



Artificial Materials in Seepage-Control Structures of Embankment Dams: A Review

Sainov, M.P.^{1*}

¹ Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russian Federation

* mp_sainov@mail.ru

Keywords:

Embankment dams, Artificial materials, Concrete, Asphalt concrete, Geosynthetic

Abstract:

Introduction. The urgent task of hydraulic engineering as a science is to search for more sophisticated, effective, and safe structures of embankment dams. Wide possibilities in this are presented by the use of artificial materials and structures made of them. To estimate the perspectives of their use, a historical survey was carried out on experience gained in the construction and operation of embankment dams with seepage-control structures (SCS) made of artificial materials. **Materials and methods.** For the survey the different sources, both modern and those of the past years, were used. There were analyzed SCS which were used in bodies and foundations of embankment dams since the start of the XX-th century. Results. The historical survey showed that over the last 50-70 years significant progress took place in the development of SCS made of artificial materials. First of all, there were used the new types of SCS made of new materials: asphalt-concrete and geosynthetics. Secondly, the new methodologies have been introduced in the construction practice by arranging SCS made of materials based on cement in dam foundations. The experience showed that these methodologies were also used for arranging SCS in dam bodies. **Conclusions.** In the future, there may be expected further extension in the scope of using artificial materials for the construction of embankment dam SCS. At that, the leading role among artificial materials is played by the materials based on cement (concrete, clay-cement concrete, soil-cement mixes, etc.). At the construction of ultra-high dams, these materials do not have any alternatives. Nevertheless, the most perspective way in improving structural designs of embankment dams SCS is a combination of different artificial materials (cement-containing and other materials), as well as the use of combined SCS.

1 Introduction

Важной задачей гидротехнической науки является совершенствование конструкций грунтовых плотин. Применяемые в настоящее время конструкции грунтовых плотин очень разнообразны, они различаются по типу (земляные, каменно-земляные, каменно-набросные), виду (ядро, экран, завеса, диафрагма) и материалу противофильтрационного элемента. Однако все они имеют либо ограничения по области применения, либо не гарантируют должного уровня надёжности.

В настоящее время единственным универсальным типом плотин, который может применяться практически при любых напорах, являются каменно-земляные плотины с центральным ядром из глинистого грунта. Самой высокой такой плотиной является плотина Нурекской ГЭС высотой 300 м в Таджикистане [1], но уже строится ещё более высокая плотина Рогунской ГЭС [2]. В Китае также проектируется несколько сверхвысоких каменно-земляных плотин [3]: Nuozhadu (261,5 м), Shuang Jiangkou (322 м), Changhe (240 м).

Однако у каменно-земляных плотин также есть ограничения по области применения, связанные с наличием и качеством местных глинистых грунтов, используемых для устройства противофильтрационного ядра. В суровых климатических условиях сложно обеспечить качество укладки глинистых грунтов, что снижает уровень безопасности каменно-земляной плотины.

Об этом свидетельствует опыт эксплуатации самой высокой в России каменно-земляной плотины Колымской ГЭС, построенной в Магаданской области [4]. Из-за недостаточного качества укладки грунтов плотина испытывает значительные деформации, а в ядре имеются зоны повышенной проницаемости. Опасность нарушения фильтрационной прочности грунтового ядра характерна и для других каменно-земляных плотин. Хорошо известен случай полного разрушения в 1976 г. каменно-земляной плотины Тетон

Sainov, M.P.

Artificial Materials in Seepage-Control Structures of Embankment Dams: A Review; 2020; *AlfaBuild*; Volume 14 Article No 1405. doi: 0.34910/ALF.14.5

(США) высотой 93 м [5]. В литературе описаны случаи гидравлического разрыва ядер плотины Balderhead (Англия) [6,7], Курейской плотины [8-10], разрушения на которых удалось избежать.

Поэтому актуальной проблемой является поиск альтернативных вариантов конструкции грунтовых плотин. Этому вопросу посвящены публикации [11-15] и другие. Анализ этих работ показывает, что наиболее перспективным признаётся применение в конструкциях грунтовых плотин противодиффузионных элементов (ПФЭ) из негрунтовых материалов. Это объясняется тем, что спектр современных негрунтовых материалов очень широк и обеспечивает выбор материала почти с любыми заданными свойствами. К ним относятся материалы на основе органических веществ. Однако основная роль отводится различным материалам на основе цемента. К цементосодержащим материалам относятся не только бетон и железобетон, но глиноцементобетон, грунтоцементобетон, а также различные грунтоцементные смеси.

Для того, чтобы верно оценить перспективы применения негрунтовых материалов для устройства ПФЭ грунтовых плотин, нами был выполнен обзор опыта их применения. Он позволил выявить преимущества, недостатки и области их рационального применения.

2 Materials and Methods

Для составления обзора и анализа были использованы различные источники информации: труды международного конгресса по большим плотинам (ICOLD)¹, нормативно-технические документы, а также публикации разных лет. Необходимо отметить, что в раритетных учебных изданиях уже выполнен подробный исторический обзор опыта применения ПФЭ разных типов, однако, во-первых, раритетные издания трудодоступны, а, во-вторых, они не охватывают современный период.

В нашем обзоре были рассмотрены все применявшиеся ранее виды негрунтовых ПФЭ, различающиеся по расположению, конструкции и материалу.

В качестве материалов для устройства ПФЭ применяются материалы на основе цемента, органических вяжущих, геосинтетики, древесины и сталь. ПФЭ могут служить для борьбы с фильтрацией в основании и теле плотины и иметь различное расположение. ПФЭ, предназначенные для противодиффузионной защиты основания, могут быть расположены горизонтально (понуры) или вертикально (зубья, завесы, стенки). ПФЭ тела плотины могут быть расположены внутри или снаружи объёма плотины. Первые называют экранами, а вторые – диафрагмами (при малой толщине) или ядрами, завесами (если ПФЭ массивный).

Все перечисленные конструктивные виды ПФЭ (понуры, зубья, завесы, стенки, диафрагмы, ядра) могут быть выполнены из материалов на основе цемента (бетон, железобетон и др.). В этой связи важно установить то место, которое занимают ПФЭ из цементосодержащих материалов, в многообразии негрунтовых ПФЭ.

3 Results and Discussion

Исторический обзор показывает, что за прошедшие 100-150 лет (с конца XIX века) произошли большие изменения в конструкциях грунтовых плотин с негрунтовыми ПФЭ. До середины XX века именно грунтовые плотины с негрунтовыми ПФЭ считались наиболее приспособленными для строительства высоких плотин, но затем их «потеснили» каменно-земляные плотины.

