




# Thermo-Stressed State of Rockfill Dam Concrete Face at Reservoir Impoundment

Sainov, Mikhail Petrovich<sup>1\*</sup> 

Kotov, Filipp Viktorovich<sup>1</sup> 

Soroka, Vladislav Borisovich<sup>1</sup> 

<sup>1</sup> Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russian Federation

Correspondence:\* email [mp\\_sainov@mail.ru](mailto:mp_sainov@mail.ru); contact phone [+74991832747](tel:+74991832747)

## Keywords:

Concrete faced rockfill dam; Temperature regime; Stress-strain state; Thermo-stressed state, Reservoir impoundment; Strength

## Abstract:

In Russia and China there considered the plans of constructing concrete face rockfill dams (CFRD) in the regions whose climate is characterized by considerable drops of temperature. Therefore, the issue about the role of thermal effects in formation of stress-strain state (SSS) of rockfill dam concrete face becomes urgent. We studied the impact on concrete face SSS without cooling effect of water during the reservoir impoundment. **Materials and methods.** A 100 m high dam was studied whose face was 0.5 m thick. Numerical modeling of the dam behavior was conducted with the aid of the finite element method. At first, the non-stationary temperature regime of the dam was studied at the reservoir impoundment. It was assumed that the rate of the water level rise comprised 1 m a day and water temperature was 20°C less than the dam temperature. Then the temperature distribution in the face was used for calculation of thermal forces in it. SSS analyses were conducted for two cases: with consideration of thermal forces and without it. **Results.** Analyses showed that by the moment of the reservoir impoundment completion the face temperature regime at a depth of more than 5÷10 m is close to the steady regime. It is characterized by nearly uniform cooling of the face, which results in appearance of additional tensile longitudinal force approximately 1 MPa in this part of the face. In the zone of water edge the thermo-stressed state of the face is much more unfavorable. The temperature regime of this zone is characterized by non-uniform distribution of temperatures along the face thickness and height; it intensively varies within several days after the reservoir impoundment completion. The most dangerous is the initial time interval when the zone of concentration of high tensile stresses (more than 3 MPa) appears in the water edge zone in the face upstream part. **Conclusions.** Cooling of the face at the reservoir impoundment is dangerous for the face concrete strength. At CFRD construction in severe climatic conditions it is reasonable to arrange heat insulation of the face upstream part.

## 1 Introduction

Каменно-набросные плотины с бетонным экраном (КНПБЭ) являются одним из самых перспективных типов плотин для строительства высоконапорных гидроузлов, они обладают целым рядом преимуществ по сравнению с бетонными и каменно-земляными плотинами [1-3]. В Китае построена самая высокая в мире КНПБЭ плотина Shuibuya высотой 233 м [4] и планируется строительство ещё более высоких плотин [5-7]. В России также рассматриваются планы строительства сверхвысоких КНПБЭ [8,9]. Однако многие из этих плотин будут расположены в районах с суровым климатом, которые характеризуются значительными колебаниями температур. В Китае – это высокогорные районы Тибета [10], а в России – это регионы Сибири [8].

Sainov, M.; Kotov F.; Soroka V.

Thermo-stressed state of rockfill dam concrete face at reservoir impoundment; Thermo-stressed state of rockfill dam concrete face at reservoir impoundment

2020; *Construction of Unique Buildings and Structures*; Volume 93 Article No 9306. doi: 10.18720/CUBS.93.6

Соответственно, можно ожидать, что в этих условиях бетонный экран (БЭ) будет подвергаться высоким температурным воздействиям.

Температурные воздействия могут являться одной из причин образования трещин в БЭ каменно-набросных плотин. С влиянием изменения температурного режима связывают образование трещин в БЭ некоторых плотин. Например, множественные горизонтальные трещины в БЭ плотины Xibeikou (высота 95 м, Китай) образовались в первую зиму после окончания строительства плотины [11-13]. В экране плотины Gongboxia (высота 132 м, Китай) более сотни вертикальных трещин образовались в 2011 году, хотя до этого экран в течение несколько лет эксплуатировался нормально [14-16]. Большинство из этих трещин расположены в области уреза воды [13]. Температурное воздействие могло также способствовать образованию вертикальной трещины в экране плотины Mohale (Королевство Лесото, высота 145 м), которое произошло в феврале 2006 года во время очередного, но быстрого наполнения водохранилища [17].

Указанные случаи привлекли внимание к проблеме влияния температурных воздействий на напряжённо-деформированное состояние (НДС) и прочность БЭ. Китайскими исследователями опубликован ряд работ, посвящённых причинам образования трещин в экране плотины Gongboxia и термонапряжённому состоянию БЭ в целом [12-16, 18-20]. Эти исследования проводились путём численного моделирования методом конечных элементов.

Исследования [12-14, 16] проводились в пространственной постановке. Использовалась следующая последовательность расчётов. Сначала решалась нестационарная температурная задача (в [14] для этого использовалась отдельная, более подробная конечно-элементная модель). Затем распределение температур использовалось для вычисления температурных деформаций [13] или напряжений [14]. В исследованиях [13,14] использовались контактные конечные элементы для моделирования особенностей поведения контактов между плотиной и экраном.

