



ISSN 2658-5553

Asphalt Concrete Faces of Embankment Dams: A Review

Sainov, Mikhail Petrovich^{1*} 
Poslykhalin, Yuriy Andreevich¹ 

¹ Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russian Federation; SainovMP@mgsu.ru; (S.M.P.); awer1999@mail.ru (P.Y.A.)

Correspondence: * email SainovMP@mgsu.ru; contact phone [+74992874914*1427](tel:+749928749141427)

Keywords:

Asphalt concrete faced dam; Asphalt concrete; Bituminous concrete; Embankment dam

Abstract:

Introduction. Embankment dams with asphalt concrete face have been used already 100 years; in the XX-th century, several hundreds of such embankment dams were built. However, asphalt concrete coatings were primarily used in Europe, and in other countries, including Russia, they were not widely used. For assessing advantages and disadvantages and prospects of further use of asphalt concrete face in embankment dams, the authors analyzed the development of these structures in a historical retrospective. For compiling a historical survey, there were used hard-to-get publications of the previous years. **Results.** The experience of the first half of the XX-th century in using bituminous materials in embankment dams showed that asphalt concrete faces showed the greatest safety and effectiveness. In the 1950-s there were developed typical reliable methods of creating asphalt concrete faces. Their implementation permitted considerably wider use of asphalt concrete faces in embankment dams. However, using asphalt concrete faces is still restricted due to the negative impact of temperature effects on asphalt concrete properties. More often, the seepage-control elements of embankment dams are made as asphalt concrete diaphragms or geo-membranes. The article gives information about cases of asphalt concrete failures; their disadvantages are analyzed and several methods of their overcoming. **Conclusion.** Experience in the operation of modern asphalt concrete faces evidence about the safety of these structures, but further refinement is required for widening the sphere of their use.

1 Introduction

Битум обладает уникальными свойствами – высокой водонепроницаемостью, гибкостью, хорошей адгезией к бетонным поверхностям. Благодаря тому, что битум представляет собой тяжёлую жидкость, он способен заполнять пустоты и трещины. Поэтому битум, изделия и материалы из него выполняют важную роль в строительстве. В промышленном и гражданском строительстве битумные изделия используются для герметизации конструкций зданий и сооружений, а в транспортном строительстве на основе битума создается асфальтобетон для покрытия автомобильных дорог.

В гидротехническом строительстве битумные материалы используются для борьбы с фильтрацией из каналов, водоёмов и плотин, а также для гидроизоляции гидротехнических сооружений.

В гидротехнике используется целый ряд материалов и изделий на основе битума: битумные мастики, битум-маты, асфальт, асфальтобетон, битумные геомембраны и др. В отличие от чистого битума битумные материалы содержат минеральные добавки, которые придают им дополнительные свойства. Крупный (щебень) и мелкий (песок) заполнитель формирует жёсткую структуру, обеспечивая сдвиговую прочность материала и снижение его деформируемости. Минеральный наполнитель (обычно в виде порошка) заполняет поры, обеспечивая снижение водопроницаемости и сохранность состава асфальтобетона.

Битумная мастика – это битумный материал, который представляет собой смесь битума с минеральным наполнителем. Она обладает большей вязкостью, чем битум.

Битумные маты – это изделия, которые состоят из одного или нескольких слоёв гидроизоляционной ткани, на обе стороны которого нанесён битум или асфальтовая мастика.

Асфальт, асфальтовый раствор – это смесь песка и асфальтового битума.

Асфальтобетон – это искусственный каменный материал на основе органического вяжущего – асфальтового битума. Он представляет собой пластичную смесь минерального материала (щебня, песка, минерального порошка) с асфальтовым битумом.

Битумные материалы и изделия активно применяются в гидротехническом строительстве уже около века. В конструкциях грунтовых плотин они используются для создания противофильтрационных устройств. Наибольшее распространение получили экраны из асфальтобетона – грунтовые плотины с асфальтобетонным (или асфальтовым) экраном (АБЭ) строятся и эксплуатируются уже более 100 лет. В данной публикации мы рассмотрим опыт применения АБЭ, отчасти затронув вопросы применения других битумных материалов. Это позволит оценить преимущества и недостатки АБЭ, а также перспективы их дальнейшего применения.

2 Materials and Methods

Чтобы систематизировать информацию об опыте применения асфальтобетонных экранов, нами был выполнен ретроспективный анализ развития конструкций и технологий возведения грунтовых плотин с АБЭ, а также проблем их эксплуатации.

Большой объём информации был получен из трудов Международного конгресса по большим плотинам (ICOLD) [1]. Для составления исторического обзора потребовалось использовать издания и источники, некоторые из которых в настоящее время являются труднодоступными [2-7]. Ценность этих трудов заключается не только в наличии описаний и графического материала о реальных плотинах с АБЭ, но и в описании фактов из истории их строительства. Они ближе к первоисточникам, чем современная литература.

При выполнении ретроспективного анализа мы столкнулись с несколькими трудностями по поиску и верификации информации. Сложность поиска информации была связана с изменением наименования плотин и трактовке терминов. Ещё бóльшую трудность представляла верификация научно-технической информации, содержащейся в различных источниках. Был выявлен ряд противоречий в имеющихся фактах. Нами была проделана большая работа по подтверждению имеющейся информации, однако некоторые из них не удалось подтвердить документально.

Для анализа информации о современных плотинах с АБЭ, проблем применения асфальтобетонных экранов и путей их решения использовались современные публикации, которые приведены в списке литературы.

3 Results and Discussion

Выполненный нами обзор информации о развитии конструкций и технологий создания АБЭ представлен в хронологическом порядке.

Известно, что природные битумы и асфальты использовались в строительстве с глубокой древности. Имеются сведения, что битум стали применять для гидроизоляции плотин ещё в древнем Междуречье [1]. В Пакистане (в Мохенджо-Даро) уже несколько тысячелетий существует резервуар, гидроизолированный асфальтом [8].

Однако полноценные противофильтрационные устройства из битумных материалов стали создавать в плотинах только в XX веке. Считается, что впервые противофильтрационный элемент из битумного материала был устроен в 1910 г. в США [1]. Соответственно, история применения битумных материалов в грунтовых плотинах насчитывает уже более 100 лет.

В ней можно выделить два основных этапа. На первом этапе, в 1910-1950-х годах происходило накопление опыта применения битумных материалов, пока наконец в 1950-х годах не были выбраны несколько наиболее подходящих конструктивных решений. Их использование позволило перейти на втором этапе, с 1950-1960-х годов, к активному применению битумных материалов, прежде всего асфальтобетона, для строительства масштабных грунтовых плотин.

3.1 Ранние примеры применения битумных материалов

Самой первой грунтовой плотинной с противофильтрационным элементом из битумного материала считается плотина Central высотой 17 м (США) [1]. На этой плотине в 1910 г. был

устроен экран толщиной 10 см (Наши документные изыскания показали, что экран плотины Central, по-видимому, был устроен в ходе её реконструкции после повреждения).

Ориентировочно в 1920-1921 годах (возможно раньше) для создания водохранилища Devero/Codelago в итальянских Альпах было построено две плотины: Codelago (высота 19,5 м по данным [3]) и Devero (высота 31 м по данным [2]). Водонепроницаемость каменно-набросной плотины Devero обеспечивается двумя слоями асфальта [2] толщиной 5 см [3]. Асфальтовый экран был плотины Devero является закрытым, он защищён от внешних воздействий специальным покрытием (рис.1). Поверхность экрана покрыта штукатуркой из цементного раствора и закрыта гранитными блоками, скреплённых цементным раствором. Плотины Codelago и Devero эксплуатируются по сей день, уже 100 лет.

