

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

2018, №2, Том 10 / 2018, No 2, Vol 10 <https://esj.today/issue-2-2018.html>

URL статьи: <https://esj.today/PDF/19SAVN218.pdf>

Статья поступила в редакцию 20.03.2018; опубликована 14.05.2018

**Ссылка для цитирования этой статьи:**

Саинов М.П., Борзов М.С. О роли вертикальных швов в регулировании напряжённо-деформированного состояния железобетонного экрана каменно-набросной плотины // Вестник Евразийской науки, 2018 №2, <https://esj.today/PDF/19SAVN218.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ.

**For citation:**

Sainov M.P., Borzov M.S. (2018). Role of vertical joints in regulation of stress-strain state of concrete faced rockfill dam. *The Eurasian Scientific Journal*, [online] 2(10). Available at: <https://esj.today/PDF/19SAVN218.pdf> (in Russian)

УДК 627.2

**Саинов Михаил Петрович**

ФГОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет», Москва, Россия  
Доцент кафедры «Гидравлики и гидротехнического строительства»

Кандидат технических наук

E-mail: [mp\\_sainov@mail.ru](mailto:mp_sainov@mail.ru)

РИНЦ: [https://elibrary.ru/author\\_profile.asp?id=427608](https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=427608)

**Борзов Максим Сергеевич**

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

E-mail: [borzov.bms@yandex.ru](mailto:borzov.bms@yandex.ru)

**О роли вертикальных швов  
в регулировании напряжённо-деформированного  
состояния железобетонного экрана  
каменно-набросной плотины**

**Аннотация.** Из результатов натурных наблюдений за железобетонными экранами каменно-набросных плотин, а также из результатов численного моделирования их напряжённо-деформированного состояния известно, что в направлении от борта к борту экран испытывает сжатие. В экранах сверхвысоких плотин, построенных в узких створах, эти сжимающие напряжения стать причиной появления экране вертикальных трещин. При этом трещинообразование в экране происходит несмотря на то, что железобетонный экран всегда разделён вертикальными швами на секции шириной 12-15 м.

Путём численного моделирования нами было исследовано влияние жёсткости швов на напряжённо-деформированное состояние железобетонного экрана плотины высотой 200 м. Было выявлено, что из-за малой толщины швов и существенной жёсткости заполняющего их материала они не могут компенсировать сжимающие напряжения в экране. Чтобы швы могли выполнять свою роль, их жёсткость должна быть уменьшена как минимум на порядок. Можно рекомендовать устраивать швы толщиной не менее 2 см и заполнять материалом (конструкцией) с очень малой жёсткостью. Однако следует иметь ввиду, что радикальное уменьшение сжатия может повлечь за собой появление в экране растягивающих напряжений.

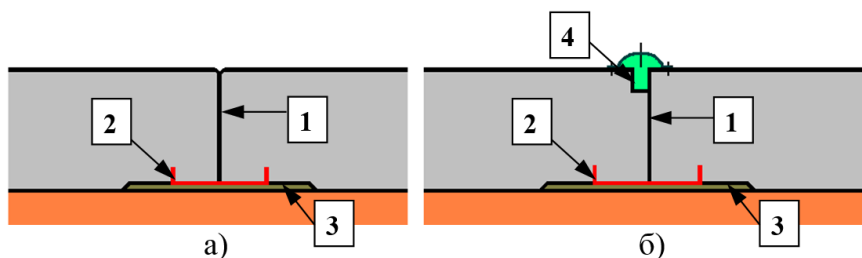
**Ключевые слова:** каменно-набросная плотина с железобетонным экраном; шов; напряжённо-деформированное состояние; численное моделирование

## Введение

По данным натурных наблюдений на ряде сверхвысоких каменно-набросных плотин с железобетонными экранами в противофильтрационном элементе образовались вертикальных трещин [1-6] и потребовался его ремонт. Примерами могут служить плотины Barra Grande [1-3], Mohale [1, 2, 4], Campos Novos [1, 2, 5, 6], Tianshengqiao-1 и другие. Характер повреждения железобетонного экрана (ЖБЭ) свидетельствовал о разрушении за счёт нарушения прочности бетона на сжатие.

