

## Образование структурных трещин железобетонных экранов каменно-набросных плотин

### Structural cracks initiation in reinforced concrete faces of rockfill dams

М.П. Саинов<sup>1\*</sup>, М.А. Затонских<sup>2</sup>

M. Sainov<sup>1\*</sup>, M. Zatonskikh<sup>2</sup>

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26

Moscow State University of Civil Engineering (National Research University)

#### КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

каменно-набросные плотины с железобетонным экраном;  
трещины;  
авария;  
напряжённо-деформированное состояние;  
данные натуральных наблюдений;

#### KEYWORDS

Concrete faced rockfill dams;  
cracks;  
crash;  
stress strain state;  
data of field observations;

#### АННОТАЦИЯ

В статье рассмотрены факты нарушения целостности железобетонных экранов ряда каменно-набросных плотин, выполнен обзор мнений о причинах образования трещин в железобетонных экранах. Анализ показывает, что зоны и механизм трещинообразования в рассмотренных случаях различаются. Это позволяет говорить о том, что в основе трещинообразования могут лежать разные причины. Данных натуральных наблюдений недостаточно для того, чтобы составить однозначное представление о напряжённо-деформированном состоянии железобетонного экрана. В настоящее время не существует единого мнения о причинах образования трещин в железобетонных экранах. Соответственно, предлагаемые меры предотвращения трещинообразования основаны на эмпирическом подходе и требуют теоретического обоснования.

#### ABSTRACT

The article deals with the facts of damage of some reinforced concrete faces integrity in rockfill dams; a review of opinions was made regarding the causes of crack formation in reinforced concrete faces. Analysis shows that the zones and the mechanism of crack formation in the considered cases are different. This permits speaking about the fact that various reasons may exist for crack formation. The data of field observations is not sufficient for obtaining unique understanding about the stress-strain state of the reinforced concrete face. At present there is no general opinion on the causes of crack formation in reinforced concrete faces. Consequently, the proposed measures on prevention of crack formation are based on empirical approach and require theoretical validation.

#### Содержание

1.	Введение	16
2.	Методы	17
3.	Результаты и обсуждение	17
4.	Заключение	25

## 1. Введение

Каменно-набросные плотины с железобетонным экраном являются одним из распространённых типов каменно-набросных плотин, т.е. плотин, тело которых выполнено из крупнообломочных грунтов, а противофильтрационный элемент – из негрунтового материала. В каменно-набросной плотине с железобетонным экраном противофильтрационный элемент представляет собой тонкую железобетонную плиту, которая уложена на верховой откос плотины. Эта плита (железобетонный экран) воспринимает гидростатическое давление водохранилища и передаёт его на грунтовую насыпь. Толщина железобетонного экрана имеет малую толщину в сравнении с высотой плотины – 0,5÷1% и как правило является неразрезной по высоте.

Жёсткий противофильтрационный экран из железобетона работает в непростых условиях, т.к. вынужден перемещаться и деформироваться вслед за телом грунтовой насыпи. При этом перемещения напорной грани каменно-набросных плотин могут быть довольно высокими – достигать 0,6% от высоты сооружения [1]. Обеспечение надёжности и герметичности железобетонной плиты в таких условиях кажется невозможным, однако тем не менее каменно-набросные плотины с железобетонным экраном успешно применяются уже более ста лет. Это достигается благодаря использованию наиболее совершенных технических и технологических решений, накопленных за более чем вековой период.

Основным фактором, определяющим надёжность работы противофильтрационного железобетонного экрана, является снижение деформируемости тела грунтовой плотины. Благодаря современной технологии, предусматривающей послойное уплотнение каменной наброски вибрационными катками, удаётся достичь высокой степени её уплотнения.

Кроме того, залогом успешной работы противофильтрационной защиты каменно-набросной плотины является устройство герметичных швов на контакте железобетонного экрана с основанием и бортами, а также разделение экрана швами на вертикальные секции. Швы экранов современных плотин имеют несколько типов уплотнений, выполненных из различных материалов (сталь, медь, полимеры), которые способны сохранить герметичность швов даже при значительных деформациях.

Благодаря указанным и другим современным конструктивным и технологическим решениям удалось добиться применения каменно-набросных плотин с железобетонным экраном даже для восприятия сверхвысоких напоров (более 200 м).

Однако использование этих решений не гарантирует надёжность железобетонного экрана как противофильтрационного элемента. Имеются случаи возникновения на плотинах с железобетонным экраном аварийных ситуаций, заключающихся не только в нарушении герметичности противофильтрационной защиты, но и повреждении железобетонного экрана. Данные ситуации представляют серьёзную опасность и имеют катастрофические последствия. Нарушение герметичности противофильтрационной защиты плотины влечёт за собой возникновения фильтрационного потока в теле плотины, который может привести к суффозии и к разрушению плотины.

В связи с этим актуальной задачей гидротехники в настоящее время является выявление причин повреждений железобетонных экранов и разработка мероприятий по их устранению. В данной статье мы постарались собрать и представить информацию о фактах аварийных ситуаций на каменно-набросных плотинах с железобетонным экраном, а также мнения о причинах трещинообразования и мерах по борьбы с ними.

## 2. Методы

Для составления аналитического обзора аварийных ситуаций на каменно-набросных плотинах с железобетонным экраном использовались материалы Международного конгресса по большим плотинам 1 и источники [2-10].

Анализ причин возникновения трещин в железобетонных экранах представляет собой более сложную задачу, т.к. для этого необходимо рассмотреть напряжённо-деформированное состояние (НДС) каменно-набросных плотин с железобетонным экраном. Нами был проведён поиск источников о результатах натурных наблюдений за НДС экранов, а также о расследовании причин образования трещин. Также был составлен обзор рекомендаций по предупреждению трещинообразования в железобетонных экранах.

## 3. Результаты и обсуждение

### Факты нарушения герметичности и повреждений железобетонных экранов

Аварийные ситуации, связанные с нарушением герметичности противофильтрационной защиты каменно-набросной плотины, чаще всего фиксировались по возрастанию фильтрационного расхода через тело плотины. Повышенная фильтрация могла быть объяснена двумя основными причинами. Первая причина – это нарушение герметичности уплотнений швов на контакте экрана с другими конструкциями, а также швов в самом экране. Вторая причина – это нарушение целостности самого железобетонного экрана в следствие образования в нём сквозных трещин. Оба факта свидетельствуют о неблагоприятном напряжённо-деформированном состоянии железобетонного экрана.