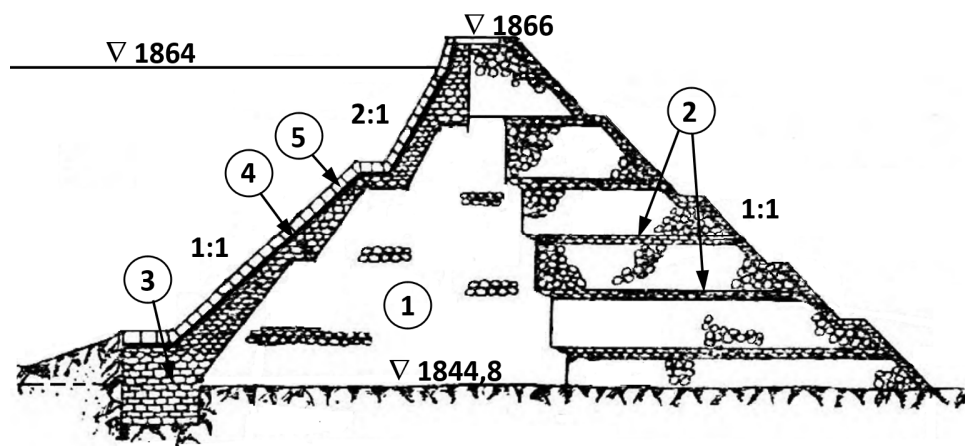


Рис. 1 - Конструкция плотины Devero в соответствии с [2]

1 – каменная наброска, 2 – сухая кладка камня, 3 – кладка камня на растворе, 4 – слой асфальта, покрытый цементной штукатуркой, 5 – облицовка из гранитных блоков.

Fig. 1 - Devero dam construction according to [2]

1 – rock placement, 2 – dry stone masonry, 3 – mortar-based stone masonry, 4 – asphalt layer covered with cement plaster, 5 – facing from granite blocks.

Затем, около 1923 года, асфальтобетонное покрытие было использовано для гидроизоляции верхней части плотины Mulungushi высотой 46 м, расположенной в Замбии (Информация получена из диссертации Chebbah Lynda 2020 года (Алжир)). Открытый экран был выполнен из смеси гравия с битумом. По-видимому, слой гравия проливался горячим битумом, что создавало асфальтобетонный экран. Такой экран воспринимал напор в несколько метров, и имел толщину 10 см. Впоследствии потребовалась его замена.

В начале XX века покрытия из битумосодержащих материалов не рассматривались в качестве полноценного способа обеспечения герметичности плотин. Битумные материалы применялись как дополнительная мера в конструкции бетонных и деревянных экранов. Это вызвано опасениями в возможности повреждения битумных изделий.

Имеются сведения [2], что покрытие из асфальта было использовано для повышения водонепроницаемости бетонного экрана каменно-набросной плотины Strawberry высотой 45,8 м, построенной в США в 1917 г. При этом бетонный экран плотины Strawberry был уложен по слою битумной мастики.

Таким образом, уже в самый ранний период наметились два основных направления применения битумных материалов в конструкциях грунтовых плотин:

Первое – использование битумных материалов для повышения герметичности противофильтрационных элементов, выполненных из других материалов, а также для обеспечения герметичности их швов.

Второе – использование битумных материалов в качестве основных противофильтрационных элементов.

Далее рассмотрим, какое развитие эти направления применения битумных материалов получили в дальнейшем.

3.2 Применение битумных материалов в составе сложных противофильтрационных конструкций.

Материалы из битума применялись в составе самых разнообразных противофильтрационных конструкций. Для обеспечения надёжности их гидроизоляции использовались битумматы и асфальт.

Тонкие битумматы толщиной в несколько миллиметров применялись в составе деревобитумных экранов. Деревобитумные экраны применялись Малоульбинской (1938 г.) и Широковской (1948 г.) плотинах [3,6]. Малоульбинская и Широковская плотины – полунабросные и имеют высоту соответственно 34,5 м и 40 м. На земляной плотине Нижне-Туломской ГЭС (1937 г.) битумные маты толщиной 1 см укладывались поверх песчано-супесчаного экрана [3].

В 1950 г. в Швеции была построена плотина Nissaström высотой 17 м и длиной 100 м. Сборный железобетонный экран этой плотины сверху был покрыт деревобитумным экраном [4].

Асфальт применялся для дополнительной герметизации металлической диафрагмы плотины Lower Otay, построенной в 1897 г. в США [3]. Эта плотина имела высоту 45,7 м.

Большое применение битумные материалы нашли в конструкциях бетонных и железобетонных экранов грунтовых плотин. Можно привести несколько примеров.

Битумные маты были применены на плотине Терухтерес, построенной в Мексике в 1929 г. Эта плотина была построена высотой 37,5 м [2]. Она выполнена из сухой кладки камня и имеет уклон верховой грани 1:0,7 (рис.2). Противофильтрационный экран плотины Терухтерес выполнен многослойным: он состоит из двух слоёв битумных матов и двух слоёв бетона, которые перемежаются друг с другом [2,6]. Использовались битумные маты толщиной 25 мм. Суммарная толщина экрана составляет 0,5÷0,7 м. Битум был использован также для уплотнения швов между бетонными плитами.

Традиционно плотину Терухтерес относят к плотинам с железобетонным экраном, но фактически она является плотиной со смешанным экраном, который можно обозначить как бетонно-битумный.

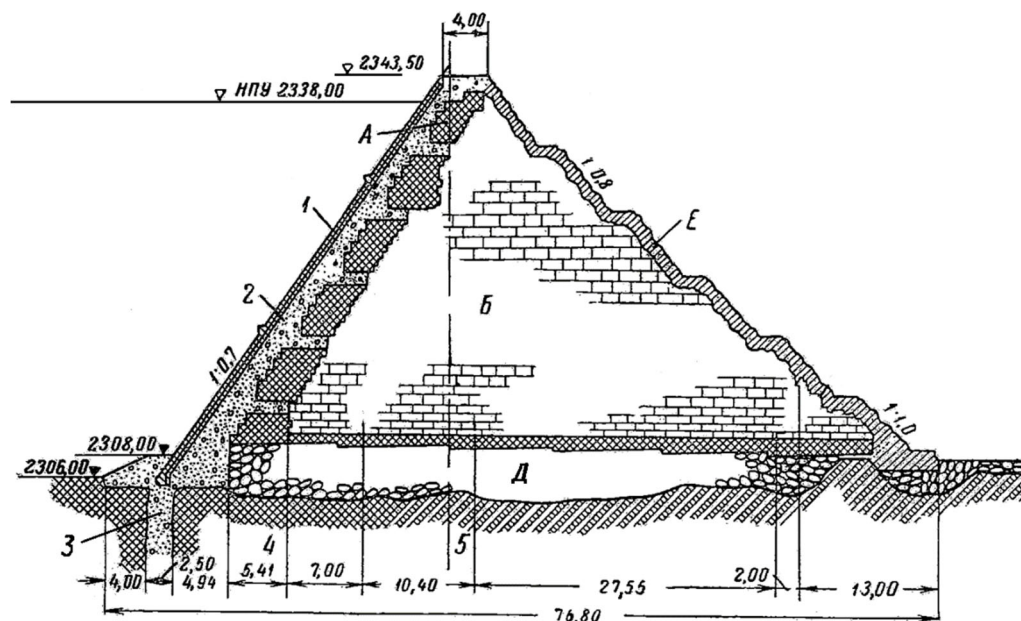


Рис. 2 - Конструкция плотины Терухтерес по [3]

1 – железобетонный слоистый экран толщиной 50-70 см; 2 – бетонные блоки размером 3×1,3 м; 3 – бетонный зуб; 4 – вулканические шлаки; 5 – слоистый базальт; А – плотная сухая кладка из крупных камней с пустотностью 20%; Б - кладка из крупных камней с пустотностью более 20%; Д – кладка камня на растворе; Е – кладка штучного камня

Fig. 2 - Teruxtepec dam structure according to [3]

1 – reinforced concrete laminated screen 50-70 cm thick; 2 - concrete blocks 3×1.3 m in size; 3 – concrete tooth; 4 – volcanic slags; 5 – layered basalt; А – dense dry masonry of large stones with a voidage of 20%; Б – masonry of large stones with a voidness of more than 20%; D – laying a stone on a solution; Е – masonry piece stone

Можно привести примеры использования асфальтовых покрытий в конструкциях бетонных экранов. Это Карачуновская и Касан-Сайская плотины, которые были построены в СССР.

