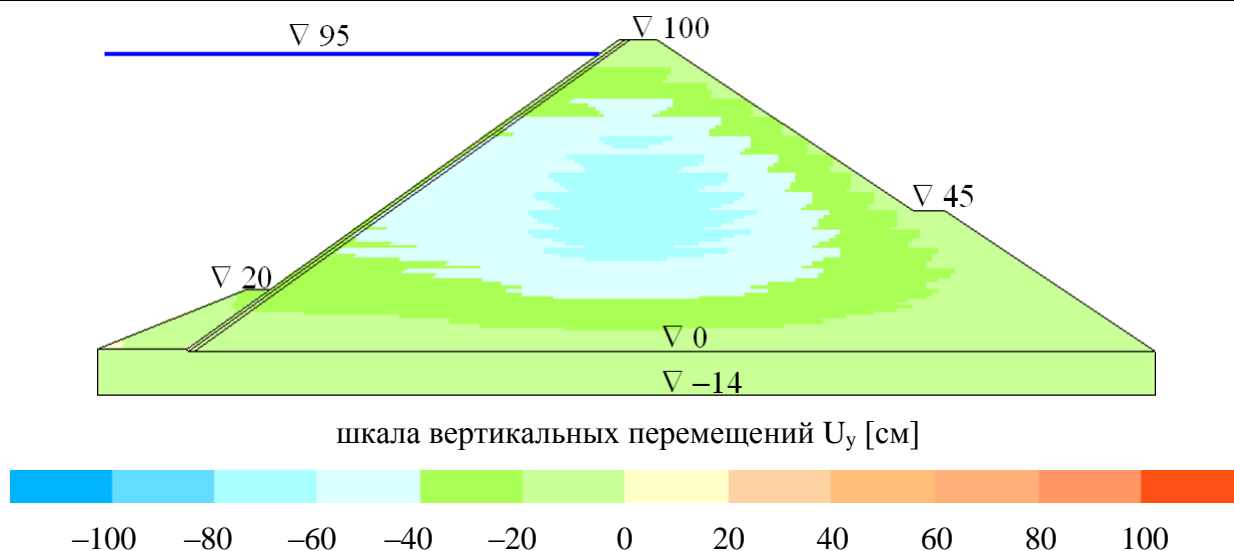


Рисунок 2. Осадки плотины в варианте 1А (получены автором)

Поэтому более важной является близость значений прогибов экрана. Максимальный прогиб экрана, полученный автором, составляет 44,9 см (табл. 2), а оппонентами – 48,7 см (табл. 3). Таким образом, отличие составляет 8,5 % и является приемлемым, оно позволяет сравнивать результаты расчётов НДС вариантов серии «А» и по напряжениям.

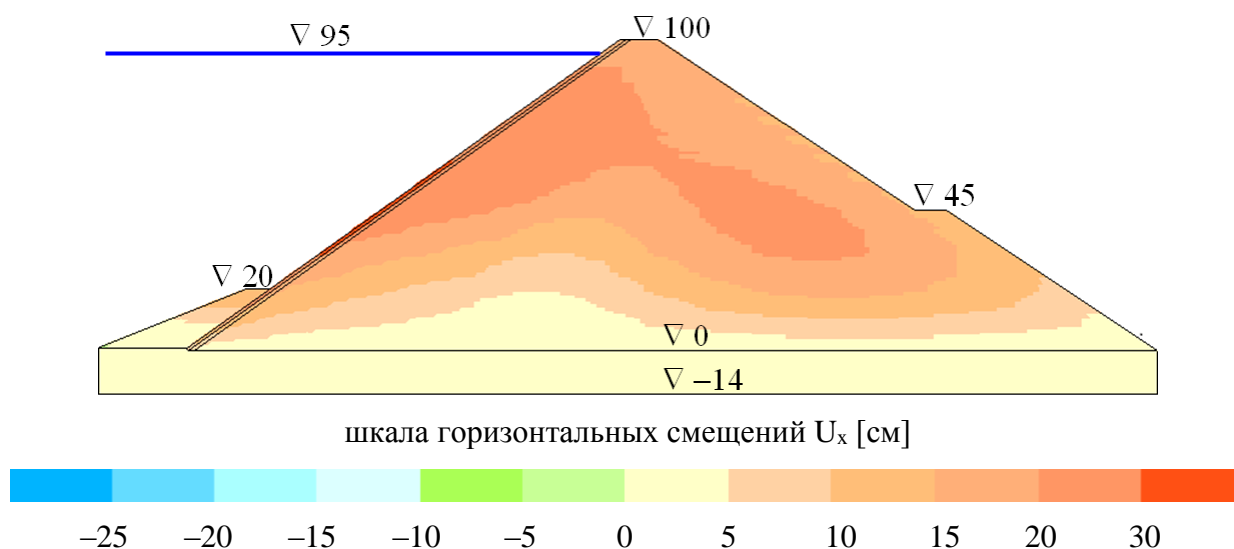


Рисунок 3. Смещения плотины в варианте 1А (получены автором)

Однако, значения продольных напряжений в бетонном экране не совпадают. По данным автора на низовой грани экрана возникают значительные растягивающие напряжения, достигающие 6,5 МПа (рис. 4, табл. 2). А по данным оппонентов растягивающих напряжений в экране не возникает вовсе (табл. 3). Это различие не может быть связано с отличием в

использованных моделях каменной наброски. Отсутствие растягивающих напряжений в экране является неправдоподобным, т.к. экран испытывает изгиб, при котором низовая грань растягивается. Различие в результатах может быть объяснено несколькими причинами. Во-первых, тем, что оппоненты использовали простые (неточные) конечные элементы, а также не учитывали наличие трения между экраном и плотиной. Во-вторых, отличие может быть связано с иной схемой возведения плотины с экраном.

