

doi: 10.5862/MCE.63.2

Влияние формы створа на напряженное состояние железобетонного экрана каменно-насыпной плотины

Impact of dam site configuration on 3D stress-strain state of concrete faced rockfill dam

Канд. техн. наук, доцент М.П. Саинов,
Национальный исследовательский Московский
государственный строительный университет,
Москва, Россия

M.P. Sainov,
Moscow State Civil Engineering University
(National Research University), Moscow,
Russia

Ключевые слова: плотина с железобетонным экраном; пространственное напряженно-деформированное состояние; численное моделирование; трещинообразование; периметральный шов; влияние геометрии створа

Key words: concrete faced rockfill dam; 3D Stress-Strain State; numerical modeling; cracking; perimetral joint; effect of foundation topography

Аннотация. В статье рассмотрены результаты численного моделирования пространственного напряженно-деформированного состояния (НДС) плотины высотой 100 м с железобетонным экраном. Показано, что при расположении плотины в ущелье любой формы железобетонный экран сжат в направлении от борта к борту, а в направлении вдоль откоса может испытывать растяжение. Образование в экране растягивающих напряжений вызвано возникновением растягивающих усилий при смещениях каменной насыпи, а также изгибными деформациями. Изгиб экрана делает наиболее вероятным образование растяжения на нижней грани. Во всех вариантах створа происходит раскрытие периметрального шва. Большое влияние на формирование НДС экрана оказывает последовательность возведения и загрузки плотины. При возведении плотины в две очереди НДС экрана оказывается более благоприятным, чем при возведении в одну очередь: прогибы экрана, растягивающие и изгибающие усилия в нем становятся меньше, а уровень сжатия в направлении и от борта к борту растет. Однако при возведении в две очереди верхняя часть экрана первой очереди будет испытывать неблагоприятные изгибные деформации из-за неравномерности протекания осадок каменной насыпи. По указанным причинам сверхвысокие каменно-насыпные плотины с железобетонным экраном (высотой 150 м и более) могут иметь крайне неблагоприятное НДС. По результатам численного моделирования увеличение высоты плотины в 2 раза привело к росту перемещений в 3.5 раза, а напряжений в экране – в 2 раза. В экранах сверхвысоких плотин могут возникать значительные растягивающие и сжимающие напряжения, которые могут вызвать нарушение прочности бетона. Сверхвысокие плотины должны возводиться в несколько очередей, чтобы улучшить надежность работы их железобетонного экрана.

Abstract. The article deals with the results of numerical modeling of the 3D stress-strain state (SSS) of a 100 m high dam with reinforced concrete face. It is shown that at the location of the dam in a gorge of any shape, the reinforced concrete face is compressed in the direction from one side to the other and in the direction along the slope it may have tensile stresses. The formation of tensile stresses in the face is caused by the emergence of tensile forces at the displacement of rockfill as well as by bending deformations. The face bend contributes to the most probable formation of tension on the downstream face. In all site alternatives the perimetral joint opens. Construction sequence and dam loading have a great effect on the face SSS formation. During the dam construction in 2 stages the face SSS turns to be more favorable than when the dam is constructed in 1 stage: face deflections, tensile and bending forces in it decrease, but the level of compression from one side to the other increases. However, during the dam construction in 2 stages the first-stage face upper part will suffer unfavorable bending deformations caused by non-uniform settlements of the rockfill. Due to the aforementioned reasons, very high rockfill dams with a reinforced concrete face (150 m and higher) may have extremely unfavorable SSS. By the results of numerical modeling, twice as much increase in the dam height led to 3.5 times as much the growth of displacements and twice as much the growth of stresses in the face. In the faces of very high dams there may appear considerable tensile and compressive stresses, which may

Sainov M.P. Vliyaniye formy stvora na napryazhennoe sostoyaniye zhelezobetonnoyego ekrana kamenno-nasyypnoy plotiny [Impact of dam site configuration on 3D stress-strain state of concrete faced rockfill dam]. *Magazine of Civil Engineering*. 2016. No. 3. Pp. 16–39. doi: 10.5862/MCE.63.2 (rus)

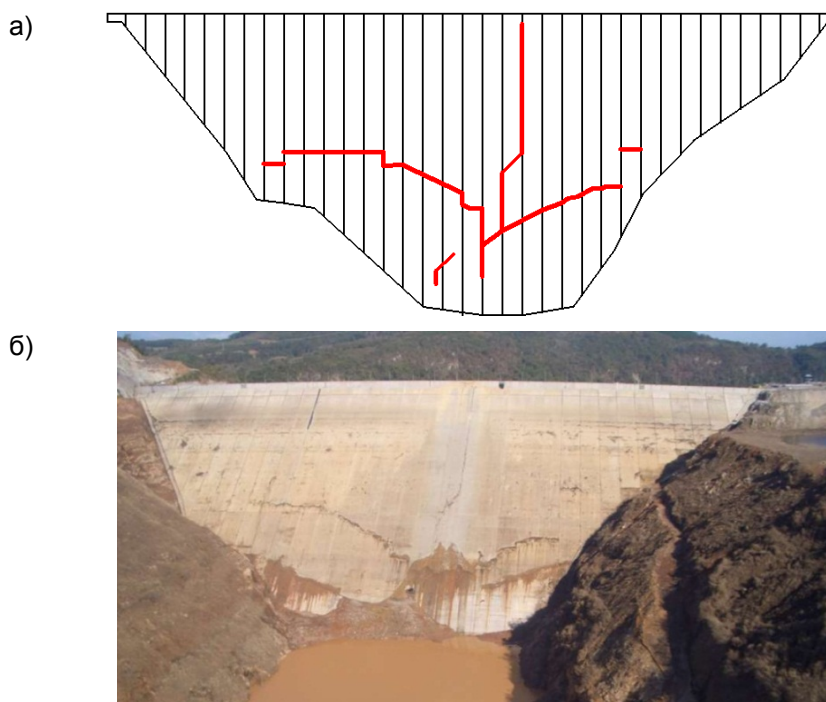
cause concrete structural failure. Very high dams should be constructed in several stages in order to improve reliability of reinforced concrete face performance.

Введение. Постановка задачи.

Каменные плотины с железобетонным экраном в настоящее время весьма распространенный тип грунтовых плотин, хотя большинство из них построено в странах Латинской Америки и Китае. 7 подобных плотин имеют высоту более 200 м. Большинство высоких плотин с железобетонным экраном построены в относительно узких створах [1–2], и их напряженно-деформированное состояние (НДС) формируется в пространственных условиях.

При проектировании подобных плотин обычно считают, что железобетонный экран находится в состоянии двухосного сжатия, а арматуру устанавливают для восприятия температурно-усадочных деформаций. Однако численные исследования, ранее проведенные нами [3–5], показали, что это не так: экран может находиться в неблагоприятном НДС. В направлении вдоль откоса экран может испытывать растягивающие усилия; в направлении от борта к борту – существенные сжимающие напряжения. Некоторыми другими авторами получены похожие результаты.

Возможность формирования неблагоприятного характера НДС железобетонного экрана подтверждает опыт эксплуатации некоторых плотин, в железобетонном экране которых образовывались трещины. Трещинообразование наблюдалось в экранах плотин Shuibuya (высотой 233 м), Aguamilpa (187 м), Tianshengqiao 1 (178 м), Barra Grande (185 м), Campos Novos (202 м), Mohale (145 м) [1, 2, 6–11]. На разных плотинах трещины были ориентированы по-разному. Горизонтальные трещины возникли в экранах плотин Shuibuya, Aguamilpa; по мнению исследователей [6], эти трещины являются следствием растягивающих усилий в экране. Вертикальные трещины наблюдались в экранах плотин Tianshengqiao 1, Barra Grande и Mohale [7,10]. В них происходило разрушение защитного слоя над арматурой, что характерно для разрушения при нарушении прочности бетона на сжатие. Отмечены также случаи, когда причиной образования трещин в железобетонном экране был сложный характер его деформирования, являющийся следствием сложных топографических условий [6]. В железобетонном экране плотины Campos Novos образовалась целая система трещин, вертикальных, горизонтальных и наклонных [11] (рис. 1). Очевидно, что не последнюю роль в образовании этих трещин сыграло взаимодействие плотины со скальным каньоном.



**Рисунок 1. Расположение трещин в железобетонном экране плотины Campos Novos, образовавшихся после первого наполнения водохранилища:
а) схема; красными линиями обозначены трещины; б) фото**

В связи с вышесказанным становится важным оценить НДС железобетонного экрана в условиях пространственной работы в скальном ущелье. В последнее время появился ряд исследований, посвященных этой теме [12–17]. В данной статье рассматриваются результаты наших численных исследований, начало которым было положено в [4–5]. В нашем исследовании ставится цель выявить степень влияния на НДС экрана таких факторов как форма ущелья, в котором построена плотина, высота плотины и последовательность возведения плотины.

Принципы численного моделирования

В качестве объекта исследования была выбрана абстрактная плотина высотой 100 м из горной массы с заложением откосов 1.4. Она была принята однородной, зонирование камня в теле упорной призмы не учитывалось. Толщина железобетонного экрана принята переменной – от 0.5 м на гребне до 1 м у подошвы. От скального основания экран отрезан периметральным швом, расположенным перпендикулярно к верховой грани. Экран разрезался вертикальными швами на секции шириной 12 м.

Исследования проводились методом конечных элементов (МКЭ) по вычислительной программе Nds-N, составленной М.П. Саиновым [18]. Для моделирования поведения швов в экране и взаимодействия железобетонного экрана с окружающими грунтами использовались контактные конечные элементы. В расчетах учитывалась нелинейность деформирования грунтов (по модели проф. Л.Н. Рассказова [19], [20]), а также поведения контактов (по модели Кулона–Мора).

Параметры деформируемости каменной насыпи были выбраны такими, чтобы в плоской задаче ее максимальные строительные осадки составили 54 см, что вписывается в результаты натуральных наблюдений за рядом плотин [21]. Если принимать модель линейного деформирования камня, то данная осадка может быть получена при модуле деформации $E \approx 60$ МПа. Модуль деформации бетона экрана был принят равным 29000 МПа.

Сетка МКЭ для поперечного сечения, в котором плотина имеет максимальную высоту, показана на рисунке 2. Для моделирования железобетонного экрана и прилегающих к нему зон использовались конечные элементы с квадратичной аппроксимацией перемещений, так как наши предварительные исследования показали, что только такой подход может обеспечить получение приемлемых результатов. При использовании элементов низкого порядка распределение напряжений в тонкостенной конструкции экрана получается не гладким, а со скачками на границах конечных элементов. Квазилинейные конечные элементы использовались только для моделирования каменной насыпи. В сетку МКЭ был включен неглубокий блок скального основания плотины.

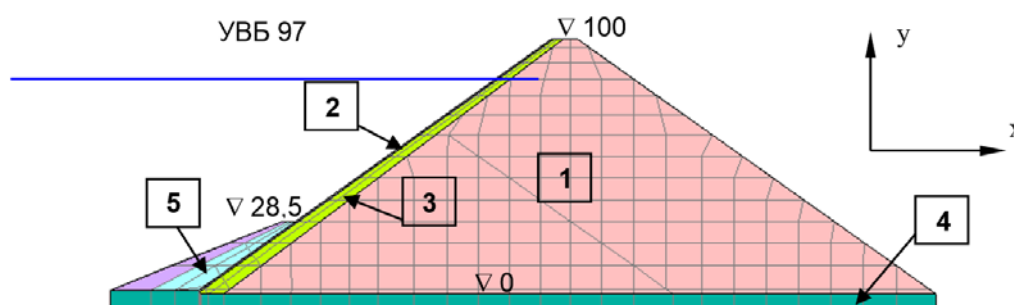


Рисунок 2. Сетка МКЭ плотины в поперечном сечении:

1 – упорная призма; 2 – железобетонный экран; 3 – подэкранный блок; 4 – скальное основание; 5 – защитная призма

При расчетах учитывалась последовательность возведения и загрузки плотины. Была принята схема поэтапности, предусматривающая наполнение водохранилища до НПУ 97 м и возведения железобетонного экрана только после возведения плотины на полный профиль.

Влияние формы створа выявлялось путем сравнения НДС между несколькими расчетными вариантами геометрии речной долины. Во всех вариантах форма ущелья принималась трапецеидальной. Варианты различались наклоном бортов и шириной руслового участка плотины. Заложение бортового склона принималось равным 0.5, 1 или 2, ширина русловой части – 12, 48 или 108 м. Всего было получено 9 вариантов конфигурации створа. Варианты обозначены Sainov M.P. Vliyaniye formy stvora na napryazhennoye sostoyaniye zhelezobetonnogo ekrana kamenno-nasyynoy plotiny [Impact of dam site configuration on 3D stress-strain state of concrete faced rockfill dam]. *Magazine of Civil Engineering*. 2016. No. 3. Pp. 16–39. doi: 10.5862/MCE.63.2 (rus)

двойной нумерацией. Цифра указывает на уклон борта, а буква кодирует ширину русла. Параметры створов указаны в таблице 1. Там же указаны количественные параметры сеток МКЭ для различных вариантов конфигурации створов.

Таблица 1. Параметры вариантов створов и сеток МКЭ (плотина высотой 100 м)

вариант	Параметры створа			Параметры сетки МКЭ		
	ширина русловой части, м	заложение склона бортов	длина по гребню, м	конечных элементов	угловых узлов	степеней свободы
1a	216	2	610	4629 + 1444	6870	38070
1b	96	2	490	3219 + 1024	4855	26690
1c	24	2	418	2373 + 772	3646	19862
2a	216	1	511	4125 + 1274	6091	33726
2b (№0)	96	1	391	2715 + 854	4076	22346
2c	24	1	319	1869 + 602	2867	15516
3a	216	0,5	389	4629 + 1284	6603	36017
3b	96	0,5	293	3501 + 948	4991	26914
3c	24	0,5	221	2655 + 696	3782	20085

Примечание: Отдельно указано количество элементов сплошной среды и контактных элементов

Анализ результатов численного моделирования НДС плотины высотой 100 м при ее возведении и загрузке в одну очередь

Сначала рассмотрим НДС среднего варианта №2b, который будем называть вариант №0. В этом варианте ширина русловой части створа составляет 96 м, а уклон скальных бортов – 1^1 . Соответственно, коэффициент створа составляет 3.9, это достаточно широкий створ.

