



Review Article

Received: 22 May 2021

Accepted: 20 June 2021

Published: 26 June 2021

ISSN 2658-5553

Asphalt Concrete Cores of Embankment Dams: a Review

Sainov, Mikhail Petrovich^{1*} 
Poslykhalin, Yuriy Andreevich² 

¹ Moscow State University of Civil Engineering, National Research University Moscow Power Engineering Institute, Moscow, Russian Federation; SainovMP@mgsu.ru;

² Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russian Federation, awer1999@mail.ru

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

Keywords:

Bituminous concrete; Embankment dam; Asphaltic concrete core dam; Hydraulic fracturing

Abstract:

Introduction. Asphalt concrete cores (ACC) have been used as seepage-control elements of embankment dams for a relatively short time, about 60 years. Relatively not many embankment dams with ACC have been constructed. However, at present, this type of dams is used more often. For assessment of advantages and disadvantages of dams with ACC we analyzed the history of their application. **Materials and methods.** For compiling a historical survey, there were used very old publications and modern sources. **Results.** The analysis shows that in the XX century, the dams with ACC were primarily constructed in European countries. In 1960-s in Germany, a reliable methodology of constructing diaphragms of compacted asphalt concrete permitted using this type of seepage-control element to construct high dams. In the XXI century, the dams with ACC became widely spread in all the continents. At present, the maximum height of dams with ACC reached 167 m. Another methodology of constructing diaphragms was developed and successfully applied in Russia, which was pored asphalt. This methodology is well adapted for use in severe climatic conditions of our country. The dams with ACC, their disadvantages, and the methods of their overcoming are analyzed. **Conclusion.** Dams with ACC are a very perspective type of embankment dams for use in severe climatic conditions; they are competitive with more spread types. Further refinement of structural designs of dams with ACC will be related to the enhancement of their safety.

1 Introduction

Асфальтобетонная диафрагма – это противofильтрационный элемент грунтовой плотины, который выполнен в виде тонкой стены из асфальтобетона, расположенной внутри тела плотины. Зарубежом асфальтобетонные диафрагмы называют битумными ядрами (Bituminous cores), асфальтовыми ядрами (Asphalt core), асфальтобетонными стенами (Asphalt concrete core wall). Ранее для возведения диафрагм использовали различные битумные материалы, однако в настоящее время они выполняются только из одного битумного материала – асфальтобетона.

Асфальтобетон – это искусственный каменный материал на основе органического вяжущего, асфальтового битума, который представляет собой пластичную смесь минеральных материалов (щебня, песка, минерального порошка) с асфальтовым битумом. В составе асфальтобетона битум играет роль связующего. Крупный (щебень) и мелкий (песок) заполнитель обеспечивает формирование жёсткого каркаса материала. Наполнитель (минеральный порошок) обеспечивает высокую плотность материала. За счёт сцепления между битумом и жёстким каркасом, очень малой пористости обеспечивается удерживание битум внутри асфальтобетона.

Благодаря свойствам битума и высокой плотности асфальтобетон является практически водонепроницаемым, а также способен к самозалечиванию образовавшихся трещин. Благодаря наличию минерального заполнителя обеспечивается сдвиговая прочность асфальтобетона и



снижение его деформируемости. Уникальное сочетание перечисленных качеств позволяет создавать из асфальтобетона очень тонкие, но надёжные противофильтрационные элементы грунтовых плотин: асфальтобетонные экраны и асфальтобетонные диафрагмы (АБД).

Плотины с асфальтобетонными диафрагмами (АБД) применяются сравнительно недавно – около 60 лет, их построено сравнительно немного, однако они являются очень перспективным типом грунтовых плотин. Плотины с АБД выполняются как земляными, так и каменно-набросными. В зарубежной научно-технической литературе каменно-набросные плотины с АБД обозначаются как ACRD или ACCRD (англ. Asphaltic/Asphalt Concrete Core Rockfill Dam). Плотины этого типа строятся в разных регионах, в разных климатических условиях, для создания как низко- и средненапорных, так и высоконапорных гидроузлов.

Чтобы оценить преимущества и недостатки грунтовых плотин с АБД, а также перспективы их применения, нами был выполнен исторический обзор опыта строительства плотин с АБД.

2 Materials and Methods

Для систематизации информации об опыте применения асфальтобетонных экранов, нами был выполнен ретроспективный анализ развития конструкций и технологий возведения грунтовых плотин с АБД.

Большой объём информации был получен из трудов Международного конгресса по большим плотинам (ICOLD). Для составления исторического обзора потребовалось использовать издания и источники, некоторые из которых в настоящее время являются труднодоступными. Ниже приведены выходные данные этих изданий, а также их кодовые обозначения для ссылок:

/M/ Моисеев С.Н. Каменно-земляные и каменно-набросные плотины. Основы проектирования и строительство – М.: Энергия, 1970. – 176 с.

/R/ Радченко В.Г., Заирова В.А. Каменно-земляные и каменно-набросные плотины. – Л.: Энергия, 1971. – 166 с.

/N/ Ничипорович А.А. Плотины из местных материалов – М.: Стройиздат, 1973. – 320 с.

/P/ Попченко С.Н. Гидроизоляция сооружений и зданий. – Л.: Стройиздат, 1981. – 304 с.

/L/ Ляпичев Ю.П. Проектирование и строительство современных высоких плотин. – М.: Изд-во РУДН, 2004 – 275 с.

При составлении обзора были использованы также несколько публикаций на русском языке:

/Rus1/ Успенский В.В., Ногинов Ю.Н. Обоснование технологии возведения асфальтобетонной диафрагмы траншейным способом на строительстве гидроузла Хадита // Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. 1988. Т. 211. С. 31-36

/Rus2/ Костин В.В., Нейковский А.А., Юркевич Б.Н. Грунтовая плотина Ирганайской ГЭС. Гидротехническое строительство. 2007. № 6. С. 60-65.

/Rus3/ Прокопович В.С., Созинова Т.А. Расчеты напряженно-деформированного состояния диафрагмы из литого асфальтобетона в теле плотины Ирганайской ГЭС. Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. 2009. Т. 254. С. 52–58.

/Rus4/ Дымант А.Н., Касаткин Ю.Н., Кузнецов Е.И., Успенский В.В. Особенности выполнения литых асфальтобетонных диафрагм грунтовых плотин при низких температурах. Известия Всероссийского научно-исследовательского института гидротехники им. Б.Е. Веденеева. 2009. Т. 254. С. 59–65.

/Rus5/ Дымант А.Н., Кузнецов Е.И., Прокопович В.С. Литые асфальтобетонные диафрагмы грунтовых плотин. Гидротехническое строительство. 2011. №9. С.47–54.

/Rus6/ Дымант А.Н., Кузнецов Е.И., Прокопович В.С. Опыт возведения литой асфальтобетонной диафрагмы каменно-набросной плотины Богучанской ГЭС. Гидротехника XXI век. 2012. №5(12). С.20–25.

/Rus7/ Радченко В.Г., Абрамова Е.В. Самая высокая в мире каменно-набросная плотина с асфальтобетонной диафрагмой // Гидротехника. XXI век. 2018. №2(34). С.8–11.

/Rus8/ Подвысоцкий А.А., Саинов М.П., Кириченко А.Ю. Сравнение работоспособности типов грунтовой плотины для условий Муллалакской ГЭС // Вестник МГСУ. 2021. Т. 16. Вып. 2. С. 202–219. DOI:10.22227/1997-0935.2021.2.202-219.

3 Results and Discussion

Выполненный нами обзор информации о развитии конструкций и технологий создания плотин с АБД представлен в хронологическом порядке.