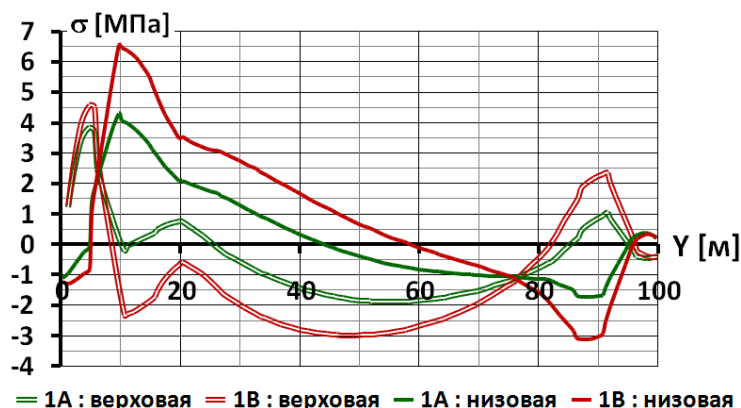


Рисунок 4. Продольные напряжения на гранях бетонного экрана при отсутствии подэкрановой зоны из «камнебетона» (получены автором)

Большие различия в результатах расчётов фиксируются и в других расчётных вариантах серии «А». Заметно отличаются максимальные значения прогибов экрана в вариантах №3А и №4А. В варианте №4А различие наиболее значительно. По данным автора, максимальный прогиб экрана составил 12,7 см (рис. 5), в то время как по данным оппонентов – 27,1 см (табл. 3), т.е. в 2 раза больше. Для проверки данных могут быть использованы упрощённые теоретические формулы Fitzpatrick и автора, которые позволяют довольно точно спрогнозировать прогибы экрана по известному значению модулю деформации [21; 24]. По этим формулам прогиб экрана должен составлять 11÷14 см. Таким образом, результаты, полученные оппонентами, вызывают сомнения.

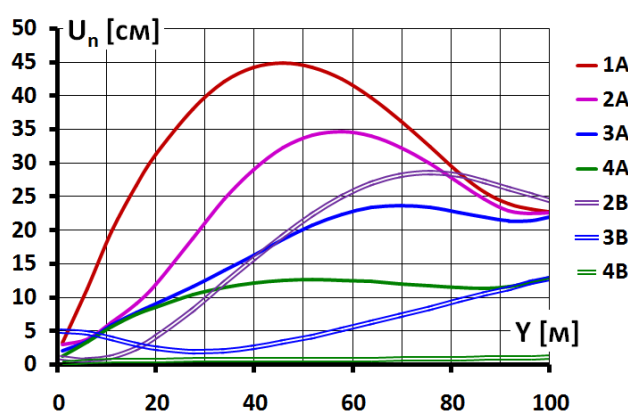


Рисунок 5. Прогибы (нормальные перемещения) бетонного экрана в различных вариантах (получены автором)

На рис. 6–8 показано напряжённое состояние плотины в вариантах серии «А», полученное автором. Следует отметить наличие зоны концентрации сжимающих напряжений у низового ребра ПЭЗ. По результатам расчёта автора, максимальные значения сжимающих напряжений σ_3 достигают 3÷5 МПа (табл. 2). Это выше прочности «камнебетона» на сжатие, которая по данным А.С. Бестужевой и Д. Гадея [17–19] не превышает 2 МПа. Таким образом, даже при сильно заниженном значении модуля деформации «камнебетона» (200 МПа) можно ожидать нарушения его прочности на сжатие.