С второй половины XX века начался поиск и внедрение принципиально новых типов негрунтовых ПФЭ, связанных с применением новых, искусственных гидроизоляционных материалов и новых строительных технологий. Соответственно, значительные изменения претерпели конструктивные решения грунтовых плотин с негрунтовыми ПФЭ. Некоторые типы ПФЭ вышли из употребления, а другие проявили себя в новом качестве.

Анализ исторического опыта применения различных негрунтовых противодиффузионных конструкций в грунтовых плотинах.

До XX века основным материалом, из которого выполнялись ПФЭ, являлась древесина, из неё выполнялись экраны и шпунтовые диафрагмы. Примерами могут служить Малоульбинская (1936 г.) и

¹ ICOLD. Filling materials for watertight cut-off walls. 1985. Bulletin 51.

ICOLD. Soil cement for embankment dams. 1986. Bulletin 54.

ICOLD. Rockfill Dams with Concrete Facing, International Commission on Large Dams. 1989. Bulletin 70.

ICOLD. Bituminous Cores for Fill Dams. International Commission on Large Dams. Paris. 1992. Bulletin 42.

ICOLD. Concrete Face Rockfill dam: Concepts for design and construction, International Commission on Large Dams. 2010. Bulletin 141.

ICOLD. Geomembrane sealing systems for dams. Design principles and review of experience. 2010. Bulletin 135.

Sainov, M.P.

Artificial Materials in Seepage-Control Structures of Embankment Dams: A Review; 2020; AlfaBuild; Volume 14 Article No 1405. doi: 0.34910/ALF.14.5

Широковская (1948 г.) плотины в России. Высота таких плотин могла достигать несколько десятков плотины. Например, Широковская плотина имеет высоту 40 м.

Однако древесина имеет существенные недостатки – она подвержена гниению и пожароопасна. Ориентировочный срок службы деревянных ПФЭ составляет 20 лет, а деревобитумных экранов – около 50 лет. Из-за недолговечности ПФЭ из древесины в настоящее время практически не применяются и не имеют перспектив широкого применения.

Значительно реже для создания ПФЭ применялась нержавеющая сталь. Устраивались как стальные экраны и стальные диафрагмы. Примерами могут служить плотина Храма ГЭС-1 высотой 32,2 м в Грузии (1947 г.), экран которой осуществлён из листов нержавеющей стали толщиной 8 мм, а также плотина Salazar, Pego do Altar (1949 г.) строительной высотой 64 м в Португалии. Самой высокой каменно-набросной плотиной со стальной диафрагмой является Серебрянская плотина-2 высотой 64 м. Однако из-за высокой стоимости ПФЭ из стали распространения не получили и сейчас не применяются.

Более распространённым материалом для ПФЭ стал бетон (железобетон) – искусственный камень, получаемый на основе цементного вяжущего. Преимуществами бетона является его технологичность и высокая прочность на сжатие.

Первые каменно-набросные плотины с бетонным экраном (КНПБЭ) были построены в США ещё во второй половине XIX в. [16], они пришли на смену плотинам с деревянным экраном. В XX веке конструкции КНПБЭ постоянно совершенствовались, благодаря чему их высота постоянно возрастала. В 1931 г. высота плотин с бетонным экраном (БЭ) достигла 100 м – такую высоту имеет плотина Salt Springs в США. Однако этот прогресс сопровождался нередкими случаями образования трещин в бетонных экранах, одним из примеров как раз служит плотина Salt Springs. С целью повышения надёжности БЭ разрабатывались не только жёсткая, но и полужёсткая, а также гибкая конструкции железобетонных экранов. Гибкий БЭ представлял собой многослойную конструкцию из бетонных плит, разделённых слоями битума [16].

В первой половине XX в. предпринимались попытки использовать бетон для устройства также и внутренних ПФЭ. Применялись два типа конструкции: массивные и тонкостенные диафрагмы.

Массивные диафрагмы представляли собой это широкие полые оболочки или ячейки из железобетона. По сути это были не диафрагмы, а полые железобетонные ядра в теле каменных плотин. Попытки строительства плотин с подобными ПФЭ часто заканчивались неудачей. Жёсткие бетонные ядра-диафрагмы работали как подпорные стены, воспринимая гидростатическое давление почти полностью, без участия каменной наброски. Поэтому такие жёсткие ядра-диафрагмы срезались по основанию. Примерами могут служить плотина Уэд-Кебир (1925 г.) высотой 35 м в Тунисе, плотина Мельтон.

Предпринимались также попытки строительства тонких бетонных диафрагм, но они также терпели неудачу. Например, бетонная диафрагма-стена плотины Эйлдон высотой 42,7 м (1927 г.) в Австралии не смогла приспособиться к значительным деформациями грунтовой насыпи и через 2 года она была повреждена. Более удачным был опыт эксплуатации плотины Rojus высотой около 15 м в Швеции, в котором диафрагма была защищена слоем глинобетона.

На основании неудачного опыта первой половины XX века применения плотин с бетонными ПФЭ инженерами и учёными был сделан вывод о том, что жёсткий бетон не приспособлен для восприятия тех значительных деформаций, которые присущи грунтовым плотинам. В середине XX в. наблюдался перерыв в строительстве плотин с ПФЭ из бетона, а бетонные стены-диафрагмы не проектируются и не возводятся вплоть до настоящего времени.

Лидирующие позиции стали занимать каменно-земляные плотины. Однако с середины XX в. в гидротехническом строительстве стали внедряться новые искусственные материалы, выполненные на основе органических вяжущих и веществ.

В частности, широкое распространение получили материалы и изделия на основе битумов. На основе органического битумного вяжущего выполняют асфальтовые растворы и асфальтобетоны.

Асфальтовые растворы стали применяться для гидроизоляции плотин ещё в конце XIX в. Впервые плотина с применением битумной изоляции была построена в Португалии (плотина Валь де Гайо) в 1897 г.

Асфальтобетон (АФБ) представляет собой смесь битума, минерального заполнителя и заполнителя. Благодаря такому составу он имеет высокую плотность и практически водонепроницаем. Кроме того, в сравнении с материалами на основе цемента АФБ обладает ещё несколькими важными преимуществами. Во-первых, по деформируемости он очень близок к грунтам, конструкции из АФБ деформируются совместно с грунтовым массивом, без нарушений сплошности. Во-вторых, АФБ способен воспринимать большие деформации без образования трещин, а также самозалечивать образовавшиеся трещины.