Wang Z. и др. [13, 2014 г.] пришли к выводу, что причиной образования трещин в экране плотины Gongboxia стали высокие температурные градиенты в зоне уреза воды, которые произошли при понижении температуры воздуха зимой. Учитывая, что самая низкая измеренная температура воздуха в районе плотины составляла около  $-14^{\circ}\text{C}$ , разница температур воды и воздуха могла превышать  $17^{\circ}\text{C}$ . Полученные расчётом для таких условий растягивающее напряжение на верховой грани экрана превысили 2,3 МПа. Они превышают расчётное сопротивление бетона на растяжение.

Похожие результаты получили Zheng, D. и др. [14, 2013 г.], Yanlong, L. и др. [15, 2015 г.]. Они показали, что случай длительного (около 10 дней) периода низких температур более опасен, чем непродолжительное, но резкое (в течение суток) снижение температуры воздуха на  $-14^{\circ}\text{C}$ . Для защиты от температурного воздействия они предложили укрывать экран пластиковым покрытием.

Однако в исследованиях [12-16, 18-20] рассматривался случай температурного воздействия в виде кратковременного изменения температуры воздуха. Между тем, более опасным может быть температурное воздействие, которому подвергается БЭ при наполнении водохранилища. В работах [21,22] нами было показано, что равномерное (по толщине и высоте) охлаждение экрана является не столь опасным, как неравномерное распределение температур.

В [23,24] нами были проведены исследования изменения температурного режима БЭ при наполнении водохранилища. Было показано, что процесс формирования температурного режима экрана при наполнении водохранилища протекает довольно длительное время. Через 0,5 суток температурный фронт проходит примерно 0,5 м, а через сутки – примерно 1 м. Установление температурного режима происходит только примерно через месяц. Было установлено, что в зоне уреза воды температурное поле является крайне неравномерным.

Поэтому важным являются исследования термонапряжённого состояния (ТНС) БЭ в процессе наполнения водохранилища. Этому посвящена данная статья.

## 2 Materials and Methods

Исследования проводились путём численного моделирования ТНС методом конечных элементов. Они проводились не в объёмной, а плоской постановке, однако это позволило использовать более подробные конечно-элементные модели.

В исследовании рассматривалось поперечное сечение плотины высотой 100 м. Толщина бетонного экрана принималась равной 0,5 м. Конструкция плотины предусматривала устройство подэкрановой подготовки из малоцементного бетона за исключением зоны сопряжения с основанием. Между БЭ и подэкрановой подготовкой предусмотрен антифрикционный слой битумной эмульсии.

Как и в исследованиях других авторов, расчёты термонапряжённого состояния выполнялись в 2 этапа. На первом этапе решалась задача о нестационарном температурном режиме плотины, а на втором – задача о её НДС с учётом температурных усилий.

Решение задачи о нестационарном температурном режиме основывалось на решении системы линейных алгебраических уравнений теплопроводности:

$$\left( [K_t] + \frac{[C_t]}{\Delta\tau} \right) \{ \Delta T \} = -[K_t] \{ T \}.$$

Здесь  $[K_t]$  – матрица теплопроводности сооружения для текущего момента времени;

$[C_t]$  – матрица теплоёмкости сооружения для текущего момента времени;

$\Delta\tau$  – интервал времени;

$\{ T \}$  – вектор температур в степенях свободы сооружения на предыдущего момента времени;

$\{ \Delta T \}$  – вектор приращений температур в степенях свободы сооружения за интервал времени.

С помощью указанного уравнения можно определить распределение температур для ряда моментов времени. Зная приращения температур, можно рассчитать соответствующее температурное усилие:

$$\Delta\sigma_t = \alpha_t E \Delta T,$$

где  $\Delta\sigma_t$  – приращение нормального напряжения от изменения температуры;

$\alpha_t$  – коэффициент линейного температурного расширения материала;

$E$  – модуль линейной деформации материала.

Эта величина должна учитываться при определении полной величины приращений нормальных напряжений:

$$\Delta\sigma_{ij} = \Delta\sigma_{ij}^S + \Delta\sigma_t.$$

Здесь  $\Delta\sigma_{ij}$  – компонента тензора приращений напряжений;

$\Delta\sigma_{ij}^S$  – приращение нормального напряжения от действия статических сил.

Определение НДС для момента времени ведётся на основе итерационного решения системы линейных алгебраических уравнений:

$$[K] \{ \delta u \} = \{ \Delta F \} - \{ \Delta F_s \}.$$

Здесь  $[K]$  – матрица жёсткости для текущего момента времени;

$\{ \Delta F \}$  – вектор приращений внешних сил в степенях свободы на рассматриваемом интервале времени;

$\{ \Delta F_s \}$  – вектор приращений на рассматриваемом интервале времени сил, соответствующих приращениям напряжений на данной итерации;

$\{ \delta u \}$  – вектор приращений перемещений на рассматриваемом интервале времени, соответствующий данной итерации.

По приращениям перемещений определяются приращения деформаций и напряжений, соответствующие интервалу времени.

Указанные методики расчёта реализованы в вычислительных программах, созданных к.т.н. Саиновым М.П. Программа FILT\_N предназначена для выполнения температурных (или фильтрационных) расчётов, а NDS\_N – для расчётов напряжённо-деформированного состояния (НДС) [25]. Усилия, вызванные изменениями температуры, вычисляются специальной вспомогательной программой и вводятся в качестве дополнительных исходных данных при расчётах НДС.

