

ГИДРОТЕХНИЧЕСКИЕ СООРУЖЕНИЯ HYDRAULIC CONSTRUCTIONS

DOI 10.22363/1815-5235-2023-19-1-94-109

EDN: GJKIEK

УДК 627.82+693.5

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH ARTICLE

Оценка безопасности массивно-контрфорсных плотин при наличии в них трещин температурного происхождения

В.А. Зимнюков , М.И. Зборовская  

Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева, Москва, Российская Федерация

 moo_abh@mail.ru

История статьи

Поступила в редакцию: 20 ноября 2022 г.

Доработана: 22 января 2023 г.

Принята к публикации: 25 января 2023 г.

Для цитирования

Зимнюков В.А., Зборовская М.И. Оценка безопасности массивно-контрфорсных плотин при наличии в них трещин температурного происхождения // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2023. Т. 19. № 1. С. 94–109. <http://doi.org/10.22363/1815-5235-2023-19-1-94-109>

Аннотация. В 1950-е годы началось строительство гидроузлов в районах Сибири и Дальнего Востока, характеризующихся суровыми климатическими условиями, с учетом которых нужно уметь прогнозировать напряженное состояние плотин. Цель исследования – оценка условий формирования температурных трещин в бетонных плотинах и их влияния на дальнейшую работу сооружения, а также мероприятий и технологии по борьбе с трещинообразованием в массивном бетоне. Температурные напряжения нередко по величине превышают напряжения, вызванные действием внешних нагрузок, и приводят к появлению в бетоне трещин. Температурному трещинообразованию и сегодня подвержены практически все современные бетонные плотины. Необходимо предусматривать соответствующие конструктивные и технологические мероприятия. При изучении термонапряженного состояния облегченных бетонных плотин применяют метод непосредственного воспроизведения температурных деформаций на моделях из хрупких материалов и расчетные методы, ориентированные на компьютерные методы решения задач. Представлены результаты модельных и расчетных исследований массивных контрфорсных плотин, рассмотрено влияние основных воздействующих факторов с учетом влияния трещинообразования на работу таких плотин.

Ключевые слова: массивный бетон, перепад температуры, трещинообразование, суровый климат, температурный режим, термонапряженное состояние, охлаждение бетона, поверхностная изоляция, трубное охлаждение

Зимнюков Владимир Анатольевич, кандидат технических наук, доцент кафедры гидротехнических сооружений, Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева, Российская Федерация, 127434, Москва, Тимирязевская ул., д. 49.; ORCID: 0000-0002-9892-146X, eLIBRARY SPIN-код: 9152-1962; zimnyukov@rgau-msha.ru

Зборовская Марина Ильинична, кандидат технических наук, доцент кафедры гидротехнических сооружений, Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева, Российская Федерация, 127434, Москва, Тимирязевская ул., д. 49.; ORCID: 0000-0002-8405-8757, eLIBRARY SPIN-код: 6748-0927; moo_abh@mail.ru

© Зимнюков В.А., Зборовская М.И., 2023



This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode>

Safety assessment of massive buttress dams in the presence of thermal cracks in them

Vladimir A. Zimnyukov , Marina I. Zborovskaya  

Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy, Moscow, Russian Federation

 moo_abh@mail.ru

Article history

Received: November 20, 2022

Revised: January 22, 2023

Accepted: January 25, 2023

Abstract. In the 1950s, the construction of hydropower facilities began in the regions of Siberia and the Far East, characterized by harsh climatic conditions, which should be taking into account to predict the stress state of dams. The aim of the study is an assessment of the conditions for the formation of temperature cracks in concrete dams and their influence on the further operation of the structure, as well as measures and technologies to combat cracking in massive concrete. Thermal stresses often exceed the stresses caused by the action of external loads and lead to the appearance of cracks in the concrete. Almost all modern concrete dams are subject to thermal cracking today. Appropriate design and technological measures must be provided for. When studying the thermally stressed state of lightweight concrete dams, the method of direct reproduction of thermal deformations on models made of brittle materials and computational methods oriented towards computer methods of solving problems are used. The results of modeling and computational studies of massive buttress dams are presented and the influence of the main influencing factors is considered, taking into account the effect of cracking on the operation of such dams.

Keywords: massive concrete, temperature difference, cracking, harsh climate, temperature regime, thermal stress state, concrete cooling, surface insulation, pipe cooling

For citation

Zimnyukov V.A., Zborovskaya M.I. Safety assessment of massive buttress dams in the presence of thermal cracks in them. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2023;19(1):94–109. (In Russ.) <http://doi.org/10.22363/1815-5235-2023-19-1-94-109>

Введение

В 1950-е годы началось строительство гидроузлов в районах Сибири и Дальнего Востока и во второй половине XX века гидроэнергетическое строительство продвинулось на восток России: Иркутская (1958 г.), Братская (1967 г.), Усть-Илимская (1974 г.) ГЭС на р. Ангаре; Красноярская (1972 г.), Саяно-Шушенская (1983 г.) ГЭС на р. Енисее; Вилюйская ГЭС на р. Вилюе (1976 г.); Колымская ГЭС на р. Колыме (1988 г.) и др.

С началом проектирования и строительства, а также эксплуатации бетонных плотин гидроузлов стало очевидно, что для таких плотин и природно-климатических условий весьма актуальными являются температурные воздействия и нужно уметь прогнозировать напряженное состояние плотин с их учетом.

Для особо суровых климатических условий средняя многолетняя температура может быть ниже $-3-4$ °С и им соответствуют большие величины амплитуды колебаний температуры (до 90 °С). Это Бухтарминская, Братская, Мамаканская и прочие гидроэлектростанции с бетонными плотинами [1].

Другими районами, где очевидно существует и остро стоит вопрос учета температурных воздействий на работу бетонных плотин и куда в 1970–1980-е годы пришло гидротехническое строительство, являются южные горные районы бывшего СССР. Их преимущество в возможности строительства высоконапорных гидроузлов большой емкости при малых площадях затопления. Но с целью облегчения доставки строительных материалов и с учетом наличия прочных скальных оснований для таких районов характерно строительство облегченных бетонных плотин – арочных и контрфорсных. Кроме того, такие плотины позволяют оптимальным образом регулировать температурный режим в строительный период, а районы строительства характеризуются перепадами до 20 °С в разрезе суток. Для их нормальной работы необходимо обеспечивать монолитность, а температурные трещины, возникающие во время строительства в

Vladimir A. Zimnyukov, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Hydraulic Structures, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy, 49 Timiryazevskaya St, Moscow, 127434, Russia Federation; ORCID: 0000-0002-9892-146X, eLIBRARY SPIN-code: 9152-1962; zimnyukov@rgau-msha.ru

Marina I. Zborovskaya, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Hydraulic Structures, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy, 49 Timiryazevskaya St, Moscow, 127434, Russia Federation; ORCID: 0000-0002-8405-8757, eLIBRARY SPIN-code: 6748-0927; moo_abh@mail.ru

сейсмически активных зонах, могут нарушать монолитность сооружения в эксплуатационный период и вести возникновению недопустимой фильтрации [2].

В России существует уникальный опыт проектирования и строительства плотин в суровых условиях, когда воздействие внешних температур и тепловыделение бетона при гидратации цемента ведут к трещинообразованию в блоках секций плотины, что может сказаться на напряженно-деформированном состоянии плотины в условиях дальнейшей эксплуатации. Вопросы оценки условий формирования температурных трещин в бетонных плотинах и их влияния на дальнейшую работу сооружения, а также мероприятия и технологии по борьбе с трещинообразованием в массивном бетоне по-прежнему актуальны.

На ряде отечественных гидроузлов проводятся натурные наблюдения, в том числе для плотин Братской, Красноярской и Усть-Илимской ГЭС (гравитационные плотины); Зейской и Андижанской ГЭС (массивно-контрфорсные плотины); Саяно-Шушенской ГЭС (арочно-гравитационная плотина) [3]. Это уникальный российский опыт, не имеющий аналогов.

Конструктивные и технологические мероприятия по регулированию температурного режима плотины в период кладки и твердения бетона

Характерным примером трещинообразования в строительный период может быть бетонная плотина Андижанской и некоторых других ГЭС. Образовавшиеся в ее теле системы трещин вызвали необходимость дополнительного изучения их влияния на работу Андижанской плотины.

Начальный этап строительства – период укладки бетона в тело плотины – закладывает основу будущей работы плотины в период приложения всех эксплуатационных нагрузок.