Из АФБ выполняют экраны и диафрагмы. В 1930-х годах были построены плотины Сорпе (Германия) и Бу-Ханифия, Де Гриб (Алжир) с асфальтобетонными экранами. Следует отметить, что конструкции экрана из асфальтобетона должна предусматривать защитные слои, которые часто устраиваются из цементосодержащих материалов.

Однако у асфальтобетонных экранов также есть существенные недостатки, которые связаны с зависимостью свойств АФБ от температуры. При высоких температурах он ведёт себя как тяжёлая жидкость, что приводит к его «оплыванию», сползанию экрана по откосу. При отрицательных температурах

АФБ становится жёстким и хрупким. На плотинах Монтгомери и Альма при отрицательных температурах в асфальтобетонных экранах наблюдалось образование трещин.

По этой причине с 1960-х годов ПФЭ из АФБ стали выполнять в виде диафрагмы. Первая плотина с асфальтобетонной диафрагмой была построена в 1961 г. в Германии. Такой тип ПФЭ подходит для климатических условий нашей страны. В нашей стране построены следующие каменно-набросные плотины асфальтобетонными диафрагмами: плотина Ирганайской ГЭС высотой 101 м (2008 г.) [17] и Богучанской ГЭС высотой 78 м [18]. Данный тип плотин имеет хорошие перспективы для дальнейшего применения.

Однако у плотин с диафрагмой из АФБ имеют ограничения по применению. До 2017 года самой высокой подобной плотиной была плотина Storglomvatn в Норвегии высотой 125 м². Расчётные исследования показывают, что сверхвысокие плотины с асфальтобетонной диафрагмой могут потерять свою устойчивость вследствие значительных горизонтальных смещений [19].

Кроме того, битум используется для создания *битумных рулонных гидроизоляционных изделий*. Битумные мембраны представляют собой тонкие (толщиной 2-6 мм) листы битума, армированные нитями из полиэстера или стекловолокном. Битум является эластомером, поэтому битумные мембраны хорошо приспособляются к деформациям грунтового массива, сохраняя при этом свою целостность и водонепроницаемость [20]. Во франкоязычных странах плотины и резервуары с применением битумных мембран получили широкое распространение, в т.ч. в районах с суровыми климатическими условиями.

Ещё одним видом рулонных гидроизоляционных изделий являются **геосинтетические геомембраны** [21-23] из искусственных пластмасс (полиэтилен, полиизобутилен, поливинилхлорид, полипропилен и др.). Преимуществом искусственных пластмасс (геосинтетиков) является их практически полная водонепроницаемость.

Впервые плотины с экранами из пластмассовых рулонных изделий появились во второй половине XX в. В 1959 г. была построена плотина Contrada Sabetta в Италии [24, 25], а в 1960 г. – плотина Dobsina (Добчина) в Чехословакии.

Следует отметить, что в первых плотинах экран из геосинтетической мембраны был заключён между бетонными плитами. Это связано с опасностью их прокола вследствие малой толщины (до 2 мм).

В середине XX в. рулонные геосинтетические изделия из полиэтилена и поливинилхлорида представляли собой тонкие плёнки толщиной в доли миллиметра³ [25,26]. По этой причине ПФЭ из полимерных плёнок на ранних этапах редко применялись в плотинах, использовались в основном во временных сооружениях – грунтовых перемычках. В постоянном сооружении геосинтетическая диафрагма была применена в России только в одном сооружении. На Атбашинской плотине (1960 г.) ПФЭ выполнен в виде диафрагмы из многослойной полиэтиленовой плёнки [27]. Максимальный напор на диафрагму составляет 39 м.

Недоверие к применению в плотинах геосинтетических изделий можно объяснить не только опасениями в возможности их механического повреждения, но и сомнениями в их долговечности.

Для решения этих проблем вместо тонких геосинтетических плёнок в конце XX века были созданы геомембраны. Они имеют толщину 1-3 мм⁴. Это резко снижает риск механических повреждений ПФЭ и увеличивает их долговечность. Кроме того, для защиты от проколов геомембраны защищают слоями геотекстиля (мягкий нетканый геосинтетический материал).

В настоящее время наибольшее применение нашли геомембраны из поливинилхлорида (ПВХ) и полиэтилена (ПЭ). Они обладают высокой прочностью на растяжение (примерно 10 МПа у ПВХ и 25 МПа у ПЭ). И ПВХ и ПЭ могут работать в широком диапазоне температур (до –60°С) и являются морозостойкими, что делает их привлекательными для устройства ПФЭ в суровых климатических условиях.

Основной проблемой использования геосинтетических материалов остаётся их постепенное «старение», т.е. деструкция и потеря изначальных свойств. Старение происходит в результате окислительных реакций, которым содействуют солнечная радиация и высокие температуры. В последнее время появились результаты исследований долговечности геомембран [28, 29], которые показали, что в условиях высоких температур гарантийный срок службы открытых геомембран из ПВХ составляет около 30 лет, а из ПЭ – около 40 лет. При работе во внутренних зонах плотины, где полимер защищён от воздействия температур и ультрафиолетового излучения, он практически не стареет [25, 30]. Поэтому срок службы ПЭ может достигать нескольких сотен лет [28, 29].

Это делает геомембраны хорошей альтернативой другим типам противофильтрационных элементов, в т.ч. выполненных из цементосодержащих материалов. Сооружения с диафрагмами и экранами из геосинтетиков активно строятся в разных странах мира. В частности, в перемычке плотины

² Höeg, K. Asphaltic Concrete Cores for Embankment Dams. Stikka Press, Norway, 1993. – 88p.

³ СН-551-82. Инструкция по проектированию и строительству противофильтрационных устройств из полиэтиленовой плёнки для искусственных водоёмов. – М., 1983. – 41с.

ГОСТ 10354-82. Пленка полиэтиленовая. Технические условия. М.: Стандартинформ, 2007. – 12с.

⁴ ГОСТ Р 56586-2015. Геомембраны гидроизоляционные полиэтиленовые рулонные. Технические условия. – М.: Стандартинформ, 2016. – 9с.

Gibe-III (Эфиопия) устроена зигзагообразная диафрагма из ПВХ, которая рассчитана на восприятие напора 44 м.