Похожие методики выполнения расчётов ТНС использовались и китайскими исследователями. Отличия методики исследований ТНС, использованной авторами, состоят в подходах к созданию конечно-элементных моделей.

Можно перечислить следующие особенности создания конечно-элементных моделей.

1. Подробное рассмотрение процесса формирования ТНС по времени. В [24] нами было показано, что начальный интервал времени после изменения граничных температур является особенно опасным, т.к. он характеризуется крайне неравномерным распределением температур. Поэтому начальный шаг расчёта по времени был принят равным 0,2 суток.

2. Подробность конечно-элементной модели экрана. Т.к. в зоне уреза воды и напорной грани температурное поле является крайне неравномерным, то на этом участке размер конечных элементов был принят 5 см. По толщине экрана было выделено 6 рядов конечных элементов.

3. Для расчётов температурного режима и расчётов НДС использовалась одна и та же конечно-элементная модель. Это позволило более точно определять усилия, вызванные изменениями температурного поля.

4. При расчётах НДС использовались конечные элементы высокого порядка, с кубической аппроксимацией перемещений внутри элемента. Это позволило более точно определять характер распределения напряжений в жёсткой тонкостенной конструкции бетонного экрана.

Во исследованиях китайских авторов использовались объёмные, но недостаточно подробные конечно-элементные модели БЭ, с использованием простых конечных элементов.

Использованная нами модель плотины насчитывает 1231 конечный элемент. Наличие антифрикционного слоя между экраном и подэкрановой подготовкой моделировалось контактными элементами. Контактные элементы использовались также для моделирования нелинейного поведения периметрального шва, разделяющего БЭ и бетонный понур. Общее количество контактных элементов составило 108.

При расчётах температурного режима граничные условия задавались в виде известных значений температур на контуре плотины. Т.к. задачей исследования было выявление влияния на ТНС БЭ охлаждающего действия воды водохранилища, принималось, что температура воды на 20°С ниже, чем температура воздуха. Температура воздуха принималась условно равной 0 и неизменной во времени. Соответственно, температура воды принималась одинаковой по глубине и равной –20°С. Общее количество степеней свободы модели при расчётах температурного режима составило 1223.

При расчётах НДС граничные условия задавались в виде отсутствия перемещений на границе с основанием. Общее количество степеней свободы модели при расчётах НДС составило 11857.

Для возможности выявления влияния охлаждающего воздействия расчёты было проведено два расчёта НДС. Первый расчёт не учитывал влияния температурного воздействия, а второй – учитывал.

Расчёты ТНС проводились для 60 моментов времени (этапа расчётов). Первые 27 этапов моделировали возведение плотины. Сначала воспроизводился процесс послойной отсыпки тела плотины, а затем – бетонирования экрана. Изменение температурного поля плотины при этом не учитывалось. Следующие 22 этапа моделировали процесс постепенно наполнения водохранилища до НПУ 95 м. Скорость подъёма уровня водохранилища принималась равной 1 м в сутки. Соответственно, продолжительность наполнения водохранилища составила 95 суток. При этом учитывалось охлаждающее действие воды.

Ещё 11 моментов времени моделировали изменение НДС сооружения в процессе установления температурного режима.

Расчёты НДС выполнялись с использованием модели линейного деформирования материалов. Расчётные деформативные характеристики материалов приведены в табл.1.

Теплофизические характеристики материалов, принятые в расчёте, также приведены в табл.1.

**Таблица 1. Расчётные характеристики материалов**  
**Table 1. Design characteristics of materials**

Материал	E [МПа]	$\nu$	$\lambda$ [Вт/(м К)]	$\rho$ [кг/м <sup>3</sup> ]	C [кДж/ кг К]
Бетон экрана	29000	0,20	2,5	2400	1,00

Sainov, M.; Kotov F.; Soroka V.

Thermo-stressed state of rockfill dam concrete face at reservoir impoundment; Thermo-stressed state of rockfill dam concrete face at reservoir impoundment

2020; Construction of Unique Buildings and Structures; Volume 93 Article No 9306. doi: 10.18720/CUBS.93.6

Каменная наброска	60	0,20	1,47	2150	0,88
Подэкрановая подготовка	5000	0,20	2,5	2400	1,00

Обозначения:

$E$  – модуль линейной деформации;

$\nu$  – коэффициент Пуассона;

$\rho$  – плотность;

$\lambda$  – коэффициент теплопроводности;

$c$  – удельная теплоёмкость.

Коэффициент линейного температурного расширения бетона принимался равным  $1 \cdot 10^{-5} 1/^\circ\text{C}$ .

Для антифрикционного слоя между БЭ и подэкрановой подготовкой принимались следующие параметры: нормальная жёсткость  $K_n=5000$  МПа/м, касательная жёсткость  $K_t=200$  МПа/м.

### 3 Results and Discussion

#### **Температурный режим бетонного экрана.**

Полученный в результате расчётов температурный режим БЭ в целом соответствует тому, который был получен и описан нами ранее в [15,16].