Нарушение герметичности швов происходит в следствие повреждения их уплотнений. Как известно, в экранах современных плотин устраиваются швы двух типов – вертикальные швы и контурный периметральный шов. Если на гребне плотины устраивается подпорная стена, то шов выполняется также и на контакте подпорной стены с экраном.

Наиболее вероятным является нарушение герметичности периметрального шва. Это объясняется тем, что его уплотнения работают в крайне неблагоприятных условиях – они вынуждены испытывать сложные и большие по величине деформации. Из натурных данных известно, что периметральный шов всегда раскрывается [11], при чём величина раскрытия составляет от нескольких миллиметров до нескольких сантиметров. Раскрытие происходит как правило на всём протяжении шва. Кроме того, в

периметральном шве происходят сдвиговые смещения, величина которых как правило превышают величину раскрытия.

При больших перемещениях можно ожидать повреждение уплотнений шва, поэтому при проектировании плотины предусматривают дополнительные мероприятия по обеспечению безопасности плотины. По предложению Пинто и Мори с обеих сторон от шва выполняют отсыпку грунта специального зернового состава [12]. Благодаря хорошо подобранному зерновому составу отсыпки даже при интенсивной фильтрации в плотине не происходит суффозия грунтов. Нарушение целостности шва не вызывает серьёзных последствий для эксплуатации плотины. Случаев разрушения (или повреждения) каменно-набросных плотин из-за нарушения герметичности периметрального шва зафиксировано не было.

Однако имеется пример разрушения каменно-набросной плотины, связанного с нарушением герметичности другого шва. Это случай плотины Gouhou высотой 70 м, построенной в 1989 г. в Китае. При первом наполнении водохранилища вода проникла в негерметичный шов между железобетонным экраном и подпорной стенкой на гребне плотины [13]. Из-за фильтрации воды через шов произошла суффозия грунтов тела плотины, в результате которой плотина Gouhou была разрушена.

Однако этот случай был единичным, существенно более частым и опасным явлением является нарушение целостности самого железобетонного экрана. В трудах ICOLD и других научно-технических источниках [2-10] приведены описания аварийных ситуаций, связанных с повреждением железобетонных экранов каменно-набросных плотин современного типа. В [2,3] содержатся иллюстрации повреждённых экранов нескольких плотин.

Рассмотрим несколько фактов повреждения железобетонных экранов каменно-набросных плотин.

Наиболее известным является случай образования трещин в экране плотины Aguamilpa. Эта плотина высотой 187м была построена в Мексике в 1993 году. Сразу после наполнения водохранилища стали фиксироваться довольно большие фильтрационные расходы через плотину. В 1997 году на верхних отметках экрана (с интервалом 22 м по высоте) были обнаружены горизонтальные трещины. Раскрытие трещин достигало 15 мм. Образование трещин было связано с тем, что верхняя часть экрана испытывала повышенные деформации изгиба – в направлении к гребню плотины прогибы экрана резко возрастали [2]. Эти прогибы были вызваны повышенными осадками низовой части упорной призмы плотины (зона 3С) [14]. По экспертным оценкам деформируемость каменной наброски в низовой и верховой частях плотины различалась более, чем в 5 раз. Кроме того, повышенные деформации плотины могли быть связаны с просадками каменной наброски при замачивании атмосферными осадками.

Плотина Campos Novos высотой 202 м была построена в Бразилии в 2005 г. После наполнения водохранилища в экране была обнаружена вертикальная трещина [4,10]. Для её обследования водохранилище было опорожнено. При сработке водохранилища в 2006 г. в экране был обнаружен ещё целый ряд горизонтальных и наклонных трещин (рис.1). Положение одной из трещин было приурочено к границе очередей экрана.



**Рисунок.1. Трещины в железобетонном экране плотины Campos Novos (вид с верхнего бьефа)**

Большие повреждения испытал также экран плотины Tianshengqiao-1. Эта плотина высотой 178 м была построена в Китае в 1999 г. В её экране трещины образовались ещё до завершения строительства плотины. Система из тысяч трещин возникла в верхней части экрана предпоследней очереди плотины [5]. Перед наполнением было зафиксировано образование трещин в подэкрановой зоне той же части плотины. Исследователи делают выводы, что сложная схема возведения и нагружения плотины,

предусматривающая восприятие гидростатического давления неполным профилем плотины и сложный порядок наполнения и водохранилища, является одной из причин трещинообразования в экране плотины Tianshengqiao-1 [5].

В 2003 году в экране плотины Tianshengqiao-1 была обнаружена вертикальная трещина (рис.2а). Глубина трещины составила до 30 см, длина – почти 60 м. Трещина простирается на глубину около 40 м [5]. В 2004 году несмотря на проведённые ремонтные работы, в той же зоне трещина возникла вновь. Образование в экране вертикальной трещины связывают с нарушением прочности бетона на сжатие. В качестве причины концентрации в экране сжимающих напряжений называется недостаточно высокое качество уплотнения каменной наброски и использования в теле плотины слабых пород (аргиллитов). Пористость каменной наброски при укладке составляла 22÷24%. Максимальная строительная осадка плотины Tianshengqiao-1 составила более 300 см (более 1,6% от высоты плотины) [1,6].

Образование вертикальной трещины в железобетонном экране наблюдалось также на плотинах Barra Grande и Mohale.

Плотина Barra Grande высотой 185 м была построена в Бразилии в 2005 году. При первом же наполнении водохранилища в середине экрана образовалась вертикальная трещина (рис.2б), которая простирается на глубину около 100 м [10].

Плотина Mohale высотой 145 м была построена в Лесото в 2000 году [7]. При первом заполнении водохранилища в экране образовались горизонтальные трещины. При этом в период строительства отмечались трещины в подэкрановой подготовке, выполненной из бетона. 14 февраля 2006 года в экране образовалась вертикальная трещина (рис.2д). Образование трещины было связано с резким наполнением водохранилища в сезон дождей.

На плотинах Ita и Itapebi образование трещин происходило в бортовых секциях экрана,

Плотина Ita высотой 125м была построена в Бразилии в 2000 году. Плотина построена в широком створе (880 м). После первого наполнения водохранилища был зафиксирован большой фильтрационный расход – 1,7 м<sup>3</sup>/с [2]. Подводные исследования выявили в экране горизонтальные и субгоризонтальные трещины. Они расположены на 10÷15 м выше поверхности скального основания. Раскрытие трещин достигало 7 мм. Образование трещин связали с повышенными деформациями тела плотины. В центре экрана прогиб составил 65 см, а прогиб гребня – 75 см.