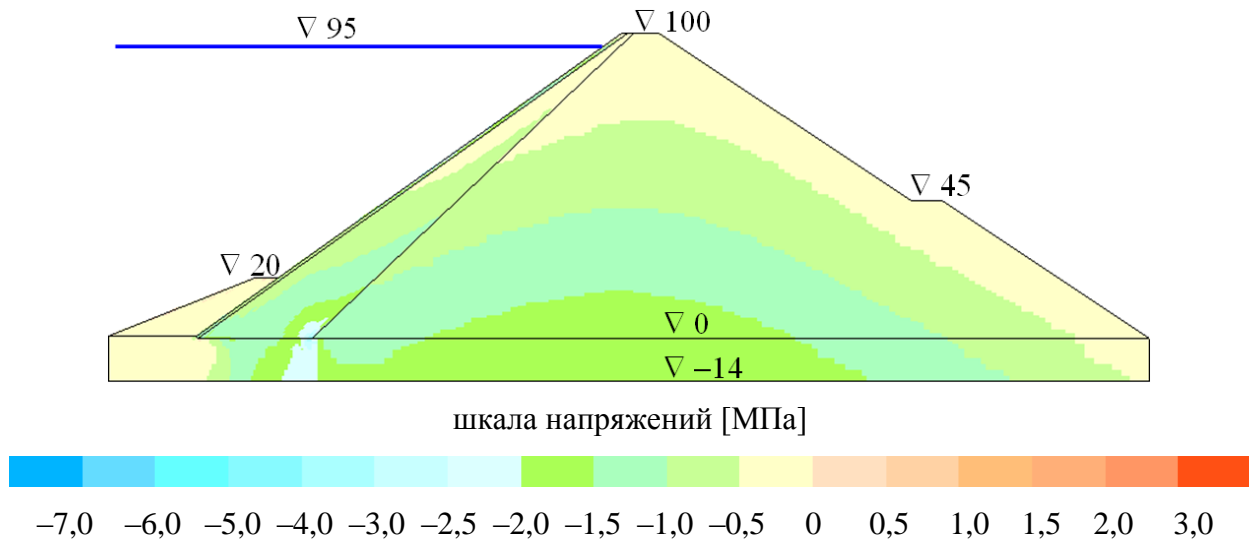


Рисунок 6. Минимальные главные напряжения σ_3 в теле плотины варианта 2А (получены автором)

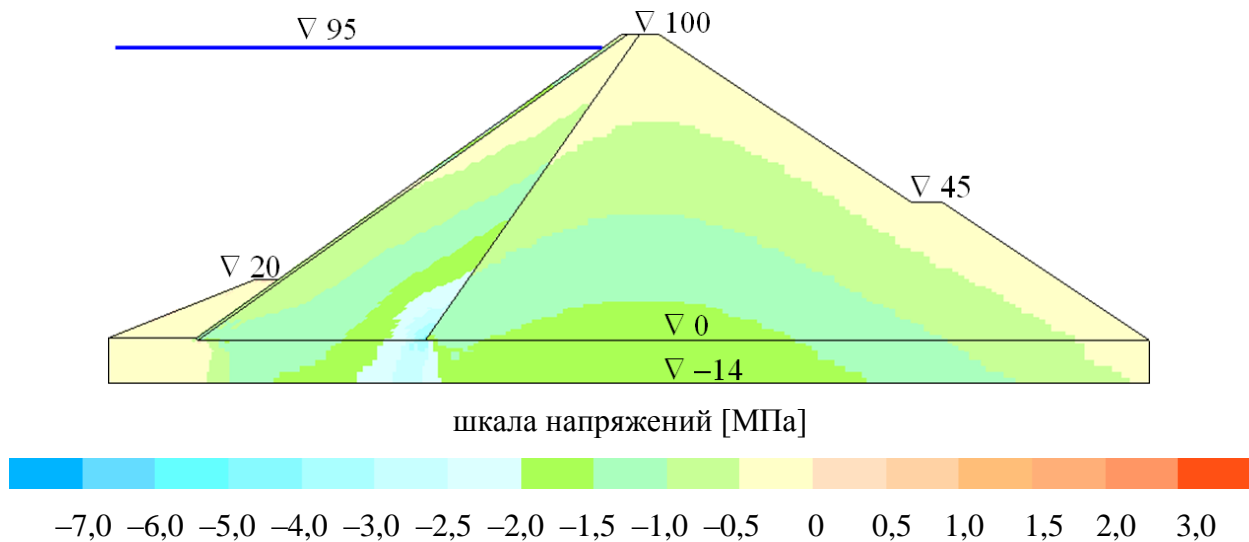


Рисунок 7. Минимальные главные напряжения σ_3 в теле плотины варианта 3А (получены автором)