К моменту окончания наполнения водохранилища продвижение температурного фронта вглубь тела плотины составило всего  $8 \div 10$  м, однако характер температурного режима экрана различается по высоте. С точки зрения характера испытываемого температурного воздействия в экране можно выделить четыре участка: нижний, средний, верхний и надводный.

Условная граница между нижним и средним участками проходит примерно по  $\nabla 75$  м, т.е. на 20 м ниже НПУ. Нижний участок экрана характеризуется довольно равномерным и стабильным распределением температур. Разница температур между верховой и низовой гранями составляет не более  $4^\circ\text{C}$ . На момент окончания наполнения водохранилища температурный режим нижнего участка близок к установившемуся и мало изменяется даже через полгода.

Условная граница между средним и верхним участками проходит примерно на  $\nabla 91$  м, т.е. на 4 м ниже НПУ. На среднем участке разница температур между верховой и низовой гранями на момент окончания наполнения водохранилища составляет не более  $6^\circ\text{C}$ . Особенностью среднего участка является то, что после окончания наполнения водохранилища изменения температур продолжаются. Через  $5 \div 10$  суток температурный режим среднего участка становится близким к температурному режиму нижнего участка.

Для температурного режима верхнего участка экрана характерны две особенности. Первая особенность состоит в высокой неравномерности распределения температур как по высоте, так и по толщине экрана. Резкое изменение температур по высоте наблюдается между  $\nabla 94$  м и уровнем воды (рис.1а). Особенно высокие температурные градиенты наблюдаются в локальной области вокруг уреза воды. Характерный размер этой области составляет примерно  $0,1 \div 0,2$  м. На этом расстоянии происходит резкое изменение температур. Например, в сечении на отметке уреза воды на расстоянии 0,2 м от напорной грани температура является относительно стабильной и составляет примерно  $-10^\circ\text{C}$  (рис.1б). В рассмотренном случае температурные градиенты могут достигать  $100^\circ\text{C}$  на 1 пог.м, направление движения тепла – от низовой грани к верховой.

Вторая особенность температурного режима верхнего участка состоит в том, что он существенно изменяется во времени. В тот момент, когда уровень водохранилища достигает  $\nabla 95$  м температура в соответствующем поперечном сечении экрана близка к 0 (рис.2). Через 0,2 суток ( $\approx 5$  часов) температурный фронт достигает низовой грани. В течение последующих 5 суток происходит существенное изменение температур. С течением времени изменение температур замедляется, и примерно через месяц температурный режим экрана может считаться установившимся.

Третья особенность состоит в том, что даже установившийся температурный режим верхнего участка характеризуется неравномерным распределением температур.

Для температурного режима надводного участка экрана характерно то, что температурный градиент направлен в обратную сторону – от верховой грани к низовой. На этом участке нагретая

воздухом верхняя грань экрана теплее, чем низовая (рис.1). На высоте 0,5 м от уровня воды охлаждающее влияние воды практически не заметно.

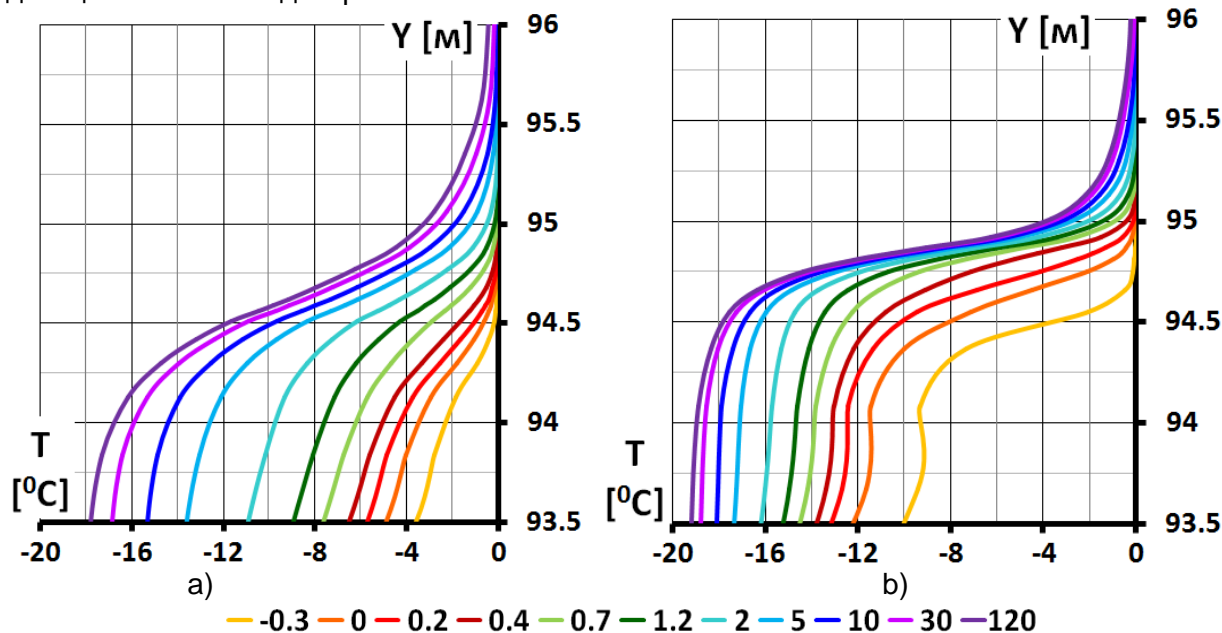


Рис.1 – Распределение температур по высоте в верхнем и надводном участке экрана. а – на низовой грани экрана, б – на 0,2 м вглубь относительно напорной грани. Цифрами обозначено время, прошедшее после наполнения водохранилища до  $\nabla 95$  м.