3.1 Первые асфальтобетонные диафрагмы.

Асфальтобетонные диафрагмы возникли как модификация конструкции асфальтобетонных экранов. АБД стали использовать для гидроизоляции грунтовых плотин с середины XX века, а асфальтобетонные экраны применяются с начала XX века.

Впервые диафрагма из битумсодержащего материала была применена в 1948 году на плотине Vale do Gaio (ныне Trigo de Morais) в Португалии. Максимальная строительная высота этой плотины составляет 51 м. Плотина имеет наклонную диафрагму толщиной 10-20 см с наклоном 1:0,8 в сторону верхнего бьефа [1]. Диафрагма устраивалась как слой непроницаемого материала, укладываемого между каменной кладкой тела плотины. Асфальтовый материал диафрагмы по своему составу был близок к асфальтовому раствору. По данным [М] он состоял из 10% битума, 27% минерального порошка, 27% песка и 36% щебня, а максимальная крупность частиц заполнителя составляла 9 мм [1].

Дальнейшее развитие асфальтобетонные диафрагмы получили в Германии.

В Германии в 1950-1960-х годах на плотинах Henne и Bigge наклонная стенка из асфальтобетона была применена как дополнительный конструктивный элемент. Эта конструкция выполняла роль полупроницаемой зоны, предназначенной для предотвращения опасной эрозии грунтов в случае повреждения основного противодиффузионного экрана. Она выполнена с наклоном 1:0,6 в сторону верхнего бьефа. Основным противодиффузионным элементом в обеих плотинах является двухслойный поверхностный асфальтобетонный экран с дренажным слоем под ним.

Плотина Henne (нем. Hennetalsperre) высотой 60 м была построена в 1957 г. на реке Ruhr. Плотина Bigge имеет высоту 55 м (рис. 1), она построена в 1962 г. Её диафрагма имеет толщину 0,85 м.

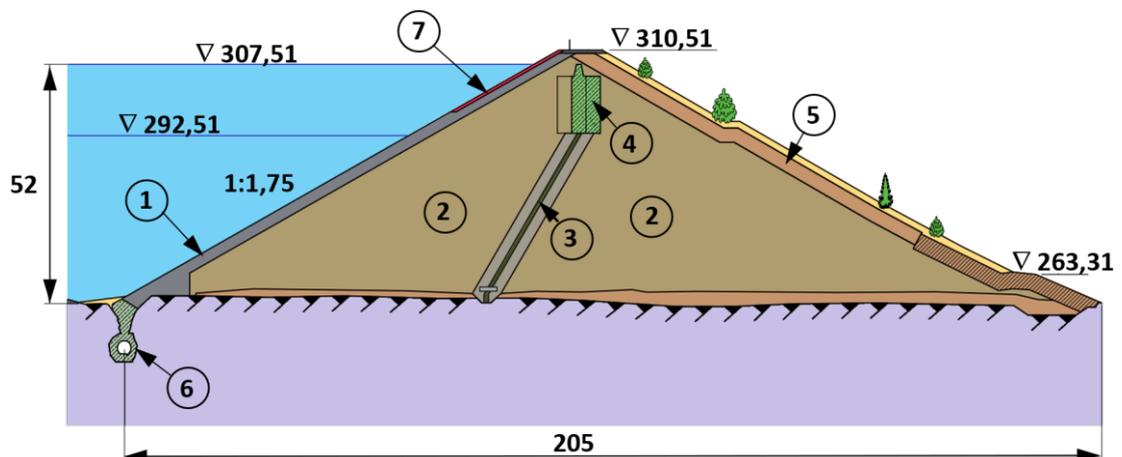


Рис. 1 - Конструкция плотины Bigge в соответствии с [1]

1 – асфальтобетонный экран; 2 – каменная наброска, 3 – асфальтобетонная диафрагма как полупроницаемая зона, 4 – бетонная стенка, 6 – галерея для контроля или цементации, 7 – покрытие из асфальтобетона, устроенное при реконструкции экрана

Fig. 1 - Bigge dam structure in accordance [1]

1 – asphalt concrete face; 2 – rock fill, 3 – asphalt concrete core as a semi-permeable zone, 4 – concrete wall, 6 – gallery for control or grouting, 7 – asphalt concrete pavement, arranged during face reconstruction

В качестве основного противодиффузионного элемента грунтовой плотины асфальтобетонная диафрагма применялась сначала на плотинах меньшей высоты. В 1957 г. были построены плотины Wahnbach высотой 13 м (Германия) и Rotguldensee высотой 22 м (Австрия). АБД плотины Wahnbach впервые была выполнена вертикальной.

Для создания асфальтобетонной диафрагмы перечисленных четырёх плотин (Henne, Bigge, Wahnbach, Rotguldensee) использовалась специально разработанная технология. По этой технологии горячая асфальтобетонная смесь помещается в опалубку, а затем с помощью

вибраторов (до 8 т) в неё втапливается крупный заполнитель [1]. Содержание крупного заполнителя в полученном таким образом асфальтобетоне достигало 40%, иногда диаметр камней достигал 70 см /R/. Созданная таким образом диафрагма выполнялась широкой: её толщина могла составлять 100÷120 см.

Примером применения данной технологии может являться плотина Eichagen высотой 21 м, которая была построена в Германии в 1962 г. /M/. Диафрагма этой плотины имеет толщину 0,8-0,9 м. В асфальтовый раствор с помощью вибраторов массой 4,5 т втапливался крупный заполнитель размером 10-30 мм. Содержание крупного заполнителя в асфальтобетоне достигало 42÷45%.

Асфальтобетонная диафрагма, созданная по описанной выше технологии, в научно-технической литературе получила обозначение «Cyclopear Mortar Core» (рус. «ядро из раствора с очень крупным заполнителем»).

В 1960-х годах эта технология активно применялась во Франции и Германии (ФРГ) для создания асфальтобетонных диафрагм грунтовых плотин. Она стала первоосновой для технологии литого асфальтобетона, которая позже была разработана и применена для строительства плотин в СССР и России.

Однако в европейских странах от технологии на основе литого асфальтобетона впоследствии отказались в пользу технологии уплотняемого асфальтобетона. Эта технология была разработана немецкой фирмой Strabag. Диафрагмы, созданные по этой технологии, получили обозначение «Dense Asphaltic Concrete Core» (рус. «плотное асфальтобетонное ядро») [1].

Технология уплотняемого асфальтобетона заключается в использовании более жёсткой асфальтобетонной смеси, которую можно уплотнять катками. Для этого в смеси используется меньшее количество битума – 5÷7%, а для повышения плотности получаемого асфальтобетона в его составе используется минеральный наполнитель. Для уплотняемого асфальтобетона обычно используется жёсткий битум марок 60 или 70.

Уплотняемый асфальтобетон укладывается слоями по 0,2÷0,25 м и уплотняется лёгкими катками. Благодаря содержанию разных по крупности частиц и их плотной упаковке пористость уплотняемого асфальтобетона на момент укладки составляет порядка 3% [3]. За счёт такой низкой пористости обеспечивается высокая степень водонепроницаемости асфальтобетона, которая практически исключает возможность гидравлического разрыва диафрагмы.