Похожая ситуация сложилась на плотине Itapebi, также построенной в Бразилии в 2002 г. Эта плотина несколько меньше, чем плотина Ita, её высота составляет 100м. При наполнении водохранилища фильтрационный расход достиг 800 л/с [2]. С помощью подводного обследования в правобережных секциях экрана были обнаружены трещины на высоте 10÷15 м выше скального основания.

Ещё одной бразильской плотинкой, в экране которой образовались трещины, является плотина Xingo высотой 150м и длиной по гребню 850 м. Она была построена в 1994 г. После первого наполнения были обнаружены протечки. Подводные исследования выявили наличие вертикальных трещин в бортовых секциях экрана в тех зонах, где во время строительства наблюдались трещины в подэкрановой зоне [2].

Образование трещин в бортовых секциях железобетонных экранов плотин Ita, Itapebi, Xingo связывают с их сложными деформациями изгиба, сформированных сложными топографическими условиями.

Образованию трещин был подвержен экран и самой высокой в мире каменно-набросной плотины с железобетонным экраном – плотины Shuibuya. Эта плотина высотой 233 м была построена в Китае в 2006 г. [8]. Она была построена в три очереди. В экране плотины Shuibuya трещины имели горизонтальное расположение, можно выделить 2 основные зоны трещинообразования [9]. Первая зона – это верхняя часть экрана первой очереди плотины. Вторая зона трещинообразования – это центральная часть экрана третьей очереди плотины. В этой зоне расположены многочисленные трещины, равномерно распределённые по высоте данной части экрана.

Похожий случай имел место на плотине Vuxi в Китае [9]. Возведение этой плотины высотой 135,8 м было завершено в 2011 г. В 2010 г. при частичном наполнении водохранилища был зафиксирован фильтрационный расход 600-700 л/с. При первом этапе наполнения были зафиксированы 46 горизонтальных трещин, раскрытие которых составляло до 0,2 мм. При полном заполнении водохранилища в 2012 г. фильтрационный расход достиг 1645 л/с. Горизонтальные трещины были обнаружены в верхней части экрана первой очереди (рис.2е). Кроме того, были обнаружены трещины и вдоль стыков вертикальных плит.

Существуют и иные примеры повреждения железобетонных экранов высоких и сверхвысоких плотин. Однако приведённых примеров достаточно для того, чтобы сделать несколько выводов.

Во-первых, образование крупных трещин происходит как правило при первом наполнении водохранилища. Реже образование трещин фиксируется до наполнения водохранилища или через несколько лет эксплуатации. В тех зонах, где до наполнения водохранилища наблюдались негативные процессы (например, зоны разуплотнения в подэкрановой зоне), при наполнении образуются трещины.

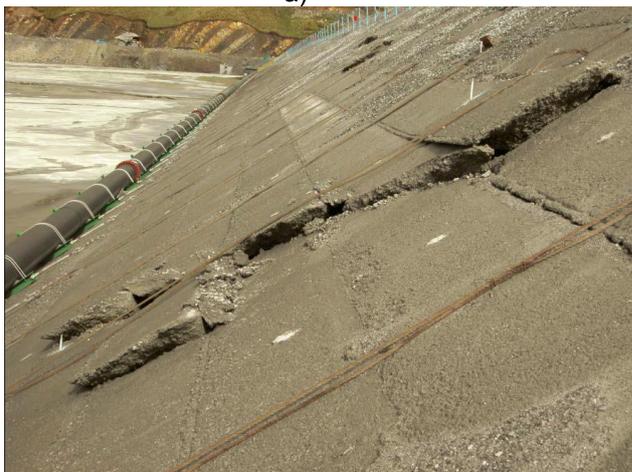
Во-вторых, можно заметить, что трещины могут иметь различное направление. Они могут быть горизонтальными, вертикальными и наклонными.



а)



б)



в)



г)



д)

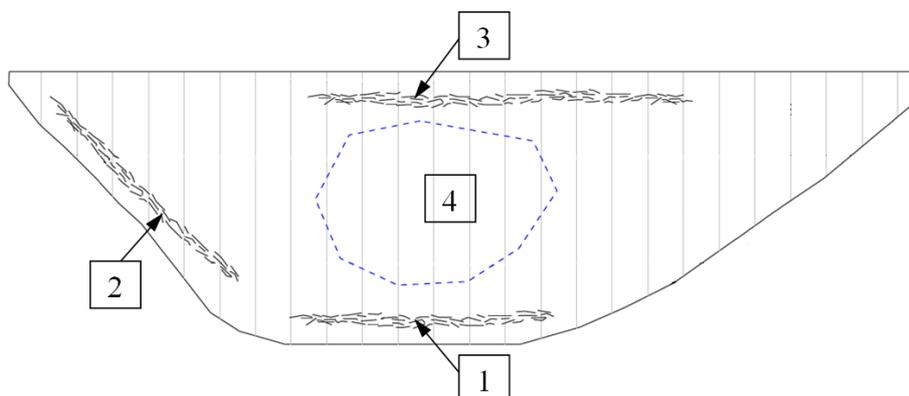


е)

**Рис.2. Характер повреждений железобетонного экрана. а-д - вертикальные трещины; е – горизонтальная трещина; а – плотина Tianshengqiao-1; б – плотина Barra Grande; в – плотина Antamina; г – плотина Campos Novos; д – плотина Mohale; е – плотина Buxi.**

В-третьих, можно выделить несколько зон возможного трещинообразования с характерным для них положением и направлением трещин. Горизонтальные трещины могут образовываться на различных высотах, часто они приурочены к границам очередей строительства плотины. Эти трещины являются протяжёнными и/или составляют целую систему. Такие трещины образовались в экранах плотин Tianshengqiao-1, Shuibuya, Buxi, Ita, Campos Novos. Вертикальные трещины образуются в центре экрана, часть они приурочены к вертикальным межсекционным швам в экране. Такие трещины образовались в

экранах плотин Barra Grande, Mohale, Antamina, Campos Novos. Наклонные трещины как правило образуются в прибортовых зонах и повторяют контуры рельефа местности. Такие трещины образовались в экранах плотин Itarebi, Campos Novos. Исследователями замечены перечисленные выше закономерности в расположении трещин, в [1] приведена схема зон трещинообразования, показанная на рис.3.