Fig.1 – Temperature distribution along the height in the upper and above-water areas of the face. а – on the lower edge of the screen, б – 0.2 m deep relative to the pressure edge. The numbers indicate the time elapsed after filling the reservoir to  $\nabla 95$  m.

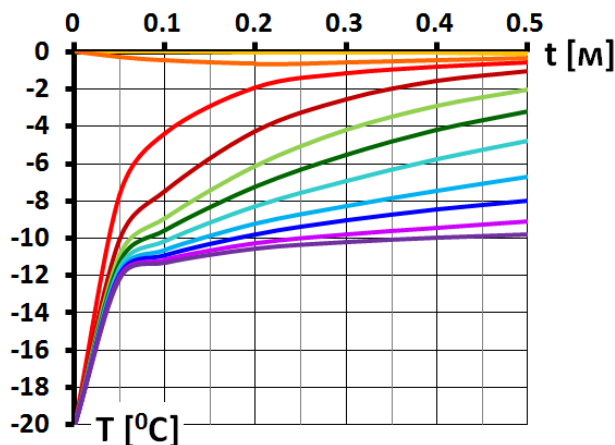


Рис.2 – Распределение температур по толщине экрана в поперечном сечении, проходящем через урез воды.

Условные обозначения на рис.1.

Fig.2 – Temperature distribution over the thickness of the face in the cross section passing through the water's edge.

Legend in Fig.1.

Таким образом, в результате расчёта было выявлено, что температурный режим экрана при наполнении водохранилища характеризуется неравномерным распределением температур по толщине и высоте, особенно в зоне уреза воды. Такое распределение температур по толщине экрана может вызвать деформации его изгиба. Особенно неблагоприятным температурный

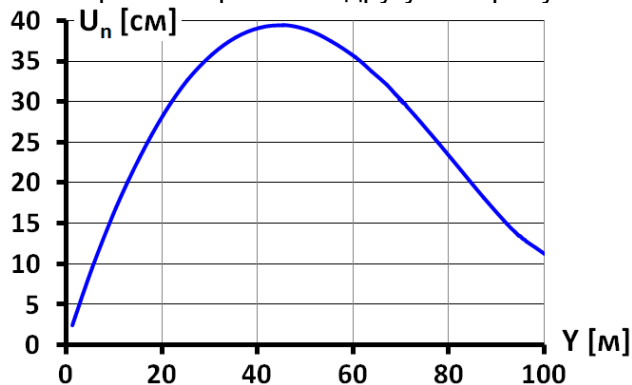


режим является в начальный интервал времени после изменения уровня воды, который длится менее суток.

### **Напряжённо-деформированное состояние экрана без учёта температурного воздействия**

Для возможности выявления влияния температурного воздействия был выполнен расчёт НДС экрана при действии только статических сил. Провести анализ позволяют рисунки 3,4, на которых показано НДС БЭ на момент завершения наполнения водохранилища до НПУ 95 м.

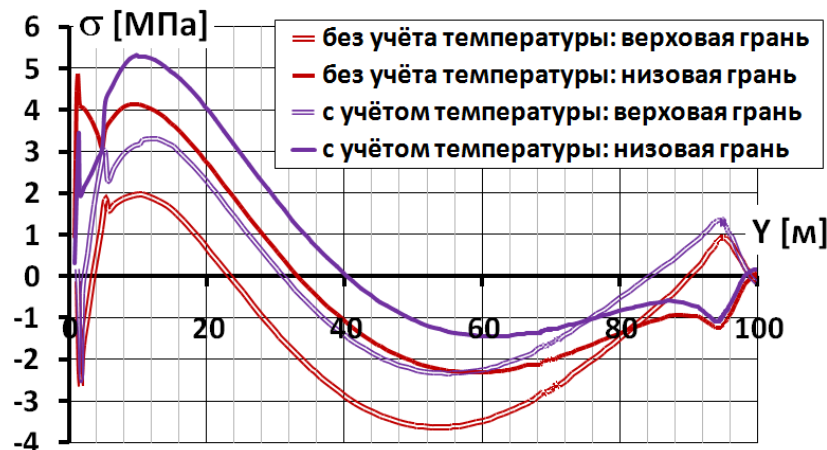
Распределение по высоте прогибов экрана (рис.3) говорит о том, что под действием статических сил экран испытывает изгиб в сторону нижнего бьефа. Максимальный прогиб БЭ на  $\nabla$  45 м составляет 39,4 см. В нижней части экрана деформации изгиба более интенсивны, чем в верхней. В зоне уреза воды изгиб экрана направлен в другую сторону – в сторону верхнего бьефа.



**Рис.3 – Распределение по высоте прогибов экрана**  
**Fig. 3 – Height distribution of face deflections**

Однако экран испытывает не только деформации изгиба, но и другие виды деформаций, в частности линейные. В нижней части экран испытывает растягивающие деформации (деформации удлинения), а в верхней – сжимающие (укорачивания).