Карачуновская плотина была построена в 1938 году на территории Украины. Плотина каменно-набросная, заложение верхового откоса изменяется от 1 (вверху) до 1,25 (внизу) [2]. Высота плотины составляет 23 м. Толщина плит железобетонного экрана составляет от 0,3 м до 0,45 м, плиты железобетонного экрана соединены шпонками, что обеспечивает его герметичность. Однако этот экран уложен на слое асфальта толщиной 5 см.

Строительство Урто-Токойской плотины началось в 1941 г. до начала Великой Отечественной Войны, а завершено в 1953 г. Урто-Токойская/Орто-Токайская (с 1958 года Касан-Сайская) плотина построена в Кыргызстане/Узбекистане [4]. Информация о Касан-Сайской плотины получена нами из первоисточника (Кузовлев Г.М. Опыт строительства каменнонабросной плотины с железобетонным экраном и асфальтовой прослойкой // Гидротехническое строительство. 1968. No.1. С.14–16).

Высота каменно-набросной Касан-Сайской плотины составляет 35 м. Заложение верхового откоса плотины составляет 1,25. Экран состоит из двух слоёв бетонных плит размером 7,5×7,5 м толщиной по 20 см, между которыми уложен слой материала на основе битума. По данным Г.М. Кузовлева этот слой выполнен из асфальтовой мастики, а по данным [4] – из мешковины, пропитанная битумом, т.е. битум-маты. В составе мастики 40% битума. Инж. Г.М. Кузовлев относил экран плотины Урто-Токойской плотины к бетонному с асфальтовой прослойкой.

Есть примеры применения смешанных, бетонно-асфальтобетонных экранов и зарубежом. В источниках научно-технической информации существует путаница в типе противофильтрационного элемента каменно-набросной плотины Ohra. Эта плотина высотой 59 м была построена в Германии (ГДР) в 1966 году. В трудах ICOLD [1] эта плотина отнесена к плотинам с АБЭ, а в других источниках её часто относят к плотинам с бетонным экраном. В [4] указано, что экран плотины – сборный, он состоит из железобетонных плит, но водонепроницаемость плотины обеспечивается 1,5-сантиметровым слоем асфальта. Плиты экрана укладывались по слою подготовки из тощего бетона. Такой противофильтрационный элемент плотины следует признать комбинированным асфальтобетонно-бетонным экраном.

Отдельно следует упомянуть, что в конструкциях бетонных экранов грунтовых плотин битумные материалы используют не только для гидроизоляции, но и для снижения трения между конструкциями. С этой целью на поверхность под экраном наносят битумную эмульсию [9].

3.3 История первых опытов применения асфальтобетона для создания основного противофильтрационного покрытия.

Возможность устройства основного противофильтрационного элемента плотины из битумсодержащего материала связана с использованием асфальтобетона.

Впервые асфальтобетон был применён на плотине Sorpetalsperre / Amecke в Германии. Плотина Sorpetalsperre (англ. Sorpe) высотой 12 м была построена в 1935 г. На её пологом верховом откосе (около 1:2) был устроен открытый асфальтобетонный экран. На откосе уложены 2 слоя асфальтобетона толщиной по 6 см, которые покрыты битумной эмульсией [3]. Однако на плотине Sorpe / Amecke АБЭ являлся лишь дополнительным противофильтрационным устройством, а в качестве основного была запроектирована бетонная диафрагма, укрытая с верховой стороны толстым слоем глины.

В дальнейшем открытый асфальтобетонный экран был использован в других плотинах Германии – Turawa и Schevelinger [1]. Плотина Turawa высотой 13 м была построена в 1937 г., ныне располагается на территории Польши и носит название Turawskie. Её асфальтобетонный экран имеет толщину 5 см. Плотина Schevelinger (ныне Silbertalsperre) была построена в 1941 г. Максимальная строительная высота плотины составляет 22 м, высота экрана – 15 м. Плотина – каменно-набросная, уклон её верхового откоса составляет 1:1,75. Экран состоял из двух слоёв асфальтобетона: толщиной 3 см и 6 см. Применялся асфальтобетон, состоявший из 10% битума, 18% минерального наполнителя, 22% песка, 50% щебня.

Значительным прогрессом стало использование асфальтобетонных экранов для строительства более высоких плотин в Северной Африке. В 1920-1930е годы были построены две плотины в Алжире: Bou Hanifia высотой 55 м и El Ghrib высотой 72 м. Строительство плотины El Ghrib было начато в 1926 году, а завершено в 1938 г. [10]. В течение почти 20 лет плотина El Ghrib была самой высокой плотиной с асфальтобетонным экраном в мире. Строительство плотины Bou Hanifia было завершено в 1941 г. [10].

Плотины El Ghrib и Bou Hanifia выполнены из сухой кладки камня, поэтому имеют крутой верховой откос. Заложение верхового откоса плотины Bou Hanifia составляет 0,8-0,9, а плотины El Ghrib – от 0,6 (вверху) до 1 (внизу) (рис.3) [3].

Sainov, M.P.; Poslykhalin Y.A.

Asphalt Concrete Faces of Embankment Dams: A Review;
2021; *AlfaBuild*; 17 Article No 1705. doi: 10.34910/ALF.17.5

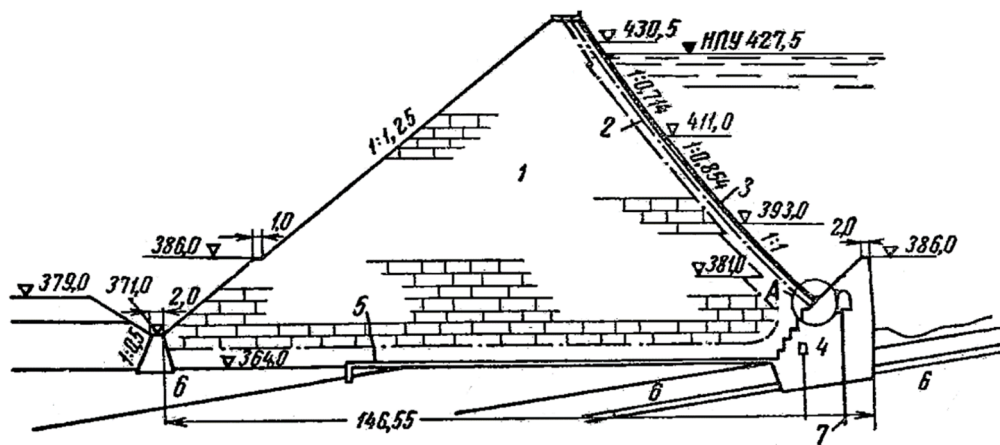


Рис. 3 - Конструкция плотины El Ghrib в соответствии с [3]

1 – сухая кладка крупного камня, 2 – кладка на растворе, 3 – асфальтобетонный экран, 4 – бетонное сооружение со смотровой и дренажной галереями, 5 – железобетонная плита толщиной 40 см с дренажем, 6 – основание из слоёв песчаника и мергеля, 7 – цементационная завеса

Fig. 3 - El Ghrib dam structure according to [3]

1 – dry masonry of large stone, 2 – masonry on mortar, 3 – asphalt concrete face, 4 – concrete structure with observation and drainage galleries, 5 – reinforced concrete slab 40 cm thick with drainage, 6 – base of sandstone and marl layers, 7 – grout curtain

Асфальтобетонные экраны плотин El Ghrib и Bou Hanifia имеют сложное многослойное строение. Они укладывались по подэкрановой подготовке из сухой кладки камня [3]. Поверхность под экран выравнивалась слоем пористого бетона толщиной 8-10 см, который служил для экрана дренажным слоем (рис. 4). Поверх него в два слоя по 6 см укладывался асфальтобетонный экран. Для обеспечения адгезии экрана поверхность подготовки предварительно покрывалась битумной мастикой (расход 1 кг/м²). Поверх экрана укладывался слой асфальтового раствора толщиной 1 см.

Для экрана плотин El Ghrib был использован асфальтобетон, состоящий из 8% битума, 36% песка, 56% щебня [3,4]. Использовался битум марки 70/30 [7]. В экране плотины Bou Hanifia был использован битум с пенетрацией 80/100. Он содержит 63% гравия, 29% песка, 10% наполнителя и 8% битума [10]. Нижний слой асфальтобетонного экрана Bou Hanifia армирован сеткой диаметром 6 мм [6].