Учет релаксации напряжений позволяет снижать требования к температурному режиму бетона. Поэтому так активно разрабатываются и используются методы по регулированию температурного режима плотины в период кладки и твердения бетона. В настоящее время продолжается изучение поведения бетонных плотин в строительный период, оценки температурного и напряженно-деформированного состояний бетона раннего возраста и их регулирования для предотвращения трещинообразования [2; 4; 5].

Необходимо предусматривать соответствующие конструктивные и технологические мероприятия. Одним из них является столбчатая разрезка, которая позволяет более свободно проявляться температурным деформациям бетонной плотины и формировать более благоприятное термонапряженное состояние.

При таком подходе между отдельными бетонными столбами формируются временные строительные швы (искусственно создаются «трещины», рис. 1) [6; 7].

Технологические мероприятия состоят в основном в понижении температуры бетона во время максимума экзотермического разогрева и в последующий период [7].

Раскрытие блочных швов появляется после снижения температуры бетона (от максимальной) в среднем на 10–11 °С [7], а величина раскрытия определяет условия их цементации.

На Братской ГЭС раскрытие швов составляло менее 0,3 мм в 29 % и 0,3–0,5 мм в 13,3 % случаев.

При раскрытии более 0,5 мм цементация швов может быть выполнена с использованием обычных цементов. При меньшем раскрытии нужны материалы с меньшими размерами фракций, например особо тонкого дисперсного вяжущего (ОТДВ «Микродур») [8].

Согласно [3], низкая отрицательная температура наружной среды способствуют изменению физико-механических характеристик бетона из-за промораживания блоков, поведения швов и трещин, влияющих на работу плотин. Необходимо дальнейшее изучение процессов, возникающих при замораживании и оттаивании бетонов.

Температурное трещинообразование отмечено во многих плотинах и в настоящее время, в том числе и в возведенных по современной технологии укатанного бетона с малым количеством цемента [4].

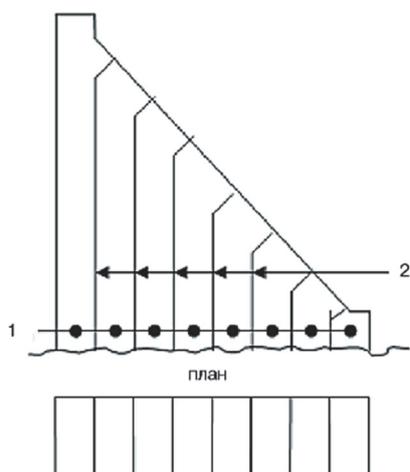


Рис. 1. Бетонная плотина со столбчатой разрезкой:

1 – столбы бетонирования; 2 – строительные швы

Figure 1. Concrete dam with column cut:

1 – concreting pillars; 2 – building seams

Бетонных массивно-контрфорсных плотин и гравитационных облегченных плотин с расширенными швами более 500, и они имеют некоторые преимущества по сравнению с гравитационными плотинами – это экономия материала и восприятие температуры, а также возможности ее регулирования. Данные преимущества хорошо видны на примере плотины Зейской ГЭС.

Проблема трещинообразования в строительный период и сегодня остается актуальным вопросом, которому необходимо уделять должное внимание [4].

Роль температурных напряжений в статической работе гидротехнических сооружений

Температурные напряжения играют в статической работе большинства гидротехнических сооружений существенную роль. Нередко по величине они превышают напряжения, вызванные действием внешних нагрузок, и приводят к появлению в бетоне трещин. Большой интерес представляют напряжения, обусловленные сезонными колебаниями температуры воздуха в зоне у граней сооружения. Термонапряженное состояние сооружения зависит также от механических и тепловых характеристик бетона, размеров изучаемого сооружения и их конфигурации, характера и жесткости связей с основанием.

Большую помощь при изучении термонапряженного состояния облегченных бетонных плотин оказывает метод непосредственного воспроизведения температурных деформаций на моделях из хрупких материалов.

Рассмотрим результаты модельных исследований термонапряженного состояния секции облегченной бетонной плотины с расширенными швами от сезонных колебаний температуры воздуха при наполненном водохранилище, когда температура воды, воздушной полости и основания постоянны во времени при граничных условиях первого рода. В этом случае моделирование термонапряженного состояния для упругой стадии работы осуществлялось по критериям Гука σ_0 и Фурье F_0 . На основе принятых критериев подобия выведены масштабы подобия: времени, температуры, модулей упругости и напряжений. Годовая гармоника температур с амплитудой $15\text{ }^\circ\text{C}$ воспроизводилась на модели за 40 минут и амплитудой $8,9\text{ K}$ [9].

Исследования позволили выявить весьма существенные величины растягивающих напряжений, являющихся очевидно следствием температурного защемления.

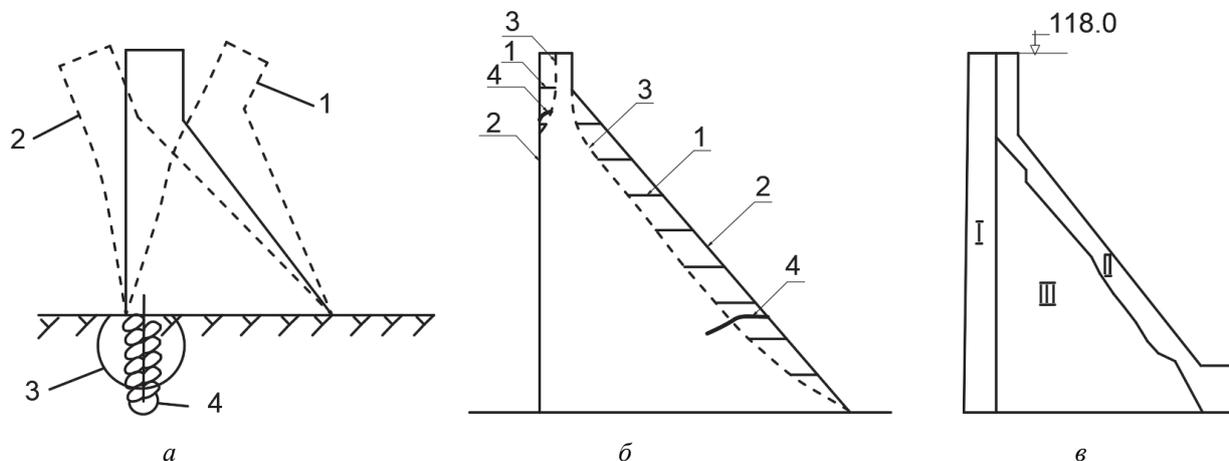


Рис. 2. Конструктивные особенности бетонной плотины:

a – перемещение гребня плотины при изменении температуры наружного воздуха: 1 – профиль плотины при охлаждении зимой; 2 – профиль плотины при нагревании летом; 3 – зона, в которой могут возникнуть растягивающие напряжения, что может привести к разрыву противофильтрационной завесы; 4 – противофильтрационная завеса; *б* – раскрытие строительных швов при понижении температуры наружного воздуха: 1 – строительный шов; 2 – расчетный профиль плотины; 3 – реальный профиль плотины; 4 – трещина; *в* – схема разбивки плотины на зоны различной деформативности (I, II, III)

Figure 2. Design features of a concrete dam:

a – movement of the crest of the dam with a change in the temperature of the outside air: 1 – profile of the dam during cooling in winter; 2 – profile of the dam during heating in summer; 3 – zone in which tensile stresses can occur, which can lead to rupture of the impervious curtain; 4 – impervious curtain; *б* – opening construction joints when the outside temperature drops: 1 – construction joint; 2 – design profile of the dam; 3 – real profile of the dam; 4 – crack; *в* – scheme of dividing the dam into zones of different deformability (I, II, III)

Бетон низовой и верхней частей верховой грани работает в условиях двухосного (возможно трехосного) растяжений σ_1 , σ_2 и σ_3 . Величины растягивающих напряжений на низовой грани (за исключением зоны

в верхней части плотины) не превосходят величины прочности бетона на растяжение ($R = 18 \times 10^5$ Па). Учитывая, что прочность швов значительно ниже (на 30–40 %) прочности на растяжение монолита, следует ожидать раскрытия строительных швов на низовой грани плотины (рис. 2, б).

Перемещения гребня плотины с расширенными швами носят циклический характер. При наполненном водохранилище амплитуда их составляет 0,7 мм на 1 К амплитуды колебаний температуры низовой грани; зимой гребень плотины перемещается в сторону нижнего бьефа (НБ). Запаздывание и продолжительность максимальных величин перемещения гребня плотины составляет 1 месяц (рис. 2, а).

Полученные результаты указывают на необходимость учета температурных воздействий и термонапряженного состояния облегченной бетонной плотины при анализе ее работы в целом.