Сложный характер деформаций вызывает неблагоприятное распределение в экране продольных напряжений, т.е. напряжений, которые действуют в направлении вдоль откоса. Ниже  $\nabla$  30 м экран испытывает растягивающие напряжения (рис.4). За счёт изгиба на низовой грани растягивающие напряжения выше, чем на верховой. Растягивающие напряжения достигают высоких значений (4÷5 МПа), которые превышают расчётное сопротивление бетона на растяжение.



**Рис.4 – Распределение по высоте продольных напряжений на гранях экрана (с учётом и без учёта температурного воздействия)**  
**Fig. 4 – Distribution of longitudinal stresses along the height on the edges of the face (with and without temperature exposure)**

В зоне уреза воды ( $\nabla$  95 м) за счёт изгиба в сторону верхнего бьефа растягивающие напряжения образуются на верховой грани. Они не столь велики (до 1 МПа) и не превышают прочность бетона (рис.4).

Таким образом, при заданных характеристиках грунтовой среды прочность БЭ при действии статических гидростатических сил не обеспечивается.

#### **Напряжённо-деформированное состояние экрана с учётом температурного воздействия**

По сравнению с силовыми нагрузками температурное воздействие, которое сопровождает наполнение водохранилища, очень в малой степени изменяет характер деформаций экрана. Его прогибы практически не изменяются.

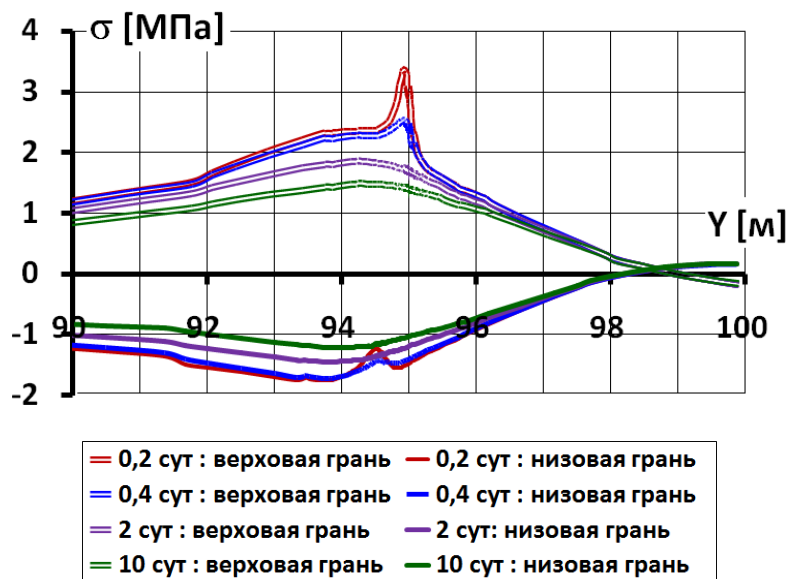
Тем не менее, температурное воздействие сильно влияет на напряжённое состояние БЭ. На рис.4 показано распределение продольных напряжений для случая почти установившегося температурного режима (через 30 суток после окончания наполнения).

На рис.4 хорошо видно, что охлаждающее действие воды ведёт к появлению в нижней части экрана дополнительной растягивающей продольной силы. За счёт этого растягивающие напряжения возрастают примерно на 1 МПа. Это показывает, что температурное воздействие может способствовать образованию трещин в экране.

При этом неравномерный характер распределения температур создаёт в нижней части экрана небольшой изгибающий момент в сторону верхнего бьефа. Это несколько уменьшает разницу значений напряжений между гранями экрана.

Благодаря появлению дополнительного изгибающего момента в верхней части экрана температурное воздействие ведёт к увеличению растягивающих напряжений на верхней части экрана. Но это увеличение довольно мало в сравнении с НДС от статических сил.

Однако, необходимо отметить, что более опасным с точки зрения прочности экрана является начальный момент времени, сразу после наполнения водохранилища. Это видно из рис.5, на котором показано распределение напряжений для нескольких моментов времени после окончания наполнения водохранилища.



**Рис.5 – Изменение продольных напряжений в верхней части экрана после наполнения водохранилища.**

Указаны промежутки времени, прошедшие с момента окончания наполнения водохранилища

**Fig. 5 – Changes in longitudinal stresses in the upper part of the face after filling the reservoir. The time intervals are indicated since the end of the filling of the reservoir**

После наполнения водохранилища до  $\nabla$ 95 м на верховой грани экрана в зоне уреза воды возникает зона концентрации растягивающих напряжений (рис.4). Через 0,2 суток (около 5 часов)



они составляют почти 3,35 МПа. Они почти в 2 раза превышают прочность бетона на растяжение. Однако эти напряжения на 40% меньше по сравнению с возможным температурным усилением от охлаждения на 20°C (5,8 МПа).

С течением времени происходит снижение растягивающих напряжений. Например, ещё через 5 часов напряжения снижаются до 2,5 МПа, а через 2 суток до 1,9 МПа. Таким образом, начальный интервал времени представляет наибольшую опасность с точки зрения образования трещин. Однако, рассмотренный случай температурного воздействия является гипотетическим. В реальных условиях температура на поверхности воды ближе к температуре воздуха, чем на глубине.