Учитывая жаркий климат, первоначально релизованный проект алжирских плотин предусматривал устройство защитного покрытия экрана, выполненного из бетона. На плотине Bou Hanifia плиты были выполнены из железобетона толщиной 8÷15 см, а на плотине El Ghrib – плитами из пористого бетона размерами 2×3×0,1 м, армированными металлической сеткой [3]. Покрытие играло роль теплоизоляции и защищало экран от механических повреждений. Однако оно довольно быстро пришло в негодность. В 1953 г. покрытие экрана El Ghrib было повреждено, поэтому оно было удалено [3], а для уменьшения теплового воздействия экран был покрашен белой светоотражающей краской. В 1970 г. асфальтобетонный экран плотины El Ghrib был защищён слоем торкрета.

В процессе строительства в нижней части экрана плотины El Ghrib наблюдалось образование трещины толщиной в несколько миллиметров, через которую фильтровала вода, однако с течением времени трещина закрылась, а фильтрация существенно уменьшилась [3,7].

В процессе эксплуатации экраны плотин El Ghrib и Bou Hanifia из-за инсоляции подвергались высоким температурным воздействиям. Была зафиксирован нагрев экрана плотины El Ghrib до температуры 70°C. Из-за высоких температур асфальтобетон становился более деформируемыми и проявлялась проблема оплывания асфальтобетона по крутому откосу.

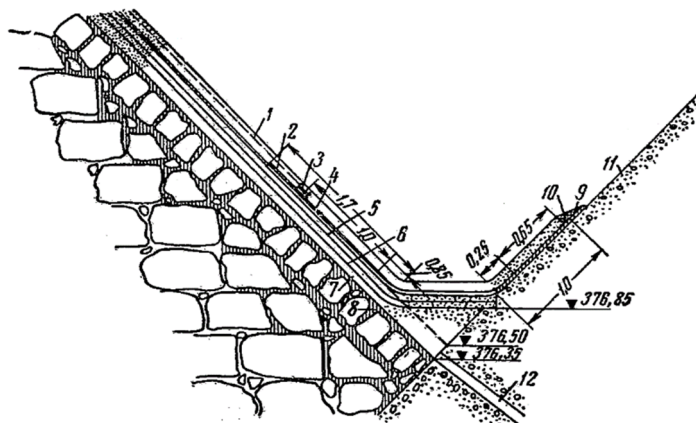


Рис.4 - Строение экрана плотины El Ghrib и его сопряжение с бетонным сооружением according to [3]

1 – сетка арматуры, 2 – слой пористого бетона толщиной 10 см, 3 – слой цементного раствора, 4 – армированный торкрет, 5 – первый слой асфальтобетона, 6 – второй слой асфальтобетона, 7 – дренажный слой пористого бетона, 8 – цементный раствор, 9 – битум, 10 – покрытие армированным торкретом, 11 – покрытие битумом, 12 – дренажная труба

Figure 4 - El Ghrib dam shield structure and its interface with concrete structure according to [3]

1 - reinforcement mesh, 2 - a layer of porous concrete 10 cm thick, 3 - a layer of cement mortar, 4 - reinforced shotcrete, 5 - the first layer of asphalt concrete, 6 - the second layer of asphalt concrete, 7 - drainage layer of porous concrete, 8 - cement mortar, 9 - bitumen, 10 - reinforced shotcrete coating, 11 - bitumen coating, 12 - drainage pipe

По образу алжирских плотин в Югославии в 1959 г. была построена плотина Радойна высотой 42 м [4], однако она была выполнена не из сухой кладки камня, а каменно-набросной с подэкрановой зоной из сухой кладки камня.

С 1940х годов вместо плотин из сухой кладки камня стали активнее применять плотины из каменной наброски, имеющие более пологие откосы. Это позволило отказаться от защитных слоёв и применять открытые экраны.

Примером могут служить две каменно-набросные плотины с асфальтобетонным экраном, построенные в 1950-х годах также в Алжире: Oued / Sarno (1952 г.) высотой 28 м [10] и Iril Emda (1954 г.) высотой 75 м [10].

Плотина Oued/Sarno имеет уклон верхового откоса 1:2 [1]. Её асфальтобетонный экран имеет толщину 10 см. В открытом экране образовались трещины, которые заняли четверть его площади [7]. Это привело к необходимости выполнить несколько ремонтов экрана.

При строительстве следующей плотины, плотины Iril Emda, во избежание образования трещин был использован более мягкий битум марки 40-60. Плотина Iril Emda на протяжении 20 лет была самой высокой плотиной с асфальтобетонным экраном в мире.

Экран плотины Iril Emda имеет толщину 12,5 см [3], он уложен на откос с уклоном 1:1,6 [1]. Экран выполнен закрытым – он помещён между двумя плитами. Нижняя плита дренажного слоя выполнена из пористого бетона, а наружная плита защитного слоя – из железобетона толщиной 8-15 см [3,4]. Асфальтобетон экрана содержит 9% битума, 12% минерального порошка, 52% песка и 36% гравия [4]. Он уплотнялся 15 тонным катком.

По образу плотины Iril Emda в Югославии в 1955 г. была построена плотина Врла II высотой 25 м [6]. В ней асфальтобетонный экран, уложенный в 2 слоя, был покрыт железобетонной плитой. Особенностью экрана этой плотины является его армирование проволочной сеткой.

Таким образом, на первом этапе применялись разные по конструкции асфальтобетонные экраны, использовались как открытые (Sorpe), так и закрытые (в Алжире) АБЭ.

Опыт строительства перечисленных выше плотин позволил определить основные принципы создания более совершенных и простых конструкций асфальтобетонного экрана применительно к каменно-набросным плотинам. Во-первых, была обоснована надёжность и эффективность применения асфальтобетонных экранов. Во-вторых, была продемонстрирована возможность применять асфальтобетонные экраны без защитных покрытий. В-третьих, были даны рекомендации по выбору материала и конструкций экранов. В частности, было рекомендовано

применять для устройства АБЭ мягкий битум. Была выявлена необходимость не только выравнивания поверхности под экраном, но и создания дренажного слоя.

3.4 Появление конструкций плотины с асфальтобетонным экраном современного типа

Начиная с 1950-х годов началось активное применение плотин с асфальтобетонным экраном для строительства плотин средней (более 40 м) и малой высоты. Причиной этого явилось создание надёжных и простых типовых конструкций АБЭ.

Прообразом современных плотин с АБЭ является плотина Genkel, построенная в Германии (ФРГ) в 1952 году. Плотина высотой 44 м имеет уклон верхового откоса 1:2,25 [1].

Экран плотины Genkel выполнен многослойным. Он состоит из трёх покрытий (рис.5а). Верхнее, наружное непроницаемое покрытие асфальтобетона имеет толщину 16 см и уложено в 4 слоя. Нижнее покрытие асфальтобетона имеет толщину 9 см и также уложено в 3 слоя. Между двумя непроницаемыми покрытиями уложен дренажный слой пористого асфальта толщиной 12 см [1]. Многослойная конструкция АБЭ позволяет повысить его надёжность.

Асфальтобетон экрана плотины Genkel включает 40% базальтового щебня (3-8 мм), 12% мелкого гравия (до 3 мм), 15% средне- и крупнозернистый песок (0,2-2 мм), 15% мелкий песок (0,06-0,2 мм), 18% – минеральный заполнитель [4]. Данные о содержании битума в асфальтобетоне экрана плотины Genkel разнятся. По данным ICOLD он включал 6% битума [1]. Однако, как и в других немецких плотинах того времени, скорее всего содержание битума составляло 8,1%. По данным [4] содержание органического вяжущего в асфальтобетоне составляло 8%: из которых 85% мягкого битума и 15% асфальта.