Примером применения экранов из геомембран в конструкциях современных плотин является плотина Камбаратинской ГЭС-2 в Киргизии (2010 г.), экран которой из ПВХ воспринимает напор 20 м [31]. Самой высокой плотиной с экраном на основе геомембраны является плотина Bovilla в Албании высотой 91 м [32]. Первоначально в данном створе планировалось строительство КНПБЭ, но затем БЭ был заменён на геосинтетический. При этом экран из геомембраны ПВХ толщиной 3 мм уложен на слой грунта, укрепленный цементом. А для защиты геосинтетического экрана от солнечного света и механических повреждений он был покрыт защитными бетонными плитами. По сути, данный экран на основе геомембраны является многослойным ПФЭ – полимерно-железобетонным экраном.

Таким образом, несмотря на то, что ПФЭ из асфальтобетона и геосинтетиков являются хорошей альтернативой традиционным ПФЭ из грунтовых и цементосодержащих материалов, они не могут составить им конкуренцию во всех сферах применения. Более того, при создании ПФЭ из асфальтобетона и геосинтетиков зачастую требуется применение цементосодержащих материалов.

Более того, при высоте плотин более 125 м ПФЭ из цементосодержащих материалов не имеют альтернативы. В 2017 г. в Китае было завершено строительство плотины Qixue высотой 164 м [33] с диафрагмой из АФБ, однако в нижней части данной плотины ПФЭ является бетонный массив. Это вновь подчёркивает актуальность применения цементосодержащих материалов в конструкциях высоких грунтовых плотин и позволяет рассматривать новые типы конструкции ПФЭ грунтовых плотин.

Современный опыт создания из бетона противофильтрационных конструкций каменно-набросных плотин

Единственным типом плотин с негрунтовым ПФЭ, который в настоящее время применяется при сверхвысоких напорах, являются КНПБЭ. Они получили большое распространение в странах Азии и Америки.

«Ренессанс» плотин с бетонными экранами произошёл в 1970-х годах. Это произошло благодаря внедрению новой технологии качественной насыпи крупнообломочных грунтов с виброуплотнением. Благодаря качественному уплотнению удалось существенно снизить деформируемость каменной наброски и, соответственно, уменьшить деформации БЭ. В 1980 г. в Бразилии была успешно построена построена плотина Foz do Areia с высотой 160 м [16]. Это открыло путь для создания сверхвысоких КНПБЭ.

На рубеже XX-XXI веков технология строительства КНПБЭ была усовершенствована. Для выравнивания поверхности под экраном стали применяться бордюрные блоки из малоцементного бетона, а для снижения трения между БЭ и подэкрановой зоной – слой битумной эмульсии [34]. Это позволило обеспечить более благоприятное НДС экрана. Для уплотнения швов между плитами БЭ стали применять шпонки из геосинтетических материалов, что позволило повысить гарантии обеспечения их герметичности. Для обеспечения трещиностойкости экрана плотины Shuibuya была использована объёмно распределённая арматура из геосинтетических материалов [34]. Эти решения повысили надёжность КНБЭ.

Самой высокой КНПБЭ в мире в настоящее время является плотина Shuibuya высотой 233 м в Китае [35]. В Китае строят планы по созданию ещё более высоких КНПБЭ [34].

Однако реализации этих планов препятствует уязвимость БЭ. В экранах целого ряда сверхвысоких КНПБЭ происходили аварийные ситуации повреждения БЭ [36-38]. Причины этого явления до конца не изучены, как и не созданы надёжные способы борьбы с ним. Некоторые российские авторы [14] в качестве единственного метода повышения безопасности КНПБЭ рассматривают дальнейшее уширение жёсткой подэкрановой зоны. Они считают использование жёстких и прочных цементосодержащих материалов «панацеей» от всех бед грунтовых плотин.

При этом игнорируется результаты зарубежного опыта. В XXI веке для ремонта бетонных и асфальтобетонных экранов высоких плотин стали осуществлять путём покрытия геомембранами [39]. Примерами могут служить плотины Salt Springs в США [40], Turimiquire и Венесуэле [41]. В последнем случае ремонт осуществлялся подводным способом.

Получившийся в результате такого ремонта ПФЭ является многослойным полимерно-бетонным экраном. В такой конструкции геомембрана защищена от механических повреждений жёстким бетонным экраном и слоями геотекстиля. Надёжность такого ПФЭ подтверждена опытом эксплуатации указанных плотин. Данный опыт может быть использован для создания новых надёжных конструкций ПФЭ в теле плотин.

Однако это не единственный способ создания новых, более надёжных конструкций ПФЭ из искусственных материалов. Можно использовать также опыт, полученный при создании ПФЭ в основании плотин.

Анализ опыта применения цементосодержащих материалов для противофильтрационных конструкций в основании грунтовых плотин.

Анализ показывает, что цементосодержащие материалы практически не имеют альтернативы при создании ПФЭ в основании.

Исключение составляют шпунтовые завесы из стали или дерева, которые имеют ограничения по применению по глубине и по инженерно-геологическим условиям. Они могут применяться только в

песчаных основаниях, во всех остальных случаях применяют противофильтрационные устройства из цементосодержащих материалов.

Эти устройства могут выполняться в виде завес или стен. Инъекционные завесы выполняют в скальных и гравийно-песчаных основаниях, а противофильтрационные стены (ПФС) – в основаниях практически всех типов. Технологии их создания стали развиваться с середины XX века, все они основаны на применении цементосодержащих материалов.

Метод создания инъекционных завес заключается в нагнетании под давлением в трещины и поры горной породы специальных растворов для снижения водопроницаемости породы. В трещины могут инъектироваться глиноцементные, цементные, битумные растворы, жидкое стекло [42]. Но чаще завесы устраиваются с использованием растворов на основе цемента: чисто цементных (цементационные завесы), цементно-глинистых и глинисто-цементных.

Методы создания инъекционных завес в крупнообломочных грунтах существенно отличаются по технологии от инъекций скальных пород вследствие наличия в грунте разветвлённой системы крупных пор [42-44]. Инъекцию производят не цементными, а глинисто-цементными (бентонито-глинистыми) растворами. Первая инъекционная завеса в аллювиальных крупнообломочных грунтах была выполнена на плотине Серр-Понсон (Франция) в 1954–1956 гг. [42]. Масштабные работы по устройству цементационной завесы были проведены в песчано-гравийном основании высотной Асуанской плотины, построенной во второй половине 1960х годов [45].

У инъекционных завес в нескальных грунтах есть серьёзный недостаток – для обеспечения фильтрационной прочности они должны иметь достаточно массивными. В соответствии с СП 39.13330.2012⁵ толщина инъекционной завесы в крупнообломочных грунтах должна составлять около 20% от напора. Соответственно, для устройства завес требуется большой объём работ и большой расход материалов.