Численные исследования напряжённо-деформированного состояния каменно-набросных плотин с ЖБЭ, проведённые рядом авторов [2, 7, 8, 9] показали, что в средней части экрана как правило концентрируются сжимающие напряжения в направлении от борта к борту. Нами было установлено, что значительные сжимающие напряжения, сопоставимые с прочностью бетона на сжатие, характерны для сверхвысоких плотин, построенных в узких створах [9].

Однако ЖБЭ всегда разрезаются на секции межсекционными швами [10], поэтому теоретически эти швы должны были частично компенсировать сжимающие напряжения, не допустив образования в экране трещин. По этой причине разными исследователями было высказано предположение, что образование трещин в ЖБЭ плотин Campos Novos, Barra Grande было вызвано недостаточной толщиной швов [1]. На данных плотинах швы выполнялись в виде прорези, заполненной битумом [10] (рис. 1).



1 – шов, промазанный битумом, 2 – водонепроницаемое уплотнение (металлическая или из поливинилхлорида), 3 – цементно-песчаная подушка, 4 – битумное уплотнение с крышкой из поливинилхлорида

**Рисунок 1.** Устройство «тонких» вертикальных швов в железобетонном экране: а – шов, работающий на сжатие, б – шов, работающий на растяжение [1]

После этого вертикальные швы стали выполнять уширенными, с уплотнением в виде деревянной доски или листа ПВХ. При ремонте ЖБЭ плотин Campos Novos, Barra Grande были применены именно такие швы [1].

Следует отметить, что на начальном этапе развития каменно-набросных плотин с железобетонными экранами применялись именно широкие швы. Например, на плотине Когсвилл, построенной в 1935 г., зазоры между плитами составляли 25 мм [11].

В данной статье описаны результаты выполненных нами исследований по оценке влияния разрезки экрана вертикальными швами на величину возникающих в нём сжимающих напряжений.

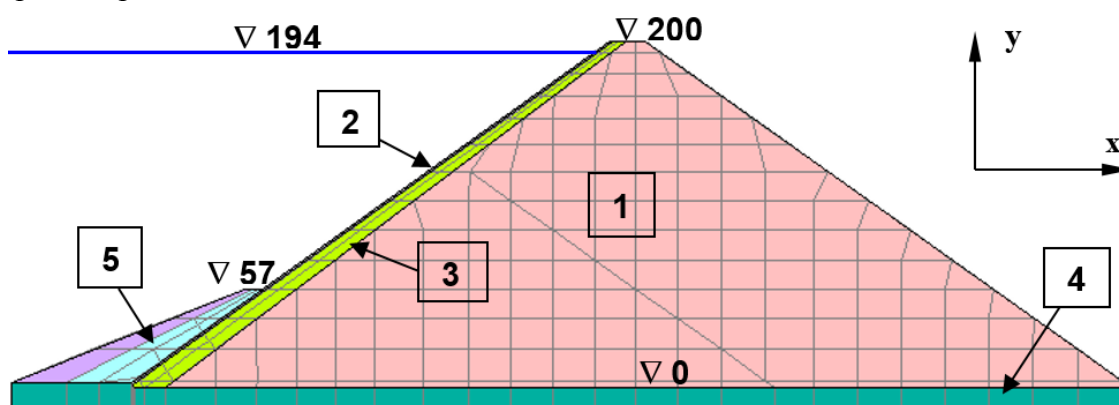
Для определения исходных данных расчётов нами был проведён анализ жёсткости швов. Для шва (трещины), имеющего толщину и заполненного каким-либо материалом, жёсткость  $E_n$  в нормальном направлении может быть найдена из закона Гука:

$$E_n = E / \delta \quad (1)$$

Здесь  $E$  – модуль деформации заполняющего материала;  $\delta$  – толщина шва.