Впервые технология уплотняемого асфальтобетона для устройства диафрагмы была применена на плотине Dhünn высотой 35 м (рис.2) /R/. Эта плотина была построена в Германии в 1962 г. (В 1987 г. вместо плотины Dhünn была построена более высокая плотина, высотой 63 м. Она также имеет название Dhünn, но иногда её называют Große Dhünn (Große Dhünntalsperre). Диафрагма новой плотины имеет ломаное очертание) Асфальтобетон был выполнен на основе битума марки 65 и заполнителя крупностью до 30 мм /N/. Вертикальная диафрагма плотины Dhünn имела переменную толщину: от 0,5 м у гребня до 0,7 м у основания. Для дренирования просочившейся воды за АБД был уложен слой щебня толщиной 25-80 см.

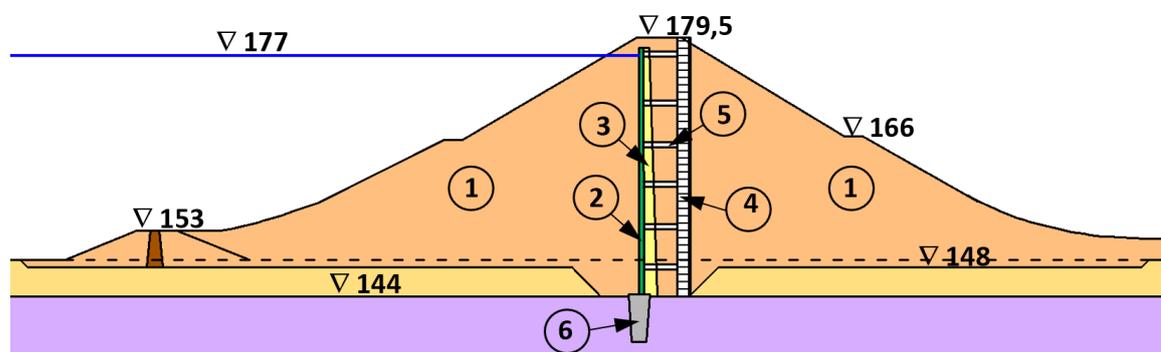


Рис.2 - Конструкция плотины Dhünn в соответствии с [1]

1 – каменная наброска, 2 – асфальтобетонная диафрагма, 3 – переходная зона, 4 – смотровой колодец, 5 – трубы для размещения реперов, 6 – бетонный зуб в основании.

Fig.2 - Dhünn dam structure in accordance [1]

1 – rockfill, 2 – asphaltic concrete core, 3 – transition zone, 4 – observation and measuring channel, 5 – observation apes, 6 – concrete cut off wall.



Т.к. это было первый опыт применения уплотняемого асфальтобетона, за диафрагмой был устроен смотровой колодец из бетонных колец внутренним диаметром 150 см и высотой 100 см /N/, /R/. Между АБД и смотровым колодцем было уложено несколько (по высоте труб) диаметром 70 см, в которых были установлены реперы для контроля вертикальных и горизонтальных перемещений диафрагмы. По результатам измерений максимальное смещение диафрагмы в сторону нижнего бьефа составило 22 см.

Позже технология уплотняемого асфальтобетона была усовершенствована и механизирована. В настоящее время диафрагма из уплотняемого асфальтобетона укладывается и уплотняется одновременно с окружающими её переходными зонами. Укладка уплотняемого асфальтобетона осуществляется тонкими слоями, обычно с той же толщиной, что и переходные зоны. Уплотнение асфальтобетона и переходных зон производится катками одновременно. Такой способ возведения АБД обеспечивает высокую степень уплотнения асфальтобетона и надёжность его сопряжения с телом плотины.

У диафрагмы, созданной из уплотняемого асфальтобетона, помимо высокой плотности и водонепроницаемости есть ещё очень важное преимущество. За счёт низкого содержания битума заполнитель образует жёсткий скелет, что снижает деформируемость асфальтобетона. По своей деформируемости уплотняемый асфальтобетон сопоставим с каменной наброской тела плотины. В таких условиях гидравлический разрыв асфальтобетонной диафрагмы считается невозможным.

Важным элементом конструкции плотины с АБД являются переходные зоны, устраиваемые с обеих сторон от диафрагмы. Они предотвращают выход битума из асфальтобетона. Опытным путём установлено, что крупность частиц фильтра (переходной зоны) не должна превышать размер частиц заполнителя асфальтобетона в 6-8 раз. На практике применяют разные условия для выбора зернового состава фильтра. В США принимают, что диаметры частиц 15%-ной обеспеченности фильтра и заполнителя асфальтобетона должны отличаться не более, чем в 5 раз (Shafiei, H., Eskandari, M.S. A Review of the Embankment Dam with Asphalt Concrete Core. International Journal of Science and Engineering Investigations. 2016. 5(54). Pp. 111–114). В трудах ICOLD рекомендуется устанавливать 2 условия: максимальный размер частиц заполнителя должен быть больше диаметра 10%-ной обеспеченности фильтра, а максимальный диаметр частиц фильтра не должен быть мельче максимального размера частиц упорных призм более, чем в 4 раза [3]. Обычно фильтр выполняют из щебенистого грунта, основную долю которого занимают частицы размером 10-60 мм.

3.2 Применение диафрагм из уплотняемого асфальтобетона в современных плотинах.

Создание технологии уплотняемого асфальтобетона позволило расширить сферу применения асфальтобетонных диафрагм, их стали использовать для создания высоких плотин.

В 1977-1980 годах в Австрии осуществлялось строительство плотины Finstertal высотой 96 м. Диафрагма плотины имеет наклон 1:0,4, её толщина составляет 50-70 см [2]. Асфальтобетон диафрагмы содержит 6,3% битума марки В65, а максимальная крупность частиц заполнителя составляет 16 мм. Асфальтобетон был уплотнён для пористости 2%. Особенностью плотины Finstertal является её обжатый профиль – заложение верхового откоса составляет 1,5, низового – 1,3. Для устройства верховой переходной зоны использована морена с максимальной крупностью частиц 100 мм, а для низовой – отсортированный карьерный материал.

В 1973-1978 годах в Гонконге в рамках реализации проекта «High Island» по созданию запасов пресной воды были построены две высокие каменно-набросные плотины с АБД. Западная плотина (High Island West) имеет высоту 95 м, восточная (High Island East) – 105 м [2]. Особенностью этих плотин является то, что они возводились в морском заливе, поэтому в их нижней части выполнено две АБД (рис.3). Толщина основной диафрагмы составляет 0,8-1,2 м, второй диафрагмы – 0,6 м. Через каждые 60 м диафрагмы соединяются вертикальными стенками, которые ограничивают движение фильтрации в пределах секций. С низовой стороны от диафрагм расположена смотровая галерея.

Эти две плотины в Гонконге превзошли по высоте не только другие плотины с АБД, но и все плотины с асфальтобетонным экраном.