## 4 Conclusions

1. Изменения температуры окружающей среды (воздуха или воды) могут представлять угрозу для прочности бетонного экрана. При охлаждении экрана на 15÷20°C и более в нём могут возникать растягивающие напряжения, превышающие расчётное сопротивление бетона на растяжение. При проектировании каменно-набросных плотин с бетонных плотин в районах со значительными колебаниями температур требуется выполнять расчёты термонапряжённого состояния экрана.

2. Для того, чтобы адекватно моделировать термонапряжённое состояние бетонного экрана, необходимо соблюдать ряд условий. Во-первых, при расчётах температурного режима необходимо рассматривать короткие промежутки времени, т.к. наиболее неблагоприятное температурное воздействие экран испытывает в начальный времени после изменения уровня воды. Во-вторых, конечно-элементная модель экрана должна быть очень подробной, чтобы правильно воспроизвести процесс постепенного проникновения температурного фронта внутрь экрана и точнее определить величины температурных градиентов. В-третьих, для воспроизведения сложного характера деформаций изгиба экрана необходимо использовать конечные элементы высокого порядка.

3. Температурный режим экрана при наполнении водохранилища крайне различается по высоте (глубине). На глубине более 5÷10 м под уровнем воды поле температурный режим экрана характеризуется почти равномерным охлаждением (или нагревом) и является близким к стационарному (установившемуся). В зоне уреза воды температурный режим характеризуется неравномерным распределением температур по толщине и высоте экрана и существенными изменениями во времени.

4. Характер термонапряжённого состояния нижнего и верхнего участков экрана различается. Нижний участок экрана при охлаждении испытывает дополнительную растягивающую силу. В рассмотренном случае охлаждение на 20°C вызвало температурное напряжение около 1 МПа. Однако наиболее неблагоприятное термонапряжённое состояние складывается в верхнем участке экрана, в зоне уреза воды. В течение первых суток после наполнения водохранилища охлаждающее действие воды выражается в деформациях изгиба, которые вызывают концентрацию растягивающих напряжений на напорной грани. Их величина превышает расчётное сопротивление бетона на растяжение.

5. При строительстве КНПБЭ в суровых климатических условиях необходимо предусматривать мероприятия по снижению негативного влияния температурного воздействия на НДС экрана. В качестве такого мероприятия можно рассматривать теплоизоляцию напорной грани.

## References

1. Sainov, M., Yurieva, E. Structures of concrete faced rockfill dams in historical retrospective. *Construction of Unique Buildings and Structures*. 2018. 9(72). Pp.46-60. DOI: 10.18720/CUBS.72.3
2. Radchenko V.G., Glagovskiy V.B., Kassirova N.A., Kurneva Ye.V., Druzhinin M.A. *Sovremennoye nauchnoye obosnovaniye stroitelstva kamennonabrosnykh plotin s zhelezobetonnyimi ekranami [Modern scientific study of the construction of concrete face rockfill dams]*. *Gidrotekhnicheskoye stroitelstvo [Hydraulic Engineering]*. 2004. 3. Pp.2–8
3. Radchenko V.G., Kurneva Ye.V., Rotchenko Yu.G. *Sovremennyye tekhnologii stroitelstva kamennonabrosnykh plotin s zhelezobetonnyimi ekranami [Modern technologies for the construction of concrete faced rockfill dams]*. *Gidrotekhnicheskoye stroitelstvo [Hydraulic Engineering]*. 2007. 10. Pp.25–32

Sainov, M.; Kotov F.; Soroka V.

Thermo-stressed state of rockfill dam concrete face at reservoir impoundment; Thermo-stressed state of rockfill dam concrete face at reservoir impoundment

2020; *Construction of Unique Buildings and Structures*; Volume 93 Article No 9306. doi: 10.18720/CUBS.93.6