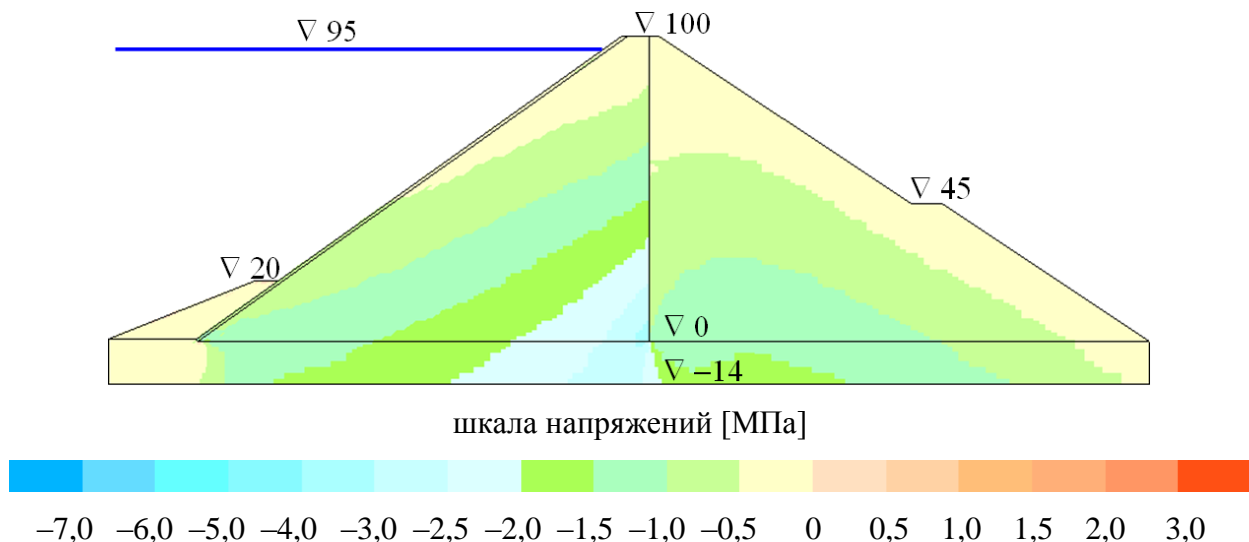


Рисунок 8. Минимальные главные напряжения σ_3 в теле плотины варианта 4А (получены автором)

Но более опасным с точки зрения прочности является напряжённое состояние самого бетонного экрана. По результатам расчётов автора (рис. 9) он испытывает значительные растягивающие продольные силы. При этом во всех вариантах серии «А» с ПЭЗ из «камнебетона» растягивающие продольные напряжения в экране многократно превышают прочность бетона на растяжение. Особенно неблагоприятное НДС имеет экран в варианте №2А – максимальное растягивающее напряжение достигает 6,5 МПа. Оно больше по величине, чем в конструкции без применения «камнебетона» (вариант №1А). Это опровергает тезис оппонентов о благоприятном влиянии ПЭЗ из «камнебетона» на НДС бетонного экрана. Улучшения характерны только для варианта №4А, где ПЭЗ занимает половину профиля плотины.

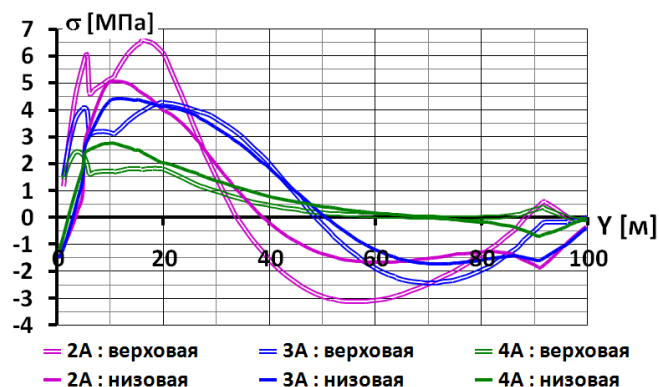


Рисунок 9. Продольные напряжения на гранях бетонного экрана в вариантах серии «А» (получены автором)

При этом следует учитывать, что жёсткость «камнебетона» в исследованиях оппонентов была значительно занижена. Чтобы оценить реальную работоспособность конструкции плотины, предлагаемой А.С. Бестужевой и Д. Гадаем, автором были выполнены расчёты серии «В». В них модуль деформации «камнебетона» был принят равным 5 ГПа, т. е. в 25 раз выше, чем в исследованиях оппонентов.



Рисунок 10. Смещения плотины в варианте 3В (получены автором)

Полученный по результатам расчётов характер распределения перемещений плотины в вариантах серии «В» (рис. 5, 10, 11) говорит об изменении схемы статической работы плотины при устройстве в ней жёсткой и массивной зоны из «камнебетона». В этих вариантах ПЭЗ самостоятельно воспринимает нагрузки и работает как жёсткая консоль. Зона максимумов смещений располагается в верхней части плотины (рис. 10). При этом в вариантах № 2В и № 3В низовое ребро подошвы ПЭЗ вдавливается в скальное основание, а верховое – отрывается

от него и поднимается (рис. 11). Длина раскрытия контакта достигает несколько десятков метров. Таким образом, варианты № 2В и № 3В не обеспечивают необходимый уровень надёжности плотины.