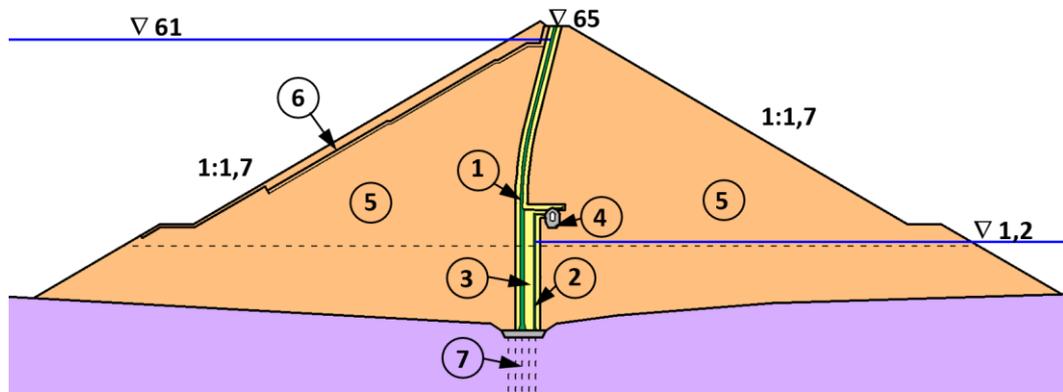


Рис. 3 - Конструкция плотины High Island East в соответствии с [2]

1 – основная асфальтобетонная диафрагма, 2 – вторая асфальтобетонная диафрагма, 3 – переходные зоны, 4 – смотровая галерея, 5 – каменная наброска упорных призм, 6 – крепление верхового откоса, 7 – инъекционная завеса в основании

Fig. 3 - High Island East Dam structure in accordance [2]

1 – main asphaltic concrete core, 2 – second asphaltic concrete core, 3 – transition zones, 4 – inspection gallery, 5 – rockfill, 6 – riprap, 7 – grout curtain

Ещё одной сферой применения плотин с асфальтобетонной диафрагмой стали районы со сложными климатическими условиями. Это связано с тем, что расположение диафрагмы внутри тела грунтовой плотины сглаживает температурные воздействия на асфальтобетон.

В конце XX века АБД была применена для строительства 9 плотин в Норвегии [3], наиболее значительными из них являются плотины Storvatn и Storglomvatn. Некоторые из этих плотин были построены в районах с суровым климатом, в частности плотина Storglomvatn располагается за Северным Полярным кругом.

Плотина Storvatn построена в 1987 г. и имеет высоту 90 м. Эта плотина долгое время являлась самой длинной плотиной с АБД – её длина составляет 1460 м [4]. Диафрагма выполнена наклонной (наклон 1:0,2). Её толщина составляет 0,5-0,8 м. Для асфальтобетона применялся заполнитель (крупный заполнитель – щебень) крупностью до 16 мм, а в переходные зоны укладывался щебень крупностью до 40 мм. Асфальтобетон укладывался слоями толщиной 20 см и уплотнялся за 6 проходов катков массой не менее 2 т. Плотина Storvatn была оборудована инклинометрами, которые позволяли измерять осадки и смещения диафрагмы. По данным натурных измерений осадка диафрагмы достигает около 20 см, а горизонтальное смещение – около 10 см [4].

Плотина Storglomvatn высотой 128 м была построена в 1998 г. Она имеет вертикальную асфальтобетонную диафрагму и довольно обжатый профиль: заложение верхового откоса составляет 1,5, низового – 1,4. Толщина диафрагмы составляет 0,5-0,9 м. В течение почти 20 лет эта плотина являлась самой высокой плотиной с АБД в мире.

На основе опыта строительства норвежских плотин [3] был рекомендован следующий состав уплотняемого асфальтобетона. Содержание битума в асфальтобетоне составляло 6,1÷6,3%. Чаще всего использовался жёсткий битум марки 60-65, только в плотине Storglomvatn использовался мягкий битум марки 180, т.к. при его использовании увеличивается способность асфальтобетона к самозалечиванию трещин. Содержание минерального наполнителя в составе твёрдой составляющей асфальтобетона составляло 11-13%. В качестве заполнителя использовался натуральный гравийный грунт (в большинстве случаев), щебень или их смесь. Максимальная крупность заполнителя составляла 16-20 мм. В составе заполнителя песчаные частицы (до 2 мм) занимали от 20 до 42%.

В плотинах Норвегии уплотнение асфальтобетона выполнялось при следующих температурах: на основе битума марки 60-65 при 160÷180°C, на основе битума марки 140-155°C. Путём обобщения опыта строительства других плотин с АБД установлены следующие диапазоны температур, при которых осуществляются основные технологические операции с асфальтобетоном: приготовление асфальтобетонной смеси выполняется при 165-178°C, уплотнение асфальтобетона начинается при 110-170°C, а завершается при температуре не ниже 80-95°C.



Из перечисленных выше примеров видно, что в XX веке плотины с АБД за редким исключением строились в Европе (чаще всего в Германии). Единичные случаи применения этих плотин отмечались в Эфиопии, Эквадоре, Чили, Японии [1]. Однако в XXI веке плотины с АБД стали активно применяться в разных странах и континентах.

В 2003 г. в Иране была построена плотина Meijagan высотой 52 м [5]. Профиль этой каменно-набросной плотины имеет уклон верхового откоса 1:1,75, низового – 1:1,6. Асфальтобетон включал 6,4% битума марки 60. Крупность частиц заполнителя составляла 19 мм. Асфальтобетон укладывалась слоями толщиной по 0,25 м и уплотнялся катком массой 1,8 т. Для устройства фильтров использовался щебенистый грунт с максимальной крупностью частиц 60 мм. Пористость асфальтобетона диафрагмы плотины Meijagan не превышает 2%. По результатам испытаний прочность асфальтобетона на растяжение составила 240 кПа.

В 2010 г. в Иране была построена ещё одна дамба с АБД – Shur River высотой 80 м и длиной 660 м. Эта дамба служит для устройства хвостохранилища.

В 2010 г. крупная плотина с АБД была построена в Саудовской Аравии. Высота плотины Murwani составляет 102 м, а длина – 1012 м.

Также в 2010 г. первая плотина с АБД была построена в Бразилии [6]. Плотина Foz do Charcosó имеет высоту 48 м и длину 548 м. В 2012 г. в Бразилии была построена ещё одна плотина с АБД, это плотина Jirau высотой 63 м.

В Северной Америке первая плотина с АБД была построена в 2008 г. [7]. Плотина Nemiscau- 1 расположена в Канаде, она имеет высоту 15 м и длину 300 м. После этого в 2010-х годах велось строительство целого каскада La Romaine плотин с АБД. Самая высокая из них, плотина La Romaine 2, имеет высоту 102 м [7].

Больших успехов в строительстве каменно-набросных плотин с АБД достиг Китай. По данным [Rus7] первая грунтовая плотина с АБД, плотина Baihe высотой 25 м, была построена ещё в 1973 г., но уже к 2017 году в Китае были построены 65 плотин с АБД. В настоящее время Китай лидирует по количеству грунтовых плотин с АБД.

В 2003 г. в рамках строительства гидроузла «Три ущелья» была построена плотина Mao Ping Xi высотой 105 м и длиной 1840 м.

В 2005 г. была построена плотина Yele высотой 124,5 м [8]. Высота диафрагмы этой плотины составляет 120 м. Для асфальтобетона использовался битум АН-70. Содержание битума составило 6,3%, минерального наполнителя – 12%. Максимальный размер крупного заполнителя составил до 20 мм. Асфальтобетон укладывался слоями толщиной 0,20-0,26 м при температуре асфальтобетона 160°C. Уплотнение производилось за 8 проходов катком массой 1,5 т. Плотина Yele находится в районе с минимальной температурой –20°C, но укладка уплотняемого асфальтобетона осуществлялась при температурах воздуха выше -5°C.

В мае 2008 г. плотина Yele успешно перенесла землетрясение Wenchuan [9,10]. При землетрясении гребень получил следующие перемещения: осадка 19 мм, смещение в сторону нижнего бьефа 25 мм, смещение вдоль створа 17 мм [8].

В 2017 г. в Китае была построена самая высокая каменно-набросная плотина с АБД. Высота плотины Qixue составляет 174,2 м. Плотина располагается в узком скальном ущелье – её длина по гребню составляет 220 м [11], [Rus7]. Особенностью конструкции плотины Qixue является то, что диафрагма располагается на высоком и массивном бетонном «постаменте», поэтому высота диафрагмы составляет 132 м, т.е. существенно меньше высоты плотины (рис.4). Толщина диафрагмы поверху составляет 0,6 м, с глубиной увеличивается до 1,5 м, а на контакте с бетонным массивом – до 3 м [Rus7].