**Рисунок.3. Расположение зон трещинообразования в железобетонном экране**

1 – горизонтальные трещины внизу русловых секций, 2 – наклонные трещины в бортовых секциях, 3 – горизонтальные трещины вверху русловых секций, 4 – зона образования вертикальных трещин.

В-четвёртых, можно обобщить высказанные причины образования трещин в железобетонных экранах. В качестве причин образования наклонных трещин, повторяющих контуры рельефа называют деформации изгиба сложного характера, характерные для прибортовых секций экрана. В качестве причин образования горизонтальных трещин называют повышенные прогибы экрана в зоне гребня плотины или границ очередей плотины, вызывающие повышенные деформации изгиба. Образование вертикальных трещин может быть связано с наличием в экране высоких сжимающих напряжений в направлении от борта к борту. Об этом свидетельствует характерная картина повреждений экрана с разрушением защитного слоя и выгибом горизонтальной арматуры (рис.2).

#### **Причины образования трещин**

Образование трещин в железобетонных экранах может быть связано с разными причинами, т.к. напряжённо-деформированное состояние (далее – НДС) определяется различными факторами. Как правило, выделяют три основных влияющих фактора. Одним из важных факторов являются температурно-влажностные деформации, возникающие при твердении бетона. Также в формировании НДС экрана участвуют температурные воздействия эксплуатационного периода. Результаты исследований [15, 16] показывают, что температурные воздействия могут вызывать появление в бетоне напряжений величиной до 2 МПа. Однако самым важным фактором, формирующим НДС экрана являются деформации тела плотины. Об этом свидетельствует обзор фактов аварийных ситуаций.

В трудах ICOLD изложена классификация трещин, предложенная Мори. Возникающие в экране трещины классифицируют на три типа. Первый тип трещин – это трещины, вызванные усадкой бетона. Эти трещины – неглубокие, а их толщина составляет доли миллиметра. Такие трещины не требуют ремонта, т.к. способны к самозалечиванию.

Трещины второго и третьего типов называют структурными. Они образуются из-за нарушения условий прочности бетона. Образование структурных трещин связывают с неравномерностью деформирования экрана, в основном – со сложным характером деформаций изгиба.

К трещинам второго типа относят трещины, возникающие в процессе возведения плотины. Сетка тонких трещин этого типа образуется как правило в центральной части экрана. Считается, что они образуются из-за выгиба экрана в верхнюю сторону при боковом расширении плотины, сопровождающем её осадки. Ремонт этих трещин осуществляется их заполнением (затиркой). При наполнении водохранилища эти трещины стремятся к закрытию.

Трещины третьего типа образуются при первом наполнении водохранилища. Эти трещины представляют наибольшую опасность, т.к. как правило такие трещины – сквозные, они нарушают целостность экрана. Толщина трещин третьего типа может составлять от нескольких миллиметров до нескольких сантиметров. Образование этих трещин связывают с недопустимыми по величине изгибными деформациями. Сильный изгиб характерен для зон вблизи скального основания, а также может быть приурочен к границам очередей возведения плотины.

Мори связывал образование этих трещин с наличием трещин в подэкрановой зоне. Пинто указывал на то, что образованию трещин в прибортовых областях способствует неравномерность в распределении деформативных свойств грунтов в этих областях.

Однако, как показывает анализ, подобная классификация трещин и причин трещинообразования в железобетонных экранах нельзя признать полной. Она не позволяет объяснить различия в расположении структурных трещин. Можно заметить, что образование вертикальных трещин характерно только для сверхвысоких плотин (высотой более 150 м). Это может говорить о том, что в основе образования вертикальных и горизонтальных трещин могут лежать разные причины.

Характер повреждения экрана при образовании вертикальных трещин позволяет связать их появление с нарушением прочности бетона на сжатие. В настоящее время это утверждение является общепризнанным [3, 5]. Данный вывод подтверждается также тем фактом, что подобные трещины образовывались в экранах тех плотин, в которых межсекционные швы были выполнены тонкими [3]. Это плотины Tianshengqiao-1, Barra Grande, Mohale. Тонкие швы (толщиной в несколько миллиметров) не позволяли компенсировать деформации сжатия. После аварий на перечисленных выше плотинах вертикальные межсекционные швы стали выполнять расширенными.

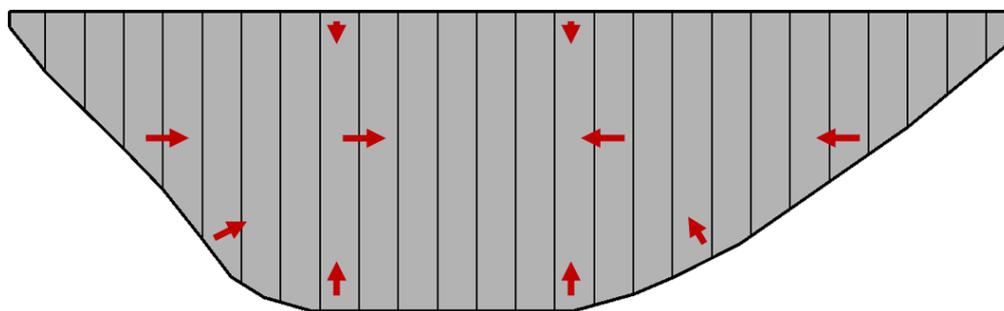
О причинах образования в экране горизонтальных и наклонных трещин нет единого мнения. Одни исследователи (например, [5, 1]) связывают образование горизонтальных трещин с нарушением прочности на сжатие, другие [9] – с нарушением сдвиговой прочности. По нашему мнению [17-19] и мнению ряда других исследователей [20, 1] образование горизонтальных трещин может быть объяснено нарушением прочности бетона на растяжение.

Отсутствие единодушного мнения объясняется скудностью данных натуральных наблюдений за напряжённо-деформированным состоянием железобетонного экрана. В ряде работ [7] приведены зафиксированные натурными измерениями высокие сжимающие напряжения в экране в направлении от борта к борту, но данных о напряжениях в других направлениях мало. Только в [1] нам удалось найти данные натуральных наблюдениях о напряжениях в направлении вдоль экрана. Кроме того, существует сложность в интерпретации натуральных данных. При мониторинге напряжённого состояния экрана измеряют не сами напряжения, а лишь относительные деформации. Для того, чтобы перейти от линейной деформации к напряжениям необходимо знать модуль линейной деформации и коэффициент Пуассона бетона, что требует дополнительных измерений.