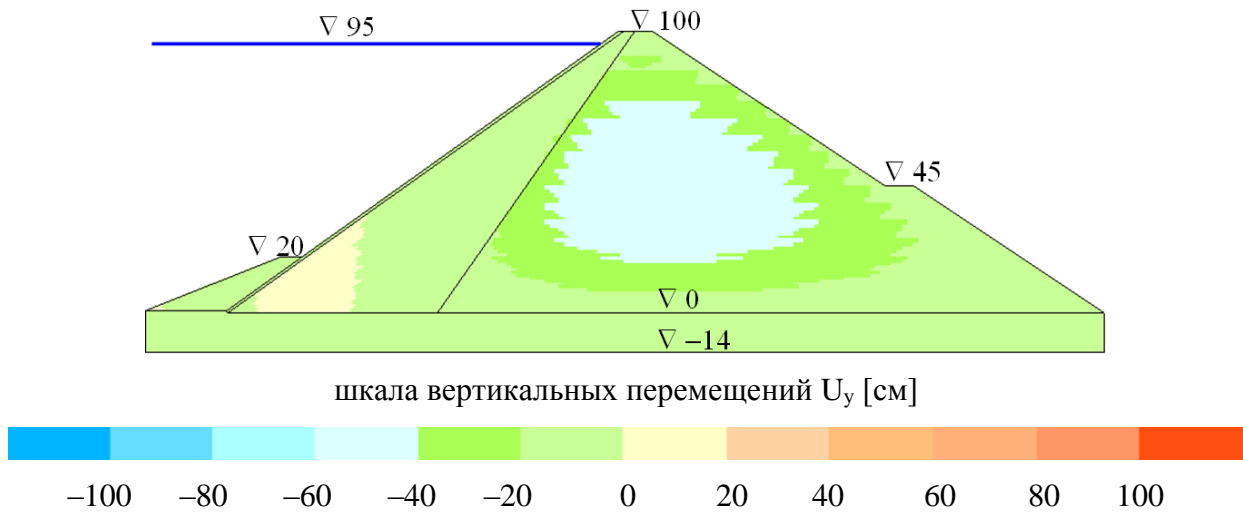


Рисунок 11. Вертикальные перемещения плотины в варианте 3В (получены автором)

ПЭЗ из «камнебетона» в этих вариантах имеет крайне неблагоприятное напряжённое состояние (рис. 12, 13, табл. 2). На её низовой грани, в зонах концентрации, возникают значительные сжимающие напряжения (рис. 12б, 13б), которые превышают 20 МПа, т. е. прочность на сжатие обычного бетона. А на верховой грани ПЭЗ возникает обширная зона высоких растягивающих напряжений (рис. 12а, 13а), которые превышают прочность на растяжение даже для обычного бетона.

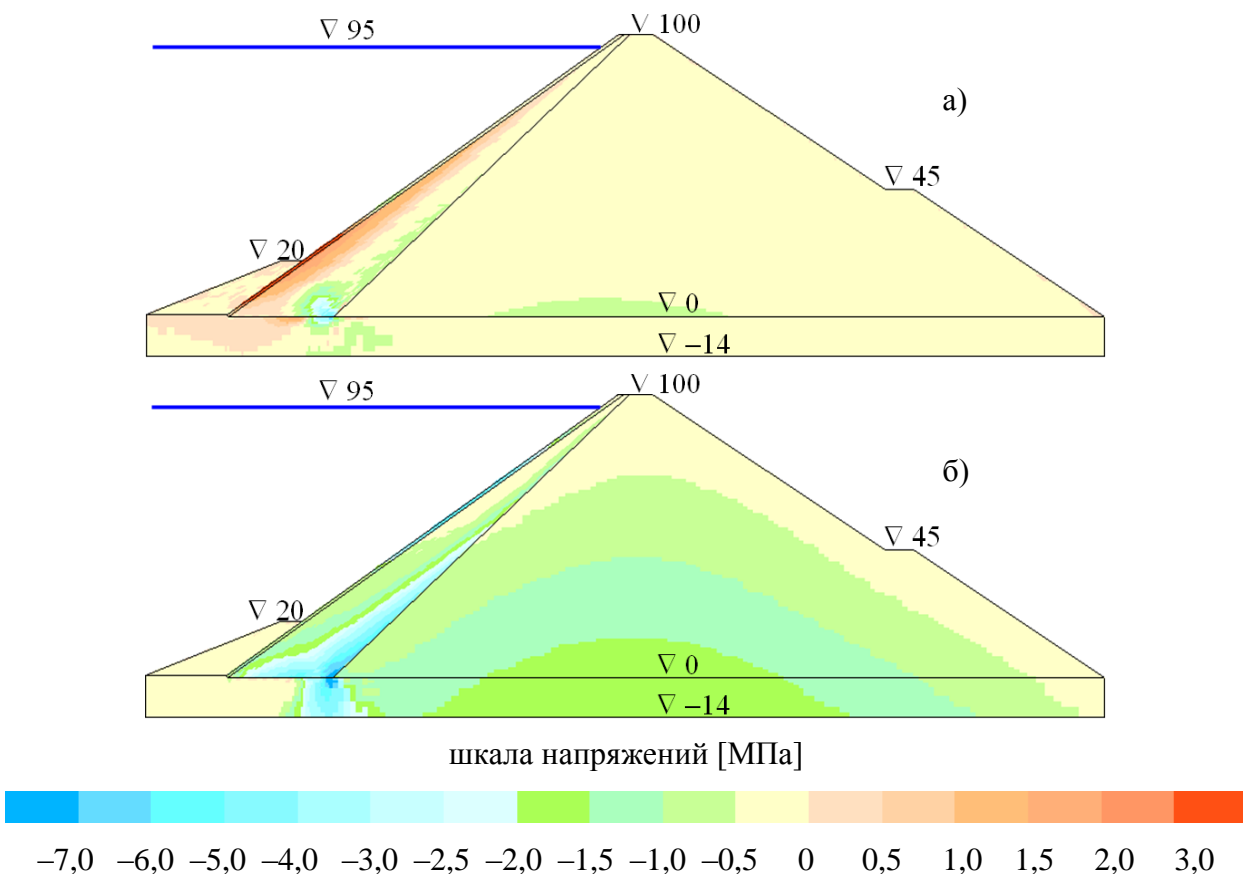
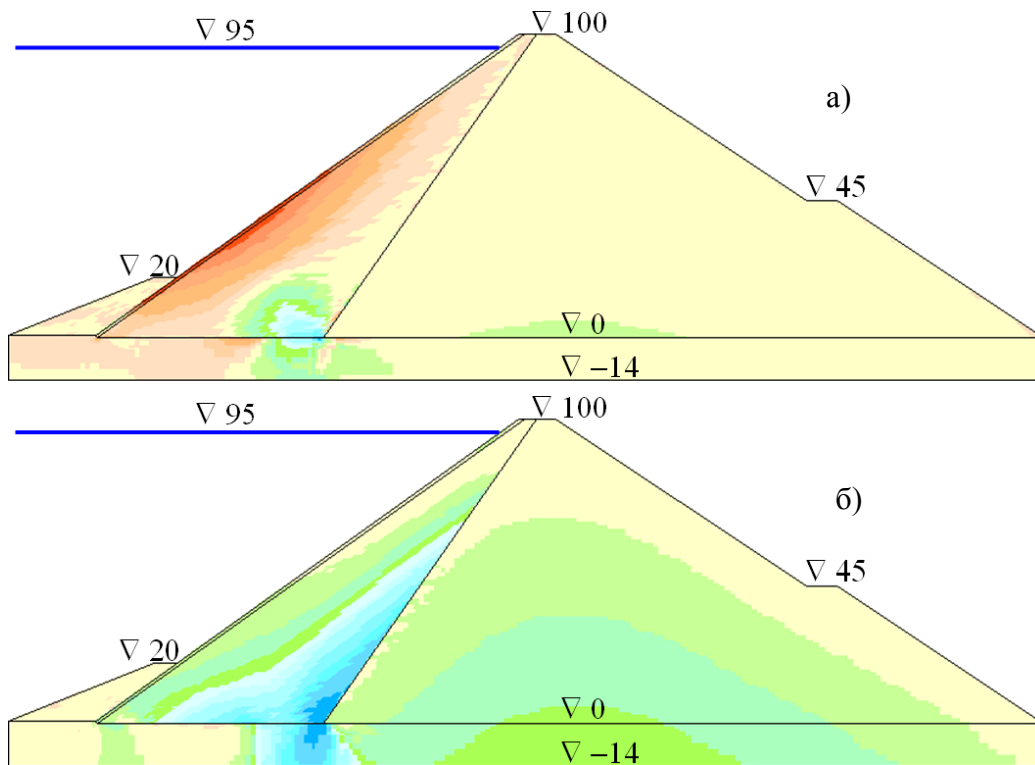