Если принять, что шов толщиной 2 мм заполнен битумом с модулем деформации 10 МПа, то  $E_n = 5000$  МПа/м. Если принять, что шов имеет толщину 2 см и уплотнён деревянной доской (модуль упругости дерева составляет около 70 МПа), то нормальная жёсткость шва составит около 3500 МПа/м. Таким образом, мы установили, что изменение конструкции шва не ведёт к существенному изменению нормальной жёсткости швов. Учитывая наличие зазоров в уплотнениях швов несколько уменьшает его жёсткость, можно считать, что величина  $E_n$  находится в пределах 1000÷5000 МПа/м.

Исследование проводилось на примере плотины высотой 200 м, расположенной в узком ущелье с коэффициентом створа около двух. Длина плотины на отметке гребня составила 432 м, а на уровне дна – 24 м. Профиль плотины показан на рис. 2. Заложение откосов плотины было принято равным 1,4.



1 – упорная призма из горной массы, 2 – железобетонный экран, 3 – подэкрановая зона, 4 – скальное основание, 5 – защитная призма

**Рисунок 2.** Конечно-элементная модель плотины в поперечном сечении

Исследование проводилось путём численного моделирования методом конечных элементов. Для плотины была составлена конечно-элементная модель из 3351 конечного элемента. 696 конечных элементов были контактными, они моделировали контакт жёстких материалов (бетон, скала) с телом плотины, а также наличие в ЖБЭ вертикальных швов.

При составлении модели сооружения использовались конечные элементы с квадратичной степенью аппроксимации перемещений. Общее количество степеней свободы составило 20085.

Для отражения нелинейного характера деформирования каменной наброски использовалась модель грунта, предложенная проф. Рассказовым Л.Н. [12]. Параметры модели были выбраны на основе данных трёхосных испытаний крупнообломочных грунтов, описанных в [13, 14, 15]. Секущий модуль линейной деформации горной массы при принятых характеристиках модели составляет порядка 100 МПа.

Модуль линейной деформации бетона экрана был принят равным 29000 МПа, коэффициент Пуассона – 0,18.

Расчёты проводились с помощью вычислительной программы NDS\_N, составленной Саиновым М.П. [16].

При расчётах НДС была воспроизведена последовательность возведения и нагружения плотины. Принималось, что плотина возводится в 2 очереди, высота первой очереди составила 125 м. Максимальный прогиб ЖБЭ составил 87,5 см (рис. 3а).