#### **Напряжённо-деформированное состояние железобетонного экрана**

Данные натуральных наблюдений и численного моделирования позволяют изучить общий характер перемещений железобетонного экрана при восприятии гидростатического давления. Гидростатическое давление вызывает в плотине дополнительные осадки и горизонтальные смещения в сторону нижнего бьефа. За счёт неравномерности смещений и осадок экран испытывает деформации изгиба. Как правило, максимальный прогиб экрана наблюдается в центре экрана.

Кроме того, экран испытывает перемещения и деформации в своей плоскости. На рис.4 показана схема перемещений экрана в его плоскости, которая соответствует общепризнанному представлению о его работе. Аналогичная схема приведена в трудах ICOLD и в [1]. Из рис.4 видно, что повышенный прогиб центра экрана вызывает движение его периферийных зон в сторону центра. Это движение сопровождается раскрытием периметрального шва, которое фиксируется данными натуральных наблюдений. В реальности картина перемещений экрана несколько сложнее. Нами было показано, что разные секции экрана могут иметь разные по величине смещения в направлении вдоль экрана. Межсекционные швы компенсируют возможность изгиба экрана в своей плоскости.



**Рисунок.4. Характер перемещений экрана при восприятии гидростатического давления  
Красными стрелками показано направление перемещений экрана.**

Однако описанный характер перемещений экрана не создаёт адекватного представления о деформациях экрана и испытываемых им напряжениях. Представленная картина перемещений может быть интерпретирована по-разному. В трудах ICOLD, в научно-технической литературе зафиксировано представление о том, что экран находится в состоянии двухосного сжатия. Такой вывод делается на

основании того факта, что периферийные зоны экрана смещаются в сторону его центра. Он подтверждается данными натурных измерений, которые фиксируют деформации сжатия экрана в направлении от борта к борту. Т.к. нижняя часть экрана также испытывает движение в сторону центра, то делается вывод о том, что экран испытывает сжатие и в направлении вдоль откоса. На основании данного суждения в [5] утверждается, что в горизонтальные трещины экрана плотины Campos Novos образовались из-за высоких вертикальных напряжений вдоль откоса.

Однако может быть сформировано и иное представление о напряжённом состоянии экрана в направлении вдоль откоса. Данные натурных измерений за экранами нескольких плотин показывает, что в направлении вдоль откоса напряжения могут быть растягивающими. Растягивающие деформации фиксировались в экранах плотин Cethana и Tianshengqiao 1 [1]. К сожалению, не известно, на какой из граней (верховой или низовой) экрана проводились измерения деформаций. Очевидно, что за счёт изгиба изгиба растягивающие напряжения на низовой грани экрана более вероятны, чем на верховой.

О возможности появления в экране растягивающих напряжений говорят результаты численного моделирования НДС. Некоторыми авторами получено, что в прибортовых сечениях экран может испытывать растягивающие напряжения [1, 17-21].

Это растяжение может быть вызвано не только наличием деформаций изгиба. В 2005 г. Marques и Pinto в работе [2] высказали предположение, что напряжённое состояние экрана вдоль откоса может характеризоваться не только деформациями изгиба, но продольными растягивающими усилиями. В своих растяжениях авторы исходили из того, что при прогибе экран вынужден удлиняться. Ими была предложена формула по определению максимально возможного продольного растягивающего усилия в экране. В работах некоторых авторов (Arici, Саинова М.П. [17-20]) было показано, что нижняя часть экрана может испытывать растягивающее продольное усилие. Причиной возникновения этого усилия являются горизонтальные смещения плотины в сторону нижнего бьефа. Это усилие передаётся экрану через силы трения на контакте экрана с грунтом. О наличии растягивающего продольного усилия может свидетельствовать раскрытие периметрального шва. В работе [1] также говорится о том, растягивающее напряжение в экране формируется за счёт двух механизмов: первый – это деформации изгиба, второй – это смещение каменной наброски, вызывающие движения экрана в сторону центра. В работах [1, 18,19] было показано, что растягивающие напряжения образуются в экране в зоне его примыкания к основанию и бортам. Наличие такой зоны растягивающих напряжений хорошо объясняет образование в экране горизонтальных и наклонных трещин.

Тем не менее, в настоящее время не существует единого представления о напряжённом состоянии железобетонного экрана. Это объясняется также тем, что картина НДС экрана реальных плотин может быть более сложной из-за влияния таких факторов как неоднородность строения плотины, сложная схема поэтапности возведения. Например, наличие повышенных прогибов на гребне плотины Aquatipa было связано с высокой деформируемостью низовой части плотины [Marques Filho], а экран плотин Tianshengqiao 1 имел повышенные прогибы на гребне каждой из очередей плотины.

В работе [5] констатируется, что в настоящее время механизм образования трещин ещё не объяснен.

Современные исследователи выделяют следующие основные причины неблагоприятного характера НДС железобетонного экрана, приводящего к его повреждению:

1) Не достаточная прочность камня в теле плотины [7] и недостаточное качество уплотнения каменной наброски;

2) Значительное различие в деформируемости разных зон тела каменно-набросной плотины [5];

3) Неблагоприятная схема возведения плотины и нагружения её гидростатическим давлением. Аналитики обращают внимание на то, что неблагоприятное НДС формируется тогда, когда плотина вынуждена воспринимать гидростатическое давление неполным (недостроенным) профилем [5] или очень быстро [7].

Тем не менее, остаётся открытым вопрос, почему в экранах одних плотин трещины образуются, а в экранах других плотин – нет. По этой причине предлагаемые меры по борьбе с трещинообразованием в экранах основаны на опыте.

#### **Мероприятия по недопущению образования трещин в железобетонных экранах**

Нами были проанализированы рекомендации, предлагаемые различными авторами, по обеспечению трещиностойкости железобетонных экранов каменно-набросных плотин [5,7,21,22].

Основной рекомендацией является снижение деформируемости каменной наброски в теле плотины. Для этого рекомендуется использовать горные породы средней и высокой прочности. Уплотнять каменную наброску рекомендуется до достижения коэффициентом относительной плотности значений  $0,95 \div 0,98$ , обеспечивая пористость не выше 20% [5]. Для этого предлагается использовать технологию уплотнения каменной наброски, использованную при строительстве плотины Shuibuya [21]. Достигнуть качественного уплотнения предлагается за счёт использования вибрационных катков весом 25т и уплотнения слоями толщиной 60-80 см [5]. Большое внимание должно быть уделено увлажнению каменной наброски до и в процессе отсыпки [7].

