



doi: 10.18720/CUBS.72.3

Конструкции каменно-набросных плотин с железобетонным экраном в исторической ретроспективе

Structures of concrete faced rockfill dams in historical retrospective

М.П. Саинов^{1*}, Е.А. Юрьева²M. Sainov^{1*}, E. Yurieva²

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26

Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), 26 Yaroslavskoye av., Moscow, 129337 Russia

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

каменно-набросная плотина с железобетонным экраном;
конструкция;
шов;
исторический обзор;
теория проектирования

KEYWORDS

concrete faced rockfill dam;
construction;
joint;
historical review;
design theory

АННОТАЦИЯ

Каменно-набросные плотины с железобетонным экраном являются перспективным типом плотин для строительства высоконапорных гидроузлов на слабо освоенных и трудно доступных территориях. Применению этих плотин в России препятствует отсутствие опыта их проектирования и строительства. В данной статье приведён исторический обзор развития конструкций и технологий строительства каменно-набросных плотин железобетонным экраном, а также описаны современные принципы их проектирования. Выявлено, что методика проектирования каменно-набросных плотин с железобетонным экраном основана на эмпирическом подходе. Для возможности совершенствования конструкций этих плотин необходимо выявить принципы их статической работы при восприятии внешних сил, провести теоретическое обоснование конструкций.

ABSTRACT

Concrete faced rockfill dams are attractive type of dams for construction of high-head projects on poorly developed and remote territories. Application of these dams in Russia is hindered by lack of experience in their designing and construction. This article gives a historical survey of developing structural designs and methodologies for construction of rockfill dams with reinforced concrete faces as well as describes up-to-date principles of their designing. It was revealed that the methodology of designing rockfill dams with reinforced concrete faces is based on the empirical approach. To have the possibility of refinement of these dams structural design it is necessary to determine the principles of their structural behavior at perception of external forces, make theoretical validation of structural designs.

Содержание

1.	Введение	46
2.	Методы	47
3.	Результаты и обсуждение	47
4.	Заключение	57

1. Введение

Каменно-набросные плотины с железобетонным экраном в настоящее время являются одним из самых перспективных типов грунтовых плотин. Плотины этого типа получили широкое распространение в странах Латинской Америки и юго-восточной Азии. Например, только в Китае с 1985 по 2013 гг. было построено более 325 грунтовых плотин с железобетонным экраном [1]. К настоящему моменту накоплен богатый опыт строительства и эксплуатации этих плотин.

Этот опыт свидетельствует о том, что каменно-набросные плотины с железобетонным экраном могут быть устроены практически в любых условиях, т.к. требуют минимального количества искусственных, привозных материалов. Эти плотины могут достигать значительной высоты. Самой

высокой в мире плотиной данного типа является плотина Shuibuya в Китае, высота которой составляет 233 м (построена в 2007 г.) [2,3]. Полученный опыт даёт основание китайским проектировщикам и исследователям рассматривать возможность строительства плотин с высотой до 300 м [1,4,5].

Каменно-набросные плотины с железобетонным экраном обладают ещё целым рядом преимуществ, поэтому логично было бы рассмотреть возможность их строительства в России и странах Средней Азии [6]. Однако в России отсутствует опыт проектирования и строительства плотин данного типа (единственным случаем строительства в СССР каменно-набросной плотины с железобетонным экраном является Урто-Токойская плотина, построенная в 1958г.), а также имеется дефицит русскоязычной научно-технической информации о зарубежном опыте их использования. В распоряжении имеется лишь труд Ю.П.Ляпичева [7] и публикации [8,9], информация в которых частично потеряла свою актуальность. Поэтому актуальным является обобщение и анализ зарубежного опыта проектирования, строительства и эксплуатации каменно-набросных плотин с железобетонным экраном с целью его применения в России. Данному вопросу посвящена и данная статья. В ней описывается исторический путь развития грунтовых плотин с железобетонным экраном, а также современные принципы проектирования каменно-набросных плотин с железобетонным экраном, их преимущества и недостатки.

Основным недостатком, основной проблемой каменно-набросных плотин с железобетонным экраном являются довольно частые аварийные ситуации, связанные с нарушением герметичности противофильтрационного элемента. В настоящий момент не существует исчерпывающего представления о причинах образования трещин в железобетонных экранах каменно-набросных плотин и не разработаны методы борьбы с трещинообразованием и с последствиями аварийных ситуаций. Данная проблема является актуальной в современной гидротехнике.

Решение данной проблемы требует анализа большого количества информации и выполнения исследований, которые невозможно описать в одной статье. Данная статья посвящена изучению конструкции и принципы работы современных каменно-набросных плотин с железобетонным экраном, а также опыт их применения.

2. Методы

Изучение конструкции и принципов работы современных каменно-набросных плотин с железобетонным экраном целесообразно вести путём обзора исторического и современного опыта применения каменно-набросных плотин с железобетонным экраном. Для составления этого обзора использовались иностранная и отечественная научно-техническая литература. Для составления обзора плотин современной конструкции использовались материалы Конгресса по большим плотинам [10,11], а также работы [7-18]. При составлении исторического обзора необходимая информация черпалась из [19,20] и из [8].

3. Результаты и обсуждение

Анализ исторического опыта применения каменно набросных плотин с железобетонным экраном

Плотины из местных материалов с противофильтрационным элементом в виде железобетонного экрана впервые начали применяться ещё в XIX в. По данным ICOLD [10,11] такие плотины начали строиться ещё в 1850-х годах. Они появились как развитие плотин с деревянным экраном. Одной из первых плотин с железобетонным экраном была плотина Фордайс в Калифорнии, построенная в 1873г. Такая информация приведена в книге [19], хотя в [8] указано, что первая плотина с железобетонным экраном была возведена лишь в 1895 г.

Анализ накопленного исторического опыта показывает, что за почти полтора столетия плотины с железобетонным экраном претерпели серьёзные изменения. Проанализируем развитие этих плотин.

Одной из наиболее важных тенденций развития плотин с железобетонным экраном являются изменения в способе устройства плотины. Первые плотины с железобетонным экраном выполнялись из сухой кладки камня (рис.2) или полунабросными (рис.1). Их профиль был довольно обжатым – верховой откос мог выполняться практически вертикальным. Однако устройство сухой кладки было довольно трудоёмким и длительным процессом. Поэтому, к середине 1960-х годов плотины из сухой кладки были вытеснены каменно-набросными [8]. В классических набросных плотинах сухая кладка камня использовалась только для устройства подэкранового слоя.

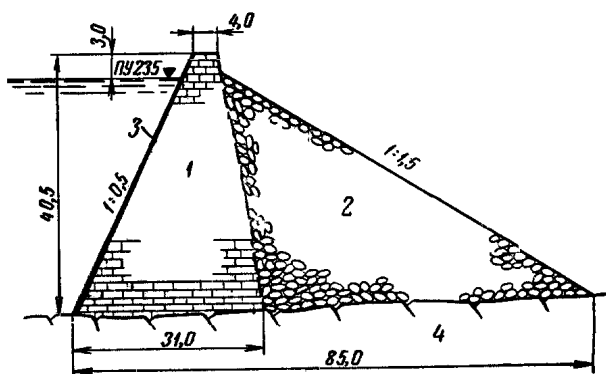


Рис.1 Плотина Релиеф (США)
1 – сухая кладка камня; 2 – каменная наброска;
3 – железобетонный экран; 4 – скальное основание

Технология наброски камня подразумевала его укладку слоями большой толщины пионерным способом. Уплотнение наброски осуществлялось под действием её собственного веса. Для ускорения этого процесса наброска проливалась большим количеством воды (3 м^3 воды на 1 м^3 камня) [8].

Однако опыт эксплуатации набросных плотин выявил низкое качество уплотнения каменной наброски, о котором свидетельствовал интенсивный и продолжительный рост деформаций плотины. Из-за высоких деформаций каменной наброски в ряде случаев происходило нарушение целостности железобетонного экрана. Для снижения деформируемости каменной наброски в некоторых случаях осуществлялся замыв песком пустот между камнями, однако это не имело высокого эффекта.

Профиль каменно-набросных плотин более широким, чем у плотин из сухой кладки камня. Заложение откосов принималось примерно $1,5\div 1,6$.

Самой высокой классической плотиной с железобетонным экраном, построенной способом наброски камня, является плотина Paradela в Португалии. Эта плотина, построенная в 1958 г., имеет высоту 108 м. Сразу после первого наполнения водохранилища в её экране образовались трещины. В качестве причины трещинообразования были названы повышенные деформации нижней части плотины. По натурным данным деформации плотины продолжают до сих пор [21].

Низкий уровень надёжности противофильтрационного элемента в виде железобетонного экрана заставил почти полностью отказаться от применения каменно-набросных плотин с железобетонным экраном. После неудачного опыта строительства плотины Cogwell (1935 г.) применение плотин данного типа стало редким, а потом и вовсе прекратилось.