Расчетами для варианта №0 получено, что максимальные строительные осадки плотины составляют 52.9 см, они наблюдаются примерно в геометрическом центре плотины, на оси створа. Максимальные горизонтальные смещения плотины в створе составили 13.6 см.

Железобетонный экран, следуя за деформациями каменной насыпи, испытывает изгиб в двух направлениях (вдоль и поперек откоса). Максимальный прогиб (29.3 см) наблюдается в центре экрана (рис. 3а), а прогибы по контуру экрана существенно меньше. Контурные прогибы являются следствием сдвиговых смещений в периметральном шве в направлении поперек откоса. Максимальный краевой прогиб экрана (54 мм) наблюдается на участке скального борта плотины, а в русловой части он не превышает 28 мм (рис. 4б).

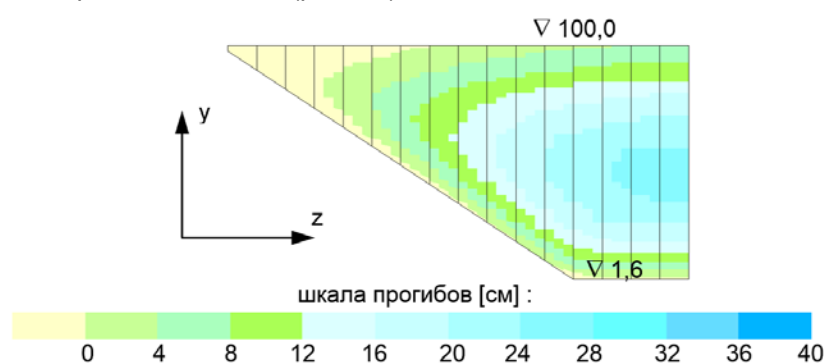


Рисунок 3. Прогибы железобетонного экрана в варианте № 0 (возведение без очередей)

Деформации экрана сопровождаются раскрытием периметрального шва (рис. 4а). Максимальное раскрытие шва на русловом участке составило 51 мм, на бортовом – 45 мм. Кроме того, происходят сдвиговые перемещения вдоль контура периметрального шва, в плоскости экрана (рис. 4в). На русловом участке смещения направлены в сторону русла, а на бортовом – в основном от подошвы к гребню. На наклонном участке примыкания к борту они достигают 32 мм.

¹ Поскольку створ принимался симметричным, то моделировалась только левобережная половина плотины. Саинов М.П. Влияние формы створа на напряженное состояние железобетонного экрана каменно-насыпной плотины // Инженерно-строительный журнал. 2016. №3(63). С. 16–39.

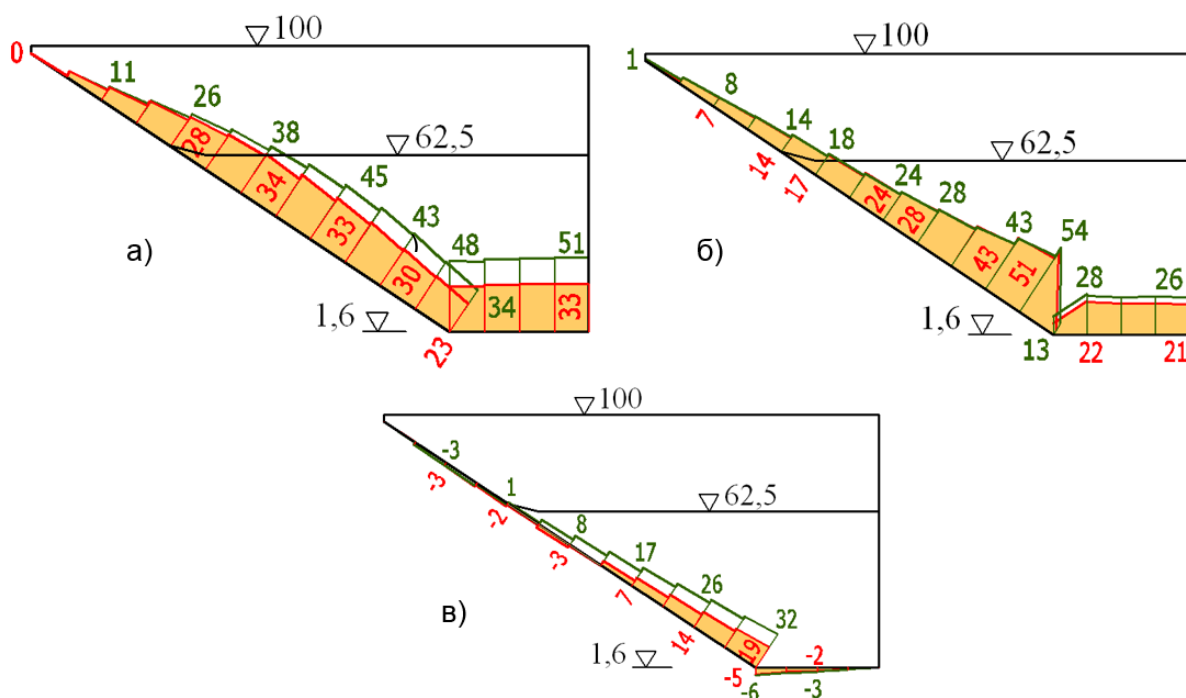


Рисунок 4. Перемещения в периметральном шве экрана варианта №0:
а) раскрытия; б) контурные прогибы; в) продольные смещения.
Закрашенные эпюры соответствуют схеме возведения плотины в 2 очереди,
незакрашенные – схеме возведения без очередей

Описанная схема деформирования экрана приводит к появлению в экране как сжимающих, так и растягивающих напряжений. При этом на низовой грани экрана уровень растяжения больше чем на верховой, а сжатия, наоборот, меньше. Это связано с изгибом плиты экрана.

В направлении, близком к направлению вдоль откоса, в экране чаще всего действуют либо максимальные главные напряжения σ_1 (рис. 5), либо промежуточные главные напряжения σ_2 (рис. 6). В нижней части экран испытывает растягивающие напряжения σ_1 в направлении вдоль откоса, а сжимающие напряжения σ_2 соответствуют гидростатическому давлению и направлены поперек плоскости экрана. Верхняя часть экрана имеет другое напряженное состояние, в ней экран сжат во всех направлениях. В направлении вдоль откоса действуют напряжения σ_2 , а напряжения σ_1 соответствуют гидростатическому давлению верхнего бьефа.

Опасность представляют растягивающие напряжения σ_1 в нижней части экрана. На верховой грани зона растягивающих напряжений σ_1 ориентирована горизонтально, то есть вероятно появление горизонтальных трещин. Однако зона растяжения невелика по площади, а максимальное значение σ_1 не превышает 1.3 МПа (рис. 5а). Такое напряжение может быть воспринято продольной арматурой экрана.

На низовой грани экрана проявление растяжения более значительно – область растягивающих напряжений σ_1 занимает всю нижнюю часть экрана. Она расположена широкой полосой вдоль периметрального шва. Появление в этой зоне растягивающих напряжений вызвано изгибом экрана в области примыкания к скальному основанию. Эта зона растяжения образуется как на русловом, так и на бортовом участках, но на бортовом участке растягивающие напряжения σ_1 все же несколько меньше по величине. Это связано с тем, что там экран имеет большую свободу в перемещениях и за счет повышенных краевых прогибов он способен уменьшить изгибные деформации. Максимальные значения растягивающих напряжений σ_1 наблюдаются на границе бортового и руслового участков, где они достигают 5.6 МПа (рис. 5б). Такое значение много больше нормативной прочности железобетона на растяжение и может привести к образованию в экране трещин. Эти трещины будут ориентированы вдоль примыкания к скале.

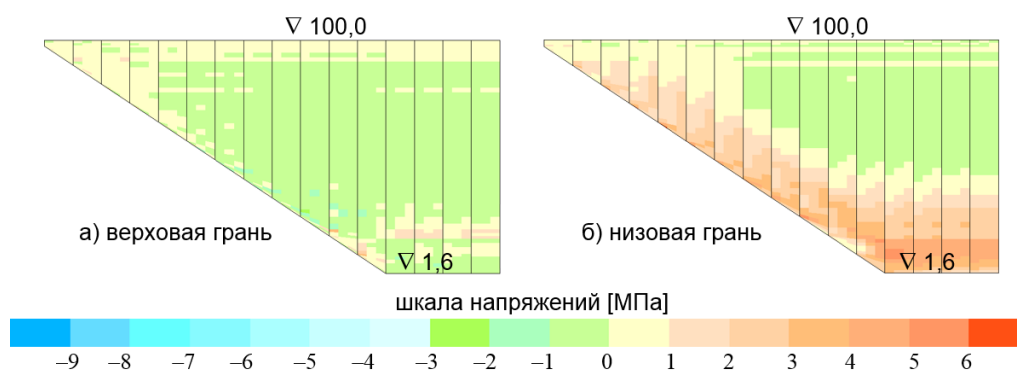


Рисунок 5. Максимальные главные напряжения σ_1 в железобетонном экране варианта №0 (возведение без очередей)

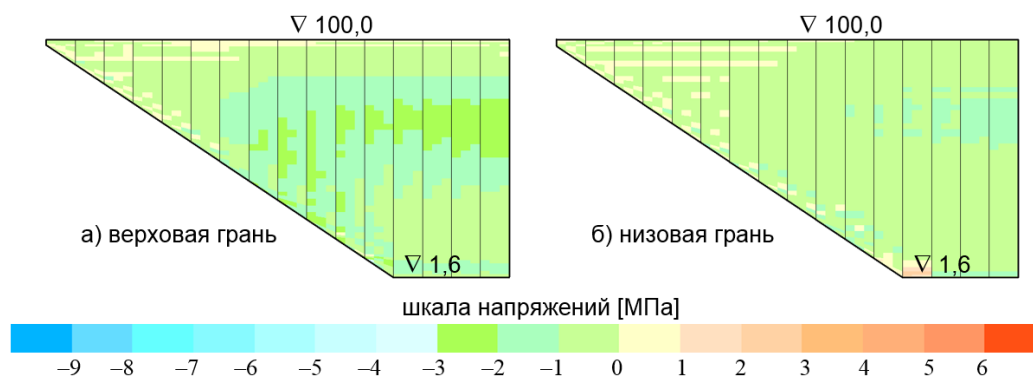


Рисунок 6. Промежуточные главные напряжения σ_2 в железобетонном экране варианта №0 (возведение без очередей)

В направлении от борта к борту экран практически по всей площади сжат минимальными главными напряжениями σ_3 . Сжимающие минимальные главные напряжения σ_3 на верховой грани достигают 6.9 МПа (рис. 7а), а на низовой – 5.7 МПа (рис. 7б). Область наибольшего сжатия по σ_3 располагается в центре экрана, а также в зоне сопряжения руслового и бортового участков плотины. Сжатие экрана в направлении от борта к борту говорит о том, что с точки зрения восприятия статических нагрузок необходимость устройства в экране вертикальных швов отсутствует. Хотя, как показывают натурные наблюдения за плотиной Num Ngun2, возможны неравномерности деформаций [22], и тогда швы могут сыграть положительную роль.

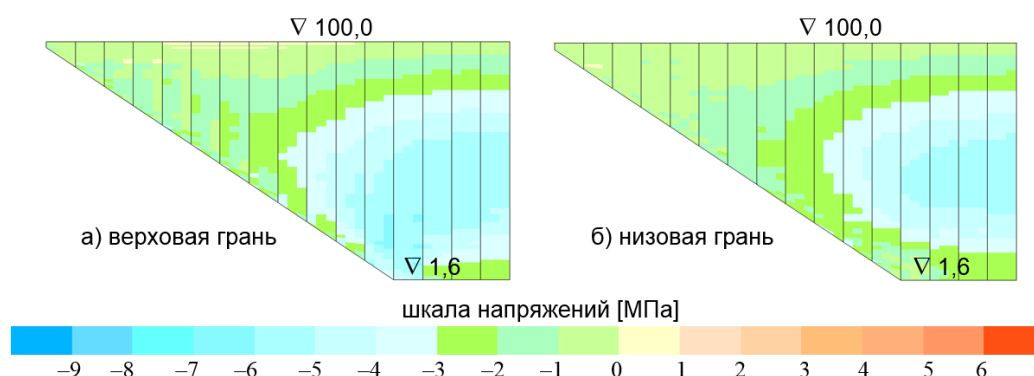


Рисунок 7. Минимальные главные напряжения σ_3 в железобетонном экрана варианта №0 (возведение без очередей)

Состояние вертикальных швов на момент окончания заполнения водохранилища показано на рисунке 8. Вертикальные межсекционные швы раскрываются только в крайних бортовых секциях, где уровень сжатия минимален (рис. 8). Раскрытия швов очень малы и составляют доли миллиметра. Красным выделены раскрытые швы, розовым – сомкнутые швы, ранее раскрывавшиеся, зеленым – сомкнутые швы без сдвиговых нарушений, желтым – сомкнутые швы со сдвиговыми нарушениями.

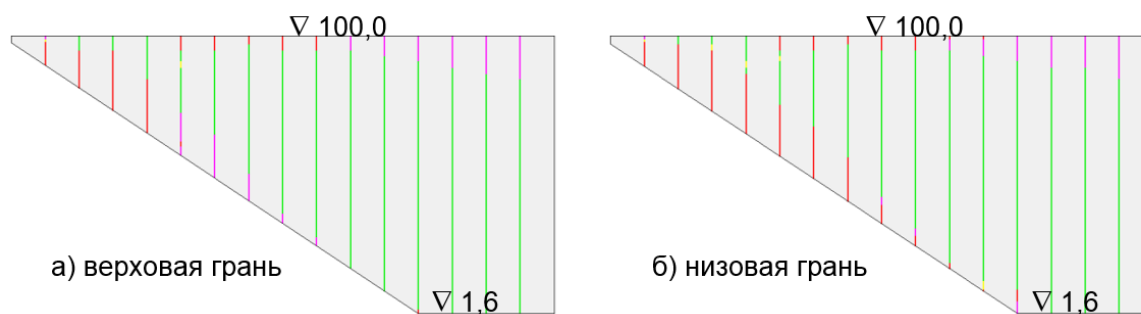


Рисунок 8. Состояние межсекционных швов в экране варианта №0 (возведение без очередей)

Далее исследовалось НДС экрана для других вариантов конфигурации створа.