В последнее время большое внимание стали уделять недопущению большой неоднородности в распределении деформируемости тела плотины. В [5] рекомендуется свести к минимуму объём зоны ЗС плотины, в которую укладывается камень меньшего качества. В современных китайских плотинах в области гребня плотины, в зоне прилегающей к основанию, каменную наброску тщательно уплотняют.

Даются рекомендации по последовательности возведения плотины и наполнения водохранилища. В [7] рекомендуется укладывать железобетонный экран только тогда, когда плотина будет возведена на 3/4 своей высоты. В [5] рекомендуется начинать укладку экрана только через 6 месяцев после окончания отсыпки для того, чтобы прошла большая часть деформаций каменной наброски от ползучести. В [7] предлагается возводить центральную часть железобетонного экрана как можно позднее, чтобы уменьшить передаваемые на него усилия. По такой схеме возводилась плотина Kárahjúkar в Исландии. В [21] подчеркивается важность контроля НДС сооружения в процессе строительства и эксплуатации путём использования новейшей контрольно-измерительной аппаратуры.

Сформулированы рекомендации по конструкции железобетонных экранов. Они касаются устройству швов и армированию экранов. Аналитики едины в том, что вертикальные межсекционные швы необходимо выполнять более широкими, предусматривая в них деформируемую прокладку [7,5]. В [7] рекомендуется применять для заполнения швов мягкую древесину или аналогичный по жёсткости материал.

В отношении армирования экрана даётся несколько рекомендаций. В [21] предлагается использовать опыт плотины Shuibuya, бетон экрана которой был армирован полимерными нитями. Предлагается использовать распределённую арматуру из металлической проволоки. В [7] предлагается изменить схему армирования экрана стальной арматурой. В настоящее время экраны как правило армируют одиночной арматурой [23], расположенной по центру экрана. Одиночное армирование предлагается сохранить только для плит толщиной 0,6 м и менее, а саму арматурную сетку сместить ближе к нижней грани экрана. Для плит толщиной более 0,6 м предлагается выполнять двойное армирование.

В [21] при устройстве железобетонных экранов предлагается применять инновационные технологии – применять бетон, обладающий свойствами самозалечивания мелких трещин. В этой же работе отмечается положительный опыт применения дополнительной противодиффузионной защиты экрана с внешней стороны. Такие защитные устройства из грунта (защитные призмы) выполняются во всех современных каменно-набросных плотинах с железобетонным экраном [24].

Аналитики также подчеркивают важность обеспечения плотного контакта между железобетонным экраном и подэкрановой зоной. В настоящее время выравнивание поверхности под экраном достигается путём выкладки откоса бордюрами блоками из низкоцементного бетона [24]. В [7], а ранее Пинто и Маруанда предложено на контакте между бетонной подэкрановой подготовкой и железобетонным экраном укладывать скользящий слой. Этот слой должен обеспечить свободу касательных деформаций экрана вне зависимости от деформации подэкрановой зоны и состояния бордюрных блоков. Данное конструктивное решение получило название «Bond Break». В [7] предлагается принимать толщину слоя битумной мастики равной 3-4 мм.

#### **Мероприятия по борьбе с трещинами в экране**

Образование в противодиффузионном экране трещин угрожает плотине повреждением и даже разрушением. Поэтому аварийные экраны должны быть отремонтированы, должен быть выполнен срочный, аварийный ремонт. Часто может потребоваться и капитальный ремонт. В трудах ICOLD и в [9,10,25] приведены сведения о методах ремонта аварийных железобетонных экранов.

При увеличении фильтрационного расхода выполняется первоочередной, аварийный ремонт экрана. Он осуществляется путём отсыпки пылеватого песка на поверхность экрана. Таким образом, осуществлялся ремонт экранов плотин Khao Laem (Vajilaronkorn) в Таиланде, Turimuquire (Венесуэла), Barra Grande, Xingo и многих других. На плотинах Ita, Itapebi и Xingo, Aguamilpa благодаря отсыпке песка удалось существенной снизить фильтрационный расход. Однако такой эффект может быть только временным и не надёжным. Например, на плотине Barra Grande через некоторое время после срочного ремонта фильтрационный расход вырос до 1000 л/с [10]. Экран плотины Turimuquire ремонтировался несколько раз. Однако все ремонты имели кратковременный эффект. В один из периодов фильтрационный расход достигал 10 м<sup>3</sup>/с [25].

Основательный, капитальный ремонт можно провести после опорожнения водохранилища. Он предусматривает заделку трещин и восстановление целостности уплотнений швов. При ремонте экрана плотины Vuxi для ремонта применялись составы на эпоксидной и полиуретановой основе [9]. При ремонте экрана Tianshengqiao 1 в 2004 г. в вертикальные швы была заложена полоса резины толщиной 2 см для снижения сжимающих напряжений в направлении от борта к борту. При ремонте экрана плотины Barra Grande была произведена замена уплотнений в вертикальном шве.

Однако не всегда капитальный ремонт являлся успешным, в некоторых случаях трещины в экранах образовывались повторно. На плотине Tianshengqiao 1 в 2004 году наблюдалось повторное образование вертикальной трещины несмотря на то, что в 2003 году производился ремонт. Поэтому ремонт может проводиться иным способом – имеются примеры ремонта экрана путём его покрытия водонепроницаемой

полимерной геомембраной. Данный способ применялся для капитального ремонта экрана плотины Salt Springs в США. При ремонте экрана плотины Turimiquire часть полимерной геомембраны укладывалась под водой [25].