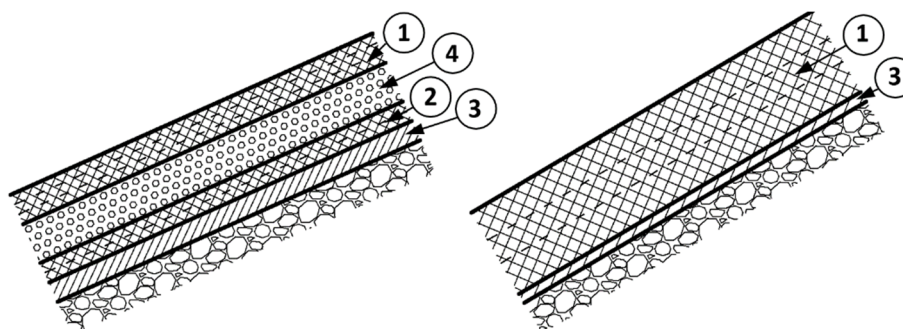
Применённая на плотине Genkel конструкция многослойного экрана с внутренним дренажем в настоящее время применяется в большинстве плотин с асфальтобетонным экраном. Анализируя конструкцию экрана плотины Genkel можно выделить следующие характерные особенности современных АБЭ:

1) Плотины, построенные после 1950-х годов, являются каменно-набросными и имеют пологие откосы. Это позволяет избежать опасности сползания экрана по откосу и даёт возможность обеспечить движение по откосу машин и механизмов.

2) Экраны выполняются открытыми, без защитных слоёв, без армирования. Это не только упрощает их конструкцию, но и технологию возведения.

3) Наличие в экране нескольких слоёв и покрытий обеспечивает большую его надёжность.

4) Технологический процесс устройства современных АБЭ в высокой степени механизирован. Это обеспечивает высокое качество уплотнения асфальтобетона и ускорение строительства.



а) экран типа «А»: экран плотины Genkel
а) face type A: face of the Genkel dam

б) экран типа «В»: экран плотины Montgomery
b) face type B: face of the Montgomery dam

Рис. 5 - Устройство асфальтобетонных экранов двух типов

1 – водонепроницаемый слой (первый) из асфальтобетона, 2 – водонепроницаемый слой (второй) из асфальтобетона, 3 – связующий слой, 4 – дренажный слой

Fig. 5 - Construction of two types of asphalt concrete faces

1 – impervious layer (first) of asphalt concrete, 2 – impervious layer (second) of asphalt concrete, 3 – binder layer, 4 – drainage layer

Технология создания асфальтобетонного экрана, применённая на плотине Genkel, была впоследствии усовершенствована. Если в экране плотины Genkel (1952 г.) уплотнение асфальтобетона проводилось с помощью ручных вибраторов, то на последующих немецких

плотинах использовались машины. Это плотины Henne (1954 г., Германия, высота 58 м) и Bigge (1965 г., Германия, высота 55 м). На плотине Bigge для уплотнения использовался 8-тонный каток.

Каменно-набросные плотины, построенные по образцу плотин Genkel, показали свою надёжность. Асфальтобетонные экраны плотин Genkel и Henne испытали действие льда, но не были повреждены. На плотине Henne дополнительно к АБЭ была предусмотрена диафрагма из битумизированного песка, но затем асфальтобетонные экраны стали применять как единственный противофильтрационный элемент грунтовой плотины.

Иная конструкция асфальтобетонного экрана была применена в США при строительстве плотины Montgomery в Колорадо. Плотина Montgomery, построенная в 1957 г., имеет высоту 34 м и длину 580 м. Она была построена в высокогорном районе с продолжительным периодом холодов. Зимой температуры воздуха опускаются до -32°C .

Т.к. водохранилище Montgomery ежегодно почти полностью срабатывается и экран доступен для осмотра и ремонта, он был выполнен открытым [3]. Экран уложен на откос с заложением 1,7. В отличие от экрана плотины Genkel экран плотины Montgomery имеет одно водонепроницаемое покрытие, однако оно выполнено довольно толстым (рис.5b). Толщина экрана увеличивается от 26,5 см на гребне до 31,4 см у подошвы [4]. Он уложен в три слоя толщинами 10, 9 и 7,5 см.

Экран укладывался на щебёночную подготовку крупностью 19-77 мм [3]. Опыт строительства выявил необходимость укладки под экраном выравнивающего слоя асфальта – он был выполнен толщиной 7,5 см [3]. Асфальтобетон имел в своём составе 8,5% битума, 11,8% минерального наполнителя, 47,4% песка и 40,8% щебня [3,4]. Уплотнение производилось 1,8-тонным катком. Весь экран был уложен за один летний сезон.

После окончания строительства в примыканиях экрана были обнаружены трещины шириной от 0,6 до 1,2 см и глубиной до 10 см. Их образование приписывают влиянию температурного воздействия. Трещины были зачищены и залечены асфальтом. Несмотря на то, что экран плотины Montgomery зимой подвергается холодным температурам, он успешно эксплуатируется.

Таким образом, в 1950-х годах были рекомендованы для применения два типа конструкции асфальтобетонных экранов: с однослойным и многослойным покрытием. В трудах Международного конгресса по большим плотинам (ICOLD) они обозначены как типы «А» и «В».

Более простую конструкцию имеет экран типа «В». Его прообразом является экран плотины Montgomery (1957 г.). Экран типа «В» представляет собой покрытие из асфальтобетона, которое располагается на связующем слое также из асфальтобетона (рис.5b). Поверхность экрана покрывается слоем мастики. Экран типа «В» чаще всего применяется для гидроизоляции водохранилищ и невысоких плотин. Для противофильтрационных устройств высоких плотин и плотин в сейсмических районах чаще используют экран типа «А».

Конструкция экрана типа «А» надёжнее, чем типа «В», но сложнее и дороже. Она состоит из двух герметичных покрытий, разделённых дренажным слоем, а также связующего слоя (рис.5а). Двойное непроницаемое покрытие увеличивает надёжность противофильтрационной защиты. Наличие дренажа позволяет снизить противодействие на водонепроницаемое асфальтобетонное покрытие. Профильтровавшая вода собирается в дренажном слое и отводится в специальные галереи. По фильтрационному расходу можно обнаружить нарушения герметичности экрана. Экран этого типа впервые был применён на плотине Genkel в 1952 г.

Водонепроницаемое покрытие в составе асфальтобетонного экрана современных плотин обычно имеет толщину 6-10 см (в среднем 8 см) [1]. Содержание битума в асфальтобетоне составляет 6÷8% (по массе), такой асфальтобетон жёстче, чем материал давно построенных плотин. Для устройства асфальтобетонного экрана обычно используют битум марок 40-60, 60-80 и 80-100. Для повышения прочности в него могут добавляться синтетические волокна.

В асфальтобетоне используется мелкий и крупный заполнитель примерно в одинаковой пропорции. Максимальный размер частиц заполнителя составляет 8-12 мм. Такой асфальтобетон называют песчаным. Плотность песчаного асфальтобетона составляет от 2,1 до 2,5 т/м³. Такой асфальтобетон имеет пористость всего около 3%.

Дренажный слой выполняют толщиной 5÷15 см из асфальтогрунтовой смеси, «чёрного щебня» [1]. В материале дренажа содержание битума составляет 2÷5% (по массе). Для его создания используется гравийно-щебенистый грунт максимальной крупностью 30 мм и с содержанием песка не более 25%. Коэффициент фильтрации дренажного слоя должен быть не менее 10^{-4} м/с.

Связующий слой предназначен надёжного соединения асфальтобетонного экрана с телом плотины, он выравнивает поверхность насыпи перед укладкой водонепроницаемого

асфальтобетонного покрытия. Связующий слой имеет толщину 4-10 см. В его состав – битум или битумная эмульсия.

Асфальтобетон изготавливается при температуре 160-180°C, а укладывается при температуре 120÷140°C. Толстые покрытия укладываются слоями толщиной 3-7 см, каждый из которых уплотняется катками. Укладка асфальта осуществляется асфальтоукладчиком. Для уплотнения асфальтобетона используют вибрационные катки весом около 5 т. Благодаря уплотнению граница между слоями асфальтобетона получается едва различимой, однако существует опасность образования паровоздушных «волдырей» на контакте слоёв [11].