Железобетонный экран вновь нашёл своё применение в качестве противофильтрационного элемента грунтовых плотин с 1970-х годов. Это произошло благодаря внедрению новой технологии укладки крупнообломочных грунтов в тело плотины, появившейся в 1950-х годах [8]. Она предусматривала отсыпку горной массы (или гравийно-галечникового грунта) относительно тонкими слоями (около $0,5\div 1\text{ м}$) и последующее уплотнение вибрационными катками. Благодаря уплотнению катками удалось существенно повысить плотность укладки горной массы. У горной массы, уложенной в тело плотины, коэффициент относительной плотности J_D составляет $0,90\div 0,95$, а плотность в сухом состоянии – $2,05\div 2,25\text{ т/м}^3$ [9]. Например, на плотине Tianshengqiao-1 основной объём плотины имеет плотность $2,15\text{ т/м}^3$, но это считается низким значением [14]. Повышение плотности сложения позволило резко снизить деформации тела плотины, особенно в эксплуатационный период. Осадки современных плотин как правило составляют $0,5\div 1,5\%$ от высоты плотины.

Одной из первых плотин с железобетонным экраном, построенной с применением новой технологии, была плотина Setapa в Австралии (высота 110 м, 1973 г.). В 1980 г. в Бразилии была успешно построена плотина Foz do Areia с ещё большей высотой – 160 м [22]. Несмотря на то, что описанная технология укладки крупнообломочных грунтов принципиально отличается от наброски камня, по традиции до сих пор плотины, выполненные из крупнообломочных грунтов, называются каменно-набросными, хотя по сути таковыми не являются. В современных плотинах не только тело плотины, но и подэкранный зона (по предложению К.Терцаги [8]) выполняются из крупнообломочного грунта, уплотнённого катками.

Таким образом, исторический опыт показывает, что основным фактором для надёжности грунтовых плотин с железобетонным экраном является величина и характер деформаций тела плотины. Большую роль в «сглаживании» деформации тела плотины играет подэкранный зона.

Второй важной тенденцией эволюции плотин с железобетонным экраном является изменение подходов к конструированию самого экрана. Как известно, железобетонные конструкции, как правило, разрезаются швами. Швы позволяют компенсировать деформации, вызванные изменением температурно-влажностного режима, а также неравномерность деформаций основания.

В первых плотинах с железобетонным экраном, построенных в конце XIX – начале XX вв., противодиффузионный экран выполнялся монолитным (неразрезным) по всей высоте. Кроме того, экран в виде бетонного «зуба» углублялся в скальное основание (рис.3). Опыт эксплуатации таких плотин показал ненадёжность узла сопряжения железобетонного экрана с основанием. В этом узле образовывались трещины [23]. Для ремонта противодиффузионного элемента приходилось опорожнять водохранилище.

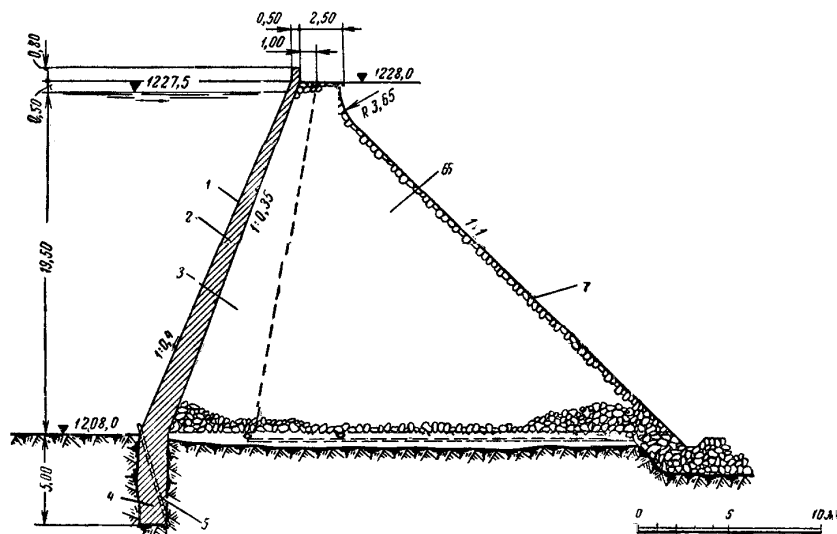


Рис.2. Плотина Гранд-Патюр (Франция)

- 1 – штукатурка по металлической сетке, 2 – бетонный экран, 3 – сухая кладка, 4 – бетонный зуб, 5 – труба для нагнетания раствора, 6 – каменная кладка, 7 – откос из уложенного камня с заливкой швов цементным раствором.

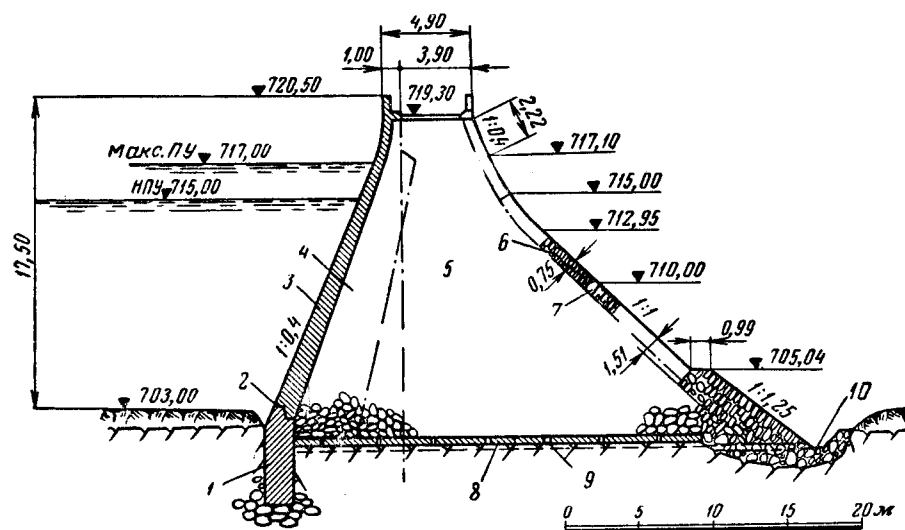


Рис.3. Поперечный профиль плотины Шамме (Франция)

- 1 – бетонный зуб, 2 – горизонтальный шов, 3 – армированный бетонный экран, 4 – сухая каменная кладка, 5 – каменная кладка, 6 – сухая кладка толщиной 0,75 м, 7 – горизонтальные швы низового откоса, 8 – фундаментная плита, 9 – дренажные отверстия, 10 – дренажный лоток.

Для повышения надёжности в некоторых случаях (например, на плотинах Тепукстепек в Мексике и плотине Стамболийского в Болгарии) экран выполнялся двухслойным, а в других – покрывался рифлёной сталью.

Затем произошло ещё одно изменение в конструкции железобетонного экрана. Оно произошло при замене технологии создания тела плотины с сухой кладки камня на наброску. Т.к. каменная наброска имеет большую деформируемость, чем сухая кладка, угроза образования трещин в железобетонных экранах возросла. Кроме того, возросла и высота строящихся плотин.

Чтобы не уменьшить опасность бесконтрольного образования и развития трещин, железобетонный экран стали разрезать горизонтальными и вертикальными швами на ряд плит. Размеры плит составляли от 6×6 до 14,6×21,3 [20]. Такая конструкция экрана получила название полужёсткой. Тем не менее,

применение полужёсткой конструкции экрана не защитило экраны плотин от образования трещин. Экран плотины Salt Springs (США, рис.4), первой плотины в мире с высотой более 100 м, был разрезан на квадратные плиты размерами 18,3х18,3 м. После наполнения водохранилища в экране образовались многочисленные трещины [19]. Раскрытия трещин достигали 25 мм. Впоследствии экран плотины Salt Springs ремонтировался более 20 раз.

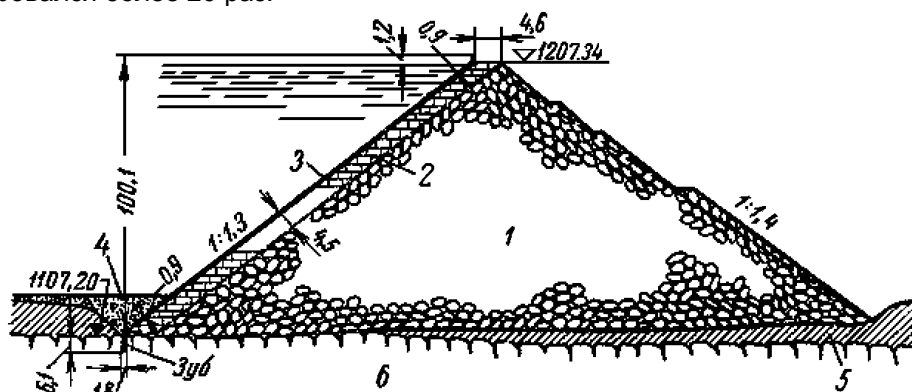


Рис.4. Плотина Салт Спрингс (США)

1 – каменная наброска, 2 – подэкрановая кладка, 3 – железобетонный экран, 4 – обратная засыпка, 5 – плотный аллювий, 6 – скальное основание.