#### 4. Заключение

1. Наибольшую опасность для надёжности железобетонного экрана как противофильтрационного элемента представляет возможность образования т.н. структурных трещин, т.е. трещин, нарушающих его целостность. Эти трещины образуются вследствие неблагоприятного характера деформации тела плотины при восприятии гидростатического давления. Анализ случаев трещинообразования, имевших место на ряде плотин, позволяет выявить зоны возможного трещинообразования и установить возможное положение трещин. Однако конкретные причины трещинообразования в железобетонных экранах каменно-набросных плотин ещё недостаточно изучены, в настоящее время дискуссия по этой проблеме продолжается. На данный момент не создано целостного и общепринятого представления о напряжённо-деформированном состоянии железобетонного экрана и о причинах образования в них трещин.
2. Структурные трещины, образующиеся в железобетонных экранах каменно-набросных плотин, могут иметь разное расположение – вертикальное, горизонтальное, наклонное. По нашему мнению, образование трещин разного направления не может быть объяснено одной причиной. Достоверно установлено, что причиной образования вертикальных (продольных) трещин являются высокие сжимающие деформации сжатия экрана в горизонтальном направлении (от борта к борту). В образовании наклонных трещин большую роль играют сложные деформации изгиба экрана в бортовых примыканиях. Причины образования горизонтальных (поперечных) трещин во многих случаях не установлены достоверно.
3. По нашему мнению, в направлении вдоль откоса экран может испытывать растягивающие продольные усилия, что ведёт к нарушению прочности бетона на растяжение и образованию трещин. Об этом свидетельствует раскрытие периметрального шва.
4. Предлагаемые различными авторами рекомендации по повышению надёжности работы противофильтрационного железобетонного экрана каменно-набросных плотин, как правило основаны на эмпирическом подходе и требуют теоретического обоснования.
5. Большим недостатком конструкций высоких каменно-набросных плотин с железобетонным экраном является сложность выполнения работ по ремонту экрана в случае образования в нём трещин. По-видимому, целесообразно повысить надёжности железобетонного экрана за счёт применения для гидроизоляции изделий из полимерных материалов.

#### Литература

- [1]. Wen L., Chai J., Xu Z., Qin Y., Li Y. Junrui C. A statistical review of the behaviour of concrete face rockfill dams based on case histories. A statistical review of the behaviour of concrete-face rockfill dams based on case histories. *Géotechnique*. 2018. 68, No.9. Pp.749–771
- [2]. Marques Filho, P., De Pinto, N.L.S. CFRD dam characteristics learned from experience // *The International Journal on Hydropower & Dams*. 2005. No.12(1). Pp.72–76
- [3]. Freitas, M.S.Jr. Concepts on CFRDs Leakage Control - Cases and Current Experiences. *ISSMGE Bulletin*. 2009. Volume 3. Issue 4. Pp.11–18
- [4]. Xavier, L.V., Albertoni, S.C., Pereira R.F., Antunes J. Campos Novos dam during second impounding // *The International Journal on Hydropower & Dams*. 2008. No 15. pp.53–58
- [5]. Ma, H.Q., Cao K.M. Key technical problems of extra-high concrete faced rock-fill dam // *Science in China. Series E: Technological Sciences*. 2007. Vol.50(1). Pp.20–33
- [6]. Bingyin Zhang, J.G. Wang, Ruifeng Shi. Time-dependent deformation in high concrete-faced rockfill dam and separation between concrete face slab and cushion layer // *Computers and Geotechnics*. 2004. No.31. Pp.559–573
- [7]. Johannesson, P., Tohlang, S.L. Lessons learned from Mohale // *The International Water Power & Dam Construction*. 2007. Volume 59. Issue 8. pp.16-18+20-22+24-25
- [8]. Song W.J. Sun Y, Li L, Wang Y. Cause analysis and

#### References

- [1]. Wen L., Chai J., Xu Z., Qin Y., Li Y. Junrui C. A statistical review of the behaviour of concrete face rockfill dams based on case histories. A statistical review of the behaviour of concrete-face rockfill dams based on case histories. *Géotechnique*. 2018. 68, No.9. Pp.749–771
- [2]. Marques Filho, P., De Pinto, N.L.S. CFRD dam characteristics learned from experience // *The International Journal on Hydropower & Dams*. 2005. No.12(1). Pp.72–76
- [3]. Freitas, M.S.Jr. Concepts on CFRDs Leakage Control - Cases and Current Experiences. *ISSMGE Bulletin*. 2009. Volume 3. Issue 4. Pp.11-18
- [4]. Xavier, L.V., Albertoni, S.C., Pereira R.F., Antunes J. Campos Novos dam during second impounding // *The International Journal on Hydropower & Dams*. 2008. No 15. pp.53-58
- [5]. Ma, H.Q., Cao K.M. Key technical problems of extra-high concrete faced rock-fill dam // *Science in China. Series E: Technological Sciences*. 2007. Vol.50(1). Pp.20-33
- [6]. Bingyin Zhang, J.G. Wang, Ruifeng Shi. Time-dependent deformation in high concrete-faced rockfill dam and separation between concrete face slab and cushion layer // *Computers and Geotechnics*. 2004. No.31. Pp.559–573
- [7]. Johannesson, P., Tohlang, S.L. Lessons learned from Mohale // *The International Water Power & Dam Construction*. 2007. Volume 59. Issue 8. pp.16-18+20-22+24-25
- [8]. Song W.J. Sun Y, Li L, Wang Y. Cause analysis and treatment of 1st phase slab cracking of Shuibuya CFRD. *Journal of Hydroelectric Engineering*. 2008. Vol.27. No.3. Pp.33–37.