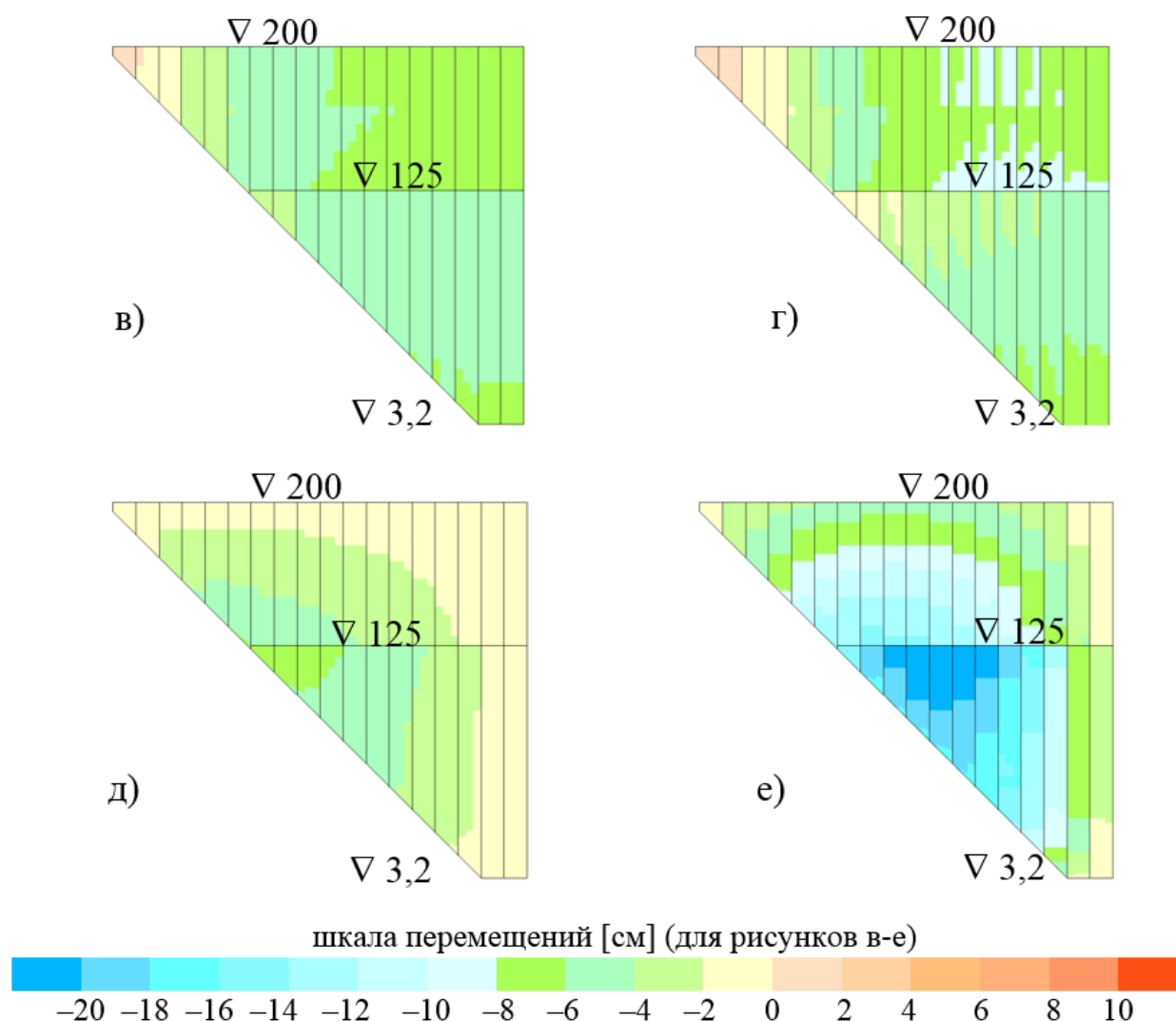
С целью выявления роли вертикальных швов расчёты были проведены для нескольких вариантов:

1. ЖБЭ не имеет вертикальных швов;
2. ЖБЭ разрезан вертикальными швами на секции шириной 12 м, нормальная жёсткость вертикальных швов составляет 5000 МПа/м;
3. ЖБЭ разрезан на секции шириной 12 м широкими швами, нормальная жёсткость которых близка к 0, условно «идеальными» швами.