По этой причине для строительства высоких плотин была разработана и применена ещё более сложная конструкция железобетонного экрана, получившая название «гибкой» или «слоистой». Она была предложена инженером Girand и была впервые применена в 1930 г. на плотине Cogoti в Чили [19]. Гибкая конструкция предусматривала выполнение экрана из нескольких слоёв железобетонных плит, перекрывающих швы друг друга (рис.5). Количество слоёв составляло от 2 до 5. Плиты слоистого экрана укладываются со значительными зазорами. Между рядами плит имеется анкерная связь. Между плитами укладывались слои битума. Битумные прослойки должны были не только обеспечить свободу смещений плит друг относительно друга, но и, по сути, являлись дополнительной противодиффузионной защитой плотины. Размер плит экрана плотины Cogoti был уменьшен до 3,5х3,5 м [19]. Толщина плит была принята 15 см. Гибкий экран плотины Cogoti смог сохранить свою герметичность даже во время землетрясения 1943 г.

На плотине Courtrait (США) слоистый экран оказался менее надёжным. В 1968 г. при опорожнении водохранилища было обнаружено, что нижняя часть экрана повреждена [24]. Часть плит была оторвана от подэкрановой зоны и бетонного зуба, бетон был частично разрушен, а шпонки и арматура порваны. В качестве причин нарушения целостности экрана были названы повышенные осадки выветрелого камня в нижней части плотины.

Ещё менее успешным было применение гибкой конструкции железобетонного экрана на плотине Cogswell (или San Gabriel 2), построенной в США в 1935 г. Каждый слой экрана плотины Cogswell выполнялся из торкрета толщиной 15 см [19]. Размеры плит экрана в плане составляли 9,15х9,15 м. Плиты разделялись швами толщиной от 25 до 100 мм. Количество слоев плит в экране увеличивалось с глубиной от 2 до 5. На границе с основанием было применено шарнирное соединение (рис.6). Применение гибкой конструкции экрана на плотине Cogswell себя не оправдало из-за чрезмерных осадок упорной призмы – железобетонный экран был повреждён. Ремонт многослойного экрана был бы слишком сложным, поэтому экран пришлось снять и заменить временным деревянным.

Несмотря на то, что на построенной по аналогичному проекту плотине Уишон аварийной ситуации не возникло, от дальнейшего применения гибкой конструкции экрана отказались.

Этот исторический обзор позволяет сделать важные выводы. Первый вывод состоит в том, что важнейшим элементом конструкции экрана является периметральный шов на границе со скальным основанием. В то же время второй вывод состоит в том, что разрезка самого экрана часто не имеет должного эффекта (при действии только статических сил). Частая разрезка на плиты слоистой конструкции экрана не избавила её от нарушения целостности и герметичности. По этой причине в плотинах современного типа железобетонный экран выполняется неразрезным по высоте [8,11]. Более того, в плотинах современного типа относительная толщина железобетонного экрана, а также процент армирования меньше, чем в прежних [8]. Это стало возможным благодаря хорошему уплотнению крупнообломочных грунтов по современной технологии.

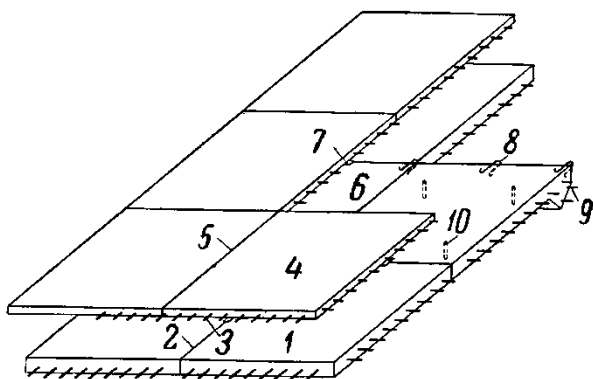


Рис.5. Схема слоистого экрана плотины Cogoti
 1 – нижняя плита переменной толщины;
 2 – швы нижних плит без уплотнения;
 3 – непрерывная арматура;
 4 – верхняя плита постоянной толщины;
 5 – прокладка битумом;
 6 – поверхность плит;
 7 – медная шпонка; 8 – анкер;
 9 – закрепительная балка через каждые два ряда плит; 10 – отверстия

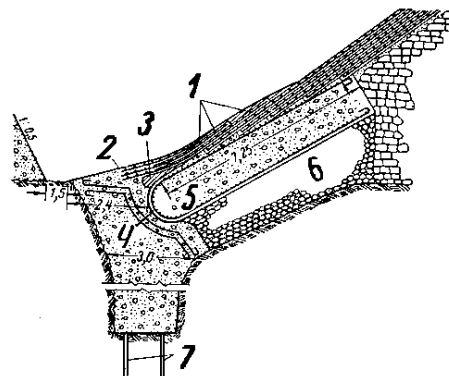


Рис.6. Шарнирное соединение железобетонного экрана плотины Cogswell с зубом
 1 – три плиты толщиной по 10 см,
 2 – четыре слоя битума с прокладкой брезента,
 3 – асфальтобетон;
 4 – слой битума; 5 – опорная железобетонная плита; 6 – гравий;
 7 – скважины для цементации основания.

Успешный опыт применения экрана плотины Cogoti позволяет сделать ещё один вывод. Он показывает целесообразность повышения эффективности железобетонного экрана за счёт устройства прослоек из маловодопроницаемых органических материалов (например, из битума). Например, экран плотины Salt Springs был отремонтирован в 2005 г. путём его покрытия геомембраной [25,26].

Проведённый анализ исторического опыта показывает взаимосвязь конструкций плотин и технологий её возведения. Успешное внедрение новых конструкций и технологий позволило добиться прогресса в строительстве каменно-набросных плотин с железобетонным экраном. С помощью рис.7 можно проследить динамику роста максимальной высоты построенных каменно-набросных плотин с железобетонным экраном, а также частоты их применения. Из рисунка видно, что плотины современного типа применяются довольно часто.

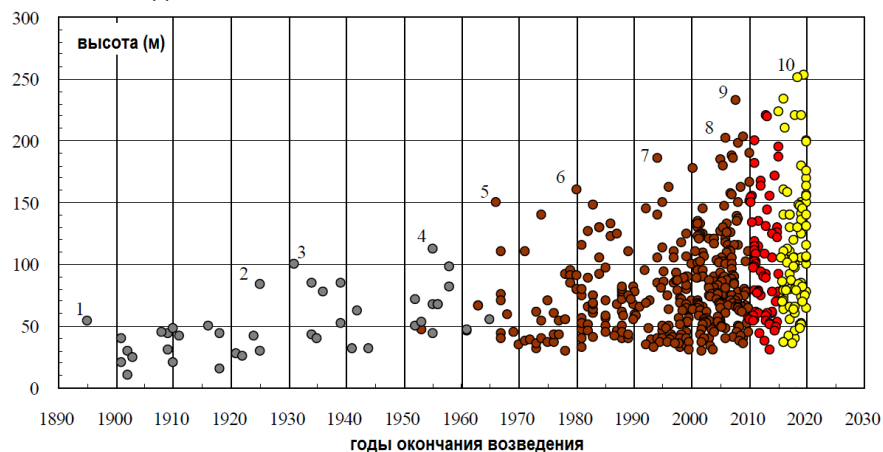


Рис.7. Изменение во времени высот построенных грунтовых плотин с железобетонными экранами

Серым цветом обозначены плотины с использованием сухой каменной кладки, коричневым – каменно-набросные плотины до 2010 г., красным – строящиеся плотины и плотины, построенные недавно, жёлтым цветом обозначены проектируемые плотины.

Цифровые обозначения соответствуют плотинам: 1 – Morena, 2 – Dix River, 3 – Salt Springs, 4 – Paradela, 5 – New Exchequer, 6 – Foz do Areia, 7 – Aguamilpa, 8 – Campos Novos, 9 – Shuibuya, 10 – Xiaoshixia & Dashixia.

Описание принципов конструирования современных каменно-набросных плотин с железобетонным экраном

Богатый накопленный опыт применения каменно-набросных плотин с железобетонным экраном позволил сформулировать принципы и рекомендации для их проектирования. Они изложены в трудах

Конгресса по большим плотинам (ICOLD) [10,11], а также работах Б.Кука и др. [17,18]. На русском языке некоторые из этих положений изложены в [8,9] и учебном пособии Ю.П.Ляпичева [7].

Плотина с железобетонным экраном проектируется в составе двух основных конструктивных элементов – массивной упорной призмы из крупнообломочных грунтов и тонкостенного экрана из железобетона, уложенного на верховом откосе упорной призмы (рис.8). Железобетонный экран является противофильтрационным элементом, он воспринимает гидростатическое давление верхнего бьефа. Упорная призма, выполненная из крупнообломочных грунтов, передаёт указанное давление на основание плотины и обеспечивает устойчивость всей конструкции. Дополнительным, но важным элементом конструкции плотины является защитная грунтовая призма, сверху прикрывающая железобетонный экран.