Рисунок 12. Главные напряжения в теле плотины варианта № 2В: а – максимальные главные напряжения σ_3 ; б – минимальные главные напряжения σ_1 (получены автором)



шкала напряжений указана на рис. 12.

Рисунок 13. Главные напряжения в теле плотины варианта № 3В: а – максимальные главные напряжения σ_3 ; б – минимальные главные напряжения σ_1 (получены автором)

Огромные растягивающие напряжения действуют и в самом бетонном экране (рис. 14). Они значительно превышают растягивающие напряжения в конструкции без применения «камнебетона» (вариант №1). На рис. 14 хорошо видно, что основной особенностью НДС экрана является наличие растягивающих продольных сил. Они являются следствием деформаций изгиба массивной и жёсткой ПЭЗ, опёртой на скальное основание, и передаются на экран через трение. В то же время вклад в НДС экрана деформаций поперечного изгиба самого экрана – мал, об этом свидетельствует то, что разница напряжений между верховой и низовой гранями экрана относительно мала. Именно в этом состоит благоприятное влияние повышения жёсткости подэкрановой зоны – она нивелирует деформации изгиба. Но это положительное влияние не идёт в сравнение с отрицательным влиянием дополнительной растягивающей продольной силы.

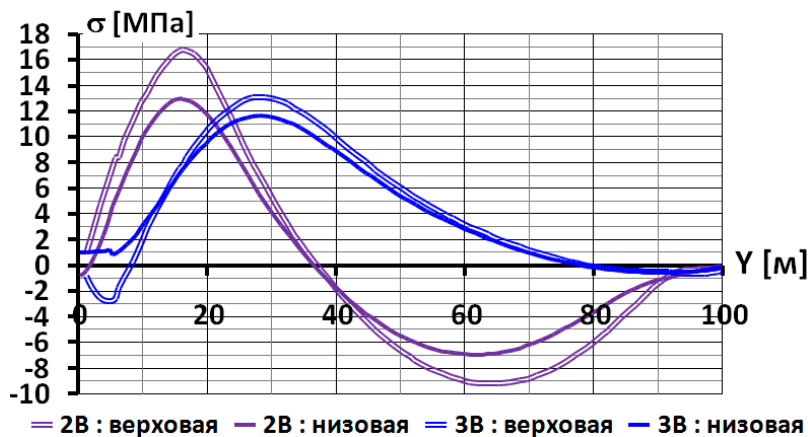


Рисунок 14. Продольные напряжения на гранях бетонного экрана в вариантах серии «В» (получены автором)

Конечно, могут быть применены меры по уменьшению растягивающей продольной силы в экране за счёт снижения трения на контакте между ним и ПЭЗ. Предварительные расчёты показывают, что они будут иметь существенный эффект, но прочность бетона на растяжение обеспечена не будет. Кроме того, не будет решена другая проблема – высокие растягивающие напряжения в подэкрановой зоне.