Как альтернатива созданию инъекционных завес уже в 1950х годах был создан *метод «стены в грунте»*, т.е. метод создания ПФЭ в виде траншейной стены [44]. В СССР в 1957–1959х гг. такая стена из суглинисто-цементного материала впервые была выполнена в основании Чурубай-Нуринской плотины (на глубину до 40 м). Технология метода траншейных стен заключается в двух основных операциях. Первая операция – разработка траншеи под защитой бентонитового раствора, который предотвращает обрушение стенок траншеи и препятствует поступлению в траншею воды. Вторая операция – заполнение траншеи водонепроницаемым материалом (местные глинистые грунты или материалы на основе цемента). В настоящее время для устройства стен как правило применяются цементосодержащие материалы.

Траншейный метод создания ПФЭ получил широкое распространение. Этим методом была построена самая большая по площади противофильтрационная стена в мире – стена в основании плотины Керхе в Иране. Её площадь составляет 190000 м² [46]. Противофильтрационные стены выполнялись также в основании плотин Peribonka (Канада) [47], Merowe (Судан) [48], Dhauliganga (Индия), Watkins, Arminou (Кипр) [49]. На плотине Sylvenstein (Германия) методом «стена в грунте» был произведён ремонт противофильтрационной защиты основания, которая ранее была выполнена в виде инъекционной завесы [50].

Помимо траншейного метода для возведения противофильтрационных стен применяется *метод буросекущихся свай*. В этом методе стена возводится от отдельных, частично пересекающихся друг с другом свай. Выемка грунта под сваю производится под защитой обсадной трубы, которая позже извлекается. Диаметр устраиваемых свай составляет обычно 1,0÷1,4 м. Соответственно стена получается толщиной 0,8÷1 м.

Впервые стена из буросекущихся свай была устроена в 1940-1944 гг. в основании плотины Hales (США) для борьбы с фильтрацией в закарстованных известняках⁶. Метод буронабивных свай был использован в 2000-2002 гг. при ремонте плотины Курейской ГЭС [8-10], в ядре которой произошло образование сквозного фильтрационного хода. В 2013 году стена из буросекущихся свай была выполнена в основании Гоцатлинской плотины [51].

Траншейным методом противофильтрационные «стены в грунте» возводятся на глубину до 135 м [47], методом буросекущихся свай – на глубину до 40 м.

В последнее время стали применяться новые методы создания противофильтрационных стен – метод перемешивания и метод струйной цементации. В этих методах выемка грунта не производится – он входит в состав искусственного камня противофильтрационного устройства.

Метод перемешивания разработан в Японии в 1993 г. В этом методе смешивание цемента и грунта происходит в процессе разработки сваи. В 2008 г. он был использован для создания ПФЭ в теле и основании дамбы Herbert Hoovere вокруг озера Lake Okeechobe в США. Её длина составляет 21,4 мили, т.е. более 34 км.

⁵ СП 39.13330.2012. Плотины из грунтовых материалов. Актуализированная редакция СНиП 2.06.05-84*. – Москва. ФАУ «ФЦС», 2012. – 86 с.

⁶ Траншейные стенки в грунтах / Круглицкий Н.Н., Мильковский С.И., Шейнблум В.М. – Киев: Наукова Думка, 1973. – 280с.

Sainov, M.P.

Artificial Materials in Seepage-Control Structures of Embankment Dams: A Review; 2020; AlfaBuild; Volume 14 Article No 1405. doi: 0.34910/ALF.14.5

В методе струйной цементации (англ. jet grouting) струя цементного раствора или воды, подаваемая под давлением, размывает грунт, освобождая место для цементного раствора⁷. Давление составляет 35÷45 МПа при использовании цементного раствора и 5÷8 МПа при использовании воды. Этот метод был использован при создании ПФЭ в основании плотины Сангтудинской ГЭС-1 в Таджикистане [52].

Таким образом, к настоящему времени созданы технологии, которые позволяют создавать из цементосодержащих материалов противofильтрационные устройства практически в любых грунтах. Это позволяет применить перечисленные выше технологии создания подземных ПФЭ для создания новых ПФЭ и в теле грунтовых плотин.

Необходимо отметить, что опыт применения этих технологий для создания ПФЭ в теле плотины уже имеется.

Применение технологий подземных завес-стен для создания противofильтрационных конструкций тела плотин.

Инъекционная завеса является ПФЭ не только в основании, но в нижней части ряда высоких грунтовых плотин. Это Атбашинская, плотины Камбаратинской ГЭС-2 [31] и Майнской ГЭС [43].

Имеются случаи выполнения инъекционной завесы в теле грунтовой плотины в целях ремонта. Примером может служить Орто-Токойская плотина (Киргизия) высотой 52 м, в которой проводилась инъекция глинисто-цементного раствора для снижения фильтрации через тело плотины. Инъекция применялась также и для ремонта ядра плотины Болдерхед (Англия), в глинистом ядре которой в 1967 г. образовались фильтрационные ходы.

Метод «стена в грунте» также уже был применён для создания ПФЭ тела плотин. Ещё в 1970х -1980х годах методом «стена в грунте» были выполнены диафрагмы ряда грунтовых плотин [53]. Например, на плотине Wadi Hawashinah (Оман) высотой 6,5 м траншейным методом была устроена диафрагма толщиной 0,6 м. В 1970-х годах в Германии была построена плотина Формиц высотой 31 м, ПФЭ которой являлось ядро из илистых песков, а в её центре была устроена стена [54]. Стена толщиной 0,6 м возводилась траншейным способом с ярусами высотой 4 м. В качестве материала диафрагмы был использован более мягкий материал, чем бетон, – глиноцементобетон.

Имеются примеры создания новых противofильтрационных диафрагм в теле ремонтируемых плотин траншейным методом – это плотины Fontenelle, Mud Montain (США).

Метод буросекущихся свай был применён для ремонта нескольких каменно-земляных плотин, в противofильтрационных ядрах которых образовались трещины. Примером является плотина Курейской ГЭС, на одном из участков которой в 1992 г. произошла аварийная ситуация потерей ядром своей герметичности [8-10]. Ремонт плотины было предложено осуществить путём создания нового ПФЭ из буронабивных свай. Он был выполнен в 1998-1999 гг. и после этого плотина продолжает успешно эксплуатироваться.