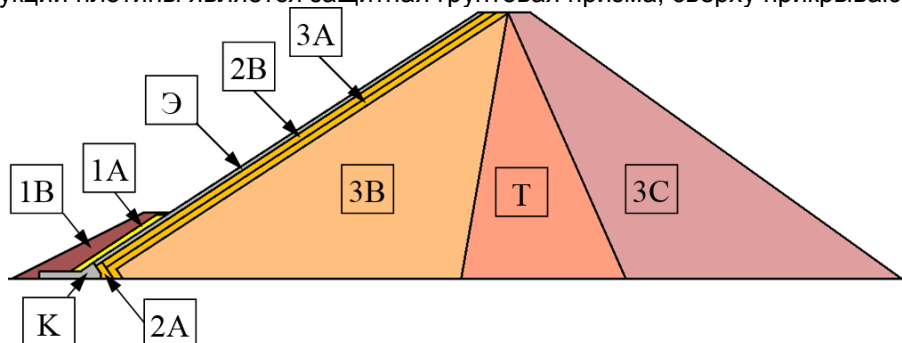


Рис.8. Схема современной конструкции каменно-набросной плотины с железобетонным экраном (на скальном основании) Э – железобетонный экран; К – контурная плита; 1А, 1В – составные части защитной призмы; 2В, 2В – составные части подэкрановой зоны; 3А – промежуточная зона упорной призмы; 3В, 3С, Т – соответственно верховая, низовая и средняя зоны упорной призмы.

Противофильтрационный железобетонный экран представляет собой плиту, толщина которой составляет лишь около 1% от высоты плотины. Для плотин высотой до 70 м экран обычно выполняют постоянной толщины (не менее 30 см). При большей высоте плотины толщину экрана принимают переменной, увеличивая к низу на 30 см через каждые 100 м высоты.

Экран выполняется из бетона класса не ниже В20 и с маркой по водопроницаемости не ниже W8 [11,17,18,7]. В [9] приведены ключевые рекомендации к выбору состава бетона для устройства экрана: водоцементное отношение принимают равным 0,5; в качестве заполнителя не используются частицы размером более 40мм.

Для бетонирования экрана разработана специальная технология, предусматривающая высокую степень механизации работ и обеспечивающая высокое качество уплотнения бетона [8]. Бетонирование экрана ведут после завершения возведения соответствующей очереди плотины. Укладка бетона ведётся по секциям, снизу-вверх, обычно сразу на всю высоту очереди плотины. Сложные нижние участки предварительно бетонируются отдельно (в виде «стартовых плит») (рис.9).



Рис.9. Плотина Foz do Areia во время строительства (вид с верхнего бьефа)

Железобетонный экран, как правило, армируется стальной стержневой арматурой. В современных плотинах процент армирования экрана рекомендуется устанавливать довольно невысоким – от 0,35 до 0,5% [11,8]. Эти рекомендации основаны на представлении, что большая часть экрана находится в состоянии двухосного сжатия [11,8] и арматура не требуется для восприятия экраном внешних сил. Арматура в основном предназначена только для восприятия температурно-влажностных деформаций бетона. По этой причине армирование часто выполняется однорядным в виде арматурных сеток с одинаковым шагом стержней в обоих направлениях. Сетки располагают примерно посередине толщины плиты.

Двухрядное армирование устраивают обычно только для восприятия температурных напряжений в зоне переменного уровня, а также вокруг периметрального шва. В этом случае арматура располагается вблизи верхней и нижней граней экрана. Такое армирование выполнено в экране плотины Salvajina [8,11].

Экран современных плотин выполняется неразрезным по высоте. Даже в строительных швах горизонтальные швы устраиваются редко. Вертикальными швами экран разделяется на секции, ширина которых, как правило, составляет 12x18 м [8] (рис.10).

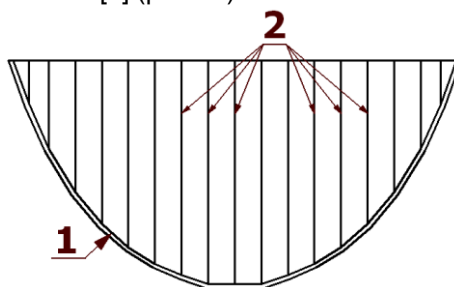


Рис.10. Схема расположения швов в железобетонном экране (вид с верхнего бьефа).
1 – периметральный шов, 2 – вертикальные межсекционные швы.

Схему сопряжения экрана с основанием и бортами выбирают в зависимости от типа основания (скальное или нескальное). На поверхности основания, как правило, укладывают контурную бетонную плиту, являющуюся продолжением экрана (рис.11). При небольшой толщe нескальных грунтов плиту заглубляют до сохранной скалы, а нескальные грунты удаляют. При глубоком залегании скалы в нескальном основании выполняют противофильтрационную стену, с которой соединяется контурная плита. Контурная плита служит понуром, удлиняющим путь фильтрации в основании плотины. Длину плиты назначают из условия снижения фильтрационного градиента до $10 \div 20$ [8]. Кроме того, контурная плита служит удобной площадкой для выполнения инъекционной противофильтрационной завесы в основании плотины. При возможности контурную плиту анкеруют в скальное основание.

Экран и контурная плита отделяются друг от друга периметральным (контурным) швом, который повторяет контур основания плотины (рис.10). При этом экран не имеет соприкосновения с основанием – между экраном и основанием всегда располагается грунтовая «подушка» (зона 2А, рис.8). По замыслу разработчиков, такая схема позволяет уменьшить локальные деформации изгиба экрана в зоне сопряжения с основанием.

Большое внимание при проектировании плотин с железобетонным экраном уделяется конструкции швов. Тип и расположение уплотнений в швах выбирают в зависимости от ожидаемого характера перемещений в шве. По данным натурных наблюдений за построенными плотинами в периметральном шве при наполнении водохранилища происходят смещения экрана относительно контурной плиты, а также раскрытия шва (рис.11). Раскрытия R представляет наибольшую опасность для состояния уплотнений. По натурным данным [27] после заполнения водохранилища периметральный шов всегда раскрывается. Раскрытия шва обычно составляют до 30 мм, но на плотине Alto Anchicaya достигало 125 мм.

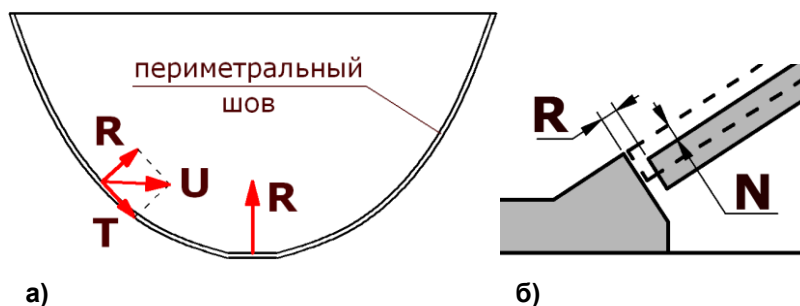


Рис.11. Компоненты перемещений в периметральном шве

а – на виде с верхнего бьефа, б – в поперечном сечении, на границе экрана с основанием

R – раскрытие шва, N – нормальное перемещение (контурный прогиб), T – продольное перемещение (перемещение вдоль шва). Пунктиром показано первоначальное положение плиты экрана, сплошной линией – после перемещений.

Ширину периметрального шва принимают $12 \div 20$ мм. Герметичность периметрального шва обеспечивается установкой уплотнений. Количество уплотнений периметрального шва выбирается в зависимости от высоты шва от двух до трёх. Уплотнение может выполняться снаружи экрана (наружное), под экраном (нижнее) и в шве (промежуточное).

Наружное уплотнение может быть выполнено в виде битумной мастики, закрытой оболочкой, и/или в виде синтетического уплотнения. Оболочка выполняется из ленты ПВХ (поливинилхлорид) толщиной 6

мм или из армированной резины (рис.12) [28]. Она крепится на болтах к поверхности бетона. Такое уплотнение рассчитано на раскрытие свыше 25 мм. Наружное уплотнение эффективно работает в первые 3-5 лет эксплуатации, в течение которых происходят наиболее интенсивные деформации тела плотины.

Промежуточное уплотнение выполняется, как правило, из ПВХ (рис.12). Иногда в состав промежуточного уплотнения входит неопреновая трубка, которая в случае раскрытия шва смещается в шов и герметизирует его. Это техническое решение заимствовано из старых плотин (например, Paradela), в которых промежуточное уплотнение выполнялось из пробковой древесины [19,20]. В современных плотинах высотой до 100 м промежуточное уплотнение чаще всего не устраивается [10,11]. Нижнее уплотнение выполняется в виде медной шпонки. Она устанавливается на специальную подушку в основании экрана (рис.12).