Межблочные строительные швы и швы надрезы оказывают существенное влияние на формирование термонапряженного состояния плотины. Характер их влияния одинаков и между ними имеются лишь конструктивные отличия [9]. Они снижают растягивающие напряжения в зимний период и могут явиться эффективным конструктивным мероприятием по регулированию напряженно-деформированного состояния облегченных бетонных плотин.

Согласно [10; 11], расчетные методы, ориентированные на компьютерные методы решения задач, имеют преимущество перед экспериментальными в смысле оперативности и меньшей трудоемкости, тогда как модельные исследования дают возможность более полного учета пространственного характера работы сооружений, его конструктивных особенностей, граничных условий, физической и геометрической нелинейности.

При обосновании прочности и устойчивости ответственных гидротехнических сооружений в практике проектирования принято проведение и расчетных, и экспериментальных исследований. Существенным является также учет деформативности скального основания, которая характеризуется модулем деформации и влияет на напряженно-деформированное состояние плотины. Важны метод определения модуля упругости основания и оценка возможной погрешности в определении расчетной деформативности скальных пород основания на термонапряженное состояние бетонных плотин [12].

В действительности температурное поле основания не остается постоянным, изменяясь как вследствие теплообмена между плотиной и основанием, так и воздействия температурных колебаний воздуха на основание со стороны нижнего бьефа плотины. Существование не равных нулю напряжений, обусловленных изменениями температурного поля основания, подтверждается как модельными исследованиями, так и натурными измерениями.

Представляет интерес выявление размеров такой зоны основания (назовем ее «температурно-активной» зоной), вне пределов которой изменение температур основания не влияет на термонапряженное состояние плотины.

Согласно расчетным исследованиям по специальной программе, изменение расчетного модуля деформации в два раза (в ту и другую сторону от исходной величины $410\,000 \times 10^5$ Па) незначительно сказывается на термонапряженном состоянии облегченной гравитационной плотины. Изменения в величинах напряжений не превышают 10 % от исходных. Напряжения, обусловленные температурными изменениями основания, имеют местный характер. Вблизи контакта сооружения с основанием пренебрежение указанными температурными изменениями или их учет в неполном объеме существенно искажают картину термонапряженного состояния плотины.

При возможном возникновении системы вертикальных трещин на высоту получаем в целом улучшение термонапряженного состояния плотины по сравнению со случаем монолитного профиля. Наиболее существенное уменьшение величины растягивающих напряжений имеет место в прискальной зоне в связи с уменьшением общей жесткости сооружения из-за уменьшения осредненного модуля упругости при наличии вертикальных трещин. А наличие вертикальных незацементированных трещин (со значительным развитием по высоте) ухудшает суммарное напряженное состояние плотины по сравнению с монолитным профилем с появлением растягивающих напряжений на верховой грани и в контактной зоне основания. Наличие такой системы вертикальных трещин приводит к значительному снижению коэффициента запаса (примерно на 46 %).

Появление больших величин растягивающих напряжений на верховой грани может привести не только к раскрытию строительных швов в ее верхней части, но и к раскрытию контактного шва. Эта тенденция может вызвать ряд неблагоприятных воздействий при наличии достаточно жесткого основания под напорной гранью. Аналогичная ситуация может возникнуть при раскрытых межстолбчатых швах.

Одним из главных направлений прогресса в области проектирования и строительства бетонных плотин является регулирование их напряженного состояния, направленное на повышение степени исполь-

зования прочностных свойств бетона и основания и обеспечение равнопрочности отдельных зон тела плотины. Традиционный метод направленного воздействия на напряженное состояние сооружения – использование конструктивных мероприятий, таких как рационализация формы плотины, устройство различных швов, шарниров, прослоек, теплоизоляции, напряженной анкеровки и др. К этому направлению можно отнести и допущение раскрытия горизонтальных межблочных швов на низовой грани сооружения при низких температурах наружного воздуха [13].

Наряду с конструктивными существуют технологические методы регулирования напряженного состояния, например зонирование тела плотины по деформативности бетона (рис. 2, в).

Технологические методы выгодно отличаются от конструктивных тем, что не требуют изменения формы плотины, не связаны с эксплуатационными издержками.

Исследования влияния разномодульности тела плотины на ее термонапряженное состояние выполнены расчетным методом по специальной программе [12]. В совокупности рассмотрено семь расчетных вариантов зонирования тела плотины по деформативности, включая вариант однородной плотины (табл. 1).

Согласно [13], изменение модуля упругости бетона внутренней зоны не является эффективным с точки зрения регулирования термонапряженного состояния плотины, а указывает на возможность применения в определенном объеме материала с пониженными характеристиками для внутренних зон сооружения, не нарушая при этом картину суммарного напряженного состояния.

Конкретные изменения суммарных напряжений определяются геометрией сооружения и ее конструктивными особенностями, соотношением модулей упругости низового клина (II – рис. 2, в) и основного тела плотины (I – рис. 2, в), климатическими условиями створа. Наибольшее влияние на термонапряженное состояние облегченной бетонной плотины оказывают изменения модуля упругости в зоне низового клина.

Таблица 1

Расчетные модули упругости в зависимости от зоны плотины

Тип элемента	Расчетная схема 1, $E_{пл} \times 10^8$ Па			Расчетная схема 2, $E_{пл} \times 10^8$ Па			Расчетная схема 3, $E_{пл} \times 10^8$ Па		
I	265	265	265	53	265	530	265	265	265
II	53	265	530	265	265	265	265	265	265
III	265	265	265	265	265	265	53	265	530
№ варианта	3	0	4	5	0	6	1	0	2

Table 1

Calculated modulus of elasticity depending on the dam zone

Element type	Calculation scheme 1, $E_{dam} \times 10^8$ Па			Calculation scheme 2, $E_{dam} \times 10^8$ Па			Calculation scheme 3, $E_{dam} \times 10^8$ Па		
I	265	265	265	53	265	530	265	265	265
II	53	265	530	265	265	265	265	265	265
III	265	265	265	265	265	265	53	265	530
Option number	3	0	4	5	0	6	1	0	2

Работа гравитационных и контрфорсных плотин с трещинами в зоне контакта со скальным основанием в период эксплуатации

В период эксплуатации не всегда благоприятными оказываются условия работы плотин с трещинами и, в частности, сквозными вертикальными трещинами, возникшими в зоне контакта со скальным основанием. В гравитационных и контрфорсных плотинах могут возникать вертикальные или несколько наклонные трещины, распространяющиеся на большую высоту и разделяющие сооружение на отдельные части.

Основной причиной образования таких трещин являются растягивающие напряжения в бетоне, возникающие в результате его остывания на скальном основании. С другой стороны, появление таких трещин связано с неравномерностью распределения температур по сечению массивных сооружений, вызванной экзотермией бетонной смеси, начальным перепадом температур и колебанием температуры наружной среды.

Так, например, сквозные вертикальные трещины, возникшие в контактной зоне со скальным основанием в плотине Кировской ГЭС (рис. 3) связаны с приостановкой в бетонировании, что привело к остыванию ядровой части массивов на 10–12 К по отношению к максимальной температуре.

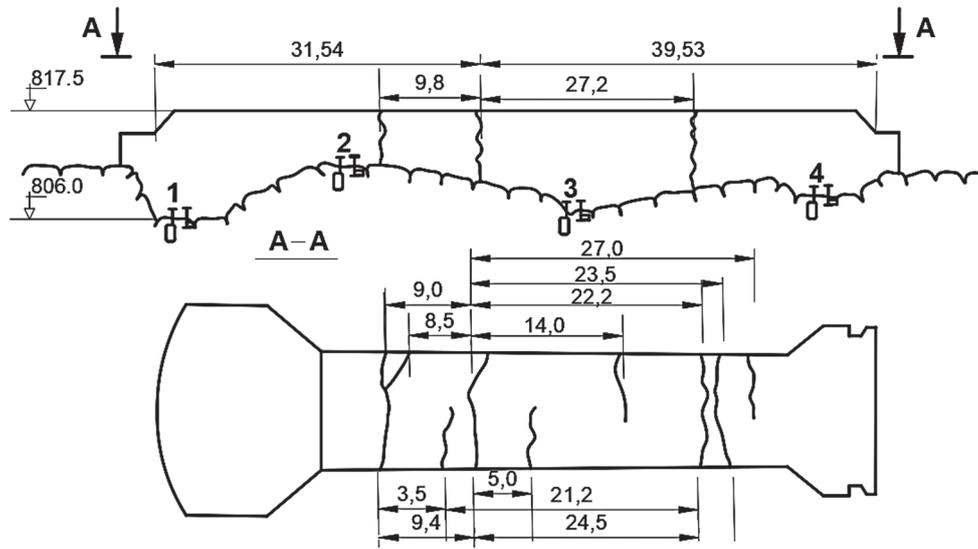


Рис. 3. Схема трещинообразования Кировской плотины (секция 6):

1–4 – места установки приборов

Figure 3. Fracturing scheme of the Kirov Dam (section 6):

1–4 – instrument installation locations



Рис. 4. Схема типичных трещин 24 секции плотины Андижанской ГЭС

Figure 4. Scheme of typical cracks in section 24 of the Andijan HPP dam

Большое количество различных типов трещин зафиксировано в плотине Андижанской ГЭС. На рис. 4 представлены характерные трещины, отмеченные в 24-й секции плотины. Основными причинами трещинообразования стали длительные перерывы в бетонировании, неравномерность возведения элементов секции, отсутствие современной теплозащиты наружных граней.