В настоящее время методом буросекущихся свай возведена глиноцементобетонная диафрагма Нижне-Бурейской ГЭС [55]. Диафрагма имеет высоту около 33 м и толщину 0,85 м.

Метод струйной цементации был использован для создания временного ПФЭ перемычки плотины Xianlongdi в Китае [56].

На основании данного опыта выдвигаются разными авторами предложения о расширении сферы применения ПФЭ из негрунтовых материалов в конструкциях грунтовых плотин, они могут быть альтернативой для ставших традиционными ПФЭ из грунтовых материалов (ядрам и экранам из глинистых грунтов).

4 Conclusions

1. Диапазон негрунтовых строительных материалов и изделий, которые могут быть использованы для противofильтрационных устройств грунтовых плотин, за последнее столетие значительно расширился. Это создаёт новые перспективы для совершенствования конструкций грунтовых плотин, для повышения их эффективности и безопасности.

2. Среди искусственных строительных материалов, цементосодержащие материалы играют уникальную роль. Они могут использоваться как непосредственно для создания противofильтрационных конструкций, так и в составе более сложных, составных конструкции ПФЭ. Комбинирование различных по свойствам искусственных строительных материалов является перспективным способом создания новых типов ПФЭ грунтовых плотин. В этих составных конструкциях ПФЭ материалы на основе цемента могут выполнять важную защитных и подстилающих слоев.

3. Опыт создания из цементосодержащих материалов ПФЭ в основании плотин может быть использован для создания новых ПФЭ для тела грунтовых плотин.

4. Можно ожидать дальнейшего расширения сферы применения искусственных материалов, в т.ч. цементосодержащих, в строительстве грунтовых плотин.

⁷ Бройд И.И. Струйная геотехнология. – М.: АСВ, 2004. – 448 с.
Sainov, M.P.
Artificial Materials in Seepage-Control Structures of Embankment Dams: A Review;
2020; AlfaBuild; Volume 14 Article No 1405. doi: 0.34910/ALF.14.5

References

1. Sokolov I.V., Marchuk A.N., Tsarev A.I., Alipov V.V., Kuzmin K.K., Kuznetsov V.S., Aleksandrovskaya E.K., Pavlov V.L. Napryazhennoye sostoyaniye plotin pri poyetapnom puske Sayano-Shushenskoy i Nurekskoy GES [Stress state of dams during staged start-up of the Sayano-Shushenskoe and Nurek hydroelectric stations]. *Gidrotekhnicheskoye stroitelstvo* [Hydraulic engineering]. 1986. 20(1). Pp.14–19.
2. Orekhov V.V., Alekseyev G.V. Otsenka bezopasnosti plotiny iz gruntovykh materialov [Safety Assessment of Dam from Soil Materials]. *Stroitelnyye materialy i izdeliya* [Building materials and products]. 2019. 2(4). Pp.45–49.
3. Wang, J.-J., Zhu, J.-G., Mroueh, H., Chiu, C.F. Hydraulic fracturing of rock-fill dam. *International Journal of Multiphysics*. 2007. 1(2). Pp.199-219.
4. Rasskazov L.N., Aniskin N.A., Sainov M.P. Analiz sostoyaniya gruntovoy plotiny Kolymskoy GES [Analysis of the state of the soil dam of the Kolyma hydroelectric station]. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2009. 2. Pp.111–118.
5. Sharma, R.P., Kumar, A. Case Histories of Earthen Dam Failures. *International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering*. 2013. 8. <https://scholarsmine.mst.edu/icchge/7icchge/session03/8>
6. Vaughan P.P., Kluth D.J. et al. Cracking and erosion of the rolled clay core of Balderhead dam and the remedial works adopted for its repair. 10th ICOLD Congress. 1970. Q.36. R.5. Pp. 73–93.
7. Nichiporovich A.A., Teytelbaum A.I. Otsenka treshchinoobrazovaniya v yadrakh kamennozemlyanykh plotin. *Gidrotekhnicheskoye stroitelstvo* [Hydraulic engineering]. 1973. 4. Pp.10–27.
8. Malyshev L.I., Rasskazov L.N., Soldatov P.V. Sostoyaniye plotiny Kureyskoy GES i tekhnicheskkiye resheniya po yeye remontu. *Gidrotekhnicheskoye stroitelstvo* [Hydraulic engineering]. 1999. 1. Pp.31–36.
9. Malyshev L.I., Shishov I.N., Kudrin K.P., Bardyugov V.G. Tekhnicheskkiye resheniya i rezultaty rabot po sooruzheniyu protivofiltratsionnoy steny v grunte v yadre i osnovanii Kureyskoy GES [State of the Kureyskaya HPP dam and technical solutions for its repair]. *Gidrotekhnicheskoye stroitelstvo* [Hydraulic engineering]. 2001. 3. Pp.31–36.
10. Bardyukov V.T., Izotov V.N., Grishin V.A., Radchenko V.G., Shishov I.N. Remont plotiny Kureyskoy GES [Dam repair at Kureyskaya HPP]. *Izvestiya Vserossiyskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta gidrotekhniki im. B.E. Vedenev* [Bulletin of VNIIG im. B.E.Vedeneeva]. 2000. 238. Pp.92–96.
11. Zairova V.A., Filippova E.A., Orishchuk R.N., Sozinov A.D., Radchenko S.V. Vybor protivofiltratsionnogo ustroystva v variantakh plotin Kankunskogo gidrouzla [The choice of an seepage-control in the dam options of the Cancun hydroelectric complex]. *Gidrotekhnicheskoye stroitelstvo* [Hydraulic engineering]. 2010. 2. Pp.8–13.
12. Korchevskiy F.V., Malyshev A.M., Kolichko A.V., Orekhov V.V. Kankunskaya GES na r.Timpton v Respublike Sakha (Yakutiya): variant gruntovoy plotiny s yadrom iz ukatannogo betona [Kankunskaya hydroelectric power station on the Timpton River in the Republic of Sakha (Yakutia): a variant of a soil dam with a core of rolled concrete]. *Gidrotekhnicheskoye stroitelstvo* [Hydraulic engineering]. 2010. 2. Pp.11–22.
13. Sainov M.P., Kotov F.V. Sravneniye variantov konstruksii vysokoy kamennoy plotiny v usloviyakh Yakutii Comparison of high rockfill dam design options in Yakutia [Comparison of high rockfill dam design options in Yakutia]. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2011. 5. Pp.30–35.
14. Rasskazov L.N., Sainov M.P. Numerical Investigation of Reliability of a High Earthen Dam with a Reinforced-concrete Shield and Sub-Shield Zone Formed from Soil-Cement Concrete. *Power Technology and Engineering*. 2012. 46(2). Pp. 116–120.
15. Sainov, M.P., Soroka, V.B. Ultra-high rockfill dam with combination of the reinforced concrete face and clay-cement diaphragm. *Magazine of Civil Engineering*. 2018. 81(5). Pp.135-148
16. Sainov M.P., Yuryeva E.A. Kamennonabrosnyye plotiny s zhelezobetonnyim yekranom: yevolyutsiya konstruksii [Structures of concrete faced rockfill dams in historical retrospective]. *Stroitelstvo unikalnykh zdaniy i sooruzheniy* [Construction of Unique Buildings and Structures]. 2018. 9(72). Pp.46–60. DOI: 10.18720/CUBS.72.3.