На рисунках 9–16 представлены результаты расчета НДС только для вариантов № 1а, 1с, 3а, 3с как наиболее отличающихся друг от друга и от варианта №0.

Во всех вариантах максимальные прогибы экран получает на русловом участке, на бортовом участке они существенно уменьшаются (рис. 9).

Анализ (табл. 2) показывает, что во всех широких (варианты 1а, 1б, 2а, 3а) створах прогибы экрана примерно одинаковы – 29...30 см. В узких створах максимальный прогиб экрана уменьшается. Минимальное значение прогиба (22.6 см) экран имеет в варианте 3с, в котором скальное ущелье самое узкое. По сравнению с прогибом в варианте №0 данный прогиб меньше на 23 %.

Во всех вариантах контурные прогибы не равны 0 практически на всем протяжении периметрального шва (рис. 10). Характерно, что максимальные прогибы наблюдаются на бортовом участке плотины и составляют около 50 мм. В русловой части прогибы не превышают 30 мм, при этом сужение русловой части створа очень мало уменьшает величины контурных прогибов. Таким образом, конфигурация створа мало влияет на величины контурных прогибов экрана.

Таблица 2. Максимальные перемещения (см) экрана и плотины различных вариантов створа (возведение плотины высотой 100 м без очередей)

вариант	экран				ось плотины	
	ux	uy	uz	un	ux	uy
1а	23.1	21.0	2.7	30.5	16.1	53.6
1б	22.3	21.4	2.4	30.4	14.3	53.0
1с	19.0	18.8	1.9	26.3	11.6	47.6
2а	23.0	21.1	2.9	30.5	16.0	53.6
2б (№0)	21.3	20.8	2.4	29.3	13.6	52.9
2с	17.1	17.4	1.7	24.1	10.3	45.3
3а	22.9	21.5	3.1	30.8	15.4	54.1
3б	20.9	21.1	2.4	29.3	12.7	52.8
3с	15.5	16.7	1.5	22.6	8.4	40.3

Таблица 3. Контурные перемещения экрана (мм) для различных вариантов створа (возведение плотины высотой 100 м без очередей)

вариант	продольные		раскрытие		прогиб	
	русло	борт	русло	борт	русло	борт
1a	11	28	63	55	30	51
1b	6	30	55	51	29	50
1c	2	28	44	43	27	48
2a	12	31	62	51	30	56
2b (№0)	6	32	51	45	28	54
2c	2	27	37	34	26	50
3a	10	35	59	46	29	53
3b	5	33	47	38	27	52
3c	2	25	30	25	24	50

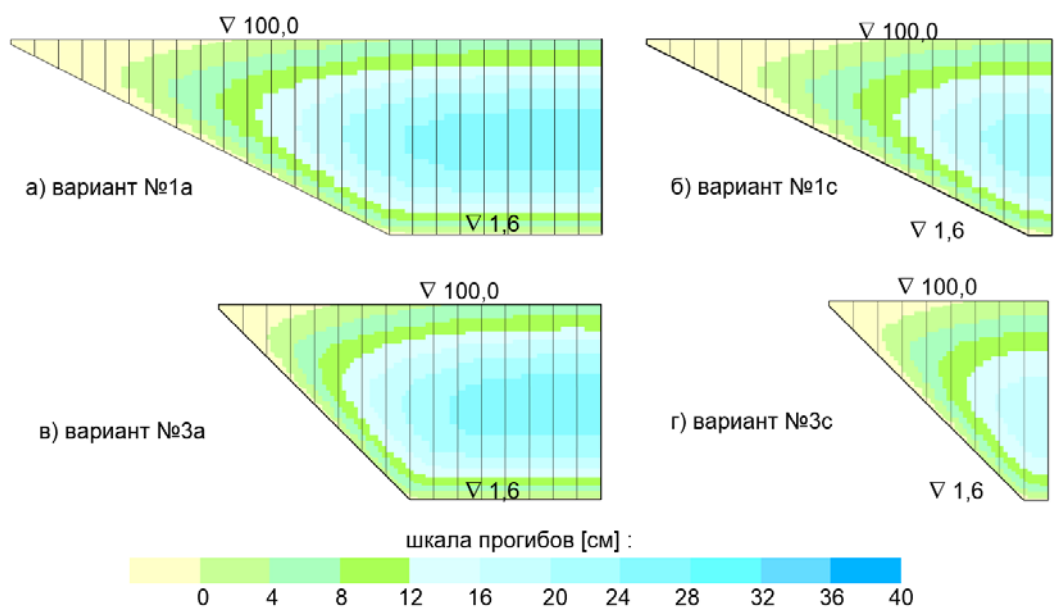


Рисунок 9. Прогибы железобетонного экрана в створах разной конфигурации (возведение без очередей)

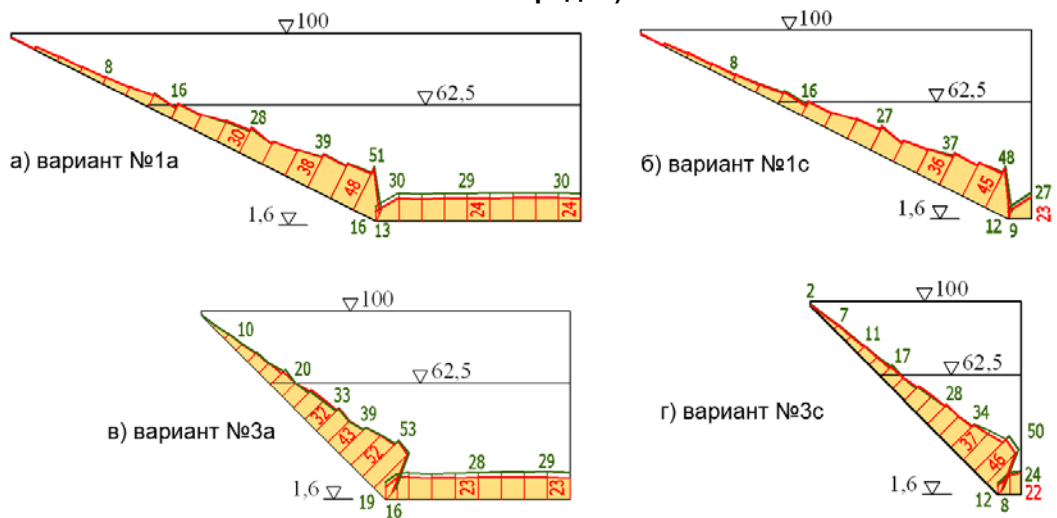


Рисунок 10. Контурные прогибы (мм) железобетонного экрана в периметральном шве для створов разной конфигурации (плотина высотой 100 м). Условные обозначения см. на рисунке 4

Во всех вариантах периметральный шов практически полностью раскрыт (рис. 11), даже в самом узком створе. Но величины раскрытий зависят от конфигурации скального ущелья. В узких Саинов М.П. Влияние формы створа на напряженное состояние железобетонного экрана каменно-насыпной плотины // Инженерно-строительный журнал. 2016. №3(63). С. 16–39.

створах и в створах с крутыми бортами раскрытие меньше. В самом узком створе (вариант 3с) раскрытие составляет 30 мм, что более чем в два раза больше (63 мм), чем в самом широком створе (вариант 1а).

Продольные смещения происходят в основном внизу бортового участка экрана. Они достигают 25...30 мм (рис. 12).

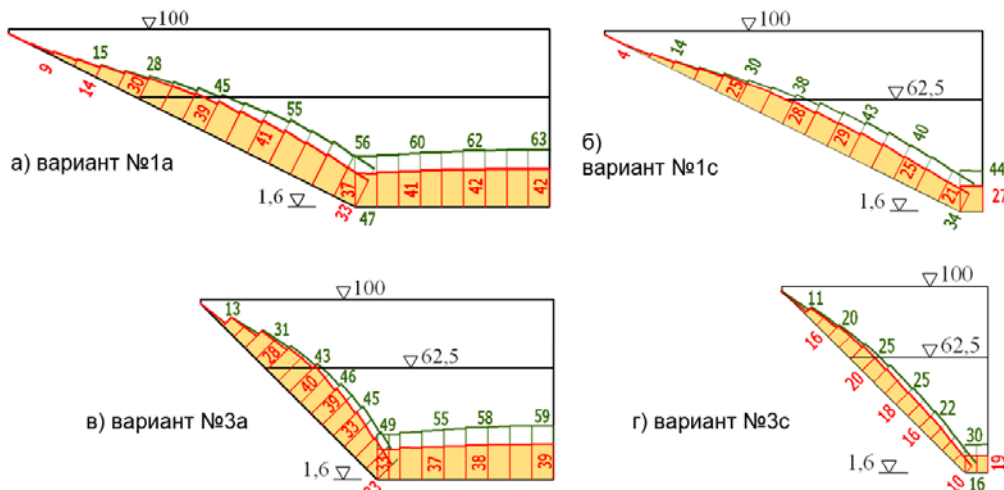


Рисунок 11. Раскрытия периметрального шва (мм) в створах разной конфигурации (плотина высотой 100 м). Условные обозначения см. на рисунке 4

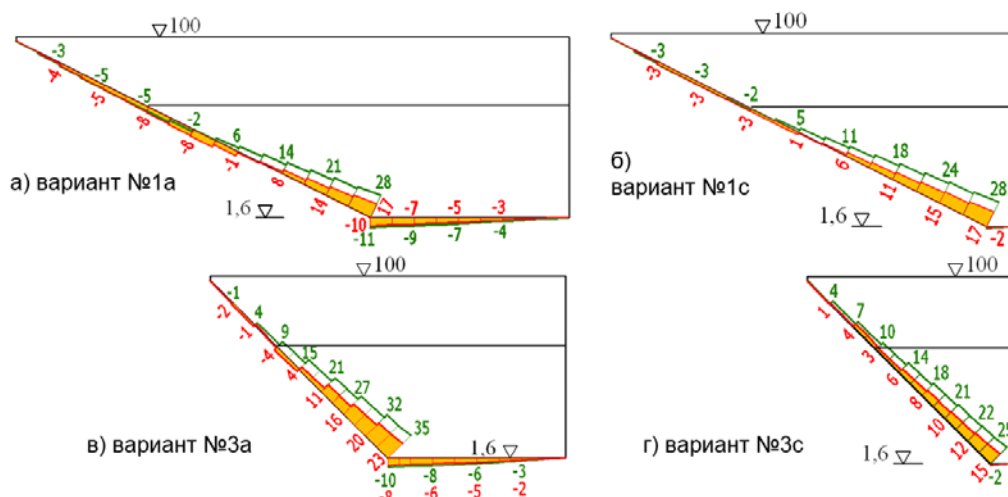


Рисунок 12. Продольные смещения экрана в периметральном шве (мм) в створах разной конфигурации (плотина высотой 100 м). Условные обозначения см. на рисунке 4

Таким образом, во всех вариантах экрана качественно картина деформаций не отличается. Соответственно, схожа во всех вариантах и картина распределения напряжений (рис. 13–16).

Анализ напряженного состояния экрана в широких створах показал, что оно качественно аналогично рассмотренному ранее в варианте №0, хотя происходит некоторое расширение зоны растяжения σ_1 (рис. 13а, 13в, 14а, 14в) и сокращение зоны сжимающих напряжений σ_3 грани (рис. 15 а,в). Изменяются и величины максимальных значений напряжений. В варианте №1 увеличение σ_1 произошло до 6.5 МПа, (рис. 13а), а уменьшение сжимающих напряжений σ_3 – до 3.8 МПа (рис. 14а).

В узком створе происходит наоборот: область растягивающих напряжений σ_1 сокращается, а сжимающие напряжения σ_3 интенсифицируются. Например, в варианте №3с растяжения на верхней грани практически не наблюдается (рис. 13г). Но максимальное напряжение σ_1 на нижней грани увеличилось до 7.5 МПа (рис. 14г). Максимальное сжимающее главное напряжение σ_3 в варианте 3с на нижней грани достигло 6.3 МПа (рис. 16г), а на верхней – 8.7 МПа (рис. 15г).