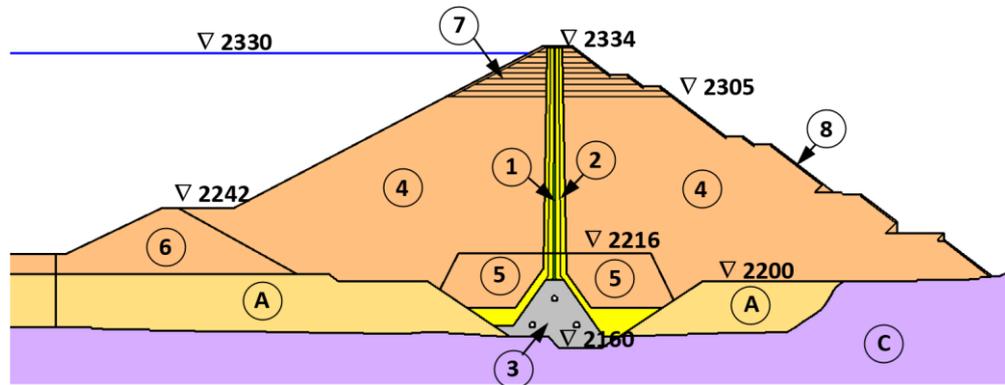


Рис. 4 - Конструкция плотины Qixue в соответствии с [11]

1 – асфальтобетонная диафрагма, 2 – двухслойные переходные зоны, 3 – бетонный массив, 4 – каменная наброска, 5 – особо тщательно уплотнённая каменная наброска, 6 – верховая перемычка, 7 – полипропиленовые георешётки, А – слой аллювия, С – скальное основание
Fig. 4 - Qixue dam structure in accordance [11]

1 – asphalt concrete core, 2 – transition zone; 3 – concrete monolith, 4 – rockfill, 5 – especially well compacted rockfill, 6 – upstream cofferdam, 7 – bi-directional polypropylene geo-grids; A – alluvial overburden, C – foundation

Плотина Qixue была возведена менее, чем за 2 года, в АБД было уложено 21 тыс. м³. Состав и технология укладки асфальтобетона была аналогична применённой при строительстве плотины Yele. Отличием являлось лишь использование более тяжёлых катков, массой 3 т.

Диафрагма плотины Qixue была оснащена большим количеством приборов для измерений. По результатам натурных измерений испытала существенные деформации. Её максимальное смещение в сторону нижнего бьефа составило почти 90 мм [11]. Была измерена также разница в осадках АБД и переходных зон. Было установлено, что эта разница накапливалась в течение строительства плотины. Как правило, она не превышает 20 мм, но может достигать почти 40 мм. Были установлены также термометры для контроля за процессом остывания асфальтобетона после укладки и обнаружения возможных протечек. Через месяц после укладки температура асфальтобетона упала до 36°С, а через 9 месяцев – до 17°С [11].

Рекорд высоты плотины с АБД, установленный плотиной Qixue, удерживался недолго. В 2019 г. в Албании было завершено строительство плотины Moglicë с максимальной строительной высотой 167 м. Длина плотины по гребню составляет 320 м. О высоте АБД сведений не имеется.

Планируется строительство плотин/дамб с АБД большей высоты. В Канаде рассматривается вариант строительства дамбы шламоохранилища KSM-Water-Storage высотой более 160 м. В Папуа-Новой Гвинее рассматривается вариант строительства ГЭС на реке Frieda с высотой плотины более 190 м.

3.3 Применение асфальтобетонных диафрагм в грунтовых плотинах России.

В России до конца 1970-х годов асфальтобетонные диафрагмы в строительстве грунтовых плотин не применяли.

Затем во ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева была разработана технология создания диафрагм из литого асфальтобетона. Первая дамба с диафрагмой из литого асфальтобетона был устроена в 1978-1981 гг. на шламоохранилище Днепровского алюминиевого завода в г. Запорожье /Rus6/. Она имеет высоту 32 м и длину 700 м.

ВНИИГ в советских ведомственных нормах¹ рекомендовал следующий состав литого гидротехнического асфальтобетона: 10–15% битума БНД-40-60, 15–25% порошкообразного наполнителя, 20–40% разнозернистого песка (фракции 0,05-2 мм), 30–50% щебня или гравия (крупностью до 25 мм). Он отличается от состава уплотняемого асфальтобетона бóльшим содержанием битума и минерального наполнителя.

¹ ВСН 37-70. Гидроизоляция энергетических сооружений. Нормы проектирования. Министерство энергетики и электрификации СССР. Всесоюзный научно-исследовательский институт гидротехники имени Б.Е. Веденеева – Л.: Энергия. 1972.



Технология литого асфальтобетона заключается в укладке асфальтобетонной смеси в опалубку, которая может быть съёмной или несъёмной. Уплотнение смеси достигается под её собственным весом. Укладка литой асфальтобетонной смеси в опалубку осуществляется при температуре 180÷220°С. Разборка опалубки осуществляется при температуре асфальтобетона ниже 45°С.

У литого асфальтобетона есть несколько преимуществ перед уплотняемым. Литой асфальтобетон можно укладывать слоями по 120 см /Rus5/, что позволяет вести строительство более высокими темпами. Благодаря высокому содержанию битума обеспечивается самозалечивание трещин даже при низких температурах. Качество литого асфальтобетона достигается даже при отклонениях от технологических норм. Однако самым главным преимуществом технологии литого асфальтобетона является то, что позволяет выполнять работы по возведению диафрагмы при низких отрицательных температурах воздуха.

Впервые применение в России АБД для грунтовой плотины водохранилища было запланировано на Богучанской ГЭС. Учитывая суровые климатические условия строительства с продолжительным сезоном отрицательных температур (190 дней в году) и абсолютным минимумом температур –60°С, было принято решение устраивать в грунтовой плотине диафрагму из литого асфальтобетона.

Перед строительством Богучанской плотины технология литого асфальтобетона была апробирована при строительстве плотины Haditha в Ираке, которую проектировали советские специалисты. Плотина Haditha строилась в 1977-1987 годах. Её высота составляет 56 м, а длина – около 9 км. Асфальтобетонная диафрагма плотины имеет толщину от 0,4 м (вверху) до 0,8 м (внизу) (Adamo, N., Sissakian, V.K., Al-Ansari, N., Elagely, M., Knutsson, S., Laue, J. Comparative Study of Mosul and Haditha Dams in Iraq: Different Construction Materials Contribute to Different designs. *Journal of Earth Sciences and Geotechnical Engineering*. 2018. 8(2). Pp. 1792–9660). В составе асфальтобетона в качестве минерального наполнителя доломитовый порошок. Литой асфальтобетон заливался не в опалубку, а в траншею, вырытую в отсыпанном ярусе плотины /Rus1/.

Грунтовая плотина Богучанской ГЭС является крупным сооружением, она имеет максимальную высоту 77 м и длину 1861 м. Её возведение было начато в 1988 г., но в 1994 г. оно резко замедлилось из-за отсутствия финансирования. К этому времени была выполнена только нижняя часть плотины и диафрагмы.