3.5 Применение плотин с асфальтобетонным экраном современного типа

Описанная выше технология устройства АБЭ была успешно внедрена в практику гидротехнического строительства и применена для строительства большого количества плотин. Для обозначения плотин этого типа стали использовать специальный термин. В зарубежной научно-технической литературе плотины с АБЭ обозначаются как AFRD (англ. Asphalt Concrete Faced Dam) или BFRD (англ. Bituminous Concrete Faced Dam).

К настоящему времени в мире построено более 350 плотин с асфальтобетонным экраном.

Используются обе конструктивные схемы устройства асфальтобетонных экранов (типы «А» и «В»). Примером применения АБЭ типа «В» является плотина Venemo высотой 51 м, построенной в Норвегии в 1963 г. [12]. Описание этой плотины часто встречается в советской научно-технической литературе [4,6]. В 1978 г. в высокогорных Альпах Австрии была построена плотина Osheniksee высотой 81 м [1]. Её верховой откос имеет заложение 1,5.

Примером устройства экрана по типу «А» является плотина Siberio высотой 82 м. Эта плотина была построена в 1978 г. в Испании, на острове Гран-Канария. Её высота превысила высоту плотины Iril Emda, построенной ещё в 1954 году.

Тем не менее, область применения АБЭ остаётся ограниченной. Большинство из плотин с АБЭ (почти 80%) построены в Европе, а на других континентах они применяются редко. Предпочтение отдают плотинам с бетонным экраном.

При строительстве высоких плотин вместо АБЭ чаще выбирают асфальтобетонную диафрагму (АБД), т.е. внутренний противофильтрационный элемент из асфальтобетона. АБД стали использовать в конструкциях грунтовых плотин в конце 1950-х годов, примерно в одно и то же время с появлением современных типов конструкций АБЭ. Однако уже к концу 1970-х годов конструкции и технологии возведения плотин с АБД были усовершенствованы настолько, что стало возможным строительство плотин с АБД высотой более 100 м [13]. К настоящему времени в мире построены несколько десятков крупных плотин с АБД.

По сравнению с АБД асфальтобетонные экраны применяются чаще, но для строительства плотин меньшей высоты. Высота плотин с АБЭ превысила 90 м лишь в 1990-х годах.

В 1995 году в Японии была построена плотина Yashio высотой 90,5 м и длиной 263 м (рис.6). Она ограждает дамбу ГАЭС Shiobara. Экран плотины Yashio выполнен по типу «А», верхнее асфальтобетонное покрытие имеет толщину 15 см, нижнее – 6 см [14]. Дренажный слой имеет толщину 8 см. В 2011 г. плотина Yashio перенесла землетрясение, в верхнем покрытии на прибортовых участках АБЭ возникли трещины [14]. Потребовался ремонт экрана.

Самой высокой каменно-набросной плотин с АБЭ в мире является плотина Colibita в Румынии. Первоначально конструкция этой плотины планировалась с противофильтрационным элементом из геомембраны [15], однако была реализована с АБЭ. Плотина Colibita построена в 1991 г., она имеет высоту 92 м и длину 251 м [16]. Асфальтобетонный экран плотины Colibita устроен по типу «А», но имеет не один, а два дренажных слоя.

Проектирование и строительство плотин с АБЭ продолжается и в XXI веке. В 2000 г. в Италии было завершено строительство плотины Menta высотой 90 м и длиной по гребню 450 м [17]. В 2006 г. в Китае построена дамба верхнего бассейна ГАЭС [18] высотой 77,3 м с асфальтобетонным экраном типа «А» [18]. В 2009 г. в Сьерра Леоне было закончено строительство плотины Vumbuna высотой 87 м и длиной 440 м [19].

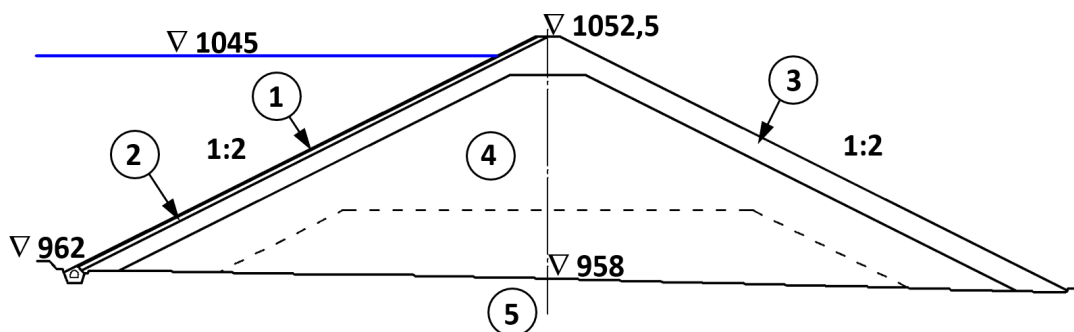


Рис.6 - Схема конструкции плотины Yashio в соответствии с [16]

1 – асфальтобетонный экран, 2 – транзитная зона, 3 – каменная наброска, 4 – каменная насыпь, 5 – основание

Fig. 6 - Yashio dam structure diagram according to [16]

1 – asphalt concrete face, 2 – transit zone, 3 – rip rap, 4 – rock fill, 5 – base

Существуют планы по строительству ещё более высоких каменно-набросных плотин с АБЭ. В Грузии планируется строительство плотины Nenskra высотой 125-130 м и длиной 870 м. В Папуа-Новой Гвинее рассматривается возможность строительства на реке Frieda хвостохранилища с плотиной высотой 171 м [20].

Необходимо отметить, что конструкции асфальтобетонного экрана современного типа обладают рядом преимуществ перед другими типами противофильтрационных устройств грунтовых плотин:

1) Асфальтобетонное покрытие хорошо приспособляется к высоким деформациям грунтовых плотин, способно к самозалечиванию трещин.

2) Процесс укладки асфальтобетона в экран в высокой степени механизирован и может быть выполнен в короткие сроки. В отличие от бетонных экранов, в АБЭ не требуется устройство швов.

3) Асфальтобетонные экраны выполняются открытыми, поэтому доступны для осмотра и ремонта.

Тем не менее, можно отметить снижение частоты применения плотин с АБЭ. Они «вытесняются» другими типами грунтовых плотин – плотинами с АБЭ и геомембранами. На территории СССР асфальтобетонные покрытия применялись редко, в основном для каналов и хвостохранилищ. В России примеры применения асфальтобетонных экранов в качестве противофильтрационных устройств грунтовых плотин отсутствуют.

Это связано с недостатками АБЭ, которые рассмотрим ниже.

3.6 Проблемы применения асфальтобетонных экранов и перспективы развития их конструкций

Первая проблема – это ограниченный срок службы асфальтобетона. Под действием света, температурных колебаний интенсифицируются процессы окисления битума и другие процессы деструкции асфальтобетона. Поэтому со временем герметичность асфальтобетонного экрана может быть нарушена и потребуются его ремонт или реконструкция. Срок службы АБЭ как правило составляет не более 50 лет, но чаще ремонт может потребоваться и раньше из-за образования в АБЭ трещин.

Из-за трещинообразования многократно ремонтировался экран плотины El Ghrib, экран плотины Oued/Sarno несколько раз подвергался ремонту в первые 20 лет эксплуатации [7].

Можно привести несколько примеров, когда ремонт асфальтобетонного экрана потребовался сразу после первого наполнения водохранилища.

На плотине Kruth-Wildenstein высотой 38 м, построенной в Австрии в 1964 г., произошло нарушение целостности АБЭ в зоне его сопряжения с бетонной галереей. В последующем этот участок экрана требовал неоднократного ремонта.

В асфальтобетонном экране плотины Scotts Peak высотой 43 м (1972 г.) на о.Тасмания (Австралия) через полтора года эксплуатации были обнаружены трещины [21]. Причиной образования трещин являлись чрезмерные осадки плотины.

В экране плотины Vimbuna (Сьерра-Леоне), который из-за прерывания строительства долгое время был незащищён покрытием битумной мастики, образовались трещины [19]. Были зафиксированы как поверхностные, так и глубокие трещины, которые пересекали половину асфальтобетонного покрытия. Потребовался капитальный ремонт экрана.

Sainov, M.P.; Poslykhalin Y.A.