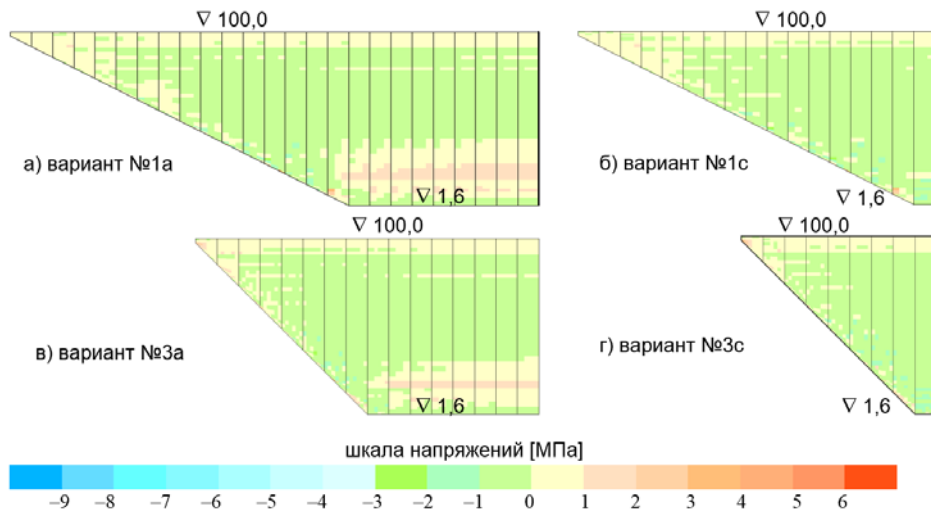


Рисунок 13. Максимальные главные напряжения σ_1 на верховой грани железобетонного экрана для створов разной конфигурации (возведение без очередей)

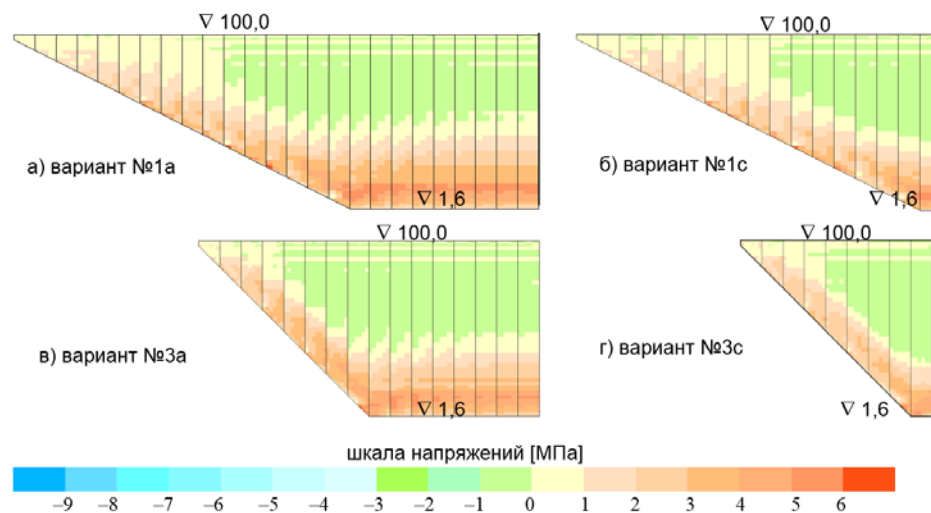


Рисунок 14. Максимальные главные напряжения σ_1 на низовой грани железобетонного экрана для створов разной конфигурации (возведение без очередей)

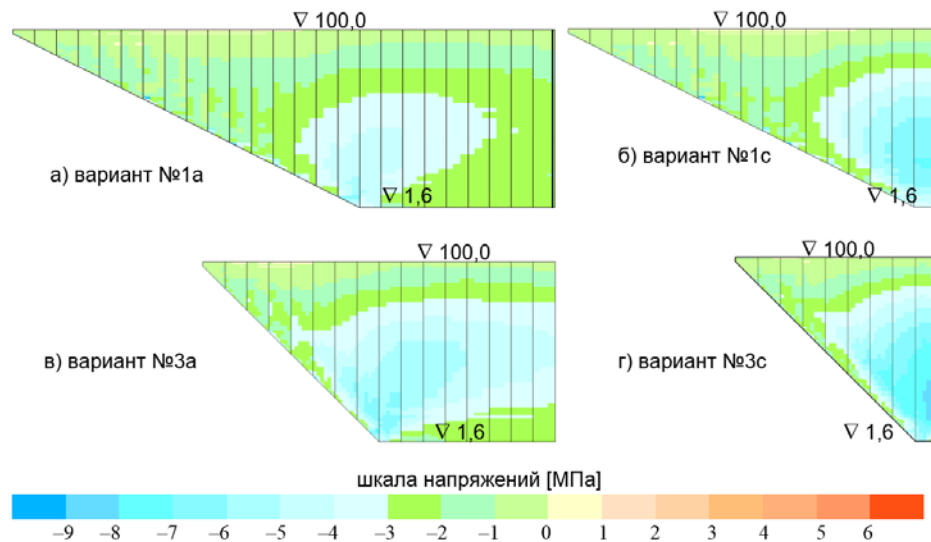


Рисунок 15. Минимальные главные напряжения σ_3 на верховой грани железобетонного экрана для створов разной конфигурации (возведение без очередей)

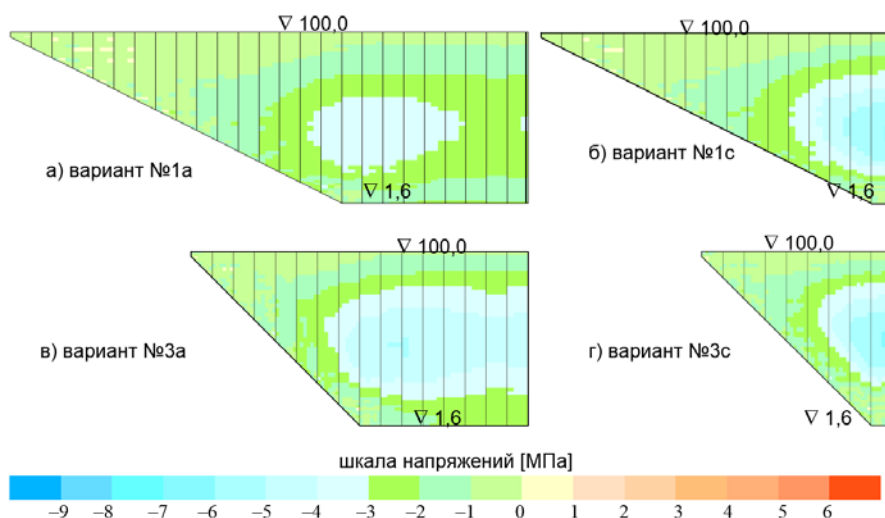


Рисунок 16. Минимальные главные напряжения σ_3 на низовой грани железобетонного экрана для створов разной конфигурации (возведение без очередей)

Область раскрытия межсекционных швов во всех вариантах располагается только в крайних секциях (рис. 17).

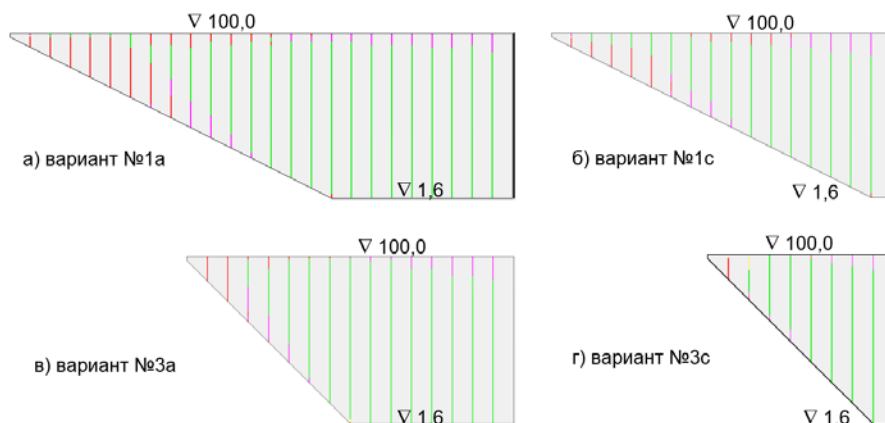


Рисунок 17. Состояние межсекционных швов на верхней грани экрана для створов разной конфигурации (возведение без очередей). Условные обозначения см. на рисунке 8

Анализ результатов численного моделирования НДС плотины высотой 100 м при схеме ее возведения в 2 очереди

Рассмотренная ранее схема возведения высокой плотины сразу на всю высоту является идеализированной, не осуществляемой на практике. Обычно экран устраивают параллельно с отсыпкой тела плотины, но с некоторым отставанием. При этом еще до завершения отсыпки возможно и наполнение водохранилища до некоторой промежуточной отметки. Поэтому рассмотрим, как влияет очередность возведения плотины на условия формирования НДС ее железобетонного экрана.

Для этого были проведены расчеты для схемы возведения плотины в две очереди. Высота первой очереди плотины была принята равной 62.5 м, то есть более 60 % от общей высоты плотины. Схема строительства в две очереди предусматривала, что сначала будет отсыпана первая очередь плотины, устроен ее железобетонный экран и защитная призма, затем произойдет частичное заполнение водохранилища, и лишь затем будут проводиться работы по отсыпке второй очереди плотины. На второй очереди строительства сначала будет отсыпано тело каменной насыпи, затем уложен железобетонный экран и в завершение водохранилище наполнится до НПУ 95 м.

Результаты расчетов НДС представлены на рисунках 18–22, а также 10–12.

Анализ результатов, полученных для варианта №0, показывает, что изменение последовательности возведения и загрузки плотины существенно сказалось на условиях работы железобетонного экрана и его НДС. При возведении плотины сразу на всю высоту железобетонный экран участвует в восприятии деформаций плотины только от гидростатического давления водохранилища – нагрузки от собственного веса грунтовой плотины на него не передаются. При возведении плотины в две очереди экран вынужден испытывать деформации каменной насыпи не только от гидростатического давления, но и от веса плотины второй очереди.

При восприятии веса второй очереди насыпь первой очереди получает небольшие дополнительные осадки, а также смещается в сторону верхнего бьефа на 2...4 см. За счет этого при наполнении водохранилища уменьшаются окончательные горизонтальные смещения плотины в сторону верхнего бьефа, возникающие при наполнении водохранилища. Уменьшение горизонтальных смещений благоприятно сказывается на НДС экрана. На большей части площади экрана его прогибы уменьшаются на величину до 2 см (рис. 18). Однако максимальный прогиб экрана возрос с 29.3 см до 34.6 см. Такой прогиб экран получает на гребне плотины первой очереди (рис. 18). Это связано с неравномерными осадками каменной насыпи первой очереди под действием веса плотины второй очереди. В этой зоне экран испытывает сильный изгиб в сторону нижнего бьефа.

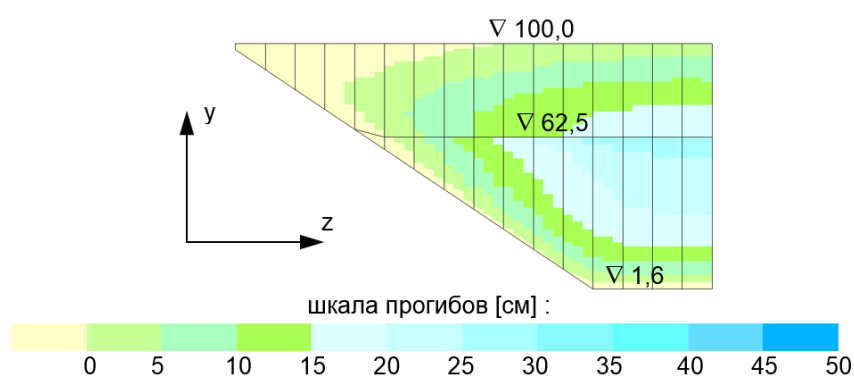


Рисунок 18. Прогибы железобетонного экрана в варианте №0 (возведение в две очереди)

Изменение схемы деформирования привело к изменению и напряженного состояния экрана. Качественно общая картина распределения напряжений в экране осталась прежней: экран сжимается в направлении от борта к борту, а растягивающие напряжения в направлении вдоль экрана наблюдаются в нижней части экрана. Различия состоят в следующем.

Во-первых, появилось различие между напряженным состоянием экрана первой и второй очередей. В экране второй очереди общий уровень напряжений меньше, чем в экране первой очереди, т.к. нагрузки, воспринимаемые экраном первой очереди, возросли, а второй очереди – упали. На границе между экраном первой и второй очереди разница в напряженном состоянии становится хорошо заметна. Например, зона максимумов сжимающих напряжений σ_3 переместилась из центра экрана к гребню плотины первой очереди (рис.19) – туда же, куда переместилась зона максимальных прогибов (рис. 18).

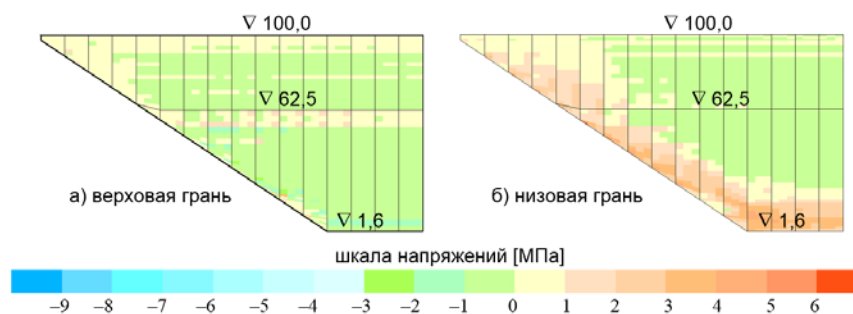


Рисунок 19. Максимальные главные напряжения σ_1 в железобетонном экране варианта №0 для створов разной конфигурации (возведение плотины в две очереди)

Во-вторых, экран первой очереди стал испытывать дополнительное сжатие под действием веса плотины второй очереди. Появление продольного сжимающего усилия привело к тому, что область растягивающих напряжений σ_1 в направлении вдоль экрана уменьшилась. На верхней Саинов М.П. Влияние формы створа на напряженное состояние железобетонного экрана каменно-насыпной плотины // Инженерно-строительный журнал. 2016. №3(63). С. 16–39.

грани, в нижней части экрана зона растяжения по σ_1 исчезла полностью (рис. 19а). В направлении вдоль экрана на большей части верховой грани экрана действуют сжимающие напряжения σ_2 . На низовой грани растягивающие напряжения σ_1 также уменьшились. Их максимальное значение уменьшилось с 5.6 МПа до 4.8 МПа (рис. 19б). Таким образом, по напряжениям σ_1 напряженное состояние экране стало в целом более благоприятным.

Дополнительные осадки и смещения, которые стал испытывать экран первой очереди, привели и к росту сжатия в направлении от борта к борту по напряжениям σ_3 . Общий уровень сжатия возрос. Максимальное значение σ_3 в верхней части экрана первой очереди составило 6.9 МПа на верховой грани (рис. 20а), что больше, чем при возведении плотины в одну очередь (6.0 МПа, рис. 7а).