Единственным из рассмотренных вариантов конструкции с относительно благоприятным НДС ПЭЗ из «камнебетона» и бетонного экрана является вариант № 4В. В этом случае растягивающие напряжения в бетонном экране не превышают 1 МПа (табл. 2), а сжимающие напряжения в ПЭЗ не превышают 7 МПа (рис. 15). Однако для данного варианта характерно неблагоприятное НДС упорной призмы (каменной наброски) плотины. В варианте № 4В на вертикальном контакте между «камнебетоном» и каменной наброской происходят нарушения сплошности в виде отрыва и/или сдвига.

Таким образом, автором было показано, что любая из рассмотренных конструкций каменно-набросной плотины с бетонным экраном и с жёсткой, массивной подэкрановой зоной из «камнебетона» не обладает необходимым уровнем надёжности. Это опровергает выводы, сделанные А.С. Бестужевой и Д. Гадаем.

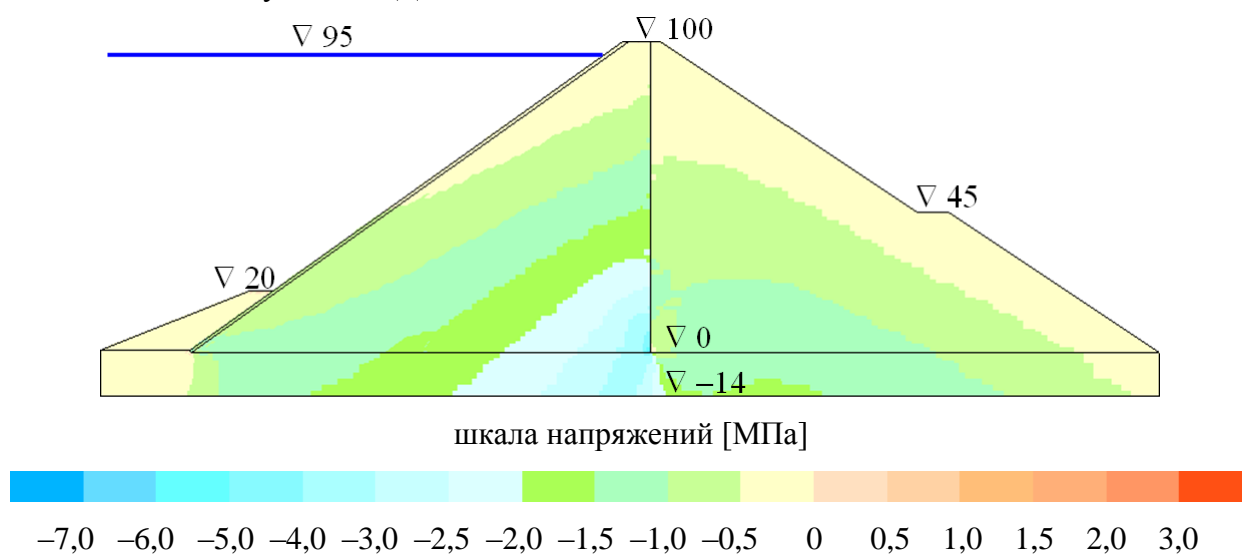


Рисунок 15. Минимальные главные напряжения σ_3 в теле плотины варианта № 4В (получены автором)

Выводы

1. Исследования НДС конструкции каменно-набросной плотины с жёсткой и массивной подэкрановой зоной из «камнебетона», выполненные А.С. Бестужевой и Д. Гадаем, искажают работу этой конструкции и завышают её работоспособность. Это связано со следующими ошибками или неточностями. Во-первых, в их исследованиях сильно занижена жёсткость бетона и «камнебетона» по сравнению с реальной. Во-вторых, использованная ими методика численного моделирования не отражает особенности взаимодействия негрунтовых конструкций между собой и не обеспечивает необходимую точность результатов численного моделирования. Исследования, проведённые автором, лишены этих недостатков, поэтому более адекватны реальным условиям работы рассмотренных конструкций плотины.

2. Вопреки утверждениям А.С. Бестужевой и Д. Гадаем, наличие в каменно-набросной плотине жёсткой и массивной подэкрановой зоны из «камнебетона» оказывает неблагоприятное влияние на НДС бетонного экрана. Это связано с тем, что при неоднородном

строении плотины (с жёсткой верховой частью) в экране возникает дополнительная растягивающая продольная сила. Отрицательное влияние этой силы более существенно, чем положительное влияние от снижения деформаций поперечного изгиба экрана, вызванного повышением жёсткости подэкрановой зоны. Более рациональным (а возможно и экономичным) способом улучшения НДС бетонного экрана является снижение деформируемости каменной наброски тела плотины за счёт более тщательного её уплотнения.