Asphalt Concrete Faces of Embankment Dams: A Review;
2021; *AlfaBuild*; 17 Article No 1705. doi: 10.34910/ALF.17.5

Ремонт плотины Winscar в Великобритании потребовался уже на первом году эксплуатации, в 1975 г. Эта плотина имеет высоту 53 м, её экран с толщиной покрытия 12 см был выполнен по типу «В». При первом наполнении водохранилища были зафиксированы протечки через АБЭ и был выполнен его ремонт. В 2001 г. из-за обнаружения трещин в АБЭ потребовалась его реконструкция [22,23].

В экранах японских плотин Numappara и Yashio трещины образовались после землетрясения [14].

Ремонт и реконструкция АБЭ заключаются в восстановлении герметичности покрытия.

Ремонт асфальтобетонного экрана плотины Scotts Peak включал покрытие повреждённой части экрана мембраной из бутилкаучука, а затем их пригрузку песчано-гравийной смесью [21]. Работы проводились без опорожнения водохранилища, подводным способом.

Однако как правило для реконструкции и ремонта асфальтобетонного экрана требуется сработка или опорожнение водохранилища.

Ремонт экранов японских плотин Numappara и Yashio после их повреждения от землетрясения заключался в заделке крупных трещин и покрытии повреждённой зоны гидроизоляционным покрытием.

На плотинах в Германии плановая реконструкция была выполнена примерно через полвека. Она заключалась в удалении верхнего слоя асфальтобетона и укладке нового. Примерами могут служить плотины Henne, Von Bach (<https://knightpiesold.com/en/news/publications/repairing-von-bach-dam-wall/>).

На плотине Henne реконструкция АБЭ была выполнена в 1998 г., после 54 лет эксплуатации. Плотина Henne высотой 52,5 м была построена в Германии в 1971 г. Её экран имел толщину 10 см. В 2008 г. экран был реконструирован на верхних 20 м (https://www.talsperrenleitzentrale-ruhr.de/fileadmin/user_upload/talsperrenleitzentrale-ruhr.de/Dokumente/PDF/sanierung_henne.pdf). Для этого был удалён верхний слой (4 см) асфальтобетона, а затем уложен новый слой и покрыт битумной мастикой.

В других случаях реконструкция АБЭ выполнялась путём покрытия геомембраной. Такая реконструкция была выполнена на экране плотины Moravka в 1999 г. [24,25], а на плотине Winscar – в 2001 г. [23].

Таким образом, при применении асфальтобетонных экранов необходимо учитывать ограниченный срок их службы и предусматривать возможность его ремонта.

Второй важной проблемой является наличие ограничений по климатическим условиям строительства и эксплуатации асфальтобетонных экранов. Неблагоприятные условия возникают как при высоких положительных, так и отрицательных температурах.

Опыт эксплуатации алжирских плотин El Ghrib, Bou Hanifia показал, что асфальтобетонные покрытия имеют недостаточную теплоустойчивость – при нагреве возможно оплывание АБЭ. Кроме того, при высоких температурах из битума быстрее испаряются летучие фракции, поэтому ускоряются процессы потери асфальтобетоном своей непроницаемости, а сам он становится более жёстким.

С проблемами теплоустойчивости битумных материалов столкнулись строители Нижне-Тулумской плотины (1936-1938 гг.), в конструкции которой было предусмотрено устройство экрана из битумных матов. При температурах выше +10°C битумные маты становились текучими, что приводило к оползанию склона [3].

В районах с суровыми климатическими условиями, с отрицательными температурами опасность представляют не только температурные, но ледовые воздействия.

Опыт применения асфальтобетонного покрытия на Тамбурищенском мысе Кременчугского водохранилища (Украина) показал, что это покрытие плохо сопротивляется ледовым воздействиям и нагрузкам [5]. Большую угрозу представляет не истирающее действие льда, а силовые нагрузки от примёрзшего льда.

Ещё большую угрозу несут изменения температур. При низких температурах асфальтобетон становится жёстким материалом, что влечёт за собой образование трещин при температурных деформациях. Укладка уплотняемого асфальтобетона может осуществляться при температуре выше +5°C. Это сдерживает применение асфальтобетонных экранов на территории России. В России нет примеров применения в плотинах этого типа противофильтрационных устройств.

Тем не менее, в мире имеется опыт применения асфальтобетонных экранов при отрицательных температурах. Помимо уже описанной выше плотины Montgomery, можно привести пример плотины Horschwurten. Эта плотина Horschwurten была построена в Австрии в

1980 г. Плотина высотой 55 м и длиной 2471 м ограждает бассейн ГАЭС [1]. Она расположена в горном районе, где температуры могут опускаться до -35°C . Экран толщиной 8 см (тип «В») успешно эксплуатируется в этих условиях. Во избежание примерзания льда к АБЭ выполнялся барботаж.

Для более суровых климатических условий требуются специальные меры. Могут быть рассмотрены несколько способов применения битумсодержащих материалов.

Для защиты от температурного воздействия асфальтобетонный экран может быть выполнен закрытым и размещён под слоем грунта. Такой экран может быть выполнен по технологии создания асфальтобетонных диафрагм. Однако такой АБЭ теряет одно из своих важных преимуществ – доступность для осмотра и ремонта. Кроме того, верховой откос плотины с закрытым экраном должен будет иметь более пологий откос.

Ещё один способ – модификация битумсодержащего материала экрана. С.Н. Попченко предлагал использовать для гидроизоляции плотин полимербитумные вяжущие. По его данным [7] эти вяжущие имеют температуру хрупкости -50°C и даже при -30°C обладают растяжимостью 10%. Полимерасфальтобетон содержит не только битум, но полиэтилен. Он был применён при ремонте трещин в АБЭ плотины Yashio [16].

В России также есть опыт применения полимерасфальтобетона для облицовки откосов водоёмов. Из этого материала выполнены экраны шламохранилищ завода фосфорных одобрений в г. Балаково, химкомбината «Фосфорит» в городе Кингисеппе Ленинградской области, Волгоградского алюминиевого завода. Во ВНИИГ им. Б.Е.Веденеева подобраны составы полимерасфальтобетона.

Однако необходимо иметь в виду, что полимерасфальтобетон дороже, чем не модифицированный, а процесс его укладки в сооружение будет сложнее.

На сегодняшний день единственным битумным материалом, хорошо зарекомендовавшим себя в условиях низких температур, являются битумные геомембраны. Плотины и дамбы с противофильтрационным покрытием из битумных мембран применяются уже более 40 лет.

В 2000 г. во Франции была построена плотина La Galaube высотой 43 м и длиной 380 м [26]. Её экран состоит из нескольких слоёв. Нижний слой толщиной 10 см выполнен из грунта крупностью до 20 мм, который пропитан битумной эмульсией. Выше уложен 10-сантиметровый слой холодной асфальтовой смеси с заполнителем крупностью до 10 мм. Использование холодного асфальтобетона позволяет вести его укладку при температурах около 0°C . Слой холодного асфальта покрыт битумной геомембраной Coletanche толщиной 4,8 мм. Сверху она защищена 10-сантиметровым слоем фибробетона, уложенного поверх геотекстиля. Благодаря битумной геомембране такое покрытие сохранит герметичность даже при очень низких температурах. Укладка битумной геомембраны может осуществляться при отрицательных температурах.

Имеется опыт применения битумных геомембран и в России. На Чукотке в 2000-х годах построена дамба Купол для хранения твёрдых минеральных отходов, противофильтрационным элементом которой является битумная геомембрана толщиной 4,8 мм [27]. Для защиты от воздействия льда битумная геомембрана покрыта геомембраной высокой прочности.

4 Conclusions

1. За прошедшие с начала применения 100 лет асфальтобетонные экраны их конструкции и технологии значительной усовершенствованы. Современные конструкции АБЭ проще и удобнее для возведения, чем те, которые применялись в начале XX века. Эти усовершенствования наделяют асфальтобетонные экраны рядом преимуществ в сравнении с другими типами противофильтрационных устройств.