В-третьих, в напряженном состоянии экрана проявились особенности деформирования плотины при ее двухочередном возведении. Как видно на рис. 18, верхняя часть экрана первой очереди испытывает повышенные прогибы. Следствием этих повышенных прогибов являются местные изгибные деформации верхней части экрана первой очереди. Изгиб вызвал появление в верхней части экрана растягивающих напряжений σ_1 на верховой грани экрана (до 1.4 МПа, рис. 19а) и увеличение сжимающих напряжений σ_3 на низовой грани экрана до 7.5 МПа (рис. 20б). Это говорит о том, что при возведении плотины в несколько очередей траектории напряжений σ_1 и σ_3 становятся более сложными и не отклоняются от направлений вдоль откоса и от борта к борту.

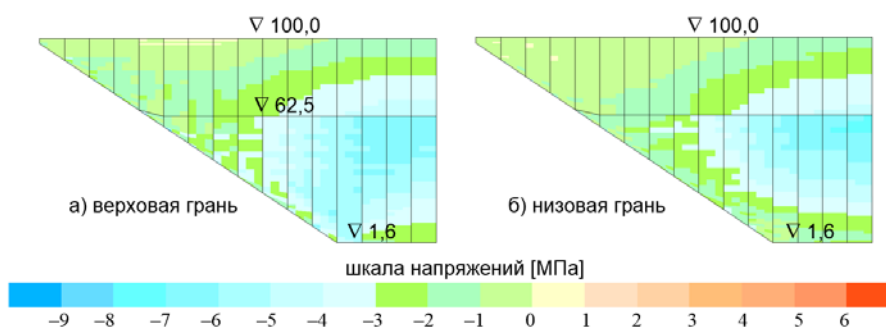


Рисунок 20. Максимальные главные напряжения σ_1 в железобетонном экране варианта №0 для створов разной конфигурации (возведение плотины в две очереди)

Все описанные выше особенности НДС железобетонного экрана плотины, возведенной в две очереди, характерны и для других вариантов конфигурации створа.

На рисунке 21 и в таблице 3 представлена информация о прогибах железобетонного экрана. В широких створах прогибы экрана при двухочередном возведении увеличились по сравнению с прогибами в случае возведения без очередей примерно на 20 %, а в узком створе (вариант 3с) – на 10 %. Для всех вариантов характерно локальное увеличение прогибов экрана в верхней части первой очереди.

Таблица 4. Максимальные перемещения (см) экрана и плотины для различных вариантов конфигурации створа (возведение плотины в две очереди)

вариант	экран				ось плотины	
	u_x	u_y	u_z	u_n	u_x	u_y
1а	25.1	28.0	3.0	37.3	16.5	52.7
1б	23.1	26.6	2.5	35.1	14.2	52.0
1с	19.3	22.8	1.9	29.8	11.5	46.5
2а	24.7	27.7	3.2	36.9	16.4	52.7
2б (№0)	22.6	26.4	2.6	34.6	13.6	51.8
2с	17.9	21.6	1.8	28.0	10.5	44.7
3а	24.6	28.0	3.5	37.1	16.0	53.1
3б	21.8	25.9	2.6	33.8	12.8	51.5
3с	15.6	19.4	1.5	24.9	8.6	42.8

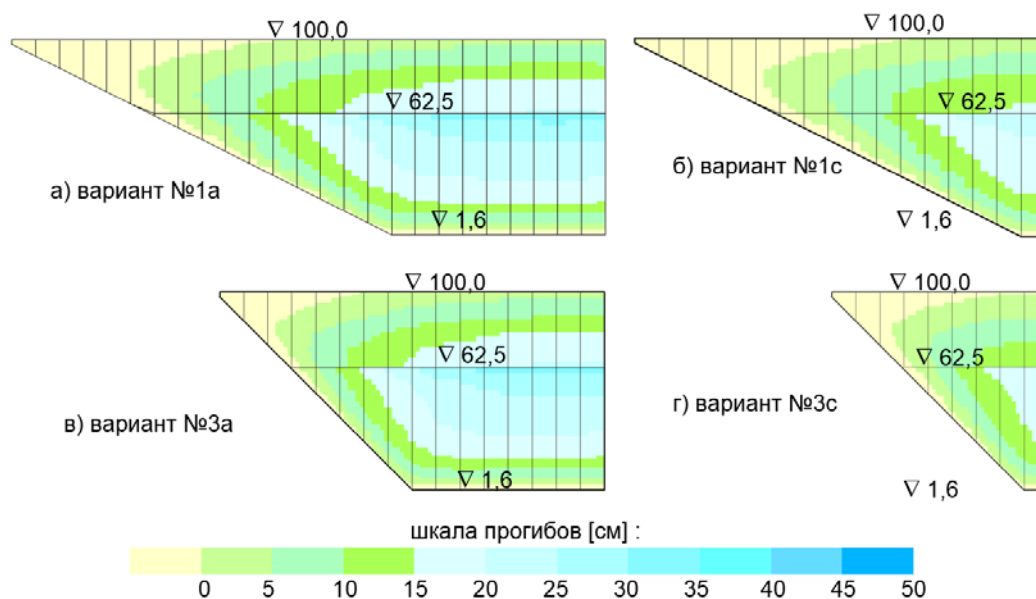


Рисунок 21. Прогибы железобетонного экрана в створах разной конфигурации (плотина высотой 100 м, возведение в две очереди)

На рисунках 10–12 показаны перемещения экрана в периметральном шве для различных вариантов конфигурации створа, а в таблице 4 указаны их максимальные величины.

Во всех вариантах при переходе на схему возведения в две очереди произошло существенное уменьшение раскрытий периметрального шва (рис. 11). Максимальные раскрытия на русловом участке уменьшились на 33...39 %, а на бортовом – на 13...33 %. При этом уменьшение прогибов более интенсивно проявлялось в узких створах.

Контурные прогибы экрана (рис. 10) также уменьшились незначительно. На бортовом участке максимальные значения контурных прогибов уменьшились на 8...19 %, а на русловом – лишь на 2...8 %.

Большое влияние последовательность возведения плотины оказала на величины смещений экрана вдоль контура периметрального шва. Их максимальные величины на бортовом участке снизились на 34...50 % (рис. 12) по сравнению со схемой строительства в одну очередь.

Таблица 5. Контурные перемещения экрана (мм) для различных вариантов конфигурации створа (возведение плотины в две очереди)

вариант	продольные		раскрытие		прогиб	
	русло	борт	русло	борт	русло	борт
1a	10	14	42	41	25	48
1b	5	18	35	36	24	46
1c	2	17	27	29	23	45
2a	10	19	41	41	25	53
2b (№0)	5	19	33	34	23	51
2c	2	16	23	25	23	49
3a	8	23	39	40	24	52
3b	4	21	30	30	22	50
3c	2	15	19	20	22	46

На рисунках 22–24 показано распределение в экранах разной конфигурации главных напряжений σ_1 и σ_3 . Во всех вариантах при переходе на схему возведения в две очереди НДС экрана претерпело изменения, аналогичные описанным ранее для варианта №0. Но ни в одном из вариантов уровень растягивающих напряжений σ_1 на низовой грани не упал до безопасного уровня.

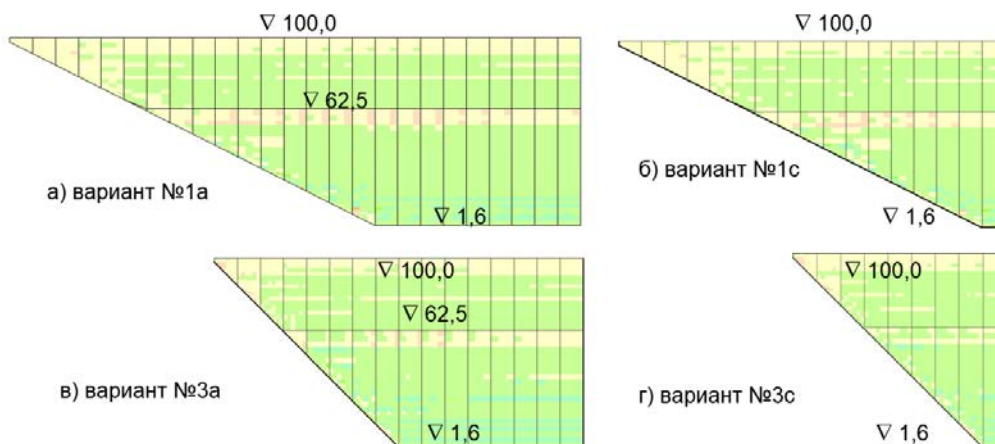


Рисунок 22. Максимальные главные напряжения σ_1 на верховой грани железобетонного экрана для створов разной конфигурации (возведение в 2 очереди). Шкала напряжений [МПа] – на рисунке 18

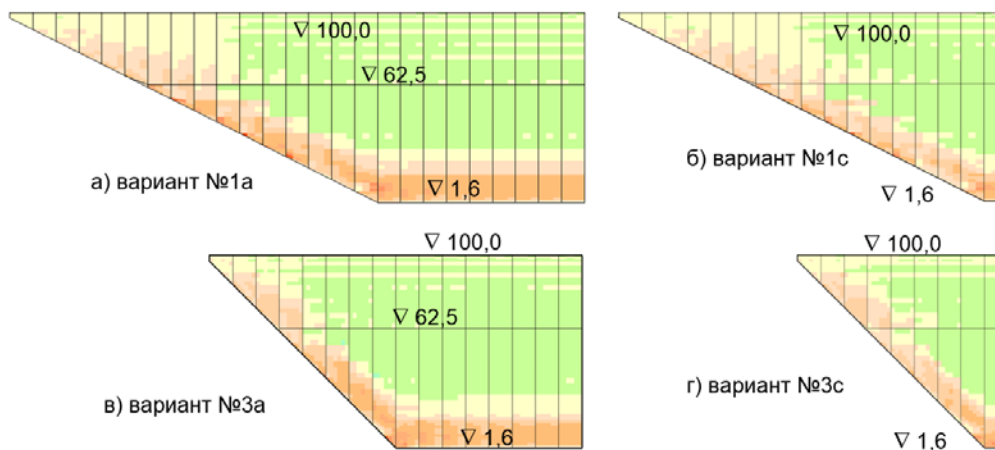


Рисунок 23. Максимальные главные напряжения σ_1 на низовой грани железобетонного экрана для створов разной конфигурации (возведение в 2 очереди). Шкала напряжений [МПа] – на рисунке 18

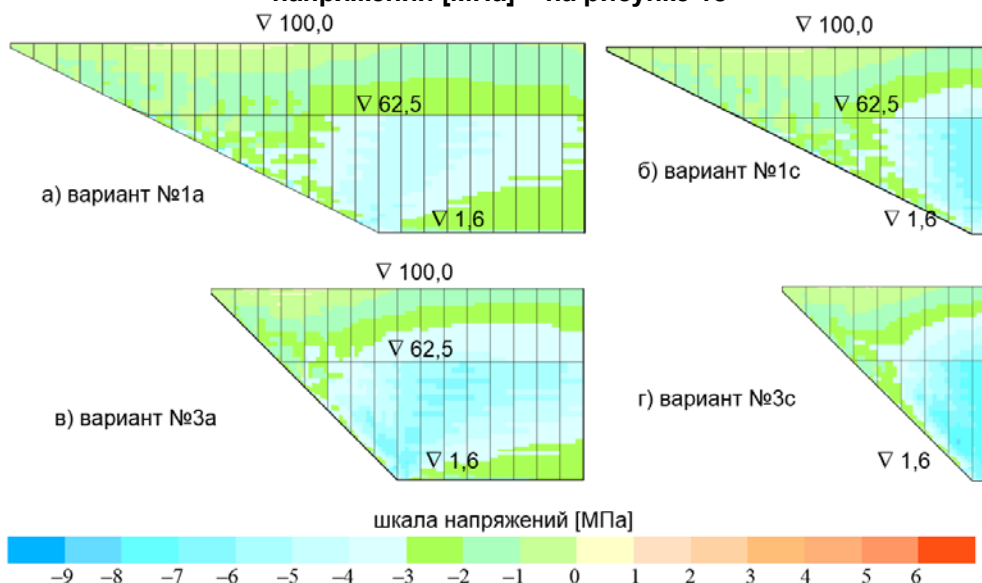


Рисунок 24. Минимальные главные напряжения σ_3 на верховой грани железобетонного экрана для створов разной конфигурации (возведение в две очереди)

Sainov M.P. Vliyaniye formy stvora na napryazhennoye sostoyaniye zhelezobetonnoy ekran kamennno-nasyponoy plotiny [Impact of dam site configuration on 3D stress-strain state of concrete faced rockfill dam]. *Magazine of Civil Engineering*. 2016. No. 3. Pp. 16–39. doi: 10.5862/MCE.63.2 (rus)

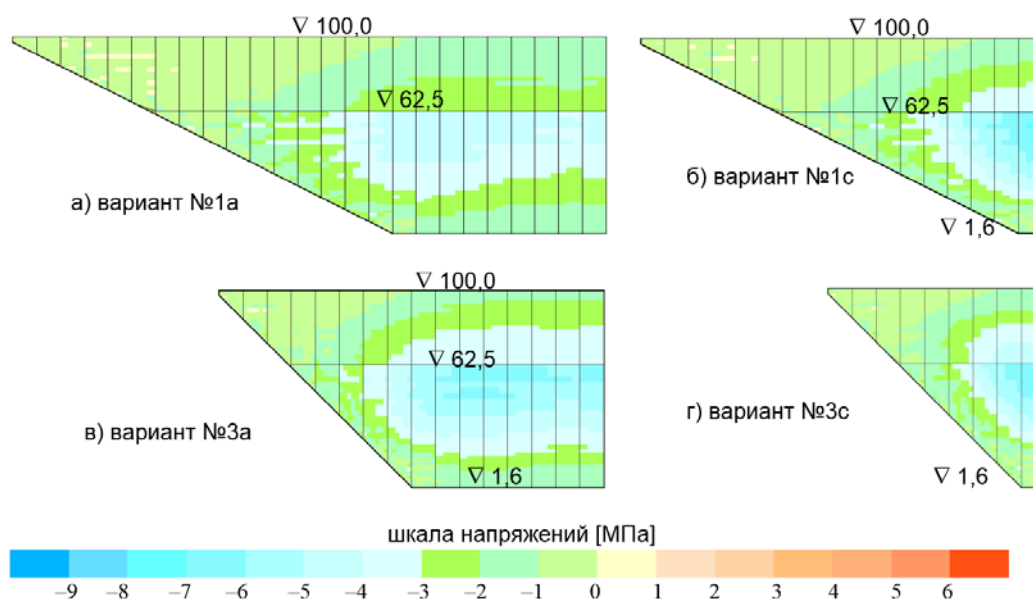


Рисунок 25. Минимальные главные напряжения σ_3 на низовой грани железобетонного экрана для створов разной конфигурации (возведение в две очереди)

Анализ влияния высоты плотины на формирование НДС плотины с железобетонным экраном

Для оценки НДС сверхвысоких плотин были выполнены исследования для плотины высотой 200 м. Для удобства сравнения рассматривалась плотина, все геометрические параметры которой и вмещающего ее ущелья ровно в 2 раза больше, чем у ранее рассмотренной плотины высотой 100 м. Соответственно, толщина железобетонного экрана плотины составила 1 м на гребне плотины и 2 м у подошвы.