На данном этапе при реализации технологии литого асфальтобетона были выявлены технические проблемы, связанные с нестабильной работой оборудования и осложнениями по изготовлению и доставки асфальтобетонной смеси в зимний период /Rus4/. При возобновлении строительства Богучанской плотины (около 2006 г.) обсуждался вопрос о смене технологии возведения АБД. Предлагалось возводить диафрагму по технологии уплотняемого асфальтобетона, однако по ряду причин это было нежелательно. В частности, возникала проблема сопряжения литого и уплотняемого асфальтобетона, сокращалась продолжительность сезона, в течение которого могла осуществляться укладка асфальтобетона.

Однако к этому времени в России была запроектирована и строилась другая плотина с АБД. Это плотина Ирганайской ГЭС в Дагестане (рис.5), она выше Богучанской (высота 101 м), но меньше по объёму (длина по гребню 313 м) /Rus2/. Асфальтобетонная диафрагма Ирганайской плотины также устраивалась из литого мелкозернистого асфальтобетона. Она имеет ломаное очертание, её толщина составляет от 0,9 м до 1,3 м. Для приготовления асфальтобетона использовался битум марок БНД 60/90 и БНД 90/130. В нижней трети укладка асфальтобетона осуществлялась слоями высотой 1 м, выше – по 0,5 м. В качестве съёмной опалубки использовались бетонные блоки, которые покрывались полимерной плёнкой. Строительство плотины Ирганайской ГЭС было завершено в 2008 г.

Учитывая положительный опыт строительства Ирганайской плотины, было решено продолжить строительство плотины Богучанской ГЭС с АБД из литого асфальтобетона. Применялся следующий состав асфальтобетона: битум марки БНД 40/60 8-12%, 30-40% щебня, 35-40% песка, 20-25% минерального наполнителя. В 2006 г. строительство Богучанской плотины было возобновлено, оно шло ускоренными темпами. Использование литой технологии позволило вести укладку асфальтобетона почти 8 месяцев в году. Самая низкая температура, при которой велись работы, составила –35,8°С. За 2007-2009 гг. в АБД была уложена примерно половина всего объёма асфальтобетона. В 2008 г. (за 8 месяцев строительного сезона) были уложены

почти 30 тыс. м³ асфальтобетона. К 2012 году строительство грунтовой плотины Богучанской ГЭС было завершено.

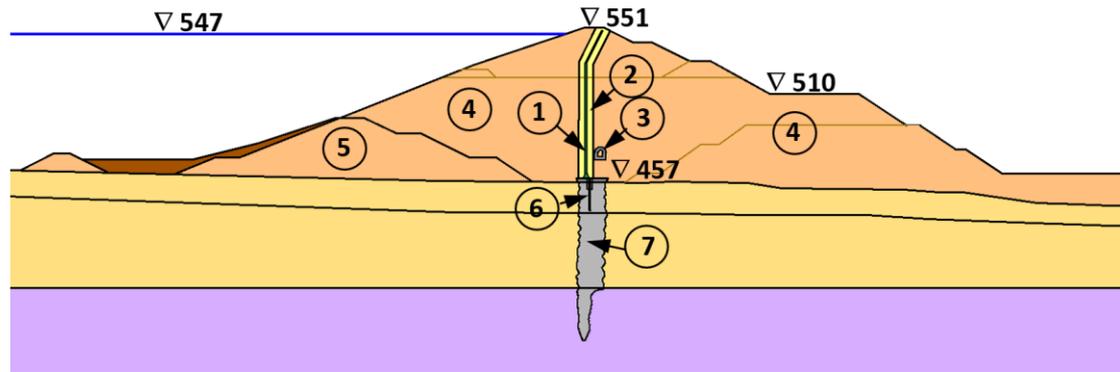


Рис. 5 – Конструкция Ирганайской плотины в соответствии с /Rus2/

1 – асфальтобетонная диафрагма, 2 – переходные зоны, 3 – упорные призмы из гравийно-галечникового грунта, 4 – железобетонная галерея, 5 – плотина первой очереди, 6 – стена в грунте, 7 – инъекционная завеса.

Fig. 5 - Construction of the Irganai dam in accordance /Rus2/

1 – asphaltic concrete diaphragm, 2 – transition zones, 3 – thrust prisms made of gravel-pebble soil, 4 – reinforced concrete gallery, 5 – first stage dam, 6 – cut off wall, 7 – injection curtain.

В 2014 году в Дагестане было завершено строительство ещё одной каменно-набросной плотины с АБД. Это Гочатлинская плотина высотой 69 м и длиной по гребню 157 м.

Опыт применения литого асфальтобетона в России показал возможность применения асфальтобетонных диафрагм грунтовых плотин в суровых климатических условиях.

3.4 Оценка преимуществ плотин с асфальтобетонными диафрагмами.

Грунтовых плотин с АБД построено относительно немного в сравнении с плотинами таких типов как каменно-земляные плотины с ядром/экраном из глинистого грунта, каменно-набросные плотины с бетонным или асфальтобетонным экраном. АБД применены примерно в 2 раза реже, чем асфальтобетонные экраны. Однако в последнее время плотины с АБД строятся всё чаще. По данным [1] на начало 1980-х годов таких плотин было построено всего 40, к началу XXI века – около 70, а сейчас их количество превышает 170 /Rus7/.

Причины увеличения «популярности» плотин с АБД кроются в наличии у них уникальных преимуществ в сравнении с плотинами других типов.

Главным преимуществом АБД по сравнению с другими типами противофильтрационных элементов является возможность применения в сложных и суровых климатических условиях. В отличие от асфальтобетонных и бетонных экранов, диафрагма, находясь внутри тела плотины, защищена от температурных и ледовых воздействий. В отличие от каменно-земляных плотин для устройства АБД не требуется глинистых грунтов, необходимо лишь относительно небольшое количество битума. Укладка асфальтобетона может вестись при неблагоприятных погодных условиях и даже при отрицательных температурах, когда укладка глинистых грунтов невозможна.

Ещё одним преимуществом АБД является возможность применения для строительства высоких плотин. За 60 лет применения АБД не зафиксировано ни одного случая серьёзной аварии грунтовых плотин с АБД, которая сопровождалась бы выходом её из строя. Асфальтобетонные диафрагмы не теряют своей водонепроницаемости даже при высоких давлениях и высоких деформациях тела плотины.

Таким образом, плотины с АБД составляют достойную конкуренцию «традиционным» типам грунтовых плотин. Они имеют хорошие перспективы для дальнейшего использования, особенно в районах с суровым холодным климатом, где затруднено применение плотин других типов.

Однако помимо преимуществ у плотин с АБД имеются и недостатки. Основным недостатком является отсутствие гарантий надёжности грунтовых плотин с АБД.

3.5 Оценка надёжности грунтовых плотин с асфальтобетонной диафрагмой.

Иногда высказываются сомнения в гарантиях герметичности АБД и высказываются предположения, каким образом она может быть нарушена. Эти гипотезы часто носят умозрительный характер, они требуют проверки, но тем не менее, заслуживают внимания. Рассмотрим предположения о возможных причинах и механизмах нарушения герметичности АБД.



Первая возможная причина – это гидравлический разрыв диафрагмы.

Расчётные и экспериментальные исследования напряжённо-деформированного состояния АБД свидетельствуют о наличии арочного эффекта в распределении напряжений в диафрагме. Арочный эффект вызван различиями в деформируемости каменной наброски и асфальтобетона – АБД «зависает» на окружающем её грунте. Натурные измерения на плотине Qixue свидетельствуют о том, что АБД стремится получить большие осадки, чем окружающий её грунт [11]. Натурные измерения на плотине Богучанской ГЭС показали, что осадки диафрагмы распределены неравномерно вдоль створа несмотря на то, что высота плотины во всех сечениях примерно одинакова [12].