17. Kostin V.V., Neykovskiy A.A., Yurkevich B.N. Gruntovaya plotina Irganayskoy GES [Embankment dam of the Irganai HPP]. *Gidrotekhnicheskoye stroitelstvo [Hydraulic engineering]*. 2007. 6. Pp.60–65.
18. Kasatkin Yu.N., Lyadov Yu.D., Noginov Yu.N., Romanov Yu.V. Vozvedeniye asfaltobetonnoy diafragmy kamennonabrosnoy plotiny Boguchanskoy GES [Construction of an asphalt concrete diaphragm of a rockfill dam at the Boguchanskaya HPP]. *Gidrotekhnicheskoye stroitelstvo [Hydraulic engineering]*. 1996. 6. Pp.45–48.
19. Orekhov V.V. Napryazhenno-deformirovannoye sostoyaniye sverkhvysokoy gruntovoy plotiny s asfaltobetonnoy diafragmoy [Stress-strain state of an ultrahigh soil dam with an asphalt concrete diaphragm]. *Gidrotekhnicheskoye stroitelstvo [Hydraulic engineering]*. 2015. 5. Pp.57–59.
20. Meglen Zh., Brel B., Gordin A. Ispolzovaniye bitumnoy geomembrany dlya gidroizolyatsii damby khvostokhranilishcha mednogo rudnika i yeye povedeniye pri zemletryaseni v 7,5 ballov. *Gidrotekhnika*. 2013. 3. Pp.73–75.
21. Lysenko V.P., Belyshev A.I. Polimernyye plenochnyye materialy v protivofiltratsionnykh konstruktsiyakh gruntovykh sooruzheniy [Polymeric film materials in antifiltration structures of soil structures]. *Gidrotekhnicheskoye stroitelstvo [Hydraulic engineering]*. 1988. 11. Pp.30–33.
22. Lupachev O.Yu., Teleshev V.I. Primeneniye geosinteticheskikh materialov v gidrotekhnicheskoye stroitelstve [The use of geosynthetics in hydraulic engineering]. *Gidrotekhnika [Hydraulic engineering]*. 2009. 1(14). Pp.71–75.
23. Glagovskiy V.B., Solskiy S.V., Lopatina M.G., Dubrovskaya N.V., Orlova N.L. Geosinteticheskiye materialy v gidrotekhnicheskoye stroitelstve [Geosynthetics in hydraulic engineering]. *Gidrotekhnicheskoye stroitelstvo [Hydraulic engineering]*. 2014. 9. Pp.23–27.
24. Cazzuffi, D. The use of geomembranes in Italian dams. *International Water Power & Dam Construction*. 1987. 39(3). Pp. 17–21.
25. Reltov B.F., Krichevskiy I.E. Perspektivy primeneniya rulonnykh plastmass v kachestve yekranov plotin iz mestnykh materialov [Prospects for the use of rolled plastics as face for dams made from local materials]. *Gidrotekhnicheskoye stroitelstvo [Hydraulic engineering]*. 1964.1. Pp.29–32.
26. Popchenko S.N., Glebov V.D., Igonin Kh.A. Opyt primeneniya polimernykh materialov v gidrotekhnicheskoye stroitelstve [Experience in the use of polymer materials in hydraulic engineering]. *Gidrotekhnicheskoye stroitelstvo [Hydraulic engineering]*. 1973.12. Pp.9–13.
27. Zinevich N.I., Lysenko V.P., Nikitenkov A.F. Tsentralnaya plenochnaya diafragma plotiny Atbashinskoy GES [Central film diaphragm of the dam of Atbashinskaya HPP]. *Yenergeticheskoye stroitelstvo [Energy construction]*. 1974. 3. Pp. 59–62.
28. Koerner, R.M., Hsuan, Y.G., Koerner, G.R. Lifetime predictions of exposed geotextiles and geomembranes. *Geosynthetics International*. 2017. 24(2). Pp. 198–212.
29. [Tian, K., Benson, C.H., Tinjum, J.M., Edil, T.B. Antioxidant Depletion and Service Life Prediction for HDPE Geomembranes Exposed to Low-Level Radioactive Waste Leachate. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. 2017. No.143\(6\). URL: \[http://ascelibrary.org/doi/pdf/10.1061/\\(ASCE\\)GT.1943-5606.0001643\]\(http://ascelibrary.org/doi/pdf/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0001643\)](http://ascelibrary.org/doi/pdf/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001643)
30. Skladnev M.F., Glebov V.D., Lysenko V.P. Nekotoryye problemy primeneniya plenochnykh materialov dlya yekranirovaniya gidrotekhnicheskikh sooruzheniy [On the design and construction of Kambarata hydroelectric power plants on the Naryn River in the Kyrgyz Republic]. *Gidrotekhnicheskoye stroitelstvo [Hydraulic engineering]*. 1977. 9. Pp.15–17.
31. Korchevskiy V.F., Obopol A.Yu. O proyektirovanii i stroitelstve Kambaratinskikh gidroyelektrostantsiy na r.Naryne v Kirgizskoy Respublike [On the design and construction of Kambarata hydroelectric power plants on the Naryn River in the Kyrgyz Republic]. *Gidrotekhnicheskoye stroitelstvo [Hydraulic engineering]*. 2012. 2. Pp.2–12.
32. Sembenelli, P., Sembenelli, G. and Scuero, A. Bovilla: A Product of Dam History. *Geotechnical Fabrics Report*. IFAI Publishers. 1998. 16(6). Pp. 30–36
33. Radchenko V.G., Abramova E.V. Samaya vysokaya v mire kamunno-nabrosnaya plotina s asfaltobetonnoy diafragmoy [The highest rockfill dam in the world with an asphalt concrete diaphragm]. *Gidrotekhnika. XXI vek [Hydrotechnics. XXI Century]*. 2018. 34(2). Pp.8–11
34. 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
35. Song W, Sun Y, Li L, Wang Y. Reason analysis and treatment for the 1st phase slab cracking of Shuibuya CFRD. *Journal of Hydroelectric Engineering*. 2008. 3(27). Pp. 33–37