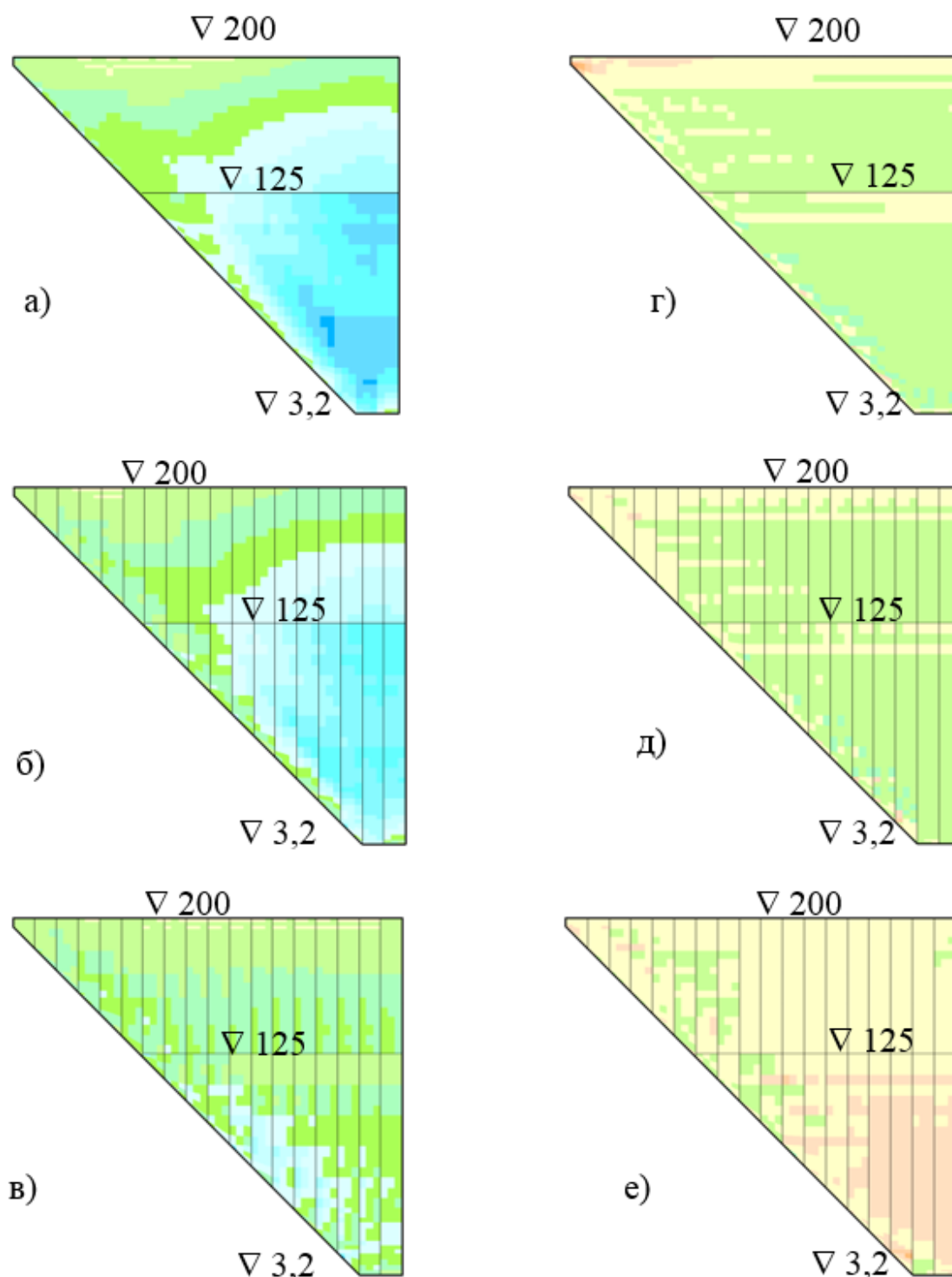
Были получены следующие результаты.

За счёт осадок тела плотины секции ЖБЭ стремятся сдвинуться от бортов к руслу. В вариантах 1 (при отсутствии швов) и 2 (при нормальной жёсткости швов) максимальные смещения ЖБЭ в направлении от борта к борту составляют до 7 см (рис. 3д). Эти смещения вызывают в ЖБЭ сжимающие напряжения в направлении от борта к борту.

При отсутствии вертикальных швов (вариант 1) в ЖБЭ сжимающие напряжения  $\sigma_3$  достигают 18,7 МПа (рис. 4а). Это больше, чем расчётное сопротивление бетона класса В25 на сжатие (14,5 МПа), соответственно можно ожидать появление в экране вертикальных трещин.



**Рисунок 3.** Перемещения верховой грани железобетонного экрана: а, б – прогибы (перемещения в направлении поперёк откоса); в, г – перемещения в направлении вдоль откоса; д, е – перемещения в направлении от борта к борту; а, в, д – при нормальной жёсткости швов 5000 МПа/м (вариант 2); б, г, е – при жёсткости швов, близкой к 0 (вариант 3) (получены авторами)



шкала напряжений [МПа]



**Рисунок 4.** Главные напряжения на верхней грани железобетонного экрана: а, б, в – минимальные главные напряжения  $\sigma_3$ ; г, д, е – максимальные главные напряжения  $\sigma_1$ ; а, б – ЖБЭ без швов (вариант 1); в, г – при нормальной жёсткости швов 5000 МПа/м (вариант 2); д, е – при жёсткости швов, близкой к 0 (вариант 3) (получены авторами)

Разрезка экрана вертикальными швами несколько снижает уровень сжимающих напряжений – в варианте 2 сжимающие напряжения  $\sigma_3$  не превышают 15,4 МПа (рис. 4б). Но они выше прочности бетона на сжатие. Таким образом, было выявлено, что тонкие вертикальные швы не в состоянии компенсировать сжатие секций ЖБЭ в направлении от борта к борту. По расчёту максимальное сближение вертикальных швов достигает 3,1 мм. Дополнительно проведённые расчёты, с чуть меньшей нормальной жёсткостью швов, не внесли существенных корректив в НДС ЖБЭ.