При расчетах рассматривалась схема возведения плотины в две очереди. Высота плотины первой очереди составила 125 м.

Учитывая тот факт, что плотины высотой 200 м и более построены в ущельях с коэффициентом створа менее 4, на рисунках показаны результаты НДС только для вариантов №1с, 2б, 3а, 3с.

Результаты моделирования НДС плотины высотой 200 м представлены на рисунках 26–33. Их анализ показывает, что сверхвысокие плотины испытывают большие перемещения и напряжения. Например, в варианте №0 максимальные строительные осадки u_y на оси плотины составили 182 см, а максимальные горизонтальные смещения u_x – 46 см. Сравнивая их с перемещениями плотины высотой 100 м, можно увидеть, что увеличение высоты плотины в 2 раза привело к увеличению осадок в 3.5 раза, смещений – в 3.4 раза.

Примерно во столько же раз увеличались и перемещения железобетонного экрана. В варианте №0 максимальный прогиб железобетонного экрана составил 119 см. Информация о перемещениях плотины и экрана для всех расчетных вариантах показана на рисунке 26 и в таблице 5.

Примерно в 3.5 раза увеличались и перемещения экрана в периметральном шве (рис. 27–29, табл. 8). В варианте №0 раскрытие шва на русловом участке достигло 110 мм. Это раскрытие очень велико, оно не может быть воспринято уплотнением шва. В реально построенных сверхвысоких плотинах таких раскрытий не наблюдалось [1, 2]. Однако следует иметь в виду, что рассмотренная нами схема последовательности возведения не характерна для сверхвысоких плотин. Такие плотины возводятся не в две очереди, а более сложным образом. При этом плотины первой очереди имеют не обжатый, а распластаный профиль. Рассматриваемая задача имеет методический характер, ее цель – выявить, как высота плотины влияет на НДС железобетонного экрана.

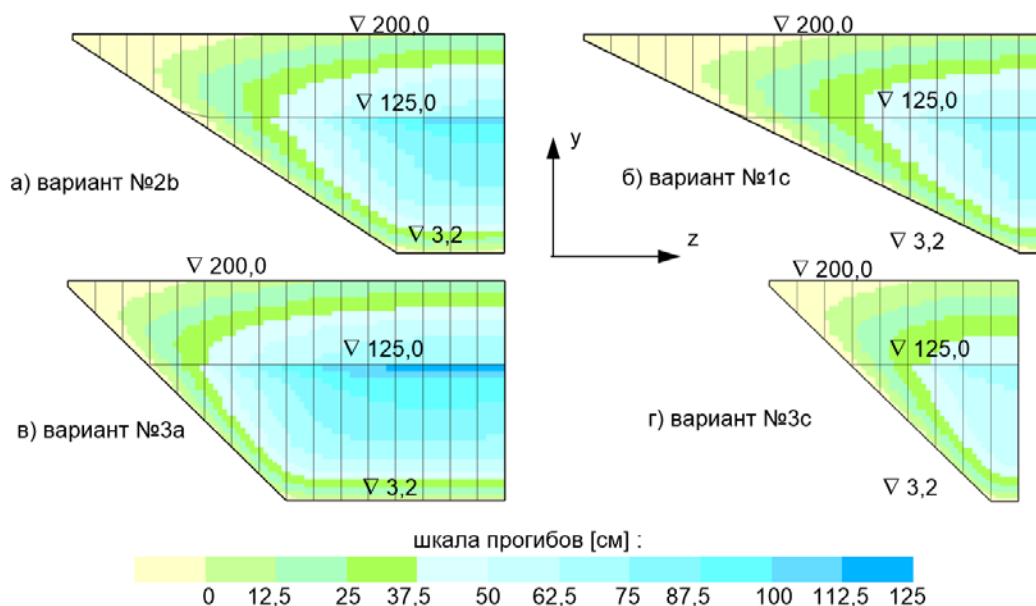


Рисунок 26. Прогибы железобетонного экрана плотины высотой 200 м

Таблица 6. Максимальные перемещения (см) экрана и плотины для различных вариантов конфигурации створа (плотина высотой 200 м)

вариант	экран				ось плотины	
	u _x	u _y	u _z	u _n	u _x	u _y
1a	86.3	96.6	10.6	128.8	53.6	187
1b	80.2	94.1	9.0	123.2	47.8	183
1c	64.6	75.9	6.3	99.3	40.3	165
2a	85.2	97.1	11.4	128.5	54.7	185
2b (№0)	77.3	91.3	9.1	119.2	46.0	182
2c	61.8	75.3	6.5	97.2	35.4	159
3a	83.6	96.8	12.0	127.3	53.0	185
3b	74.6	89.8	9.2	111.5	43.1	181
3c	54.4	68.4	5.5	87.3	29.0	146

Таблица 7. Контурные перемещения экрана (мм) для различных вариантов конфигурации створа (плотина высотой 200 м)

вариант	продольные		раскрытие		прогиб	
	русло	борт	русло	борт	русло	борт
1a	37	57	144	146	82	162
1b	20	61	118	126	79	157
1c	6	58	95	101	76	150
2a	38	65	138	143	82	182
2b (№0)	19	67	110	118	77	171
2c	6	56	80	87	76	163
3a	30	80	128	139	79	176
3b	15	73	101	111	74	166
3c	6	51	65	69	69	159

Sainov M.P. Vliyaniye formy stvora na napryazhennoe sostoyaniye zhelezobetonnoy ekran kamennonasyynoy plotiny [Impact of dam site configuration on 3D stress-strain state of concrete faced rockfill dam]. *Magazine of Civil Engineering*. 2016. No. 3. Pp. 16–39. doi: 10.5862/MCE.63.2 (rus)

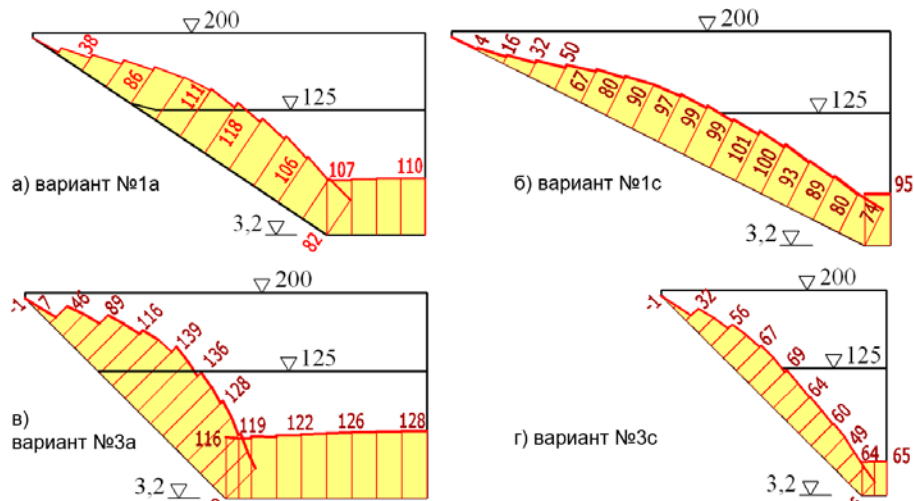


Рисунок 27. Раскрытия периметрального шва (мм) в створах разной конфигурации (плотина высотой 200 м)

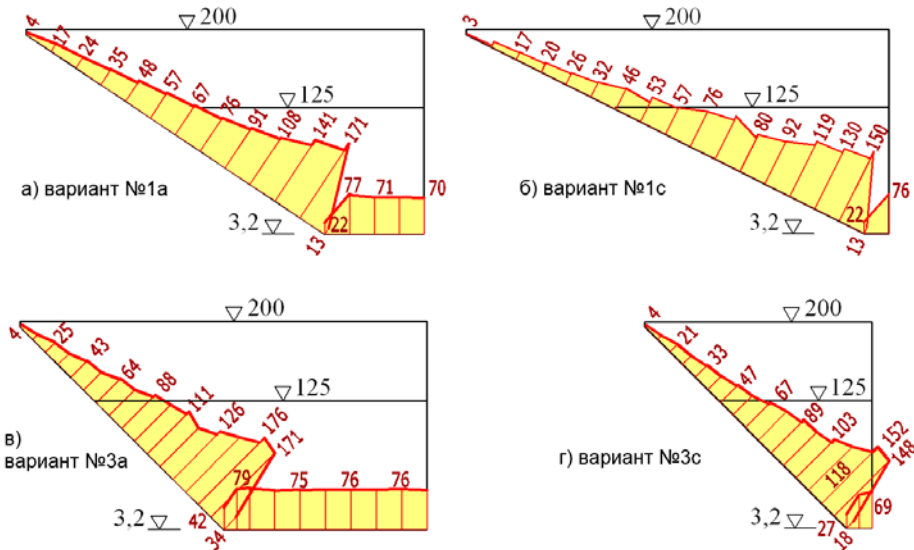


Рисунок 28. Контурные прогибы (мм) железобетонного экрана в периметральном шве для створов разной конфигурации (плотина высотой 200 м)

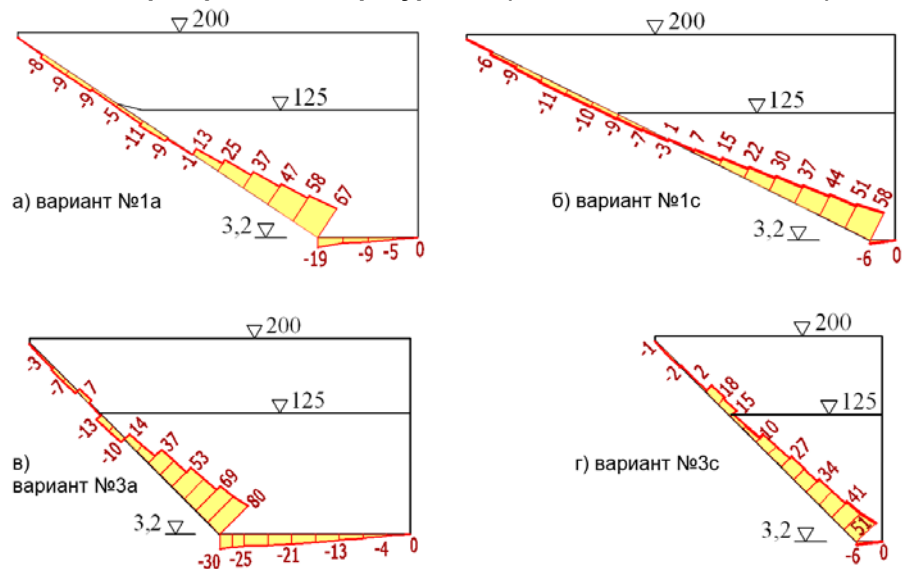


Рисунок 29. Подвижки железобетонного экрана в периметральном шве для створов разной конфигурации (плотина высотой 100 м)

Полученное напряженное состояние железобетонного экрана для различных вариантов створов показано на рисунках 30–33 в виде распределения в экране главных напряжений σ_1 и σ_3 . Для напряженного состояния экрана сверхвысокой плотины высотой 200 м характерны те же особенности, что и для плотины высотой 100 м – возникновение растягивающих напряжений σ_1 в направлении вдоль откоса и сжатие в направлении от борта к борту (по напряжениям σ_3).

Обращает на себя внимание тот факт, что при тех значительных перемещениях, которые испытывает экран, на напорной грани экрана не возникло растягивающих напряжений (рис. 30), превышающих расчетную прочность бетона на растяжение.

Зона значительных растягивающих напряжений σ_1 наблюдается на низовой грани экрана, в области его примыкания к основанию, особенно на бортовом участке (рис. 31). Значения напряжений очень велики: на значительной площади они не превышают 6 МПа, а имеются зоны с напряжениями свыше 8 МПа. Такие растягивающие напряжения возникают как в широких, так и в узких створах. Конечно, такие растягивающие напряжения многократно превышают прочность бетона на растяжение и не смогут быть восприняты арматурой, трещинообразование неминуемо. Это говорит о том, что для обеспечения надежности железобетонного экрана в сверхвысоких плотинах необходимо сгладить изгибные деформации нижней части экрана, в зоне его примыкания к основанию.

Уровень сжимающих напряжений σ_3 в сверхвысокой плотине также очень высок. Их максимум наблюдается в центре экрана, в верхней части первой очереди. В варианте №0 в этой зоне значения σ_3 достигают 15.1 МПа на низовой грани (рис. 33а) и 14.4 МПа на верховой грани (рис. 32а). Эти напряжения примерно в 2 раза выше, чем в плотине высотой 100 м. Получен практический вывод: увеличение высоты плотины в 2 раза привело к увеличению ее перемещений в 3.5 раза, но напряжений – лишь в 2 раза.

Самые большие сжимающие напряжения σ_3 в железобетонном экране получены в самом узком створе – в варианте №3с. На верховой грани они достигают 17.1 МПа (рис. 32г), а на низовой грани – 15.6 МПа (рис. 33г). При этом зона максимального сжатия по σ_3 наблюдается практически по всей высоте оси симметрии железобетонного экрана.