Арочный эффект выражается в уменьшении вертикальных напряжений в диафрагме по сравнению с давлением от собственного веса асфальтобетона. Дефицит сжатия может способствовать гидравлическому разрыву асфальтобетонной диафрагмы под гидростатическим давлением верхнего бьефа. Однако опыт показывает, что гидравлический разрыв АБД не происходит даже при самых высоких давлениях благодаря высокой плотности асфальтобетона и отсутствия в нём системы сообщающихся пор.

Вторая возможная причина – это изменения в структуре асфальтобетона.

В научно-технической литературе подчёркивается, что герметичность асфальтобетона обеспечивается при пористости 3% и менее [1,13]. При более высокой пористости проницаемость асфальтобетона снижается в условиях высокого давления. При высокой пористости возникает опасность не только проникновения воды, но и выхода битума из асфальтобетона.

Для надёжности АБД необходимо обеспечить сохранность структуры асфальтобетона при его работе в теле плотины. Нужно иметь в виду, что под действием нагрузок происходит деформирование тела плотины и АБД и, соответственно, изменяется её форма. Диафрагма сжимается по вертикали, но расширяется в боковые стороны. Факт расширения диафрагмы зафиксирован натурными измерениями на плотине Finstertal (Австрия) [13]. Такой характер деформирования диафрагмы может привести к увеличению пористости асфальтобетона, а также к появлению разрывов при сдвиговых деформациях.

Следует учитывать, что нижняя часть диафрагмы имеют довольно низкую температуру, примерно равную температуре воды водохранилища. При таких температурах асфальтобетон имеет большую жёсткость, чем при его укладке в тело плотины, что может способствовать нарушениям его целостности.

Третья возможная причина – это изменения в составе и свойствах асфальтобетона с течением времени.

Асфальтобетон диафрагмы находится в довольно благоприятных условиях – он не подвергается солнечной радиации, работает в довольно стабильном температурном режиме, поэтому можно ожидать, что срок его службы будет очень продолжительным. Однако, со временем, хоть и очень медленно, в асфальтобетоне нарастают деструктивные процессы, которые могут привести к нарушению её герметичности. Происходит уменьшение количество битума в асфальтобетоне – часть битума выдавливается в поры переходных зон. С течением времени битум постепенно окисляется.

Существующие на данный момент плотины с АБД ещё не достигли того возраста, чтобы можно было судить о долговечности асфальтобетона в теле плотины. Однако очевидно, что со временем свойства асфальтобетона, уложенного в диафрагму, с течением времени изменяются.

Соответственно, вопрос о безопасности асфальтобетонной диафрагмы как противофильтрационного элемента пока остаётся открытым.

Существует ещё одна проблема, связанная с обеспечением безопасности плотин с АБД – неблагоприятное напряжённо-деформированное состояние (НДС) тела самой плотины.

По сравнению с плотинами с экраном в плотине с АБД грунт работает в менее благоприятных условиях. В плотинах с экраном весь массив грунта тела плотины работает на сжатие (в вертикальном и горизонтальном направлениях) и защищён от водонасыщения. В плотине с АБД, в её верховой упорной призме, при наполнении водохранилища возможны просадки каменной наброски при замачивании.

Ещё большую опасность представляют горизонтальные смещения плотины в сторону нижнего бьефа, возникающие под действием гидростатического давления. Численное моделирование, выполненное различными авторами /Rus3, Rus8/, показывает, что смещения приводят к существенному уменьшению уровня сжатия в верховой упорной призме и росту



касательных напряжений. При больших смещениях в верховой форме формируется призма обрушения, а также возможно проскальзывание грунта по верховому контакту с АБД. Таким образом, существует опасность потери устойчивости плотины.

Опасность обрушения верховой части плотины с АБД возрастает при восприятии сейсмических нагрузок. По результатам численного моделирования именно в верховой части плотины следует ожидать повышенные осадки /Rus8/, [14].

По-видимому, при современном уровне уплотнения каменной наброски плотины с АБД имеют ограничение по применению по высоте. Сверхвысокие плотин АБД могут строиться только в узких створах, когда благодаря влиянию скальных бортов горизонтальные смещения плотины существенно уменьшаются.

3.6 Недостатки плотин с асфальтобетонными диафрагмами и путей их преодоления

Можно выделить несколько недостатков плотин с асфальтобетонными диафрагмами в сравнении с грунтовыми плотинам других типов.

Первая группа недостатков связана с уровнем безопасности АБД как противофильтрационного элемента плотины и всей плотины в целом.

На данный момент не зафиксировано ни одного случая выхода из строя ни одной из асфальтобетонных диафрагм. Тем не менее, как было показано выше, существуют сомнения в достаточности уровня безопасности АБД и плотин с АБД.

В целях улучшения напряжённого состояния АБД некоторые исследователи предлагают выполнять её с арочным очертанием в плане. Это должно создать дополнительное сжатие в диафрагме [15, 16]. Некоторые недавно построенные плотины имеют такое очертание диафрагмы, в частности дамба Shur River, Богучанская плотина.

Однако следует иметь в виду, что нарушения водонепроницаемости АБД могут возникнуть также вследствие технологических нарушений, допущенных при строительстве.

В [17] упоминается случай, когда нарушение герметичности плотины с АБД произошло при первом наполнении водохранилища. На плотине Dazhu высотой 61 м, построенной в высокогорной местности западной части Китая в 2011 г., были зафиксированы повышенные фильтрационные расходы (23 л/с). Из-за них пришлось прекратить наполнение водохранилища и провести ремонт.

В [18] описаны несколько случаев нарушения герметичности плотин с АБД в Китае. Повышенные фильтрационные расходы наблюдались на плотине Majiagou высотой 38 м, построенной в 2002 году, и плотине Yangjiang максимальной высотой 43,4 м. В случае плотины Yangjiang фильтрационный расход достигал 710 л/с.

Следует отметить, что в сравнении с асфальтобетонным экраном АБД имеют меньший уровень надёжности. За счёт своего многослойного строения асфальтобетонный экран может сохранить герметичность при повреждении одного из слоёв.

Для повышения надёжности асфальтобетонных диафрагм сверхвысоких плотин можно предложить использовать не одну, а две диафрагмы. Как было указано ранее, такое конструктивное решение было применено при строительстве высоких плотин в Гонконге, а также в плотине Wuppeg в Германии [2].

Ещё один способ повышения надёжности АБД – это включение АБД в состав более сложных противофильтрационных конструкций. Примером такого решения является плотина Qixue, в нижней части которой вместо АБД выполнен бетонный массив.

Вторая группа недостатков АБД заключается в затруднениях, возникающих в случае необходимости их ремонта или реконструкции.

В отличие от асфальтобетонного экрана АБД не доступна для осмотра и ремонта. В отличие от открытых экранов, которые могут быть отремонтированы снаружи при сработке или опорожнении водохранилища, единственным способом ремонта АБД является создание в плотине новой противофильтрационного элемента в виде завесы. Такая завеса может быть создана с гребня путём инъекции герметизирующих растворов или методами создания «стен в грунте». Однако для возможности осуществления такого ремонта АБД должна быть окружена удобными для выполнения завес грунтами.

В [18] описан опыт ремонта плотин Majiagou, Dazhu, Yangjiang в Китае. Ремонт плотины Majiagou высотой 38 м был выполнен путём устройства в 2008 г. противофильтрационной стены



из глиноцементобетона. Ремонт плотины Yangjiang был выполнен в 2013 г. путём выполнения инъекционной завесы в переходных зонах, окружающих диафрагму.