Известно, что температурные трещины в большем или меньшем количестве зафиксированы на всех плотинах, построенных и строящихся гидроузлов. Меры борьбы по предотвращению образования и ликвидации их неблагоприятных последствий сложны и дорогостоящи.

В связи с этим возникает вопрос: какие трещины являются допустимыми, а какие нет (то есть необходимо оценить степень их опасности). Для решения вопроса требуется проведение соответствующих теоретических и экспериментальных исследований.

В задачу настоящих исследований входило экспериментальное определение на хрупких моделях термонапряженного состояния секции массивно-контрфорсной плотины с одиночным контрфорсом (рис. 5) высотой 75,5 м и массивно-контрфорсной плотины с диафрагмой (рис. 6) высотой 110,5 м в случае появления в них трещин. Это позволило провести сопоставительный анализ с ранее полученными экспериментальными данными на эталонных (без трещин) моделях.

Физико-механические и теплофизические характеристики бетона плотин и скальных оснований описаны в [9; 14].

Модели секции массивно-контрфорсной плотины с одиночным контрфорсом и скального основания выполнены из гипсовых растворов. Высота модели плотины составила 50,3 см (геометрический масштаб 1:150), а основание имело размеры 180×60,3×14,6 см.

Сквозные вертикальные трещины на контакте с основанием (рис. 7) воспроизводились следующим образом. Вначале организовывались сквозные пропилы с помощью шлицовки. Затем поверхности полученного шва покрывались шеллачным лаком, а одна из этих поверхностей после высыхания лака смазывалась тонким слоем жировой смазки. С помощью пластилина около каждого шва организовывались карты для нагнетания гипсового раствора, состава, принятого для данной модели, но с добавлением гашеной извести. Последняя не дает увеличиваться раствору в объеме при его схватывании и позволяет получить требуемое раскрытие швов. В данном случае их раскрытие на модели не превышало 0,05 мм.

Модель секции массивно-контрфорсной плотины с диафрагмой выполнялась из гипсопесчаного раствора в масштабе 1:200.

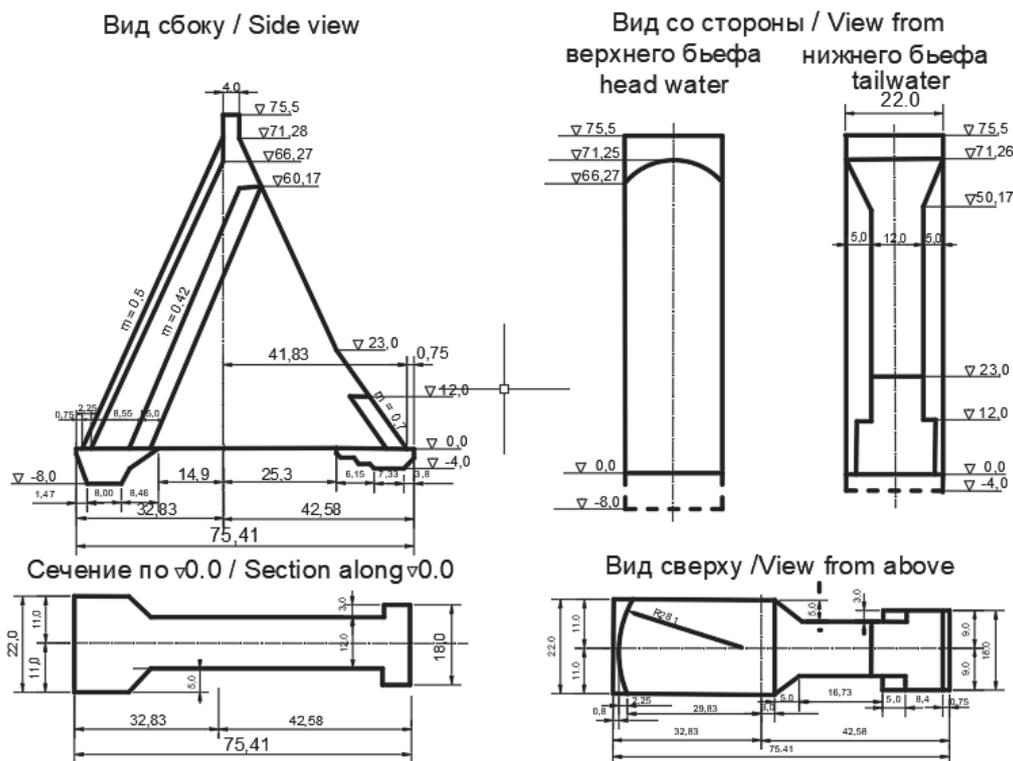


Рис. 5. Основные размеры массивно-контрфорсной плотины с одиночным контрфорсом
 Figure 5. Main dimensions of a massive buttress dam with a single buttress

Для воспроизведения системы внутренних трещин модель массивно-контрфорсной плотины с диафрагмой изготавливалась отдельными блоками (9 блоков). В каждом блоке моделирование трещин осу-

щевлялось с помощью фольговых пластинок. Они изготавливались из высокопрочной фольги от 10 до 100 микрон в соответствии с требуемой шириной раскрытия.

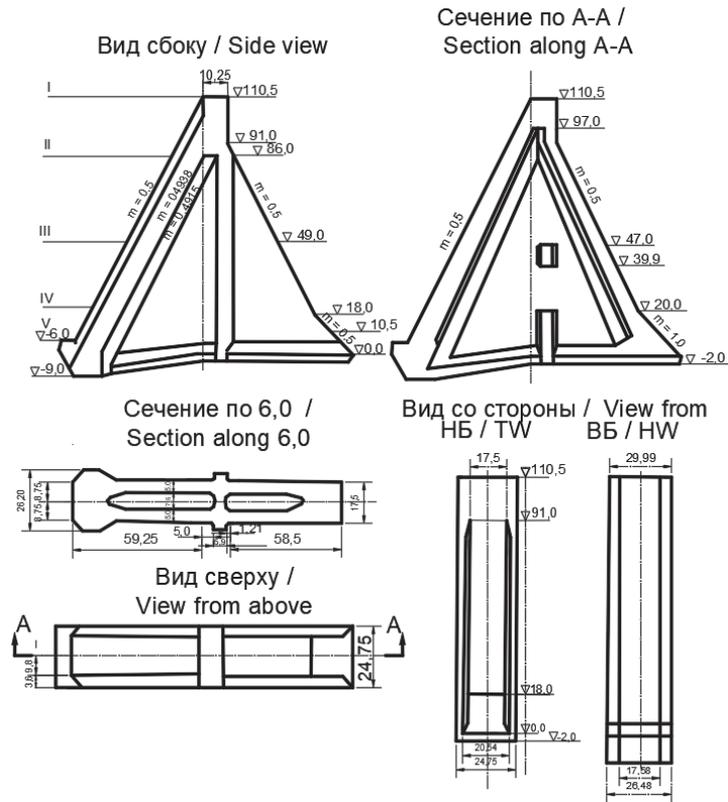


Рис. 6. Основные размеры массивно-контрфорсной плотины с диафрагмой
Figure 6. The main dimensions of a massive buttress dam with a diaphragm