На первых плотинах современного типа (Foz do Areia, Alto Anchicaya) устраивались 3 уплотнения [28]. А на плотинах Cethana, Segredo и Xingo промежуточное уплотнение в шве не устраивалось. Однако на плотинах Segredo и Xingo в качестве дополнительной защиты под нижним уплотнением была применена асфальто-песчаная подушка вместо цементно-песчаной.

На недавно построенных плотинах (Aguamilpa, Tianshengqiao 1, Campos Novos, Shuibuya, Bakun) наружное уплотнение включает в себя отсыпку золы-уноса, защищенную геотекстилем и перфорированной металлической пластиной [28].

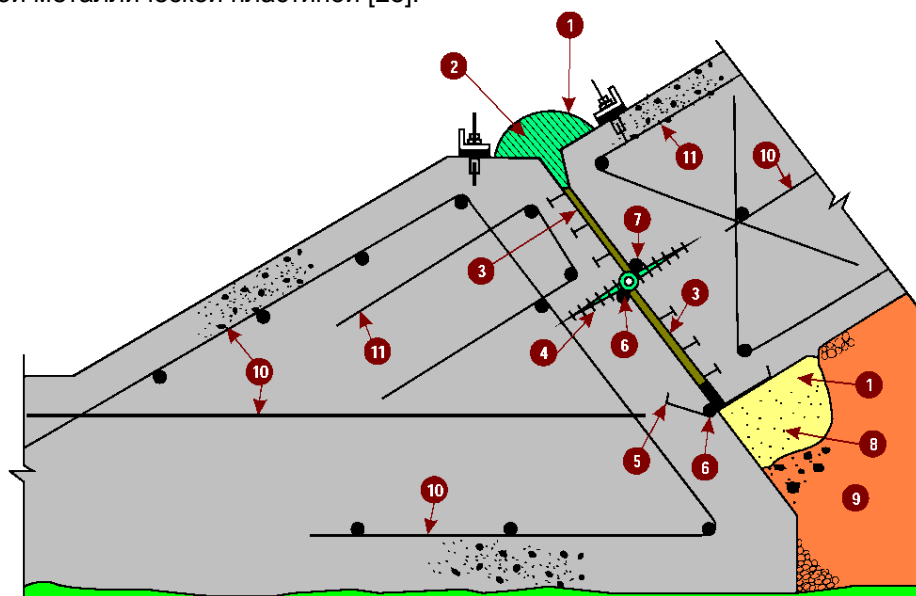


Рис.12. Сопряжение железобетонного экрана и контурной плиты плотины Salvajina [10]

1 – крышка из поливинилхлорида, 2 – битумная мастика, 3 – доска из дерева, 4 – шпонка из поливинилхлорида, 5 – медная шпонка, 6 – неопреновая трубка, 7 – заполнение пенопластом, 8 – асфальто-песчаная подушка, 9 – зона фильтров тела плотины, 10 – стальная рабочая арматура, 11 – арматура против скалывания.

Устройство вертикальных (межсекционных) швов проще, чем периметрального. Из натуральных данных известно, что вертикальные межсекционные швы в экране могут как сжиматься, так и раскрываться. Сжатие характерно для швов, разделяющих центральные секции экрана, а растяжение – для прибортовых. Конструкция шва выбирается от его предполагаемого напряжённого состояния.

В береговых секциях экрана, где шов может испытывать растяжение, вертикальный шов может иметь два уплотнения (верхнее и нижнее) (рис.13б).

В шве, испытывающем сжатие, может устраиваться только нижняя медная шпонка [11] (рис.13а). Эта шпонка укладывается на цементную подушку. На плотинах, возведённых в XX в., межсекционные швы выполняли широкими по аналогии с периметральным. Затем сжатые швы стали выполнять узкими, они представляли собой узкую прорезь, промазанную битумной мастикой (рис.13а). На ряде плотин (Tianshengqiao 1, Barra Grande, Campos Novos, Mohale) с применением таких конструкций вертикальных швов наблюдалось повреждение экрана в зоне швов (трещины откола). На основе анализа характера повреждений и замера деформаций был сделан вывод, что причиной повреждения экрана являются высокие сжимающие напряжения, концентрирующиеся в торцах плит. После этого в сверхвысоких плотинах (например, на плотинах Shuibuya, Bakun) вертикальные швы стали выполнять расширенными [28]. В шов закладывают деревянную доску (как это делалось на старых плотинах) или лист ПВХ (или неопрена). В верхней части шва иногда устраивают V-образный разрез как мероприятие против скола.

На недавно построенных плотинах (например, El Canon в Мексике) вертикальные швы выполняют с двумя уплотнениями. Верхнее уплотнение представляет собой крышку из стали и геотекстиля, которая заполнено золой-уносом. А нижнее уплотнение выполняют из ПВХ. Ещё одной тенденцией

проектирования современных плотин является стремление уменьшить ширину боковых секций экрана (до 7,5 м).

Таким образом, надёжности уплотнений швов в экранах современных плотинах уделяется особое внимание.

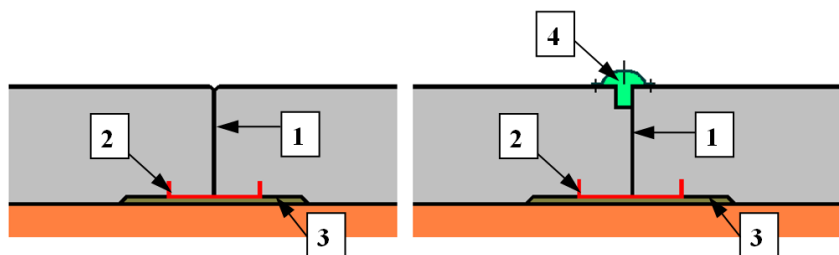


Рис.13. Устройство «узких» вертикальных швов в железобетонном экране
а – шов, работающий на сжатие, б – шов, работающий на растяжение.

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

Важной составляющей современной методики проектирования каменно-набросных плотин с железобетонным экраном являются принципы устройства упорной призмы плотины. Для отсыпки в тело плотины, как правило, применяется камень с прочностью на сжатие не менее 40÷80 МПа.

Непосредственно под железобетонным экраном выполняется подэкранный зона 2. Её основное предназначение состоит в сглаживании неравномерности деформаций упорной призмы. Для устройства подэкранный зоны используется прочный щебенистый или гравийно-галечниковый грунты, например, материал из туннельных выработок. Ещё одним предназначением подэкранный зоны является недопущение суффозии грунта в случае возникновения фильтрации под экраном. Т.к. наиболее вероятно появление фильтрации в зоне периметрального шва, подэкранный зона 2 разделяется на две подзоны: 2А и 2В. Зона 2А расположена под экраном в районе контурного шва, а зона 2В подстилает экран почти на всём его протяжении (рис.9).

Зерновой состав подэкранный зоны должен обеспечивать её фильтрационную устойчивость при градиентах 100 и более, отсутствие сегрегации при отсыпке и ровную рабочую поверхность для укладки экрана. При подборе зернового состава применяют критерий Терцаги [18]. Грунт зоны 2В содержит обычно 30÷50% частиц размером до 5 мм. Максимальная крупность частиц в этой зоне составляет 75-100 мм. Частицы грунта подэкранный зоны должны быть устойчивы к химической суффозии и обладать достаточной морозостойкостью. Грунт подэкранный зоны укладывается тонкими слоями и тщательно уплотняется. В подзону 2А укладывается гравийно-песчаный грунт максимальной крупностью 19 мм.

Ширина переходной зоны обычно назначается на гребне 3÷5 м с увеличением на 3 м на каждые 100 м напора. Поверхность подэкранный зоны выравнивается для укладки экрана слоем бетона или выкладывается из специальных бетонных бордюрных блоков [9,28].

Основной объём тела плотины обычно выполняется неоднородным – с целью получения максимального экономического эффекта в упорной призме плотины производится зонирование камня по крупности и качеству уплотнения. По аналогии с ранее применявшимися полунабросными плотинами, более жёсткой является верховая часть упорной призмы. Обычно в упорной призме выделяют три зоны: верховая (зона 3В), низовая (зона 3С) и переходная (зона 3А).

Основное назначение верховой зоны (зона 3В), расположенной под железобетонным экраном, – это восприятие гидростатических сил и передача их на основание. Поэтому камень в зоне 3В уплотняют особо тщательно, послойно, с применением вибротатков и увлажнением [9,11,18]. Внутри зоны 3В может устраиваться дренаж, если укладываемые грунты обладают низкой проницаемостью (с коэффициентом фильтрации менее 10-3 см/с). Такой дренаж предусмотрен в конструкции плотины Salvajina [29].

Зона 3А является переходной зоной между подэкранный зоной (зона 2) и верховой упорной призмой (зона 3В), и её назначение – предотвращение выноса грунта зоны 2 в поры крупнообломочного грунта в случае сильного повреждения экрана или наполнения водохранилища до окончания бетонирования экрана. В зоне 3А используется, как правило, отсортированный мелкий гравий и щебень.