Поэтому был проведён расчёт для варианта 3, предусматривающего устройство очень широких швов. По-видимому, подобные швы можно устроить, если применять для их уплотнения очень податливые материала типа полиуретана или резины.

В варианте 3 НДС ЖБЭ было получено кардинально иным. Т. к. швы не препятствуют смещениям секций ЖБЭ в направлении от борта к борту, их смещения резко возрастают. Они достигают 23 см (рис. 3е). Неравномерность этих смещений вызывает сложный изгиб секций швов. Максимальный прогиб ЖБЭ в варианте 3 составил 90 см.

В варианте 3 сжимающие напряжения  $\sigma_3$  получили иное направление – не от борта к борту, а под углом к оси z. Максимальное значение сжимающих напряжений  $\sigma_3$  не превысило 11,9 МПа, т. е. почти на 40 % меньше, чем в варианте 1. Это напряжение меньше расчётного сопротивления бетона на сжатие.

Однако было выявлено, что снижение напряжений  $\sigma_3$  сопровождается существенным увеличением перемещений ЖБЭ в направлении от борта к борту. Если в варианте с жёсткими швами (вариант 1) максимальное смещение ЖБЭ в направлении от борта к руслу составило 6,6 см, то в варианте 3 с широкими «идеальными» швами – около 20 см. В варианте с «идеальными» швами максимальное сближение шва достигает 4,8 см. Это очень большое значение, поэтому «идеальные» швы должны быть очень широкими, толщиной несколько сантиметров.

В варианте 3 ЖБЭ свободно смещается от бортов к руслу, и эти смещения происходят неравномерно по высоте. За счёт этого НДС ЖБЭ в этом варианте характеризуется появлением обширных зон растягивающих напряжений  $\sigma_1$ . Они довольно большие по величине – превышают 3 МПа (рис. 4е). В вариантах 1 и 2 растягивающих напряжений в ЖБЭ почти не наблюдалось (рис. 4г,д).

### Выводы

1. Для ЖБЭ сверхвысоких плотин, построенных в узких створах, характерно появление значительных сжимающих напряжений в направлении от борта к борту. Они могут привести к появлению в ЖБЭ вертикальных трещин.

2. Роль вертикальных межсекционных швов в уменьшении сжимающих напряжений в ЖБЭ в направлении от борта к борту невелика. Для того, чтобы они могли компенсировать сжимающие напряжения, их жёсткость должна быть уменьшена как минимум на порядок, они должны быть довольно широкими. Конструкции швов, применяемы в настоящее время, т. е. швы с прослойкой из дерева или ПВХ, являются довольно жёсткими и не могут существенно снизить уровень сжатия в ЖБЭ.