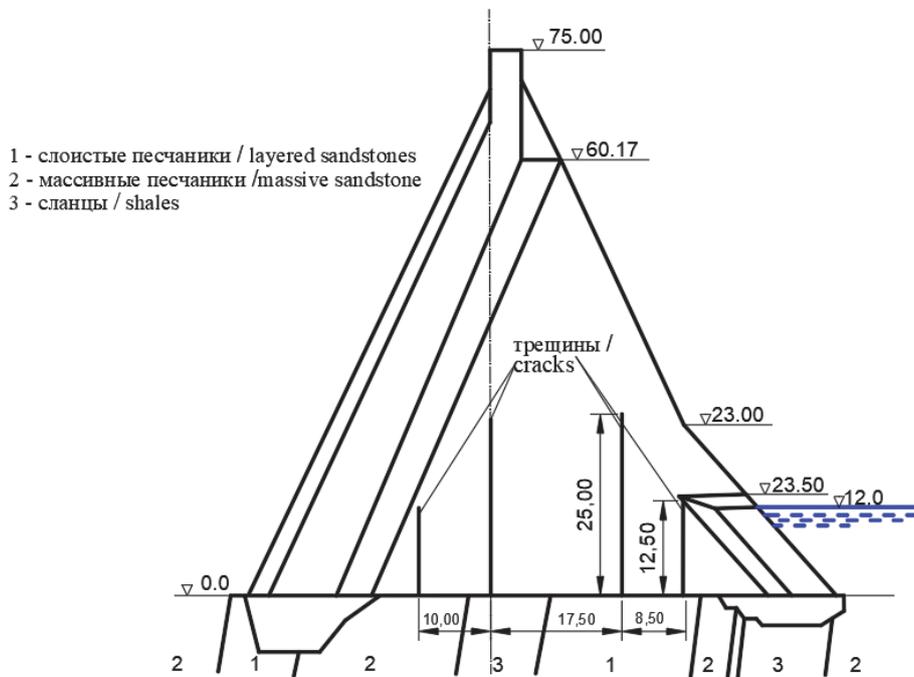


Рис. 7. Схема расположения вертикальных трещин на модели массивно контрфорсной плотины с одиночным контрфорсом со значительным развитием их по высоте
Figure 7. Scheme of location of vertical cracks on the model of a massive buttress dam with a single buttress with their significant development in height

На основании методических проработок определялось время выдергивания полосок фольги из охватывающего раствора. Контроль за качеством полученных трещин осуществлялся по распилам образцов с использованием электрического микроскопа. В пересчете на натуру ширина раскрытия трещин составила 1,4–2,0 мм. На рис. 8 представлена система замоделированных в сооружении трещин.

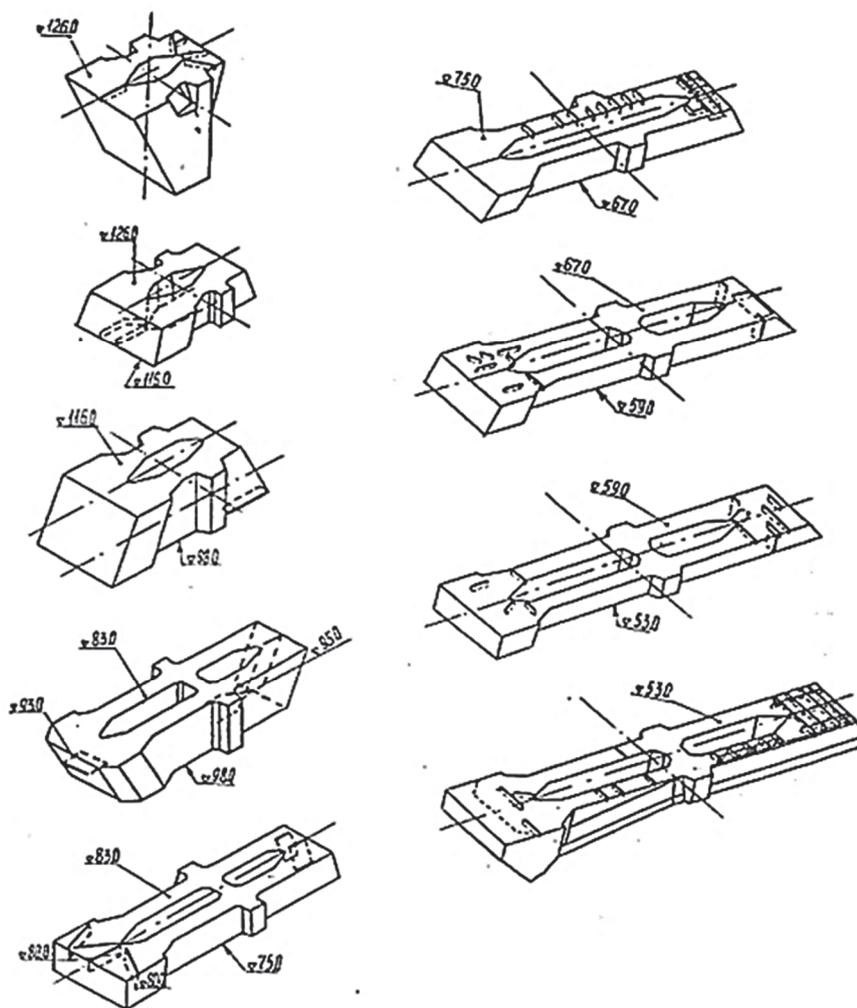


Рис. 8. Схема смоделированных трещин на поверхностях блоков (отметки 126–53, в скобках даны размеры для модели в см)
Figure 8. Scheme of simulated cracks on block surfaces (marks 126–53, in parentheses are the dimensions for the model in cm)

При проведении исследований на модели массивно-контрфорсной плотины с одиночным контрфорсом сезонные колебания температуры воздуха аппроксимировались температурной гармоникой с амплитудой 20 К, толщина низовой отепляющей стенки принималась равной 4,5 м, температура воды в водохранилище и воздушных полостей, образуемых соседними секциями плотины, принималась постоянной.

На модели массивно-контрфорсной плотины с диафрагмой и без отепляющей стенки воспроизводились сезонные колебания температуры наружного воздуха с амплитудой $A_T = 15$ К при наполненном водохранилище. При этом учитывались колебания температуры воды водохранилища (на основе анализа данных по температуре воды водохранилища) и периодические колебания температуры наружного воздуха со стороны боковых граней плотины с $A_T = 15$ К при незамкнутой низовой межсекционной полости.

Для случая наполненного водохранилища тепловое состояние и значение перемещений секции плотины были получены путем сложения соответствующих величин при раздельном приложении тепловой циклической нагрузки со стороны низовой и боковой граней и с учетом колебания температуры воды водохранилища.

Такое сложение на основе принципа суперпозиции является правомерным для монолитного профиля плотины, а для модели с трещинами справедливо для амплитуды тепловой нагрузки, имевшей место в экспериментах.

Масштабы моделирования в данных исследованиях получены на основе критериев подобия (Фурье и Гука) с учетом свойств материалов плотин и их моделей. В соответствии с полученными масштабами годовая гармоника температур с амплитудой 20 и 15 К воспроизводилась на моделях за 80 и 32 минуты с амплитудой 11,1 и 8 К соответственно.

Внешний нестационарный тепловой режим на моделях создавался с помощью специальной системы температурного нагружения, работающей в ручном и автоматических режимах. Для воспроизведения заданного режима потребовалось изменять напряжение тока, питающего нагреватель от 0 до 62 В и понижать температуру хладоносителя до 257 К.

Для замера температур применялись термометры сопротивления (термодатчики) и хромель-копелевые термоэлектрические преобразователи. Запись температуры осуществлялась непрерывно до начала опыта и в процессе всего опыта на 24-точечном самопишущем потенциометре ЭПП-09МЗ.

Деформации, возникающие от тепловой нагрузки, замерялись с помощью термокомпенсированных тензорезисторов. Замер деформаций выполнялся через определенные промежутки времени на полуавтоматическом мосту переменного тока типа АЭЛТ-4М. Цена деления прибора – с $1,0 \cdot 10^{-6}$ единиц относительной деформации.

Для замера температурных перемещений использовались датчики перемещений ДП-10 (ИЗ0-29) чувствительностью 0,01 мм, а также индикаторы часового типа с чувствительностью 0,001 мм.

В качестве клея для крепления датчиков применялся ВФ-4. Термообработка клея и тарировка контрольно-измерительной аппаратуры, установленной на модели, осуществлялась в климатической камере Feutron 3001, где температура поддерживалась с точностью $\pm 0,2$ К.

За исходное состояние моделей был принят их установившийся тепловой режим непосредственно перед температурным нагружением. Средняя температура моделей в экспериментах соответствовала температуре помещения и равнялась 291–295 К. Температурные напряжения в моделях определялись через деформации и упругие контакты материала по законам теории упругости. Пересчет результатов, полученных на моделях, на натуру осуществлялся согласно масштабам моделирования

Вертикальные сквозные трещины

Как видно из рис. 9, в случае появления трещин, распространившихся на высоту 12,5 и 25,0 м (0,16 и 0,34 Н соответственно), в целом происходит улучшение термонапряженного состояния плотины по сравнению со случаем монолитного профиля. Наиболее существенное уменьшение величины растягивающих напряжений имеет место на низовой и верховой гранях в прискальной зоне.