Низовая зона (зона 3С) в меньшей степени воспринимает гидростатическое давление, в основном она предназначена для обеспечения устойчивости профиля плотины. По этой причине считается, что в низовую часть плотины может быть уложен камень худшего качества. Для зоны 3С используется более крупный камень, он укладывается слоями большей толщины (до 2 м). Иногда между зонами 3В и 3С устраивается зона Т, в которую укладывается камень промежуточного качества. Примерами могут служить плотины Aguamilpa (Мексика), Xingo и Tianshengqiao 1 (Китай).

При строительстве в сейсмически опасных районах выполняется крепление низового откоса плотины слоем крупного камня (размером 1,2 м и более) – это зона 4.

Уплотнение каменной наброски производится, как правило, четырьмя проходками вибрационным катком весом 10 т [9]. Для уплотнения слабых пород могут применяться 6-8 проходок более тяжёлых проходок весом до 17 т. Уложенный грунт проливают водой в объёме 10÷25% от объёма отсыпки камня.

Защитная призма 1 предназначена для снижения фильтрации через экран в случае образования в нём трещин (рис.9). Впервые защитная призма была применена в конструкции плотины Alto Anchicaya, построенной в 1974 г. в Колумбии [28]. Конструктивно защитная призма состоит из двух зон: 1А и 1В. В зону 1В укладывается пылеватый песок, который должен обеспечить кольматацию возможных трещин в экране. Зона 1А из каменной отсыпки защищает грунт зоны 1В от размыва водой.

Таким образом, современные конструкции каменно-набросных плотин с железобетонным экраном предусматривают ряд мер по обеспечению благоприятного напряжённого состояния экрана и недопущению аварийных ситуаций:

- устройство периметрального и вертикального швов, обеспечивающих свободу деформаций железобетонного экрана как при возникновении температурно-влажностных деформаций, так и при деформациях от внешних нагрузок;
- предусмотрено устройство подэкрановой зоны, обеспечивающей выравнивание деформаций экрана;
- распределение грунтового материала по телу плотины выполнено таким образом, чтобы не допустить суффозионных процессов в случае возникновения фильтрационного потока через тело плотины;
- предусмотрены мероприятия по борьбе с фильтрацией через противофильтрационный контур в случае нарушения его целостности (защитная призма, «умные» уплотнения периметрального шва).

Необходимо отметить, что перечисленные выше принципы проектирования основаны на опыте, схематичных представлениях о работе сооружения, но зачастую не обоснованы теоретически.

Анализ преимуществ, недостатков и областей применения каменно-набросных плотин с железобетонным экраном

Преимущества каменно-набросных плотин с железобетонным экраном по сравнению с другими типами грунтовых плотин проистекают из того, что для их строительства не требуются (или почти не требуются) нескальные (глинистые или песчаные) грунты. Во-первых, это позволяет минимизировать объём тела плотины («обжать» её профиль). Во-вторых, это упрощает технологию возведения плотины и освобождает от необходимости разведки грунтов, пригодных для устройства противофильтрационного элемента. В-третьих, применение в теле плотины только крупнозернистых грунтов позволяет вести работы по её отсыпке круглогодично, невзирая на климатические условия. Всё это обуславливает эффективность применения каменно-набросных плотин с железобетонным экраном.

Важным преимуществом этих плотин является то, что они могут быть устроены практически в любом створе, в любых условиях. Это выгодно отличает их от плотин любого другого типа. Для строительства каменно-набросной плотины с железобетонным экраном требуется лишь местный строительный материал (камень) в необходимом количестве и относительно небольшое количество цемента и песка (в качестве заполнителя бетона).

Область применения каменно-набросных плотин с железобетонным экраном очень разнообразна. Возможность применения в различных условиях подтверждается опытом.

Плотины с железобетонным экраном применялись в сложных инженерно-геологических условиях. Плотины Puclaro, Santa Juana (Чили), Alto Anchicaya (Колумбия), Jiudianxia (Китай) были построены в створах, где непосредственным основанием плотины являлся мощный слой аллювиальных отложений [30].

Имеется опыт строительства и эксплуатации каменно-набросных плотин с железобетонным экраном в сейсмически опасных районах. Плотины Соготи (Чили) [19], Zipigpu (Китай) [31] выдержали крупные землетрясения без значительных повреждений.

Имеется опыт применения каменно-набросных плотин с железобетонным экраном в районах с холодным климатом. Самой высокой северной плотиной является плотина Tuolnostouc в Канаде высотой 76 м [32].

Каменно-набросные плотины с железобетонным экраном удобны для последующего наращивания. А несколько таких плотин стали частью плотин комбинированного типа, в результате наращивания существовавших бетонных плотин. Это плотины New Exchequer в США [19,33,34], Outardes 2 в Канаде, Kárahnjúkar в Исландии.

Основным недостатком каменно-набросных плотин с железобетонным экраном является недостаточный уровень их надёжности. На целом ряде плотин, преимущественно сверхвысоких, происходили аварийные ситуации, связанные с нарушением герметичности противофильтрационного элемента. В качестве примеров плотин, в экранах которых наблюдалось образование трещин, можно назвать плотины Aguamilpa (высотой $h=187$ м) [35], Tianshengqiao 1 ($h=178$ м) [28,35,37], Xingo ($h=150$ м) [35,37], Ita ($h=125$ м) [35], Shuibuya ($h=233$ м) [28,37,39], Barra Grande ($h=185$ м) [28,37], Campos Novos

($h=202$ м) [28,40,41], Mohale ($h=145$ м) [28,36,37], Turimiquire ($h=113$ м) [38], Buxi ($h=135,8$ м) [28], Antamina и др.

Причины возникновения этих трещин, а также меры предотвращения трещинообразования требуют отдельного анализа. Эти вопросы предполагается рассмотреть в последующих публикациях.

4. Заключение

Несмотря на то, что история каменно-набросных плотин с железобетонным экраном насчитывает более ста лет, этот тип плотин является одним из самых современных типов грунтовых плотин. По итогам исторического обзора можно сделать следующие выводы:

1. Каменно-набросные плотины с железобетонным экраном являются перспективным типом грунтовых плотин, они обладают целым рядом преимуществ, самым важным из которых является возможность их применения практически любых условиях. Однако у плотин данного типа есть серьёзный недостаток – отсутствие гарантий надёжности противофильтрационного элемента. Железобетонный экран очень восприимчив к деформациям тела грунтовой плотины и подвержен трещинообразованию. Для возможности применения плотин этого типа при строительстве высоконапорных гидроузлов, необходимо решить проблему безопасности железобетонных экранов. Требуется усовершенствование современной конструкции каменно-набросных плотин с железобетонным экраном.

2. Проблема безопасности каменно-набросных плотин с железобетонным экраном не является новой, она существует столько же времени, сколько применяются плотины этого типа. В истории этих плотин был период времени, когда от их строительства хотели отказаться. Однако каменно-набросные плотины с железобетонным экраном не только продолжили применяться, но и расширили область применения. Это объясняется тем, что конструкция плотин данного типа постоянно совершенствовалась. Технические усовершенствования позволили постоянно увеличивать максимально возможную высоту каменно-набросных плотин с железобетонным экраном. Можно ожидать, что с течением времени будут найдены способы решения имеющихся технических проблем строительства сверхвысоких плотин данного типа, что позволит построить плотины высотой свыше 250 м.

3. Все изменения в конструкции каменно-набросных плотин с железобетонным экраном были связаны с внедрением передовых технологий строительства. Наибольшее влияние на конструкцию грунтовых плотин с железобетонным экраном оказало изменение технологии возведения тела плотины. За 100 лет эта технология менялась 2 раза. Первоначально применявшаяся технология сухой кладки камня позволяла применять «обжатый» профили плотины, но она была вытеснена менее трудоёмкой технологией каменной наброски, несмотря на то, это вело к увеличению объёма плотины примерно в 6 раз. Затем ушла в прошлое и технология каменной наброски, т.к. она не обеспечивала снижения деформируемости тела плотины до уровня, требуемого для строительства высоких плотин. Технология каменной наброски была заменена на технологию, предусматривающую послойную укладку крупнообломочных грунтов с уплотнением. Современные плотины строятся по этой технологии, хотя и называются каменно-набросными.

4. Исторический опыт показывает, что ключевое значение для надёжности каменно-набросных плотин с железобетонным экраном имеет качество уплотнения крупнообломочного грунта тела плотины, т.к. оно определяет деформации плотины. Жёсткие железобетонные экраны очень восприимчивы к деформациям тела плотины. Соответственно, от качества уплотнения крупнообломочного грунта напрямую зависят деформации и напряжения в железобетонном экране, его трещиностойкость. Однако следует отметить, что существенное значение имеет не только величина, но и характер распределения деформаций. Аварийные ситуации на плотинах происходили тогда, когда в плотине имели место зоны повышенной деформируемости грунта, т.е. наблюдалась неравномерность деформаций тела плотины.