ЛИТЕРАТУРА

1. 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, No.9. Pp. 749–771.
2. Саинов М.П., Юрьева Е.А. Каменно-набросные плотины с железобетонным экраном: эволюция конструкции // *Строительство уникальных зданий и сооружений*. 2019. № 9(72). С. 46–60.
3. Song W., Sun Y., Li L., Wang Y. Reason analysis and treatment for the 1st phase slab cracking of Shuibuya CFRD // *Journal of Hydroelectric Engineering*. 2008. No.3(27). Pp. 33–37.
4. Wang, L.-B., Yan, Q. Analyze on development prospects of 300m level ultra-high CFRD from Shuibuya high CFRD. *Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference, APPEEC*. 2010. 5448667.
5. 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.
6. Marques Filho, P., De Pinto, N.L.S. CFRD dam characteristics learned from experience // *The International Journal on Hydropower & Dams*. 2005. No.12(1). Pp. 72–76.
7. Freitas, M.S.Jr. Concepts on CFRDs Leakage Control – Cases and Current Experiences. *ISSMGE Bulletin*. 2009. Volume 3. Issue 4. pp. 11–18.
8. 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.
9. Нгуен Тхань Дат. Напряжённо-деформированное состояние каменных плотин с железобетонными экранами: дис. ... канд. техн. наук 05.23.07 / Нгуен Тхань Дат. – М., 2004, 264 с.
10. 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.
11. 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.
12. Радченко В.Г., Курнева Е.В., Ротченко Ю.Г. Современные технологии строительства каменнонабросных плотин с железобетонными экранами // *Гидротехническое строительство*. 2007. №10. С. 25–32.

13. Саинов М.П., Богатырев И.Л., Зайцев Б.А. Влияние на напряженно-деформированное состояние железобетонного экрана каменно-набросной плотины устройства скользящего слоя // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Сер.: Материалы. Конструкции. Технологии. 2019. № 1(9). С. 46–56.
14. Materon B., Resende F. Construction Innovations for the Itapebi CFRD // The International Journal on Hydropower and Dams. 2001. Vol. 8, Issue 5. Pp. 66–70.
15. Sembenelli, P., Sembenelli, G. and Scuero, A.M. Geosynthetic system for the facing of Bovilla Dam, Proceedings of the 6th International Conference on Geosynthetics, (Ed. R.K. Rowe). 1998. Atlanta, Georgia, USA, International Fabrics Association International, Roseville. Minnesota. pp. 1099–1106.
16. 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.
17. 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.
18. Гадай Д. Использование камнебетона в конструкциях грунтовых плотин с железобетонным экраном: дис. ... канд. техн. наук 05.23.07 / Гадай Дмитрий – М., 2019, 198 с. URL: http://mgsu.ru/science/Dissoveti/Zashita_dissert/gaday-dmitriy/Dissertacia_GadaiD.pdf (дата обращения 01.01.2020).
19. 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).
20. Pinto, N.L., Marques, P.L. Estimating the Maximum Face Slab Deflection in CFRDs // The International Journal on Hydropower & Dams, 1998. Volume 5. Issue 6. pp. 28–30.
21. 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.
22. Саинов М.П. Вычислительная программа по расчету напряжённо-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.
23. Рассказов Л.Н., Джха Дж. Деформируемость и прочность грунта при расчете высоких грунтовых плотин // Гидротехническое строительство. 1987. № 7. С. 31–36.
24. Саинов М.П. Приближенная расчетная схема работы железобетонного экрана каменно-набросной плотины // Научное обозрение. 2016. №18. С. 18–22.

Sainov Mikhail Petrovich

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

Assessment of workability of concrete faced rockfill dam structure sand mass of stoneconcrete

Abstract. Introduction. Some researches promote the idea of enhancing safety of concrete faced rockfill dams by arrangement of a massive under-face zone of stoneconcrete, i.e. of concrete prepared by separate technology. Their studies showed that this material has compressive strength about 2 MPa, and its deformation modulus is 5÷7 GPa. The author softhe idea affirm that the found by them optimal parameters of an under-face zone made of stoneconcrete permit providing strength both of the face itself and the under-face zone. The author made analysis on checking this controversial idea.

Materials and methods. The author made analysis with the aid of numerical modelling as in the case of a 100 m high dam. Modeling was made of stress-strain state (SSS) of several structural alternatives of a concrete face rockfill dam and a massive under-face zone made of stoneconcrete. At that, high accuracy finite elements were used and consideration was made of possible appearance of non-linear effects on the contact between the dam structure elements with each other.

Results. Due to use of the adequate methodology of analysis the author assessed the real conditions of the proposed dam structural design. It is shown that the massive stoneconcrete under-face zone resting on rock foundation causes additional tensile longitudinal force in the concrete face. This affects the face crack resistance by causing high tensile stresses in it. Weak zones of strength loss also appear in stoneconcrete zone itself. The affect is also revealed even at those considerably decreased rigidity values of the face and the stoneconcrete which the authors of the idea used in their calculations.

Conclusions. The idea of favorable effect of arranging massive stoneconcrete under-face zone on safety of rockfill dam concrete face is a dangerous misapprehension.

Keywords: concrete faced rockfill dam; stoneconcrete; stress-strain state; strength; under-face zone