4. 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. 3(27). Pp.33–37
5. Ma, H., Chi, F. Technical progress on researches for the safety of high concrete-faced rockfill dams. *Engineering*. 2016. 2. Pp.332–339. DOI: 10.1016/J.ENG.2016.03.010
6. 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. 50(1). pp.20–33. DOI: 10.1007/s11431-007-6007-5
7. Wang, L.-B., Yan, Q. Analyze on development prospects of 300 m level ultra-high CFRD from Shuibuya high CFRD. *Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference, APPEEC*. 2010. 5448667
8. Zairova, V.A., Filippova, Ye.A., Orishchuk, R.N., Sozinov, A.D., Radchenko, S.V. Vybor protivofiltratsionnogo ustroystva v variantakh plotin Kankunskogo gidrouzlia [The choice of the anti-filtration device in the variants of the dams of the Cancun hydropower center]. *Gidrotekhnicheskoye stroitelstvo [Hydraulic Engineering]*. 2010. 2. Pp. 8–13.
9. Lashchenov, S.Ya., Saakyan, V.A., Salimov, Yu.T. Programma dostroyki gidroyelektrostantsiy. Osnovnyye polozheniya prognoza razvitiya gidroyenergetiki do 2015 g. [Completion program for hydroelectric power plants. The main provisions of the forecast for the development of hydropower until 2015]. *Gidrotekhnicheskoye stroitelstvo [Hydraulic Engineering]*. 2001. 11. Pp.13–21.
10. He, X., Wang, Z., He, Q. Cause analysis of face cracking of a CFRD during construction period in cold regions. *Advances in Science and Technology of Water Resources*. 2019. 39(3). Pp.68-74. DOI:10.3880/j.issn.10067647.2019.03.012
11. Mai, J., Sun, L., Research on causes of fractures of concrete plates faced on Xibeikou rock-fill dam. *Journal Water Resource and Hydropower Engineering*. 1999. 5. Pp.32–34
12. Qin X., Gu, C., Shao, C., Chen Y., Vallejo, L., Zhao, E. Safety evaluation with observational data and numerical analysis of Langyashan reinforced concrete face rockfill dam. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. 2020. DOI: 10.1007/s10064-020-01790-2
13. Wang, Z., Liu, S., Vallejo, L., Wang, L. Numerical analysis of the causes of face slab cracks in Gongboxia rockfill dam. *Engineering Geology*. 2014. 181. Pp.224–232. DOI: 10.1016/j.enggeo.2014.07.019
14. Zheng, D., Cheng, L., Xu, Y. Evaluate the impact of cold wave on face slab cracking using fuzzy finite element method. *Mathematical Problems in Engineering*. 2013, 820267
15. Yanlong, L., Shouyi, L., Yang, Y., Xing, T. Temperature stress and surface insulation measures of concrete face slabs during cold wave period // *International Journal of Civil Engineering. Transaction A: Civil Engineering*. 2015. 13(4A). Pp.501–507.
16. Zheng, X., Zhao, E., Shao, C. Cause and Stability Analysis of Cracks in Concrete Slab of Rockfill Dam under High Temperature Difference Condition. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*. 2019. 304. 052075. DOI: 10.1088/1755-1315/304/5/052075
17. Freitas, M.S.Jr. Concepts on CFRDs Leakage Control - Cases and Current Experiences. *ISSMGE Bulletin*. 2009. 3(4). pp.11–18
18. Wang, R., Wang, R., Chen, Y. Research on thermal stress of concrete slabs of rockfill dam under condition of cold wave attack. *Journal of Hydroelectric Engineering*. 2004. 23(6). Pp.45–49. DOI: 10.1016/j.enggeo.2014.07.019
19. Wang, Z., Liu, S., Vallejo, L., Wang, L. Numerical analysis of the causes of face slab cracks in Gongboxia rockfill dam. *Engineering Geology*. 2014. 181. DOI: 10.1016/j.enggeo.2014.07.019.
20. Yu, M., Wang, R., Temperature stress research on the face plate of the Gongboxia concrete-faced rock-fill dam // *Water Resource and Hydropower Engineering*. 2004. 35. Pp.54–58.
21. Sainov, M.P. Vliyanie izmeneniya temperatury na napryazhyonno-deformirovannoe sostoyanie zhelezobonnogo ekrana kamenno-nabrosnoj plotiny [Impact of temperature change on the stress-strain state of the reinforced concrete face of a rockfill dam]. *Privolzhskij nauchnyj zhurnal [Volga River scientific journal]*. 2016. 4(40). Pp.79–85.
22. Sainov, M.P., Kotov, F.V., Volkov, D.V. Napryazhenno-deformirovannoe sostoyanie massivnogo negruntovogo dvuslojnogo ekrana kamenno-nabrosnoj plotiny pri temperaturnom vozdejstvii [Stress-strain state of a massive non-soil two-layer screen of a rock fill dam under temperature exposure]. *Privolzhskij nauchnyj zhurnal [Volga River scientific journal]*. 2018. 2(46). Pp.84–90.
23. Sainov, M.P. Temperaturnyj rezhim betonnoogo ekrana kamenno-nabrosnoj plotiny [Temperature regime of the concrete screen of the rock fill dam]. *Vyshshaya shkola: nauchnye issledovaniya sbornik nauchnyh statej po itogam raboty Mezhhuzovskogo nauchnogo kongressa [Higher school: scientific research collection of scientific articles on the results of the work of the Interuniversity scientific congress Temperature regime of the concrete face of the rockfill dam]*. Moscow. 2020. Pp.140-145.
24. Sainov, M.; Nguyen, T.C. Temperature Regime of Rockfill Dam Concrete Face During the Filling of the Reservoir. *Construction of Unique Buildings and Structures*. 2020. 91. Article No 9106. DOI: 10.18720/CUBS.91.6
25. Sainov, M.P. Authorial computer program for study of stress-strain state of embankment dams. *The Eurasian Scientific Journal*, [online]. 2020. 3(12). Available at: <https://esj.today/PDF/77SAVN320.pdf>

Sainov, M.; Kotov F.; Soroka V.

Thermo-stressed state of rockfill dam concrete face at reservoir impoundment; Thermo-stressed state of rockfill dam concrete face at reservoir impoundment

2020; *Construction of Unique Buildings and Structures*; Volume 93 Article No 9306. doi: 10.18720/CUBS.93.6

Sainov, M.; Kotov F.; Soroka V.

Thermo-stressed state of rockfill dam concrete face at reservoir impoundment; Thermo-stressed state of rockfill dam concrete face at reservoir impoundment

2020; *Construction of Unique Buildings and Structures*; Volume **93** Article No 9306. doi: 10.18720/CUBS.93.6