5. В современных плотинах достигается очень высокая степень уплотнения каменной наброски, когда её пористость не превышает и 25%. Тем не менее, это не всегда позволяет достигнуть снижения деформируемости каменной наброски до нужного уровня. По современным представлениям требуется добиваться уплотнения каменной наброски до уровня, когда её пористость не превысит 20%. Однако это представляет технические сложности. По-видимому, для дальнейшего повышения степени уплотнения каменной наброски потребуется уменьшать толщину уплотняемого слоя и ограничивать зерновой состав наброски.

6. Важную роль в формировании напряжённо-деформированного состояния экрана играет периметральный шов, отделяющий экран от основания. Его необходимость подтверждена опытом. В то же время, опыт говорит о том, что сам экран может выполняться и неразрезным по высоте. Частая разрезка экрана горизонтальными швами не позволяет избежать нарушений его целостности и герметичности. Напротив, усложнение конструкции экрана, появление в нём ослабленных зон в местах заделки уплотнений, может снизить его надёжность как противофильтрационного элемента. Однако при наличии сейсмических воздействий вопрос об устройстве в железобетонном экране горизонтальных деформационных швов необходимо рассматривать отдельно.

7. Учитывая большую вероятность трещинообразования в железобетонном экране высокой каменно-набросной плотины, на первый план выходит проблема обеспечения ремонтпригодности экрана. Современные конструкции этих плотин не обладают данным свойством, в этом заключается их существенный недостаток.

8. Опыт показал, что применение гидроизоляционных изделий из органических материалов (битум, полимеры) для повышения надёжности противофильтрационных железобетонных экранов во всех известных случаях имело положительный эффект. В связи с этим целесообразно рассматривать варианты противофильтрационных устройств каменно-набросных плотин, совмещающие в себе железобетонный экран и гидроизоляционное изделие из органических материалов.

9. Существующая методика проектирования каменно-набросных плотин с железобетонным экраном основана на эмпирическом подходе. Однако поиск эффективной и надёжной конструкции плотин данного типа невозможен без теоретического обоснования. Следует признать, что актуальным вопросом современной гидротехники является не только вопрос о выявлении причин трещинообразования в железобетонных экранах, а решение научной проблемы, связанной с научным обоснованием принципов проектирования каменно-набросных плотин с железобетонным экраном.

Литература

- [1]. Ma, H., Chi, F. Technical progress on researches for the safety of high concrete-faced rockfill dams // *Engineering* 2. 2016. Pp.332–339
- [2]. Song W, Sun Y, Li L, Wang Y. Reason analysis and treatment for the 1st phase slab cracking of Shuibuya CFRD // *Journal of Hydroelectric Engineering*. 2008. No.3(27). Pp.33–37.
- [3]. Wei Z., Junjie H., Xiaolin C., Chuangbing Z. Settlement analysis of the Shuibuya concrete-face rockfill dam // *Computers and Geotechnics*. 2011. No.38. Pp.269–280
- [4]. Li, N.-H., Sun, D.-W., Li, D.-H., Deng, Y.-G., Yang, J. Deformation behavior of 300 m high-concrete face rockfill dams. *Yantu Gongcheng Xuebao/Chinese Journal of Geotechnical Engineering*. 2009. No.31(2). Pp.155–160
- [5]. 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
- [6]. Лашенов С.Я., Саакян В.А., Салимов Ю.Т. Программа достройки гидроэлектростанций. Основные положения прогноза развития гидроэнергетики до 2015 г. // *Гидротехническое строительство*. 2001. №11. С.13–21.
- [7]. Ляпичев Ю.П. Проектирование и строительство современных высоких плотин: Учеб. Пособие. – М.: Изд-во РУДН, 2004. – 275 с.
- [8]. 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.
- [9]. Радченко В.Г., Курнева Е.В., Ротченко Ю.Г. Современные технологии строительства каменнонабросных плотин с железобетонными экранами // *Гидротехническое строительство*. 2007. №10. С.25-32.
- [10]. ICOLD. *Rockfill Dams with Concrete Facing*, International Commission on Large Dams. 1989. Bulletin 70.
- [11]. ICOLD. *Concrete Face Rockfill dam: Concepts for design and construction*, International Commission on Large Dams. 2010. Bulletin 141. 401p.
- [12]. Ye Z., Shichun C. The Application of MsPSO in the Rockfill Parameter Inversion of CFRD // *Mathematical Problems in Engineering*. 2016, Article ID 1096967. 11p. <http://dx.doi.org/10.1155/2016/1096967>
- [13]. Park, H.G., Kim, Y.-S., Seo, M.-W., Lim, H.-D. Settlement Behavior Characteristics of CFRD in Construction Period. Case of Daegok Dam // *Journal of the KGS*. September 2005. Volume 21. No.7. Pp.91-105.

References

- [1]. Ma, H., Chi, F. Technical progress on researches for the safety of high concrete-faced rockfill dams // *Engineering* 2. 2016. Pp.332–339
- [2]. Song W, Sun Y, Li L, Wang Y. Reason analysis and treatment for the 1st phase slab cracking of Shuibuya CFRD // *Journal of Hydroelectric Engineering*. 2008. No.3(27). Pp.33–37
- [3]. Wei Z., Junjie H., Xiaolin C., Chuangbing Z. Settlement analysis of the Shuibuya concrete-face rockfill dam // *Computers and Geotechnics*. 2011. No.38. Pp.269–280
- [4]. Li, N.-H., Sun, D.-W., Li, D.-H., Deng, Y.-G., Yang, J. Deformation behavior of 300 m high-concrete face rockfill dams. *Yantu Gongcheng Xuebao/Chinese Journal of Geotechnical Engineering*. 2009. No.31(2). Pp.155-160
- [5]. 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
- [6]. Lashchenov S.Ya., Saakyan V.A., Salimov Yu.T. Programma dostroyki gidroelektrostantsiy. Osnovnyye polozheniya prognoza razvitiya gidroenergetiki do 2015 g. // *Gidrotekhnicheskoye stroitelstvo*. 2001. No.11. Pp.13-21
- [7]. Ljapichev Ju.P. Proektirovanie i stroitel'stvo sovremennykh vysokikh plotin [Design and construction of modern high dams]– M.: RUDN, 2004. – 275 p.
- [8]. Radchenko V.G., Glagovskiy V.B., Kassirova N.A., Kurneva Ye.V., Druzhinin M.A. Sovremennoye nauchnoye obosnovaniye stroitelstva kamennonabrosnykh plotin s zhelezobetonnymi ekranami [Modern scientific study of the construction of concrete face rockfill dams] // *Gidrotekhnicheskoye stroitelstvo [Hydraulic Engineering]*. 2004. No.3. Pp.2–8
- [9]. Radchenko V.G., Kurneva Ye.V., Rotchenko Yu.G. Sovremennyye tekhnologii stroitelstva kamennonabrosnykh plotin s zhelezobetonnymi ekranami [Modern technologies for the construction of concrete faced rockfill dams] // *Gidrotekhnicheskoye stroitelstvo [Hydraulic Engineering]*. 2007. №10. Pp.25–32
- [10]. ICOLD. *Rockfill Dams with Concrete Facing*, International Commission on Large Dams. 1989. Bulletin 70.
- [11]. ICOLD. *Concrete Face Rockfill dam: Concepts for design and construction*, International Commission on Large Dams. 2010. Bulletin 141. 401p.
- [12]. Ye Z., Shichun C. The Application of MsPSO in the Rockfill Parameter Inversion of CFRD // *Mathematical Problems in Engineering*. 2016, Article ID 1096967. 11p. <http://dx.doi.org/10.1155/2016/1096967>
- [13]. Park, H.G., Kim, Y.-S., Seo, M.-W., Lim, H.-D. Settlement Behavior Characteristics of CFRD in Construction Period. Case of Daegok Dam // *Journal of the KGS*. September 2005. Volume 21. No.7. Pp.91-105.