Полученные сжимающие напряжения σ_3 в железобетонном экране (15...17 МПа) очень велики. Они сопоставимы с прочностью на сжатие бетона даже высоких классов. Учитывая, что железобетонный экран представляет собой тонкостенную конструкцию, разрушение экрана от сжатия представляется весьма вероятным. Это согласуется с данными натурных наблюдений за построенными сверхвысокими плотинами, в экране которых образовались вертикальные трещины от сжатия с разрушением защитного слоя арматуры.

По этой причине строительство плотин высотой более 300 м в настоящий момент невозможно.

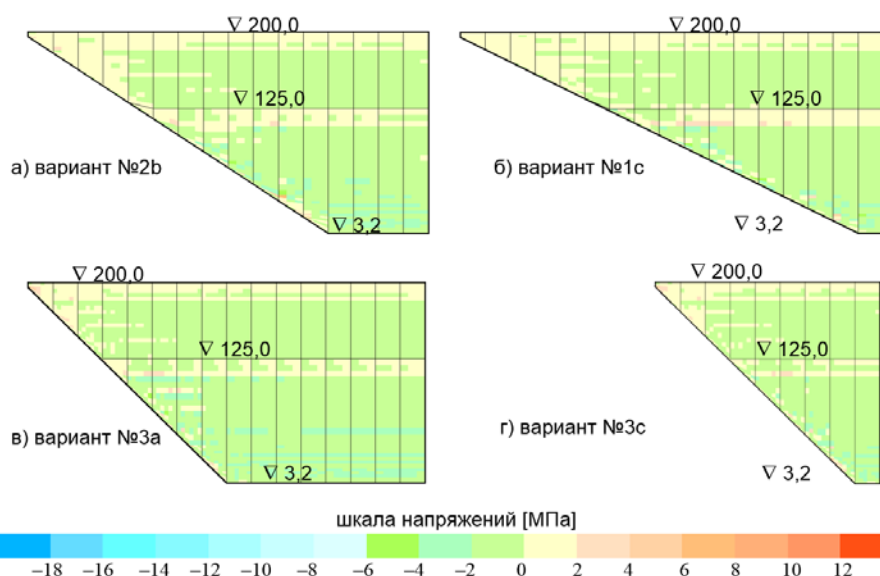


Рисунок 30. Максимальные главные напряжения σ_1 на верховой грани железобетонного экрана плотины высотой 200 м для створов разной конфигурации

Sainov M.P. Vliyaniye formy stvora na napryazhennoye sostoyaniye zhelezobetonnoy ekranu kamennno-nasyrnoy plotiny [Impact of dam site configuration on 3D stress-strain state of concrete faced rockfill dam]. *Magazine of Civil Engineering*. 2016. No. 3. Pp. 16–39. doi: 10.5862/MCE.63.2 (rus)

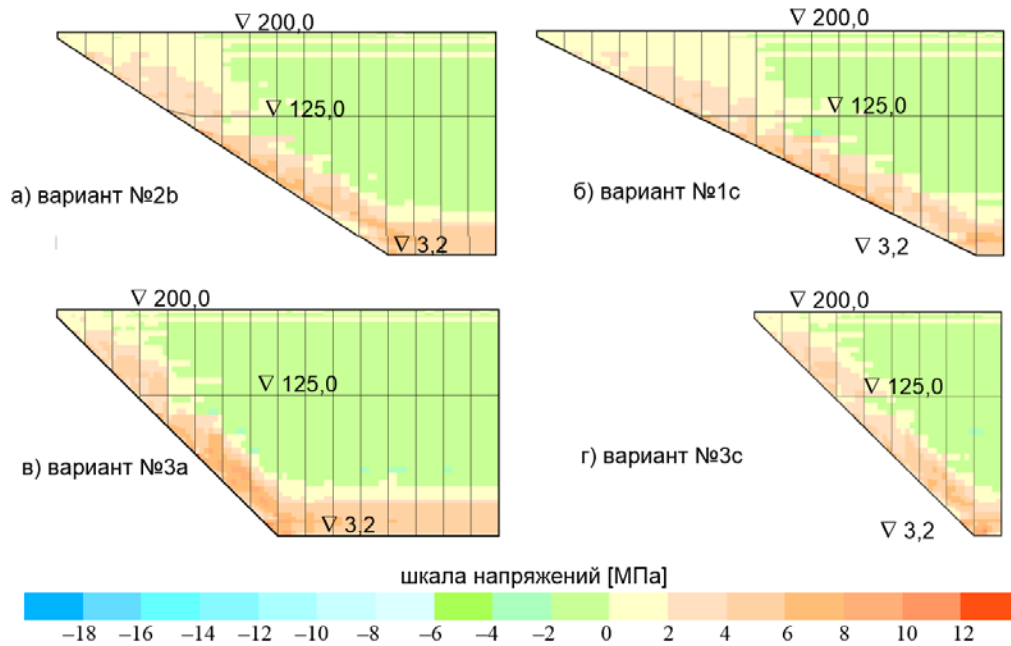


Рисунок 31. Максимальные главные напряжения σ_1 на низовой грани железобетонного экрана плотины высотой 200 м для створов разной конфигурации

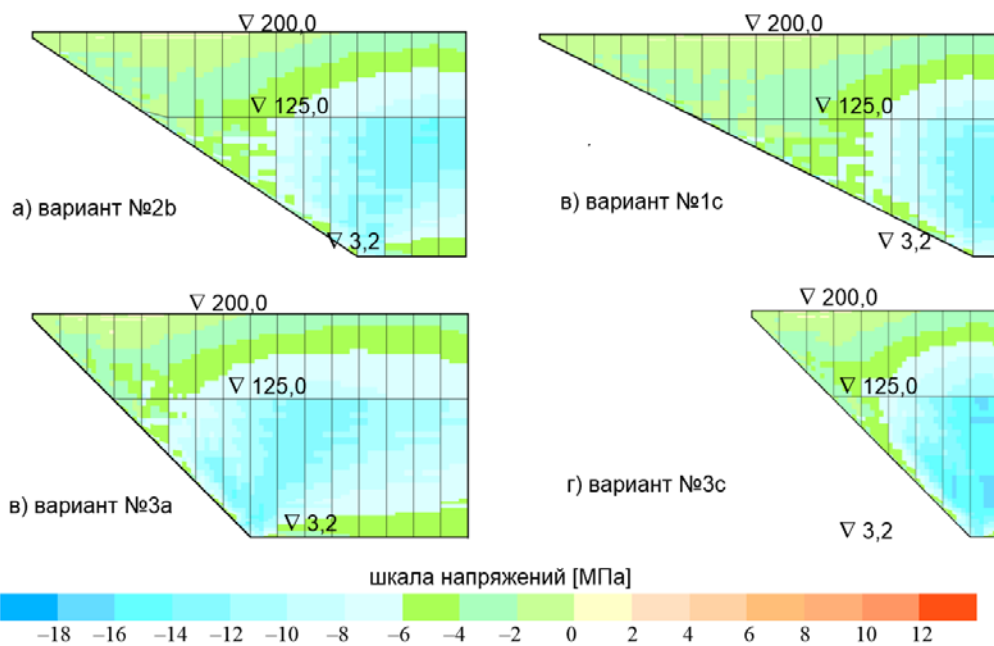


Рисунок 32. Минимальные главные напряжения σ_3 на верховой грани железобетонного экрана плотины высотой 200 м для створов разной конфигурации

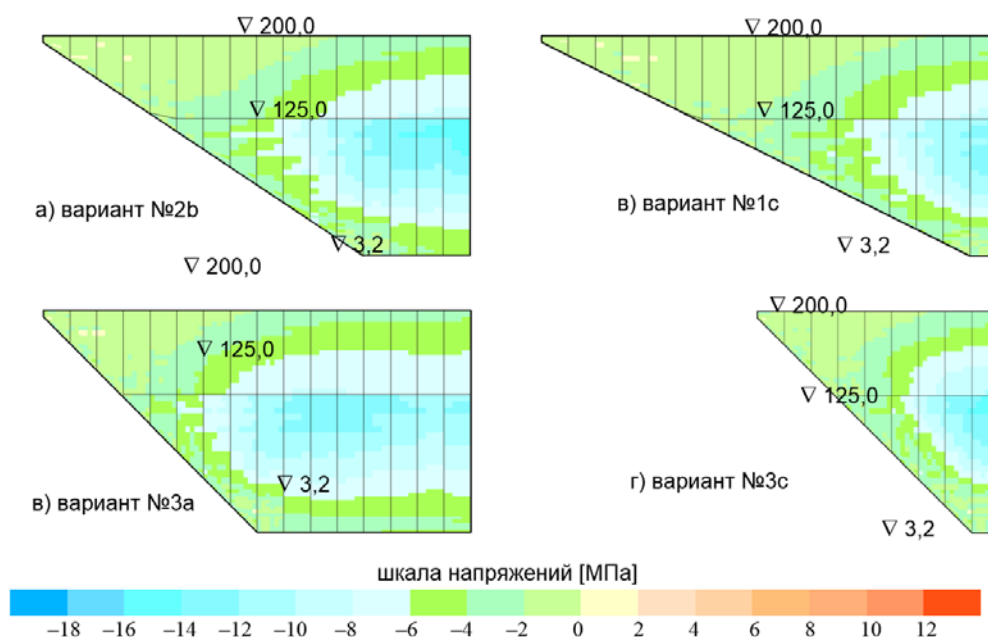


Рисунок 33. Минимальные главные напряжения σ_3 на низовой грани железобетонного экрана плотины высотой 200 м для створов разной конфигурации

Выводы

1. Численное моделирование пространственной работы каменно-насыпной плотины с железобетонным экраном в различных по форме и размерам скальных ущельях показало, что геометрия створа вносит мало качественных изменений в НДС экрана, но влияет на его количественные показатели. По нашему мнению, наибольшее влияние на формирование НДС железобетонного экрана имеет качество уплотнения каменной насыпи, так как оно определяет величины и характер его деформаций. Для принятой модели деформируемости каменной насыпи во всех рассмотренных вариантах в интервале высот плотины от 100 до 200 м НДС экрана имеет одинаковые особенности:

- экран испытывает изгиб в двух плоскостях, а также растягивающие усилия в направлении вдоль откоса;
- в результате растягивающих усилий периметральный шов в большинстве сечений раскрывается, что позволяет в некоторой степени компенсировать эти усилия;
- в периметральном шве происходят также сдвиговые перемещения как в виде контурных прогибов, так и в виде перемещений вдоль контура шва;
- на большей части площади экран находится в состоянии двухосного продольного сжатия, однако возможно и образование в экране растягивающих напряжений в тех зонах, где он испытывает интенсивные или сложные изгибные деформации, наиболее вероятны растягивающие напряжения в направлении вдоль откоса;
- наибольший изгиб испытывает экран в зоне примыкания к скальному основанию, этот изгиб вызывает появление на низовой грани экрана растягивающих напряжений (σ_1), зона растяжения располагается широкой полосой параллельно контуру периметрального шва;
- в направлении от борта к борту экран в основном сжат (по σ_3) за исключением самых дальних от русла бортовых секций.

Различие между вариантами конфигурации створа и высоты плотины заключается только в величинах, характеризующих эти проявления НДС.

2. Ширина русловой части створа имеет более значимое влияние на НДС железобетонного экрана, чем наклон скальных бортов. У плотины, расположенной в узком створе, осадки и смещения плотины меньше, чем у плотины, расположенной в широком створе. При этом ширина створа в большей степени влияет именно на смещения, а не на осадки. Это благоприятно сказывается на НДС экрана. В широких створах в нижней части экрана возможно образование горизонтальных трещин в результате растягивающих напряжений. С уменьшением ширины створа НДС экрана улучшается следующие характеристики:

Sainov M.P. Vliyaniye formy stvora na napryazhennoye sostoyaniye zhelezobetonnoyego ekrana kamenno-nasyypnoy plotiny [Impact of dam site configuration on 3D stress-strain state of concrete faced rockfill dam]. *Magazine of Civil Engineering*. 2016. No. 3. Pp. 16–39. doi: 10.5862/MCE.63.2 (rus)

- уменьшаются прогибы экрана и его изгибные деформации по высоте;
- уменьшаются раскрытия и смещения в периметральном шве;
- экран переходит в состояние двухосного сжатия, уменьшается риск образования горизонтальных трещин.

Однако для плотин, расположенных в узких створах, характерно увеличение в экране сжимающих напряжений в направлении от борта к борту, что может привести к нарушению прочности бетона на сжатие и образованию вертикальных трещин.

3. Большое значение для формирования НДС железобетонного экрана имеет последовательность возведения плотины – наличие очередей строительства и очертания профиля плотины первой очереди. При строительстве плотины в несколько очередей НДС железобетонного экрана улучшается. Это происходит за счет уменьшения горизонтальных смещений в сторону нижнего бьефа и дополнительного сжатия экрана от осадок каменной насыпи под весом последующих очередей строительства. Для правильного прогнозирования надежности работы экрана расчеты НДС экрана необходимо вести только с учетом последовательности возведения и загрузки плотины.

При возведении плотины в несколько очередей следует учитывать, что на границе очередей экран может испытывать неблагоприятные локальные изгибные деформации из-за неравномерности протекания осадок каменной насыпи. Рекомендуется верхнюю часть экрана каждой очереди возводить только после завершения отсыпки следующей очереди, с устройством шва (рис. 34).