3. Следует учитывать, что сжатие экрана в направлении от борта играет и положительную роль – оно «подавляет» в нём растягивающие напряжения. Снижая уровень сжимающих напряжений в одном направлении, можно получить ещё более неблагоприятное НДС ЖБЭ за счёт появления растяжения в другом направлении.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Freitas, M.S.Jr. Concepts on CFRDs Leakage Control – Cases and Current Experiences. ISSMGE Bulletin. 2009. Volume 3. Issue 4. pp. 11-18.
2. Silva da, A.F., Assis de, A.P., Neto, M.P.C. Three-Dimensional Analyses of Concrete Face Rockfill Dams: Barra Grande Case Study // Electronic Journal of Geotechnical Engineering. 2015. Volume 20. Bund 14. pp. 6407-6426.
3. Barra Grande Hydropower Plant. Design, Construction and Performance. Main Brazilian Dams III. URL: <http://www.cbdb.org.br/documentos/mbdiii/Barra%20grande.pdf> (дата обращения: 01.03.2018).
4. Johannesson, P., Tohlang, S.L. Lessons learned from Mohale // The International Water Power & Dam Construction. August 2007. Volume 59. Issue 8. pp. 16-18+20-22+24-25.
5. Sobrinho, J.A., Xavier, L.V., Albertoni, S.C., Pereira, R.F. Performance and Concrete Face Repair at Campos Novos // The International Journal on Hydropower & Dams. 2007. Issue 14(2). pp. 39-42.
6. Xavier, L.V., Albertoni, S.C., Pereira R.F., Antunes J. Campos Novos dam during second impounding // The International Journal on Hydropower & Dams. 2008. No 15. pp. 53-58.
7. Dakoulas, P., Thanopoulos, Y., Anastasopoulos, K. Non-linear 3D simulation of the construction and impounding of a CFRD // The International Journal on Hydropower and Dams. 2008. No 15(2). pp. 95-101.
8. Саинов М.П. Работа железобетонного экрана каменной плотины в пространственных условиях по результатам численного моделирования // Приволжский научный журнал. 2015. №3 (35). С. 25-31.
9. Саинов М.П. Влияние формы створа на напряжённое состояние железобетонного экрана каменно-насыпной плотины // Инженерно-строительный журнал. 2016. №3. С. 16-39.
10. ICOLD. Concrete Face Rockfill dam: Concepts for design and construction. International Commission on Large Dams. 2010. Bulletin 141.
11. Моисеев С.Н., Моисеев И.С. Каменно-земляные плотины. Основы проектирования и строительство – М.: Энергия, 1977. – 281 с.
12. Рассказов Л.Н., Джха Дж. Деформируемость и прочность грунта при расчете высоких грунтовых плотин // Гидротехническое строительство. 1987. №7. С. 31-36.
13. Marsal, R.J. Large Scale Testing of Rockfill Materials // Journal of Soil Mechanics and Foundations Division. ASCE. 1967. No 93(2). pp. 27-43.
14. Varadarajan, A., Sharma, K.G., Venkatachalam, K., and Gupta, A.K. Testing and Modeling Two Rockfill Materials // Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. ASCE. 2003. No 129(3). pp. 206-218.
15. Саинов М.П. Параметры деформируемости крупнообломочных грунтов в теле грунтовых плотин // Строительство: наука и образование. 2014. Вып.2. Ст.2. URL: <http://www.nso-journal.ru> (дата обращения: 01.03.2018).
16. 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.

**Sainov Mikhail Petrovich**

Moscow state university of civil engineering, Moscow, Russia  
E-mail: mp\_sainov@mail.ru

**Borzov Maksim Sergeevich**

Moscow state university of civil engineering, Moscow, Russia  
E-mail: borzov.bms@yandex.ru

## **Role of vertical joints in regulation of stress-strain state of concrete faced rockfill dam**

**Abstract.** From the results of field observations over the concrete faced rockfill dam as well as the results of numerical modeling of their stress-strain states it is known that in the direction from one side to the other the face is subject to compression. In the faces of ultra-high dams built in narrow gorges these compressive stresses may cause appearance of vertical cracks in the face. At that, cracking in the face occurs in spite of the fact that the reinforced concrete face is always divided by vertical joints into sections 12-15 m wide.

With the aid of numerical modeling we studied the impact of the joints rigidity on the stress-strain state of the reinforced concrete face of 200 m high dam. It was revealed that due to small thickness of joints and the existing rigidity of the material filling them they cannot compensate compressive stresses in the face. To provide the joints with playing their role their rigidity should become at least 10 times as less. The recommendation may be arrangement of joints with thickness at least 2 cm to be filled with the material (construction) with very low rigidity. However, it should be borne in mind that radical decrease of compression may entail appearance of tensile stresses in the face.

**Keywords:** concrete faced rockfill dam; joint; stress strain state; numerical modeling