- [14]. Pornkasem J. Deformation analysis of high CFRD considering the scaling effects. // *Geomechanics and Engineering*. 2018. Vol.14. No.3. Pp.211-224.
- [15]. 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.
- [16]. 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.
- [17]. Cooke J.B. Progress in rockfill dams. *Journal of Geotechnical Engineering*. 1984. Vol.110. No.10. Pp.1381–1414.
- [18]. Cooke J.B., Sherard J.L. Concrete-face rockfill dam: II. design. *Journal of Geotechnical Engineering*. 1987. Vol.113. No.10. Pp.1113–1132.
- [19]. Моисеев С.Н. Каменно-земляные и каменно-набросные плотины. Основы проектирования и строительство – М.: Энергия, 1970. – 176 с.
- [20]. Айрапетян Р. Проектирование каменно-земляных и каменно-набросных плотин. Изд. 2-е, перераб. и доп. – М.: Энергия, 1975. – 328 с.
- [21]. Pardo de Santayana, F., Fortunato, E., Pinto, A.V. Behaviour of Portuguese rockfill dams with upstream impervious membranes. *Proceedings of the 16th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2005-2006. Pp.1905-1908
- [22]. Pinto de, N.L.S., Filho, M.P.L., and Maurer, E. Foz do Areia Dam – Design, Construction, and Behaviour. *Proc. of the Symp. “Concrete Face Rockfill Dams-Design, Construction, and Performance*. ASCE. 1985. pp.173-191.
- [23]. Проектирование и строительство плотин из местных материалов (по материалам VII и VIII Международных конгрессов по большим плотинам), сост. А.А.Ничипорович, под общ. ред. А.А.Борового. – М.: Энергия, 1967. С.90-99.
- [24]. Моисеев С.Н., Моисеев И.С. Каменно-земляные плотины. Основы проектирования и строительство – М.: Энергия, 1977. – 281 с.
- [25]. Larson, E., Kelly, R., Dreese, T., Fleming, G., Wilkes, J. A permanent solution at Salt Springs dam // *International Water Power&Dam Construction*. 2006
- [26]. Zornberg, J.G. Ingenuity in geotechnical design using geosynthetics. *Geotechnical Special Publication*. 2012. (226 GSP). Pp.398-419
- [27]. Pinto, N.L., Marques, P.L. Estimating the Maximum Face Deflection in CFRDs. *Hydropower & Dams*. 1998. Issue 6. 28p.
- [28]. Freitas, M.S.Jr. Concepts on CFRDs Leakage Control - Cases and Current Experiences. *ISSMGE Bulletin*. 2009. Volume 3. Issue 4. pp.11-18.
- [29]. Hacelas, J.E., Ramirez, C.A., Regaldo, G. Construction and Performance of Salvajina dam. *Proceeding of the symposium “Concrete Face Rockfill dams – Design, Construction and Performance”*. 1985. ASCE. Pp.286-315.
- [30]. 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 // *Géotechnique*. 2018. 68, No.9. Pp.749–771
- [31]. Degao Z., Bin X., Xianjing K., Huabei L., Yang Z. Numerical simulation of the seismic response of the Zipingpu concrete face rockfill dam during the Wenchuan earthquake based on a generalized plasticity model // *Computers and Geotechnics*. 2013. No.49. Pp.111–122
- [32]. Chartrand, C., Clauss, M., Beauséjour, N., Briand, M.-H., Volume 21. No.7. Pp.91–105
- [14]. Pornkasem J. Deformation analysis of high CFRD considering the scaling effects. // *Geomechanics and Engineering*. 2018. Vol.14. No.3. Pp.211–224
- [15]. 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
- [16]. 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
- [17]. Cooke J.B. Progress in rockfill dams. *Journal of Geotechnical Engineering*. 1984. Vol.110. No.10. Pp.1381–1414
- [18]. Cooke J.B., Sherard J.L. Concrete-face rockfill dam: II. design. *Journal of Geotechnical Engineering*. 1987. Vol.113. No.10. Pp.1113–1132
- [19]. Moiseev S.N. Kamenno-zemljanye i kamenno-nabrosnye plotiny. Osnovy proektirovanija i stroitel'stvo [Earth-rockfill and rockfill dams. Design Basics and Construction] – M.: Jenergija, 1970. – 176 p.
- [20]. Ajrapetjan R. Proektirovanie kamenno-zemljanyh i kamenno-nabrosnyh plotin [Design of earth-rockfill and rockfill dams]. – M.: Jenergija, 1975. – 328 p.
- [21]. Pardo de Santayana, F., Fortunato, E., Pinto, A.V. Behaviour of Portuguese rockfill dams with upstream impervious membranes. *Proceedings of the 16th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2005-2006. Pp.1905-1908
- [22]. Pinto de, N.L.S., Filho, M.P.L., and Maurer, E. Foz do Areia Dam – Design, Construction, and Behaviour. *Proc. of the Symp. “Concrete Face Rockfill Dams-Design, Construction, and Performance*. ASCE. 1985. pp.173–191.
- [23]. Proektirovanie i stroitel'stvo plotin iz mestnyh materialov [Design and construction of dams from local materials (based on the materials of the VII and VIII International congresses on large dams)] – M.: Jenergija, 1967. Pp.90–99.
- [24]. Moiseev S.N., Moiseev I.S. Kamenno-zemljanye plotiny. Osnovy proektirovanija i stroitel'stvo [Earth-rockfill dams. Design Basics and Construction] – M.: Jenergija, 1977. – 281p.
- [25]. Larson, E., Kelly, R., Dreese, T., Fleming, G., Wilkes, J. A permanent solution at Salt Springs dam // *International Water Power&Dam Construction*. 2006
- [26]. Zornberg, J.G. Ingenuity in geotechnical design using geosynthetics. *Geotechnical Special Publication*. 2012. (226 GSP). Pp.398-419
- [27]. Pinto, N.L., Marques, P.L. Estimating the Maximum Face Deflection in CFRDs. *Hydropower & Dams*. 1998. Issue 6. 28p.
- [28]. Freitas, M.S.Jr. Concepts on CFRDs Leakage Control - Cases and Current Experiences. *ISSMGE Bulletin*. 2009. Volume 3. Issue 4. Pp.11-18
- [29]. Hacelas, J.E., Ramirez, C.A., Regaldo, G. Construction and Performance of Salvajina dam. *Proceeding of the symposium “Concrete Face Rockfill dams – Design, Construction and Performance”*. 1985. ASCE. Pp.286-315.
- [30]. 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 // *Géotechnique*. 2018. 68, No.9. Pp.749–771
- [31]. Degao Z., Bin X., Xianjing K., Huabei L., Yang Z. Numerical simulation of the seismic response of the Zipingpu concrete face rockfill dam during the Wenchuan earthquake based on a generalized plasticity model // *Computers and Geotechnics*. 2013. No.49. Pp.111–122

- Bouzaïene, H., Boisjoly, C., Gonzaga, G., Quenneville, R., Bergeron, A. Toulustouc Dam // Canadian Consulting Engineer. Oct/Nov 2006. Volume 47. Issue 6. p.51.
- [33]. Kearsley W.G. Recent developments of upstream membranes for rockfill dams. A Thesis Submitted to the Faculty of Graduate Studies and Research in Partial Fulfillment of the Requirements for Requirements for the Degree of Master of Engineering In Geotechnique. Edmonton. Alberta. July 1983. 122p.
- [34]. Reitter A.R. Design and construction of the New Exchequer dam - the world's highest concrete faced rockfill dam // World Dams Today. 1970. pp.4-10.
- [35]. Marques Filho, P., De Pinto, N.L.S. CFRD dam characteristics learned from experience // International Journal on Hydropower and Dams. 2005. No.12(1). pp.72-76.
- [36]. 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.
- [37]. Silva da, A.F., Assis de, A.P., Farias de, M.M., Neto, M.P.C. Three-Dimensional Analyses of Concrete Face Rockfill Dams: Barra Grande Case Study // EJGE. 2015. Volume 20. Bund 14. Pp.6407-6426.
- [38]. 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.
- [39]. 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.
- [40]. 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.
- [41]. Arici, Y. Investigation of the cracking of CFRD face plates // Computers and Geotechnics. 2011. No.38. Pp.905-916.
2013. No.49. Pp.111-122
- [32]. Reitter A.R. Design and construction of the New Exchequer dam - the world's highest concrete faced rockfill dam // World Dams Today. 1970. Pp.4-10
- [33]. Kearsley W.G. Recent developments of upstream membranes for rockfill dams. A Thesis Submitted to the Faculty of Graduate Studies and Research in Partial Fulfillment of the Requirements for Requirements for the Degree of Master of Engineering In Geotechnique. Edmonton. Alberta. July 1983. 122p.
- [34]. Chartrand, C., Claiss, M., Beauséjour, N., Briand, M.-H., Bouzaïene, H., Boisjoly, C., Gonzaga, G., Quenneville, R., Bergeron, A. Toulustouc Dam // Canadian Consulting Engineer. Oct/Nov 2006. Volume 47. Issue 6. p.51
- [35]. Marques Filho, P., De Pinto, N.L.S. CFRD dam characteristics learned from experience // International Journal on Hydropower and Dams. 2005. No.12(1). Pp.72-76
- [36]. 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.
- [37]. Silva da, A.F., Assis de, A.P., Farias de, M.M., Neto, M.P.C. Three-Dimensional Analyses of Concrete Face Rockfill Dams: Barra Grande Case Study // EJGE. 2015. Volume 20. Bund 14. Pp.6407-6426.
- [38]. 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
- [39]. 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
- [40]. 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
- [41]. Arici, Y. Investigation of the cracking of CFRD face plates // Computers and Geotechnics. 2011. No.38. pp.905-916

Контактная информация

- 1.* +79266078931, mp_sainov@mail.ru (Саинов Михаил Петрович, к.т.н., доцент)
2. +79296440047, dgein1997@mail.ru (Юрьева Евгения Александровна, студент)

Contact information

- 1.* +79266078931, mp_sainov@mail.ru (Sainov Mikhail, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor)
2. +79296440047, dgein1997@mail.ru (Yurieva Evgeniya, Student)

© Саинов М.П., Юрьева Е.А., 2018