- treatment of 1st phase slab cracking of Shuibuya CFRD. *Journal of Hydroelectric Engineering*. 2008. Vol.27. No.3. Pp.33–37.
- [9]. Hu K., Chen J., Wang D. Shear Stress Analysis and Crack Prevention Measures for a Concrete-Face Rockfill Dam, Advanced Construction of a First-Stage Face Slab, and a First-Stage Face Slab in Advanced Reservoir Water Storage. *Advances in Civil Engineering*. 2018. 2951962. <https://doi.org/10.1155/2018/2951962>
- [10]. Pinto, N.L. Very high CFRD dams – behavior and design features. *Proceedings of the 3rd Symposium on CFRD Dams*. 2007. Brazil, Florianopolis. Pp.3–16
- [11]. Pinto, N.L., Marques, P.L. Estimating the Maximum Face Deflection in CFRDs // *International Journal on Hydropower & Dams*. 1998. Issue 6. 28p.
- [12]. Pinto, N.L. de S., Mori, R.T. A New Concept of a Perimetric Joint for Concrete Face Rockfill Dams. *Proceedings of the 16th Congress of the International Commission on Large Dams*. San Francisco. 1988. Pp.35-51
- [13]. Li, J.C. Gouhou dam and analysis for causes of the dam failure. *Chinese Journal Geotechnical Engineering*. 1994. No.16(6). Pp.1–14 [in Chinese]
- [14]. Cooke, J.B. Developments in high concrete face rockfill dams // *The International Journal on Hydropower & Dams*. 1997. No.4(4). Pp.69–73
- [15]. Wang, Z., Liu, S., Vallejo, L., Wang L.. Numerical analysis of the causes of face slab cracks in Gongboxia rockfill dam // *Engineering Geology*. 2014. No.181. Pp.224–232
- [16]. Саинов М.П. Влияние изменения температуры на напряжённо-деформированное состояние железобетонного экрана каменно-набросной плотины // *Приволжский научный журнал*. 2016. №4(40). С.79–85
- [17]. Саинов М.П. Особенности расчетов напряжённо-деформированного состояния каменных плотин с железобетонными экранами // *Вестник МГСУ*. 2006. №2. С.78–86
- [18]. Саинов М.П. Влияние деформируемости каменной насыпи на напряжённо-деформированное состояние железобетонного экрана плотины // *Вестник МГСУ*. 2015. №3. С.69–78
- [19]. Саинов М.П. Влияние формы створа на напряжённое состояние железобетонного экрана каменно-насыпной плотины // *Инженерно-строительный журнал*. 2016. №3. С.16–39
- [20]. Arici, Y. Behaviour of the reinforced concrete face slabs of concrete faced rockfill dams during impounding // *Structural Infrastruct. Engng*. 2013. 9, No.9. Pp.877–890.
- [21]. Ma, H., Chi, F. Technical progress on researches for the safety of high concrete-faced rockfill dams // *Engineering 2*. 2016. Pp.332–339
- [22]. Wang, L.-B., Yan, Q. Analyze on development prospects of 300m level ultra-high CFRD from Shuibuya high CFRD. *Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference, APPEEC*. 2010. 5448667
- [23]. Радченко В.Г., Глаговский В.Б., Кассирова Н.А., Курнева Е.В., Дружинин М.А. Современное научное обоснование строительства каменнонабросных плотин с железобетонными экранами // *Гидротехническое строительство*. 2004. №3. С.2-8.
- [24]. Радченко В.Г., Курнева Е.В., Ротченко Ю.Г. Современные технологии строительства каменнонабросных плотин с железобетонными экранами // *Гидротехническое строительство*. 2007. №10. С.25-32
- [25]. Scuero, A.M., Vaschetti, G.L. Underwater repair of a 113 m high CFRD with a PVC geomembrane: Turimiquire Managing Dams: Challenges in a Time of Change. *Proceedings of the 16th Conference of the British Dam Society*. 2010. pp.474-486.
- [9]. Hu K., Chen J., Wang D. Shear Stress Analysis and Crack Prevention Measures for a Concrete-Face Rockfill Dam, Advanced Construction of a First-Stage Face Slab, and a First-Stage Face Slab in Advanced Reservoir Water Storage. *Advances in Civil Engineering*. 2018. 2951962. <https://doi.org/10.1155/2018/2951962>
- [10]. Pinto, N.L. Very high CFRD dams – behavior and design features. *Proceedings of the 3rd Symposium on CFRD Dams*. 2007. Brazil, Florianopolis. Pp.3–16
- [11]. Pinto, N.L., Marques, P.L. Estimating the Maximum Face Deflection in CFRDs // *International Journal on Hydropower & Dams*. 1998. Issue 6. 28p.
- [12]. Pinto, N.L. de S., Mori, R.T. A New Concept of a Perimetric Joint for Concrete Face Rockfill Dams. *Proceedings of the 16th Congress of the International Commission on Large Dams*. San Francisco. 1988. Pp.35-51
- [13]. Li, J.C. Gouhou dam and analysis for causes of the dam failure. *Chinese Journal Geotechnical Engineering*. 1994. No.16(6). Pp.1–14 [in Chinese]
- [14]. Cooke, J.B. Developments in high concrete face rockfill dams // *The International Journal on Hydropower & Dams*. 1997. No.4(4). Pp.69–73
- [15]. Wang, Z., Liu, S., Vallejo, L., Wang L.. Numerical analysis of the causes of face slab cracks in Gongboxia rockfill dam // *Engineering Geology*. 2014. No.181. Pp.224–232
- [16]. Sainov M.P. Vliyaniye izmeneniya temperatury na napryazhenno-deformirovannoye sostoyaniye zhelezobetonnoy ekrana kamennonabrosnoy plotiny [Effect of temperature variation on stresses-strain state on reinforced concrete face on the rockfill dam] // *Privolzhskiy nauchnyy zhurnal*. 2016. №4(40). Pp.79–85
- [17]. Sainov M.P. Osobennosti raschetov napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya kamennykh plotin s zhelezobetonnyimi ekranami [Features of the calculations of the stress-strain state of rockfill dams with reinforced concrete faces] // *Vestnik MGSU*. 2006. No.2. Pp.78–86
- [18]. Sainov M.P. Vliyaniye deformiruyemosti kamennoy nasypi na napryazhenno-deformirovannoye sostoyaniye zhelezobetonnoy ekrana plotiny [Impact of Rockfill Deformation on Stress-Strain State on Dam Reinforced Concrete Face] // *Vestnik MGSU*. 2015. No.3. Pp.69–78
- [19]. Sainov M.P. Vliyaniye formy stvora na napryazhennoye 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. №3. Pp.16–39
- [20]. Arici, Y. Behaviour of the reinforced concrete face slabs of concrete faced rockfill dams during impounding // *Structural Infrastruct. Engng*. 2013. 9, No.9. Pp.877–890.
- [21]. Ma, H., Chi, F. Technical progress on researches for the safety of high concrete-faced rockfill dams // *Engineering 2*. 2016. Pp.332–339
- [22]. Wang, L.-B., Yan, Q. Analyze on development prospects of 300m level ultra-high CFRD from Shuibuya high CFRD. *Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference, APPEEC*. 2010. 5448667
- [23]. 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*. 2004. No.3. Pp.2–8
- [24]. 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*. 2007. No.10. Pp.25–32
- [25]. Scuero, A.M., Vaschetti, G.L. Underwater repair of a 113 m high CFRD with a PVC geomembrane: Turimiquire Managing Dams: Challenges in a Time of Change. *Proceedings of the 16th Conference of the British Dam Society*. 2010. Pp.474–486

**Контактная информация**

- 1.\* +7(926)6078931, mp\_sainov@mail.ru (Саинов Михаил Петрович, к.т.н., доцент)
2. +7(925)3803260, matveyzatonskikh@mail.ru (Затонских Матвей Алексеевич, студент)

**Contact information**

- 1.\* +7(926)6078931, mp\_sainov@mail.ru (Sainov nam1, Ph.D., Associate Professor)
2. +7(925)3803260, matveyzatonskikh@mail.ru (Zatonskikh nam2, Student)

---

© Саинов М.П., Затонских М.А., 2018