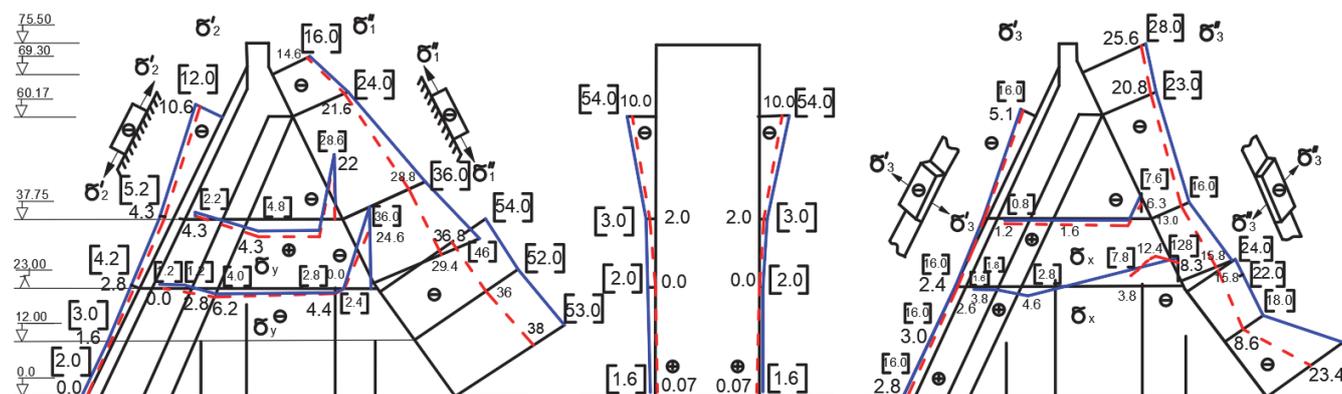


Рис. 9. Термонапряженное состояние секции плотины в январе при наполненном водохранилище ($A_T = 20$ К):
 --- монолитный профиль; ---- плотина с трещинами; величины напряжений даны в 10^5 Па

Figure 9. Thermally stressed state of the dam section in January with a filled reservoir ($A_T = 20$ K):
 --- monolithic profile; ---- dam with cracks; stress values are given in 10^5 Pa

На верховой грани в прискальной зоне величина растягивающих напряжений σ'_2 снижается на отметках 23,0 и 12,0 м на (33–46) % и составляет $(2,8–1,6) \times 10^5$ Па, а величина сжимающих напряжений увеличивается на (50–66) % и составляет $(2,4–3,0) \times 10^5$ Па. На отметке 0,0 м величина растягивающих напряжений σ'_2 близка к нулю.

На низовой грани, начиная с отметки 23,0 м до нулевой отметки, величина растягивающих напряжений σ'_2 и σ'_3 снижается на (34–38) % и составляет $(36–38) \times 10^5$ Па и $(8,6–23,4) \times 10^5$ Па соответственно.

В стенке контрфорса также происходит перераспределение напряжений и σ_x и σ_y (увеличение сжимающих и уменьшение растягивающих напряжений). Так, максимальная величина растягивающих напряжений на отметке 23,0 м уменьшается на 36 % и составляет $8,3 \times 10^5$ Па, а максимальная величина сжимающих напряжений увеличивается на 64 % и составляет $4,6 \times 10^5$ Па. Следовательно, это ограничит дальнейшее распространение трещин по высоте.

Улучшение термонапряженного состояния плотины в прискальной зоне связано с уменьшением общей жесткости сооружения вследствие уменьшения осредненного модуля упругости плотины при наличии вертикальных трещин.

Амплитуда перемещения гребня плотины с вертикальными швами увеличивается по сравнению с монолитным профилем на 15 %.

Для оценки суммарного напряженно-деформированного состояния плотины температурные напряжения, возникающие в плотине зимой, были сложены с напряжениями, полученными экспериментально на аналогичной хрупкой модели от воздействия на плотину гидростатического давления и собственного веса при принятой системе вертикальных трещин, возникших в контактной зоне (рис. 9).

На рис. 10 приведена картина суммарного напряженного состояния только для верхней грани, так как на низовой грани от статических нагрузок при данной схеме раскрывшихся вертикальных трещин величина сжимающих напряжений возрастает незначительно.

Как видно из рис. 10, наличие вертикальных незацементированных трещин со значительным развитием по высоте ухудшает суммарное напряженное состояние плотины. На верхней грани на верхних отметках происходит увеличение растягивающих напряжений, а в приконтактной зоне появились растягивающие напряжения, достигающие у подошвы плотины до $4,5 \times 10^5$ Па. Это связано с ухудшением напряженного состояния от силовых нагрузок. Последнее подтверждается результатами исследований методом фотоупругости напряженного состояния облегченной плотины с расширенными швами при наличии сквозных трещин в контактной зоне

Следует отметить, что наличие такой системы вертикальных трещин в сооружении приводит к значительному снижению (на ~40 %) коэффициента запаса (величина, численно равная отношению разрушающей нагрузки к расчетной – эксплуатационной). На основе полученной картины напряженного состояния можно отметить, что в секции плотины с вертикальными трещинами возможно также раскрытие горизонтальных строительных швов в верхней части напорной грани, где величины растягивающих напряжений превышают прочность швов.

Наличие больших величин растягивающих напряжений на верхней грани может привести не только к раскрытию строительных швов в ее верхней части, но и к раскрытию контактного шва. Вероятность этого увеличивается при наличии достаточного жесткого основания или его части под напорной гранью. Появление в сооружении трещин с развитием по высоте до 12,5 и 25,0 м (при значительном их раскрытии) недопустимо, так как это не только сказывается на суммарном напряженном состоянии, но и существенно снижает коэффициент запаса. Аналогичная ситуация может возникнуть при раскрытых межстолбчатых швах.

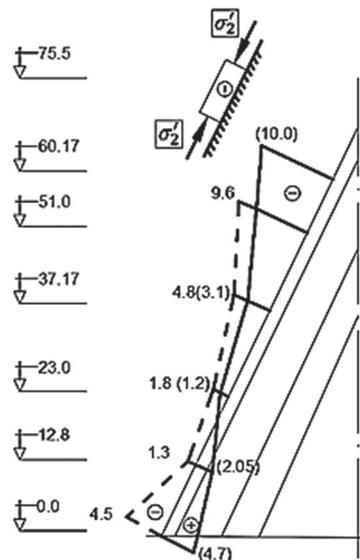


Рис. 10. Суммарное напряженное состояние верхней грани секции плотины в январе при наполненном водохранилище (Т+Р+G): --- монолитный профиль; - - - плотина с трещинами; величины напряжений даны в 10^5 Па
Figure 10. The total stress state of the upper face of the dam section in January with a filled reservoir (T+P+G): --- monolithic profile; - - - dam with cracks; stress values are given in 10^5 Pa

Система внутренних трещин

Схема воспроизведенных трещин на модели соответствует реальной трещиноватости бетона, зафиксированной в 24-й секции плотины Андиганской ГЭС и характерной для ряда других секций.

Результаты воздействия сезонных колебаний температуры наружного воздуха на работу секции плотины с трещинами при наполненном водохранилище представлены в табл. 2 и на рис. 11. Амплитуды колебаний температуры и перемещений получены при температуре наружного воздуха с $A_T = 15$ К.