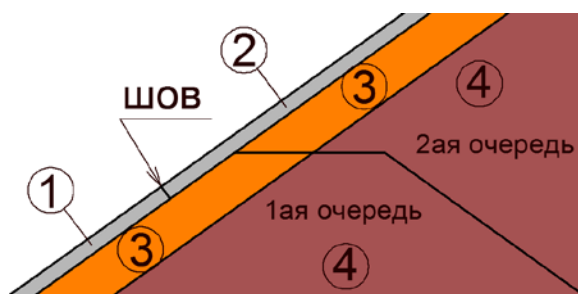


Рисунок 34. Схема сопряжения железобетонного экрана первой и второй очередей строительства: 1 – экран первой очереди строительства; 2 – экран второй очереди строительства; 3 – подэкранная зона; 4 – упорные призмы плотины

4. Наибольшую опасность для надежной работы экрана представляют изгибные деформации в зоне примыкания к скальному основанию, так как вследствие появления растягивающих напряжений они могут вызвать трещинообразование в экране. Поэтому необходимо предусматривать конструктивные меры по сглаживанию изгибных деформаций путем обеспечения большей свободы деформаций в узле примыкания к скальному основанию. Этого можно добиться укладкой в нижней части подэкранной зоны более податливого грунта (негрунтового материала). Является целесообразным и устройство шва параллельно периметральному.

5. Наибольшей опасности образования трещин подвергаются экраны сверхвысоких плотин (высотой от 150 м и выше). В них трещины могут возникнуть как от растягивающих, так и от сжимающих напряжений. По нашим исследованиям, увеличение высоты плотины в 2 раза сопровождается увеличением напряжений в экране также примерно в 2 раза.

Чтобы избежать трещинообразования, необходимо минимизировать деформации экрана, особенно в направлении из бьефа в бьеф. Для этого требуется очень качественное уплотнение грунтов тела плотины с целью снизить их деформируемость. Еще один путь уменьшения деформаций экрана – это регулирование его НДС путем выбора соответствующей последовательности ее загрузки. Необходимо, чтобы смещения экрана в сторону нижнего бьефа от гидростатического давления были частично компенсированы смещениями в сторону верхнего бьефа от бокового расширения каменной насыпи под собственным весом. Из этого следует, что сверхвысокие плотины с железобетонным экраном должны возводиться в несколько очередей.

6. Полученные нами результаты численного моделирования не могут рассматриваться как исчерпывающие, применимые для прогноза НДС любой плотины. В реальных условиях НДС

плотины и железобетонного экрана может быть совсем другим, так как оно определяется множеством факторов, разброс величин которых может быть очень значительным.

Первый, наиболее значимый фактор – это деформируемость каменной наброски и ее зонирование в теле плотины. Камень деформируется нелинейно, и его свойства сильно изменяются в зависимости от степени уплотнения. Опыт показывает, что осадки каменно-насыпных построенных плотин одинаковой высоты изменяются в очень широких пределах [21]. В теле плотины камень зонирован, и его деформируемость может различаться в 2 раза, например, как в плотине Num Ngun 2 (Лаос) [23]. Кроме того, возможны и локальные деформации экрана, связанные с анизотропией деформативных свойств или просадками каменной наброски. Соответственно, НДС экрана может изменяться очень существенно в зависимости от деформируемости каменной насыпи.

Второй фактор – это схема последовательности возведения и загрузки плотины. Третий фактор – это геометрия железобетонного экрана. Реальные плотины возводятся обычно в несимметричных створах сложной формы.

Литература

References

1. ICOLD, «Concrete Face Rockfill dam: Concepts for design and construction». International Commission on Large Dams. Bulletin 141. 2010.
2. Cooke J.B., Sherard J.L. In Proceedings of the 2nd Symposium on Concrete Face Rockfill Dams: Design, Construction, and Performance. Detroit, Mich., October 1985. American Society of Civil Engineers (ASCE). New York. Pp. 1–658.
3. Саинов М.П. Влияние деформируемости каменной насыпи на напряженно-деформированное состояние железобетонного экрана плотины // Вестник МГСУ, 2015. № 3. С. 69 - 78.
4. Саинов М.П. Исследование влияния формы створа на работу периметрального шва каменной плотины с железобетонным экраном // Вестник МГСУ, 2013. № 9. С. 101 - 117.
5. Саинов М.П. Работа железобетонного экрана каменной плотины в пространственных условиях по результатам численного моделирования // Приволжский научный журнал, 2015, № 3 (35), с. 25 - 31.
6. Маркес Фильо П., Пинто Н. де С. Характеристики каменно-набросных плотин с бетонным экраном, полученные опытным путем // Международный дайджест по гидроэнергетике и плотинам. 2007. с. 69-74.
7. Manoel S., Freitas Jr. Concepts on CFRDs Leakage Control – Cases and Current Experiences. Inter // Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. 2009. Vol.3. Issue 9. Pp. 11-18.
8. 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.
9. Yifeng Chen, Ran Hu, Wenbo Lu, Dianqing Li, Chuangbing Zhou. Modeling coupled processes of non-steady seepage flow and non-linear deformation for a concrete-faced rockfill dam // Computers and Structures. 2011. No 89. Pp.1333 - 1351.
10. Mokhtar Pour E., Freitas Jr. M.S. Rehabilitation for high concrete faced rockfill dam (CFRD): Availability and vulnerability Dam Maintenance and Rehabilitation II. // Proceedings of the 2nd International Congress on Dam Maintenance and Rehabilitation. 2011. Pp. 881-887.
11. De Pinto N.L.S. Very high CFRDs: Behaviour and design features // International Journal on Hydropower and Dams. 2008. No 15(4). Pp. 43-49.
12. Pritchard S. CFRD under pressure // International Water Power and Dam Construction. 2008. No 60(2). Pp. 27-29.
1. ICOLD, «Concrete Face Rockfill dam: Concepts for design and construction». *International Commission on Large Dams*. Bulletin 141. 2010.
2. Cooke J.B., Sherard J.L. In *Proceedings of the 2nd Symposium on Concrete Face Rockfill Dams: Design, Construction, and Performance*. Detroit, Mich., October 1985. American Society of Civil Engineers (ASCE). New York. Pp. 1–658.
3. Sainov M.P. Vliyaniye deformiruyemosti kamennoy nasypi na napryazhenno-deformirovannoye sostoyaniye zhelezobetonnoy ekrana plotiny [Influence of deformability of stone embankment on the stress-strain state of reinforced concrete dam screen]. *Vestnik MGSU*. 2015. No 3. Pp.69-78. (rus)
4. Sainov M.P. Issledovaniye vliyaniya formy stvora na rabotu perimetralnogo shva kamennoy plotiny s zhelezobetonnyim ekranom [Study of the influence of alignment work perimeter seam stone dam with reinforced concrete screen]. *Vestnik MGSU*. 2013. No 9. Pp.101-117. (rus)
5. Sainov M.P. Rabota zhelezobetonnoy ekrana kamennoy plotiny v prostranstvennykh usloviyakh po rezul'tatam chislennogo modelirovaniya [Work of reinforced concrete screen of stone dam in spatial terms as a result of numerical simulation]. *Privolzhskiy nauchnyy zhurnal*. 2015. No 3(35). Pp. 25-31. (rus)
6. Marques Filo P., Pinto N. de S. Kharakteristiki kamennonabrosnykh plotin s betonnyim ekranom, poluchennyye opytным путем [Features of rockfill dam with a concrete screen obtained by experiment]. *Mezhdunarodnyy daydzhest po gidroenergetike i plotinam*. 2007. Pp.69-74. (rus)
7. Manoel S., Freitas Jr. Concepts on CFRDs Leakage Control – Cases and Current Experiences. Inter. *Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2009. Vol.3. Issue 9. Pp. 11-18.
8. 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.
9. Yifeng Chen, Ran Hu, Wenbo Lu, Dianqing Li, Chuangbing Zhou. Modeling coupled processes of non-steady seepage flow and non-linear deformation for a concrete-faced rockfill dam. *Computers and Structures*. 2011. No 89. Pp.1333 - 1351.
10. Mokhtar Pour E., Freitas Jr. M.S. Rehabilitation for high concrete faced rockfill dam (CFRD): Availability and vulnerability Dam Maintenance and Rehabilitation II. *Proceedings of the 2nd International Congress on Dam*

Sainov M.P. Vliyaniye formy stvora na napryazhennoe sostoyaniye zhelezobetonnoy ekrana kamennonasyypnoy plotiny [Impact of dam site configuration on 3D stress-strain state of concrete faced rockfill dam]. *Magazine of Civil Engineering*. 2016. No. 3. Pp. 16–39. doi: 10.5862/MCE.63.2 (rus)

13. Song, W., Wang, P. Influence of valley topography on the safety of CFRD anti-seepage systems // *Shuili Fadian Xuebao/Journal of Hydroelectric Engineering*. 2008. No 27(4). Pp. 94-100.
14. Cheng S., Zhang G., Zhang J., Wan L. Effect of foundation topography on the stress-displacement response of concrete faced rockfill dam // *Shuili Fadian Xuebao/Journal of Hydroelectric Engineering*. 2008. No 27(5). Pp. 53-58.
15. Dakoulas P., Thanopoulos Y., Anastassopoulos K. Non-linear 3D simulation of the construction and impounding of a CFRD // *International Journal on Hydropower and Dams*. 2008. No 15(2). Pp. 95-101.
16. Dang F.N., Yang C., Xue H.B., Fang J.Y. The effect of valley topography on deformation properties of CFRD. // *Journal of Hydraulic Engineering*. 2014. No 45(4). Pp. 435-442.
17. Dang F.N., Wang X.W., Tian W., Xu S.J. Deformation and stress characteristics of high asymmetric CFRD and for measures // *Shuili Xuebao/Journal of Hydraulic Engineering*. 2012. No 43(5). Pp. 602-608.
18. 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. 9(4). С. 208-225.
19. Рассказов Л.Н., Джха Дж. Деформируемость и прочность грунта при расчете высоких грунтовых плотин // *Гидротехническое строительство*, 1997, № 7, с.31-36.
20. Саинов М.П. Параметры деформируемости крупнообломочных грунтов в теле грунтовых плотин [Электронный ресурс]. *Строительство: наука и образование*. 2014. Вып. 2. Ст. 2. Режим доступа: <http://www.nso-journal.ru>.
21. Park H.G., Kim Y.S., Seo M.W., Lim H.D. Settlement Behavior Characteristics of CFRD in Construction Period. Case of Daegok Dam // *Jour. of the KGS*. September 2005. Vol. 21. No. 7. Pp. 91-105.
22. Mairaing W., Thongthumachat C. Deformation Characteristics after Impounding of Nam Ngum 2 Concrete Face Rock Filled Dam (CFRD) in Laos PDR // *19th National Convention on Civil Engineering (Thailand)*. 2014. Pp.70-78
23. Khamwongkhong, P., Mairaing, W. Dam embankment deformation and face slab movement monitoring of Nam Ngum 2 concrete face Rockfill Dam. *Dams and Reservoirs under Changing Challenges - 79 Annual Meeting of ICOLD. Swiss Committee on Dams*. 2011. Pp. 79-90.
11. De Pinto N.L.S. Very high CFRDs: Behaviour and design features. *International Journal on Hydropower and Dams*. 2008. No 15(4). Pp. 43-49.
12. Pritchard S. CFRD under pressure. *International Water Power and Dam Construction*. 2008. No 60(2). Pp. 27-29.
13. Song, W., Wang, P. Influence of valley topography on the safety of CFRD anti-seepage systems. *Shuili Fadian Xuebao/Journal of Hydroelectric Engineering*. 2008. No 27(4). Pp. 94-100.
14. Cheng S., Zhang G., Zhang J., Wan L. Effect of foundation topography on the stress-displacement response of concrete faced rockfill dam. *Shuili Fadian Xuebao/Journal of Hydroelectric Engineering*. 2008. No 27(5). Pp. 53-58.
15. Dakoulas P., Thanopoulos Y., Anastassopoulos K. Non-linear 3D simulation of the construction and impounding of a CFRD. *International Journal on Hydropower and Dams*. 2008. No 15(2). Pp. 95-101.
16. Dang F.N., Yang C., Xue H.B., Fang J.Y. The effect of valley topography on deformation properties of CFRD. *Journal of Hydraulic Engineering*. 2014. No 45(4). Pp. 435-442.
17. Dang F.N., Wang X.W., Tian W., Xu S.J. Deformation and stress characteristics of high asymmetric CFRD and for measures. *Shuili Xuebao/Journal of Hydraulic Engineering*. 2012. No 43(5). Pp. 602-608.
18. Sainov M.P. Vychislitel'naya programma po raschetu napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya gruntovykh plotin: opyt sozdaniya, metodiki i algoritmy [The computer program for the calculation of stress-strain state of earth dams: experience of creation, techniques and algorithms]. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2013. No. 9(4). Pp. 208-225. (rus)
19. Rasskazov L.N., Dzhkha Dzh. Deformiruyemost i prochnost grunta pri raschete vysokikh gruntovykh plotin [Deformability and strength of the soil in the calculation of the high embankment dams]. *Gidrotekhnicheskoye stroitelstvo*. 1997. No 7. Pp. 31-36. (rus)
20. Sainov M.P. Parametry deformiruyemosti krupnooblomochnykh gruntov v tele gruntovykh plotin [Parameters deformability of coarse soils in the body of earth dams] [Elektronnyy resurs]. *Stroitelstvo: nauka i obrazovaniye*. 2014. Vol. 2. Issue 2. URL: <http://www.nso-journal.ru>. (rus)
21. Park H.G., Kim Y.S., Seo M.W., Lim H.D. Settlement Behavior Characteristics of CFRD in Construction Period. Case of Daegok Dam. *Jour. of the KGS*. September 2005. Vol. 21. No. 7. Pp. 91-105.
22. Mairaing W., Thongthumachat C. Deformation Characteristics after Impounding of Nam Ngum 2 Concrete Face Rock Filled Dam (CFRD) in Laos PDR. *19th National Convention on Civil Engineering (Thailand)*. 2014. Pp.70-78
23. Khamwongkhong, P., Mairaing, W. Dam embankment deformation and face slab movement monitoring of Nam Ngum 2 concrete face Rockfill Dam. *Dams and Reservoirs under Changing Challenges. Proceedings of the International Symposium on Dams and Reservoirs under Changing Challenges - 79 Annual Meeting of ICOLD. Swiss Committee on Dams*. 2011 Pp. 79-90.

Михаил Петрович Саинов,
+7(926)6078931; эл. почта: mp_sainov@mail.ru

Mikhail Sainov,
+7(926)6078931; mp_sainov@mail.ru

© Саинов М.П., 2016