36. Freitas, M.S.Jr. Concepts on CFRDs Leakage Control – Cases and Current Experiences. ISSMGE Bulletin. 2009. 3(4). Pp. 11–18.
37. Ma, H., Chi, F. Technical progress on researches for the safety of high concrete-faced rockfill dams. Engineering. 2016. 2. Pp. 332–339.
38. Sainov M.P., Zatoniskikh M.A. Povrezhdeniye zhelezobetonnykh yekranov kamenno-nabrosnykh plotin: fakty, vozmozhnyye prichiny i sposoby predotvrashcheniya [Structural cracks initiation in reinforced concrete faces of rockfill dams]. Stroitelstvo unikalnykh zdaniy i sooruzheniy [Construction of Unique Buildings and Structures]. 2018. 10(73). Pp.16–27. DOI: 10.18720/CUBS.73.2.
39. Scuro, A.M. and Vaschetti, G.L. Repair of CFRDs with synthetic geomembranes in extremely cold climates. Proceedings, Hydro 2005 – Policy into practice. Villach. 2005. Pp. 59–68.
40. Sembenelli P., and Rodriguez, E. A. Geomembranes for Earth and Earth-Rock Dams: State-of-the-Art Report. Proc. Geosynthetic Applications, Design and Construction. M. B. de Groot, et al., Eds., A.A. Balkema. 1996. Pp. 877–888.
41. Scuro, 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.
42. Bobrov R.I. Inyeksionnyye zavesy v neskalknykh porodakh [Injection curtains in non-rock formations]. Gidrotekhnicheskoye stroitelstvo. 1963 [Hydraulic engineering]. 7. S.47–56.
43. Zhurkina N.N. Inyeksionnaya zavesa v osnovanii gruntovoy plotiny Maynskoy GES [Injection curtain at the base of the main dam of the Main HPP]. Gidrotekhnicheskoye stroitelstvo [Hydraulic engineering]. 1987. 11. Pp.39–42.
44. Ganichev I.A., Meshcheryakov A.N., Kheyfets V.B. Novyye sposoby ustroystva protivofiltratsionnykh zaves [New methods of installation of impervious curtains]. Gidrotekhnicheskoye stroitelstvo [Hydraulic engineering]. 1961. 2. Pp.14–18.
45. Shaytanov V.Ya. Organizatsiya proyektirovaniya i stroitelstva Vysotnoy Asuanskoj plotiny na r.Nil v Respublike Yegipet [Organization of design and construction of the High Aswan Dam on the Nile River in the Republic of Egypt]. Gidrotekhnicheskoye stroitelstvo [Hydraulic engineering]. 2014. 9. Pp.8–22.
46. Mirghasemi, A.A., Pakzad, M., Shadravan, B. The world's largest cutoff wall at Karkheh dam. The International Journal on Hydropower & Dams. 2005. Issue 2. Pp. 2–6.
47. Balian, S. Cut-Off Wall Construction at Peribonka dam. International Water Power & Dam Construction. 2007. No.59(2). Pp. 42–44.
48. Ehrhardt, T., Scheid, Y., El Tayeb, A. Entwurf und ausfuhrung der steinschuttdamme und der schlitzwand des Merowe-Projektes. WasserWirtschaft. 2011. 101(1-2). Pp. 36–42.
49. Brown, A.J., Bruggemann, D.A. Arminou Dam, Cyprus, and construction joints in diaphragm cut-off walls. Geotechnique. 2002. 52(1). Pp. 3–13.
50. Noll, H., Langhagen, K., Popp, M., Lang, T. Rehabilitation of the sylvenstein earth-fill dam - Design and construction of the cut off wall [Ertuchtung des Sylvenstein-Staudamms - Planung und Ausfuhrung der Dichtwand]. WasserWirtschaft. 2013. 103(5). Pp. 76–79.
51. Korolev V.M, Smirnov O.E., Argal E.S., Radzinskii A.V. Novoye v sozdanii protivofiltratsionnogo yelementa v tele gruntovoy plotiny [New in creating an anti-filter element in the body of a soil dam], Gidrotekhnicheskoye stroitelstvo [Hydraulic engineering]. 2013. 8. Pp.2–9.
52. Tsoy M.S.D., Aldanov A.G., Radchenko V.G., Semenov Yu.D., Danilov A.S., Smolenkov V.Yu. Vozvedeniye protivofiltratsionnoy zavesy metodom struynoy tsementatsii v osnovanii plotiny Sangtudinskoy GES-1 [Construction of an airtight curtain by spray cementation at the base of the dam of Sangtuda-1]. Gidrotekhnicheskoye stroitelstvo [Hydraulic engineering]. 2008. 5. Pp.32–37.
53. Radchenko V.G., Lopatina M.G., Nikolaychuk E.V., Radchenko S.V. Opyt vozvedeniya protivofiltratsionnykh ustroystv iz gruntotsementnykh smesey [Experience in the construction of seepage-control devices from soil-cement mixtures]. Gidrotekhnicheskoye stroitelstvo [Hydraulic engineering]. 2012. 12. Pp.46–54.
54. Carl L., Strobl Th. Dichtungswände aus Zement-Bentonitsuspension. Wasserwirtschaft. 1976. 66(9). Pp. 246–252.
55. Borzunov V.V., Musayev A.Sh., Kadushkina E.A. Optimizatsiya projektnykh resheniy i usovershenstvovaniya konstruktsiy osnovnykh sooruzheniy Nizhne-Bureyskoj GES [Optimization

- of design decisions and improvement of structures of the main structures of the Nizhne-Bureyskaya HPP]. *Gidrotekhnicheskoye stroitelstvo* [Hydraulic engineering]. 2017. 4. Pp.2–15.
56. Zakharov S.V., Radchenko V.G., Semenov Yu.D., Sulimov V.S., Smolenkov V.Yu., Taymaskhanov A.M. Metod struynoy tsementatsii v gidrotekhnicheskoye stroitelstvo [The method of jet grouting in hydraulic engineering]. *Gidrotekhnicheskoye stroitelstvo* [Hydraulic engineering]. 2008. 4. Pp.2–11.