Таблица 2

Величины температурных перемещений для монолитного профиля и плотины с системой трещин

№ индикаторов	Отметки, м	Наполненное водохранилище			Плотина с системой трещин		
		Перемещения от сезонного колебания температуры $A_T = 15$ К	Перемещения от гидростатики и собственного веса	Суммирующие перемещения G, P и $t(A_T = 15$ К)	Перемещения от сезонного колебания температуры $A_T = 15$ К	Перемещения от гидростатики и собственного веса	Суммирующие перемещения G, P и $t(A_T = 15$ К)
13	987,5	9,45	39	48,45	8,6	46	54,6
12	883	4,95	32	36,95	4,8	42	46,8
11	883	4,8	32	36,8	5,0	42	47,0
9	846	0,81	25	25,81	0,84	32	32,84
8	846	0,84	25	25,84	0,82	32	32,82
7	818	0,3	18	18,3	0,33	25	25,33

Table 2

Values of temperature displacements for a monolithic profile and a dam with a system of cracks

No. of indicators	Marks, m	Filled reservoir			Dam with cracks system		
		Displacement from seasonal temperature fluctuations $A_T = 15$ K	Moving from hydrostatics and own weight	Summing movements G, P and $t(A_T = 15$ K)	Displacement from seasonal temperature fluctuations $A_T = 15$ K	Moving from hydrostatics and own weight	Summing movements G, P and $t(A_T = 15$ K)
13	987.5	9.45	39	48.45	8.6	46	54.6
12	883	4.95	32	36.95	4.8	42	46.8
11	883	4.8	32	36.8	5.0	42	47.0
9	846	0.81	25	25.81	0.84	32	32.84
8	846	0.84	25	25.84	0.82	32	32.82
7	818	0.3	18	18.3	0.33	25	25.33

Как видно из табл. 2 наличие трещин практически не сказалось на распределении температур в сооружении (изменения в амплитудах температур по сравнению с монолитным профилем не превышали 5–6 %). В плотине с трещинами термоэлектрические преобразователи были установлены на внутренней поверхности замкнутой полости со стороны низовой грани. Это позволило зафиксировать колебание температуры, имевшее место на поверхности низовой части внутренней полости с $A_T = 5,4$ К с запаздыванием в ~3 месяца. Максимальная амплитуда колебания температуры была отмечена в низовой части внутренней полости со стороны низовой грани и равнялась 5,9 К.

На рис. 11 приводится ход изменения температуры на гранях плотины и графики перемещений при наполненном водохранилище с учетом колебания температуры воды водохранилища.

В табл. 2 для сравнения приведены величины температурных перемещений для монолитного профиля и плотины с системой трещин. Из табл. 2 видно, что трещины не оказывают существенного влияния на поведение сооружения. Величины перемещений колеблются от 1 до 8 % и в ряде случаев находятся в пределах точности измерений.

Значения суммарных перемещений для указанных случаев также даны в табл. 2. Они получены в результате сложения соответствующих величин, замеренных на тепловых и статических моделях.

Анализ приведенных данных показывает, что при наличии достаточно слабого основания решающее воздействие на величину перемещений сооружения оказывают силовые нагрузки.

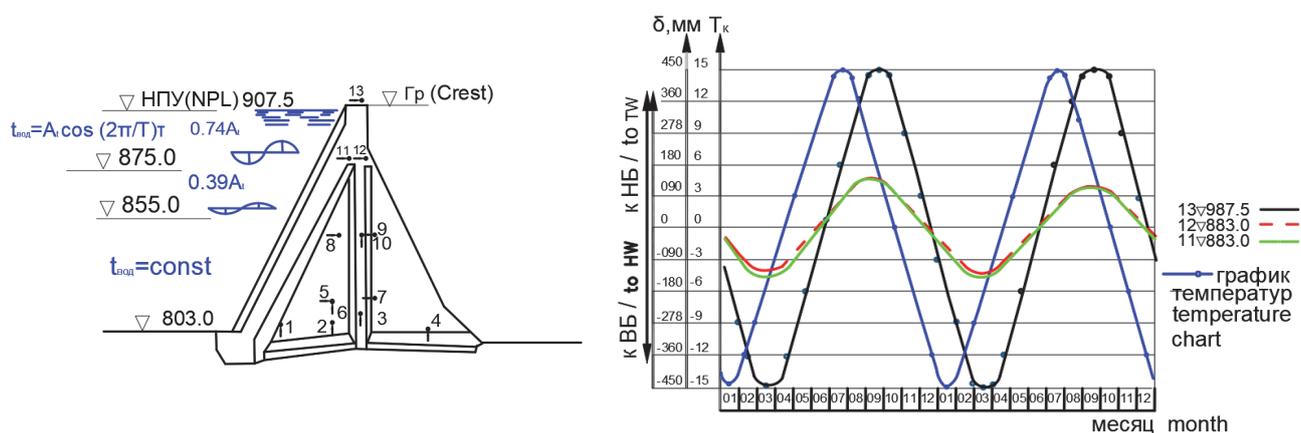


Рис. 11. Графики перемещений заданных точек секции плотины (с имеющейся системой трещин) при наполненном водохранилище с учетом колебания температуры воды водохранилища
Figure 11. Graphs of displacements of given points of the dam section (with the existing system of cracks) when the reservoir is filled, considering fluctuations in the reservoir water temperature

Стремление сделать конструкцию более экономичной и уменьшить риск трещинообразования за счет снижения расхода цемента привело к появлению плотин из укатанного бетона [15; 16].

Чтобы свести к минимуму трещинообразование в период строительства необходимо использовать методы регулирования температурного режима при возведении (выбирать состав бетона и технологические параметры его укладки).

Важным фактором, влияющим на тепловое и термонапряженное состояние плотины, является частичная или полная сработка водохранилища. В этом случае происходит изменение направления перемещения плотины и перераспределение перемещений.

Важно при расчетах на ЭВМ учитывать наличие и величину температурно-активной зоны, так как плотины активно взаимодействует с основанием. Необходимо выработать подход к назначению величины такой зоны.

Также, как показывает изучение практики эксплуатации бетонных плотин, весьма важным фактором является влажность наружного воздуха и влажность бетона, особенно в суровых климатических условиях [17; 18].

Необходимо разработать надежные методы анализа для оценки текущего состояния этих плотин и определения безопасности частично поврежденных сооружений [19].

Заключение

Исследованная система вертикальных трещин (с развитием по высоте до 25 м) при наполненном водохранилище и амплитуде колебания температуры в 20 К оказывает в целом положительное влияние на термонапряженное состояние плотины.

Полученная картина суммарного напряженно-деформированного состояния для случая с вертикальными трещинами характеризуется увеличением растягивающих напряжений на верховой грани, превышающих предельно допустимые на стадии нормальной эксплуатации и ведущих к появлению больших величин растягивающих напряжений в контактной зоне. Это может вызвать раскрытие швов и трещинообразование в верхней части напорной грани и, возможно, раскрытие контактного шва под верховой гранью.

Для обеспечения нормальной эксплуатации сооружения необходимо предотвратить появление сквозных трещин в контактной зоне, а в случае возникновения таких трещин ограничить их распространение в верхние ярусы. Появление вертикальных трещин с распространением по высоте >10 м существенно ухудшает напряженное состояние верховой грани из-за значительного перераспределения напряжений от статических воздействий и снижает величину коэффициента запаса.

Принятая к исследованиям система трещин, имеющая место в 24-й секции плотины, не оказывает существенного влияния на ее тепловое состояние и величину температурных перемещений при наполненном водохранилище.

Вопрос о степени опасности различных типов трещин должен решаться в каждом конкретном случае лишь после тщательного расчетного и экспериментального обоснования, с учетом всех внешних си-

ловых и температурных факторов, свойств материала самого сооружения и характера его взаимодействия с основанием.

Приведенные выше модельные исследования подтвердили широкие возможности разработанной ранее методики моделирования термонапряженного состояния бетонных сооружений при решении различных задач эксплуатационного периода, в том числе связанных с образованием трещин.

Как показывает опыт проектирования и эксплуатации бетонных плотин, наилучшим способом изучения их работы и проектирования является сочетание модельного и расчетного исследований сооружений, основанных на данных натуральных наблюдений эксплуатируемых плотин, которые позволяют вырабатывать новые физические представления о работе плотин и развивать расчетные методы прогнозирования их поведения с учетом факторов влияния.

Ожидаемый срок службы многих бетонных плотин в мире приближается к концу, среди них многие треснули из-за воздействия окружающей среды. Таким образом, желательно иметь возможность продлить срок службы таких плотин. Поэтому важно разработать надежные методы анализа для оценки текущего состояния этих плотин и определения безопасности частично поврежденных сооружений. Например, тонкая железобетонная арочная плотина сильно треснула вниз по течению, в основном из-за сезонных колебаний температуры. Разработана подробная модель конечных элементов для имитации истории плотины с учетом изменений условий окружающей среды, которые имели место в течение ее срока службы. Результаты продемонстрировали хорошее совпадение как картины трещины, так и смещения плотины. Процедура имитации постепенного разрушения плотины начиная с текущего состояния, используется для оценки текущего уровня безопасности. Результаты показывают, что растрескивание оказывает влияние на коэффициент безопасности плотины.