2. Отсутствие серьёзных происшествий с асфальтобетонными экранами грунтовых плотин свидетельствует о надёжности этого типа противофильтрационных устройств. Асфальтобетонные экраны обеспечивают высокую герметичность даже в условиях очень высоких деформаций грунтовых плотин. Они хорошо себя зарекомендовали на плотинах высотой до 100 м, в сейсмически опасных районах.

3. Однако асфальтобетонные экраны имеют ограничения к применению по климатическим условиям. Это затрудняет их применение в России. Из-за наличия ограничений к применению асфальтобетонные экраны уступают свою «нишу» другим типам противофильтрационных устройств на основе органических вяжущих – асфальтобетонным диафрагмам и экранам из



геомембран. Для расширения области применения асфальтобетонных экранов требуется их дальнейшее совершенствование.

4. В районах с неблагоприятными для асфальтобетона условиями могут быть применены более сложные, комбинированные конструкции противofiltrационных устройств, в составе которых битумсодержащие материалы играли бы основную, герметизирующую роль. В мировой практике гидротехнического строительства имеется опыт применения асфальтобетона в составе конструкций из бетона и геомембран.

References

1. International Commission on Large Dams (ICOLD). Bulletin 114. Embankment dams with bituminous concrete upstream facing. 1999.
2. Safronov I.P. Nabrosnye plotiny (soyuznye i inostrannye). Moscow, Glavlit Publ., 1936. 151 p.
3. Moiseev S.N. Kamenno-zemlyanye i kamenno-nabrosnye plotiny. Osnovy proektirovaniya i stroitelstvo. Moscow, Energy Publ., 1970. 176 p.
4. Radchenko V.G., Zairova V.A. Kamenno-zemlyanye i kamenno-nabrosnye plotiny. Leningrad, Energy Publ., 1971. 166 p.
5. Ajrapetyan R. Proektirovanie kamenno-zemlyanyh i kamenno-nabrosnyh plotin, second edition. Moscow, Energy Publ., 1975. 328 p.
6. Moiseev S.N., Moiseev I.S. Kamenno-zemlyanye plotiny. Osnovy proektirovaniya i stroitelstvo. Moscow, Energy Publ., 1977. 281 p.
7. Popchenko S. Gidroizolyaciya sooruzhenij i zdanij. Leningrad, Strojizdat Publ., 1981. 304 p.
8. Korshak A.A. Asfalt kak drevnejshij gidroizolyacionnyj material, Territoriya Neftegaz, 2011. No.3. Pp.90–91.
9. Del Olmo, D., Bermejo, M. Bond-breaker impact on slab behaviour in concrete face dams. Dams and Reservoirs. 2017. 27(3). Pp. 102–110. DOI:10.1680/jdare.16.00046.
10. Bounaadja, Z., Djemili, L., Houichi, P. The Algerian Experience in the Waterproofness of the Bituminous Concrete Masks Advantages and Inconveniences. Global Journal of Researches in Engineering: Journal General Engineering. 2014. 14(2). URL: https://globaljournals.org/GJRE_Volume14/1-The-Algerian-Experience.pdf
11. Wang, Hao, Sun, Ma, Xia, Li. Blistering Mechanism Analysis of Hydraulic Asphalt Concrete Facing. Applied Sciences. 2019. 9(14). Pp. 2903. DOI:10.3390/app9142903.
12. Lia, L., Jensen, T., Stensby, K.E., Holm Midttømme, G., Ruud, A.M. The current status of hydropower development and dam construction in Norway. International Journal on Hydropower and Dams. 2015. 22(3). Pp. 37–43. URL: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84948446181&partnerID=40&md5=88852147c4436b7c95adf58b7ef71d2b>.
13. Hoeg, K. Evaluation of asphaltic concrete cores for embankment dams. International Water Power and Dam Construction. 1992. 44(7). Pp. 32–34. URL: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-0026891477&partnerID=40&md5=54ee6556b63625231d106c3afdd293e1>.
14. Tsukada, T., Doi, M., Yoshizawa, K., Kikuchi, T. Long-term behavior of the Yashio dam, asphalt faced rockfill dam. Dams and Reservoirs under Changing Challenges - Proceedings of the International Symposium on Dams and Reservoirs under Changing Challenges – 79 Annual Meeting of ICOLD, Swiss Committee on Dams. 2011. Pp. 297–304. DOI:10.1201/b11669-40.
15. Bogan, V., Mihail, D. Hydropower and dam construction in Romania: present and future. Water power & dam construction. 1990. 42 (8 Aug.). Pp. 11–12. URL: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-0025018717&partnerID=40&md5=56239babe7ded4cf45d0c7a133e18540>
16. Abdulamit, A., Stematu, D. The use of the existing hydropower reservoirs as lower basins for pumped storage power plants. Hidrotehnica. 2015. 60. 4-5. Pp.24–32
17. Albano, M., Modoni, G., Croce, P., Russo, G. Assessment of the seismic performance of a bituminous faced rockfill dam. Soil Dynamics and Earthquake Engineering. 2015. 75(August). Pp. 183–198. DOI: 10.1016/j.soildyn.2015.04.005. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.soildyn.2015.04.005>.
18. Song, W., Gao, L., Lu, M., Li, Z. Stress and deformation FEM analysis of Zhanghewan asphalt CFRD. Shuili Fadian Xuebao/Journal of Hydroelectric Engineering. 2007. 26(4). Pp. 82–85. URL: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-34548533254&partnerID=40&md5=4ecf0b4459f934528177f68aa86413e0>.
19. Bezzi, A., Project, B.D. Rehabilitation and completion works at Bumbuna Falls HEP: a case history of interrupted and continued implementation activities. 2016. URL: <https://www.pietrangeli.com/assets/uploads/publicazioni/file/536a084f0b30d.pdf>
20. Ledesma, O., Alejandro Verri, K., Sfriso, A.O. Deformation analysis of an AFRD for mine tailings storage and power generation. ICSMGE 2017 - 19th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. 2017. 2017-September. Pp. 2405–2409. URL: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85045212700&partnerID=40&md5=d1ffd026aade0f553b520bb340153424>.



21. Cole, B.A., Fone, P.J.E. Repair of Scotts Peak Dam, Tasmania. *Technology Review*. 1979. 2. Pp. 211–231. URL: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-0018739231&partnerID=40&md5=fd65169654e096bcc8e7a7c3bb613ca4>.
22. Carter, I.C., Claydon, J.R., Hill, M.J. Geomembrane liner replaces ageing asphaltic lining at Winscar dam, UK. *International Journal on Hydropower and Dams*. 2004. 11(1). Pp. 80–83. URL: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-1542333758&partnerID=40&md5=3e64e2428e8e97ad50b6ee273cbd8eb1>.
23. Dams and Reservoirs under Changing Challenges - Proceedings of the International Symposium on Dams and Reservoirs under Changing Challenges - 79 Annual Meeting of ICOLD, Swiss Committee on Dams. Dams and Reservoirs under Changing Challenges - Proceedings of the International Symposium on Dams and Reservoirs under Changing Challenges - 79 Annual Meeting of ICOLD, Swiss Committee on Dams. 2011. URL: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84863671579&partnerID=40&md5=56d120fd8f1a8d65318b639baa8c18f9>.
24. Taking a synthetic approach. *International Water Power and Dam Construction*. 2000. 52(1). Pp. 28–29. URL: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-0034537056&partnerID=40&md5=8e879eb493c1228da439360b6503c82b>.
25. Scuro, A., Vaschetti, G., Bacchelli, M. The Use of Geomembranes in Dams. Long-Term Behaviour and Environmentally Friendly Rehabilitation Technologies of Dams. 2017. (Ltbd). Pp. 506–514. DOI:10.3217/978-3-85125-564-5-067.
26. Moeglen, J., Ulrich, D., Breul, B. Use of Bituminous geomembrane in hydraulic: Watertightness in dam construction. 10th International Conference on Geosynthetics, ICG 2014. 2014. URL: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84925002914&partnerID=40&md5=620d99a509240526f7f32d59528e8d9c>.
27. Goldyrev V.N., Naumov V.A. Geologicheskij analiz tekhnogenno-mineralnyh obrazovanij Au-Ag epitermalnogo mestorozhdeniya Kupol (Chukotskij AO). *Zoloto i tekhnologii*. 2020. No.3.