Список литературы

1. *Телешев В.И.* Совершенствование конструктивно-технологических решений бетонных плотин на скальных основаниях // Гидротехническое строительство. 2007. № 5. С. 22–24.
2. *Фомичева Н.Н.* Термонапряженное состояние блоков бетонирования гидротехнических сооружений в строительный период с учетом упруго-податливых связей: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Новосибирск, 1984. 16 с.
3. *Козлов Д.В., Крутов Д.А.* Применение утеплителя в конструкции бетонных плотин, эксплуатирующихся в условиях сурового климата // Природообустройство. 2017. № 2. С. 27–33.
4. *Анискин Н.А., Хоанг Н.* Прогноз трещинообразования бетонных массивных плотин при возведении в суровых климатических условиях // Вестник МГСУ. 2014. № 8. С. 165–178.
5. *Анискин Н.А., Чонг Чык Н.* Проблема температурного трещинообразования в бетонных гравитационных плотинах // Вестник МГСУ. 2020. № 3. С. 380–398. <https://doi.org/10.22227/1997-0935.2020.3.380-398>
6. *Вознесенская Н.В., Гинзбург С.М., Добрецова И.В., Шейнкер Н.Я.* Исследования по термике бетонных сооружений // Известия ВНИИГ имени Б.Е. Веденеева. 2011. Т. 263. С. 87–97.
7. *Фомин Б.Г., Корнюшина М.П.* Цементационные материалы для омоноличивания бетонных плотин // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2010. № 2. С. 100–108.
8. *Демьянова Э.А.* К вопросу определения минимального размера трещин, поддающихся цементации // Труды ВНИИ ВОДГЕО. 1971. Вып. 31.
9. *Зимнюков В.А.* Влияние трещинообразования на термонапряженное состояние массивно-контрфорсных плотин // Гидротехнические сооружения, основания и фундаменты. 1979. Т. 62. С. 123–135.
10. *Бронштейн В.И., Зимнюков В.А.* Сравнение результатов экспериментов и расчетов методом конечных элементов термонапряженного состояния облегченных бетонных плотин // Гидротехнические сооружения. 1978. Т. 58. С. 78–85.
11. *Трапезников Л.П.* Температурная трещиностойкость массивных бетонных сооружений. М.: Энергоатомиздат, 1986. 272 с.
12. *Бронштейн В.И., Зимнюков В.А., Каганов Г.М.* Исследование термонапряженного состояния бетонных плотин с учетом податливости основания // Работа бетонных плотин совместно со скальным основанием: материалы конференций и совещаний по гидротехнике. Л.: Энергия, 1979. С. 101–108.
13. *Зимнюков В.А., Зборовская М.И., Зайцев А.И.* Учет температурных воздействий при работе гидротехнических сооружений. М.: Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева, 2019. 119 с.
14. *Зимнюков В.А., Зборовская М.И.* Моделирование термонапряженного состояния бетонных гидротехнических сооружений с использованием термобатарей // Безопасность энергетических сооружений: научно-технический и производственный сборник. М.: НИИЭС, 2003. Вып. 12. С. 137–146.
15. *Ali W., Urgessa G.* Numerical prediction model for temperature distributions in concrete at early ages // American Journal of Engineering and Applied Sciences. 2012. Vol. 5. No. 4. Pp. 282–290. <https://doi.org/10.3844/ajeassp.2012.282.290>

16. Abdulrazeg A.A., Noorzaei J., Khanehzaei P., Jaafar M.S., Mohammed T.A. Effect of temperature and creep on roller compacted concrete dam during the construction stages // *Computer Modeling in Engineering & Sciences*. 2010. Vol. 68. No. 3. Pp. 239–268. <https://doi.org/10.3970/cmcs.2010.068.239>
17. Malm R., Ansell A. Cracking of concrete buttress dam due to seasonal temperature variation // *ACI Structural Journal*. 2011. Vol. 1. Issue 1. Pp. 13–22. <https://doi.org/10.14359/51664198>
18. Enzell J., Malm R., Tollsten M. Predicting the influence of seasonal thermally induced cracking on a reinforced concrete arch dam // *KSCE Journal of Civil Engineering*. 2022. Vol. 26. Pp. 2707–2721. <https://doi.org/10.1007/s12205-022-0112-7>
19. Aufleger M., Goltz M., Conrad M. Distributed fibre optic temperature measurements – a competitive alternative for temperature monitoring in large RCC dams // *The 5th International Symposium on RCC Dams*. Guiyang, 2007. Pp. 1–8.

References

1. Teleshev V.I. Improvement of constructive and technological solutions for concrete dams on rocky foundations. *Gidrotekhnicheskoe Stroitel'stvo*. 2007;(5):22–24. (In Russ.)
2. Fomicheva N.N. *Thermally stressed state of concreting blocks of hydraulic structures during the construction period, considering elastic-yielding bonds* (dissertation of the Candidate of Technical Sciences). Novosibirsk; 1984. (In Russ.)
3. Kozlov D.V., Krutov D.A. The use of insulation in the design of concrete dams operating in a harsh climate. *Prirodobustrojstvo*. 2017;(2):27–33. (In Russ.)
4. Aniskin N.A., Hoang N. Predicting crack formation in solid concrete dams in severe climatic conditions during construction period. *Vestnik MGSU. Monthly Journal on Construction and Architecture*. 2014;(8):165–178. (In Russ.)
5. Aniskin N.A., Trong Chuc N. The problem of temperature cracking in concrete gravity dams. *Vestnik MGSU. Monthly Journal on Construction and Architecture*. 2020;15(3):380–398. (In Russ.) <https://doi.org/10.22227/1997-0935.2020.3.380-398>
6. Ginzburg S.M., Sheinker N.Ya., Dobretsova I.V., Voznesenskaya N.V. Research on the thermal behavior of concrete structures. *Proceeding of the VNIIG*. 2011;263:87–97. (In Russ.)
7. Fomin B.G., Korniyushina M.P. Cementing materials for monolithic concrete dams. *RUDN Journal of Engineering Researches*. 2010;(2):100–108. (In Russ.)
8. Demyanova E.A. On the issue of determining the minimum size of cracks that can be cemented. *Proceedings of VNII VODGEO*. 1971;31. (In Russ.)
9. Zimnyukov V.A. Influence of crack formation on the thermally stressed state of massive buttress dams. *Gidrotekhnicheskije Sooruzheniya, Osnovaniya i Fundamenty*. 1979;62:123–135. (In Russ.)
10. Bronstein V.I., Zimnyukov V.A. Comparison of the results of experiments and calculations by the finite element method of the thermally stressed state of lightweight concrete dams. *Gidrotekhnicheskije Sooruzheniya*. 1978;58:78–85. (In Russ.)
11. Trapeznikov L.P. *Temperature crack resistance of massive concrete structures*. M.: Energoatomizdat Publ.; 1986. (In Russ.)
12. Bronstein V.I., Zimnyukov V.A., Kaganov G.M. Investigation of the thermally stressed state of concrete dams, considering the compliance of the foundation. *Work of Concrete Dams Together with a Rocky Base: Proceedings of Conferences and Meetings on Hydraulic Engineering*. Leningrad: Energiya Publ; 1979. p. 101–108. (In Russ.)
13. Zimnyukov V.A., Zborovskaya M.I., Zaitsev A.I. *Accounting for temperature effects during the operation of hydraulic structures*. Moscow: Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; 2019. (In Russ.)
14. Zimnyukov V.A., Zborovskaya M.I. Modeling of the thermally stressed state of concrete hydraulic structures using thermopiles. *Safety of Energy Facilities: Scientific, Technical and Production Collection* (issue 12, p. 137–146). Moscow: NIIES Publ.; 2003. (In Russ.)
15. Ali W., Urgessa G. Numerical prediction model for temperature distributions in concrete at early ages. *American Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2012;5(4):282–290. <https://doi.org/10.3844/ajeassp.2012.282.290>
16. Abdulrazeg A.A., Noorzaei J., Khanehzaei P., Jaafar M.S., Mohammed T.A. Effect of temperature and creep on roller compacted concrete dam during the construction stages. *Computer Modeling in Engineering & Sciences*. 2010;68(3):239–268. <https://doi.org/10.3970/cmcs.2010.068.239>
17. Malm R., Ansell A. Cracking of concrete buttress dam due to seasonal temperature variation. *ACI Structural Journal*. 2011;1(1):13–22. <https://doi.org/10.14359/51664198>
18. Enzell J., Malm R., Tollsten M. Predicting the influence of seasonal thermally induced cracking on a reinforced concrete arch dam. *KSCE Journal of Civil Engineering*. 2022;26:2707–2721. <https://doi.org/10.1007/s12205-022-0112-7>
19. Aufleger M., Goltz M., Conrad M. Distributed fibre optic temperature measurements – a competitive alternative for temperature monitoring in large RCC dams. *The 5th International Symposium on RCC Dams*. Guiyang; 2007. p. 1–8.