Однако такой способ ремонта не всегда может быть реализован в случае сверхвысоких плотин. «Стена в грунте» не может быть выполнена на большую глубину, а для возможности создания противofильтрационной завесы необходимо, чтобы АБД была окружена мощным слоем грунта, доступного для цементирования. Можно отметить, что многие из существующих плотин с АБД являются неремонтопригодными, т.к. необходимость их ремонта проектом не предусматривалась.

Третья группа недостатков плотин с АБД связана с затруднениями и возможными издержками при строительстве.

В сравнении с асфальтобетонным экраном АБД дороже и сложнее в устройстве. Конструкция асфальтобетонной диафрагмы требует большего количества асфальтобетона, т.к. она выполняется более широкой. При устройстве АБД переходные зоны выполняются с двух сторон, в то время как отсыпка подготовки под асфальтобетонным экраном требуется только с одной стороны.

Возведение АБД должно вестись постепенно, а не сразу на всю высоту, как могут возводиться экраны (бетонные, асфальтобетонные). Скорость возведения плотины ограничена скоростью укладки асфальтобетона в диафрагме. Обычно, скорость возведения АБД составляет 2 слоя в сутки, т.е. за сутки рост высоты плотины составит не более 0,4 м.

С этой технической проблемой столкнулись строители плотины Zhaobishan [19]. Эта плотина высотой 71 м в настоящее время возводится в Синьцзян-Уйгурском автономном районе Китая. Плотина имеет перемычку высотой 26 м, противofильтрационным элементом которой является АБД. Т.к. район строительства имеет суровый климат, для обеспечения пропуски строительных расходов необходимо было возвести перемычку за 2 месяца. При скорости роста перемычки 0,4 м/сут это оказалось невозможным, в [19] приводится пример разрушения перемычки. Для преодоления технической проблемы в Китае были проведены специальные исследования, которые позволили достичь скорости строительства 0,9 м высоты в сутки.

Есть ещё одно затруднение. Расположение АБД в центральной части затрудняет строительство плотины очередями. Объём первой очереди плотины с АБД будет существенно больше, чем у плотин с бетонным или асфальтобетонным экраном.

Уменьшение объёма плотины первой очереди может быть достигнуто за счёт придания диафрагме наклона в сторону верхнего бьефа или ломаного очертания. Наклонные диафрагмы имеют плотины Großdünn (Германия), Finstertal (Австрия) и Storvatn (Норвегия). При ломаном очертании верхняя часть диафрагмы выполняется с наклоном в сторону верхнего бьефа, а нижняя – вертикальной. Диафрагму ломаного профиля имеют 2 плотины в Гонконге, плотина Wuppeg (Германия), Ирганайская плотина (Россия).

Наклон и изменение очертания диафрагмы имеет ещё один плюс – оно позволяет включить в работу по восприятию гидростатического давления бóльший объём каменной наброски. Однако эффект от этого не столь велик и создаёт иные сложности. Во-первых, наклонная диафрагма менее ремонтпригодна, а, во-вторых, считается, что такая плотина менее сейсмостойка.

Более эффективным решением является комбинирование в конструкции противofильтрационных элементов разных типов – диафрагмы и экрана. Этот вопрос будет рассмотрен ниже на примерах реальных плотин.

Асфальтобетонные диафрагмы в составе составных противofильтрационных элементов грунтовых плотин.

При проектировании новых высоких грунтовых плотин целесообразно рассматривать варианты применения сложных конструкций противofильтрационных элементов, составной частью которых являются асфальтобетонные диафрагмы. Однако такие конструкции были использованы и раньше. Могут быть приведены несколько примеров, в которых асфальтобетонная диафрагма в нижней части плотины сочетается с экраном, расположенным в верхней части плотины.

Первый пример – это плотина Roza Honda в Эквадоре, построенная в 1970 г. У этой плотины АБД толщиной 0,6 м выполнена в качестве противofильтрационного элемента зуба, выполненного в основании [2]. Выше АБД сопрягается с асфальтобетонным экраном, который является противofильтрационным элементом тела плотины высотой 60 м.



Второй пример – это плотина Sulbu на острове Мэн, Великобритания. Строительство этой плотины велось в 2 этапа. Первая очередь плотины (1979 г.) высотой 35 м в качестве противофильтрационного элемента имеет асфальтобетонную диафрагму толщиной 75 см [2]. Противофильтрационным элементом второй очереди плотины (1982), которая имеет общую высоту 60 м, является асфальтобетонный экран толщиной 24 см.

Третий пример – это плотина Zarema May-Day, строительство которой завершается в Эфиопии. Плотина имеет высоту 152 м и длину 900 м². Асфальтобетонная диафрагма толщиной от 0,8 до 1,2 м является противофильтрационным элементом плотины в нижней части плотины высотой 137 м. В верхних 15 м плотины противофильтрационный элемент выполнен в виде экрана из геокompозита. Такое решение было принято для того, чтобы обеспечить высокие темпы строительства плотины вне зависимости от скорости роста асфальтобетонной диафрагмы.

Указанные примеры свидетельствуют о целесообразности применения в конструкции грунтовых плотин составных противофильтрационных элементов.

4 Conclusions

1. Асфальтобетонные диафрагмы зарекомендовали себя как надёжный тип противофильтрационного элемента грунтовых плотин. На данный момент не зафиксировано ни одного случая выхода из строя ни одной из асфальтобетонных диафрагм. Тем не менее, ещё не изучена надёжность этого типа противофильтрационного элемента при очень длительной эксплуатации.

2. Несмотря на то, что асфальтобетонные диафрагмы применяются в качестве противофильтрационных элементов грунтовых плотин относительно недавно, однако они строятся всё чаще, а география их применения постоянно расширяется. Это объясняется теми преимуществами, которые имеют плотины с асфальтобетонными диафрагмами по сравнению с плотинами других типов.

3. Основным преимуществом грунтовых плотин с асфальтобетонными диафрагмами является возможность их строительства и эксплуатации в районах с суровыми климатическими условиями, а также в районах, где отсутствует глинистые грунты для устройства грунтовых противофильтрационных ядер и экранов. В настоящее время плотины с асфальтобетонными диафрагмами всё чаще составляют конкуренцию традиционным типам грунтовых плотин – с глинистыми ядрами и бетонными экранами.

4. Несмотря на то, что в настоящее время плотины с асфальтобетонными используются уже при сверхвысоких напорах (150 м), в современных условиях у них есть ограничения к применению по высоте. Плотины этого типа могут выполняться сверхвысокими только в узких створах. Для применения плотин с диафрагмами при сверхвысоких напорах необходимо решить проблему обеспечения повышенной надёжности диафрагмы и устойчивости каменной насыпи в условиях больших горизонтальных смещений. Кроме того, технические сложности представляет ремонт и реконструкция плотин с асфальтобетонными диафрагмами.

5. Помимо преимуществ грунтовые плотины с асфальтобетонными диафрагмами обладают и некоторыми недостатками. Одним из путей совершенствования конструкций грунтовых плотин является применение комбинированных (составных) противофильтрационных элементов, устроенных на основе асфальтобетонных диафрагм. Это подтверждается фактами наличия плотин с такими противофильтрационными элементами.

References

1. International Commission on Large Dams (ICOLD). Bulletin 42. Bituminous cores for earth and rockfill dams. International Commission on Large Dams, 1982, Paris
2. International Commission on Large Dams (ICOLD). Bulletin 84. Bituminous cores for fill dams. State of the Art. International Commission on Large Dams, 1992, Paris.
3. Höeg, K. Asphaltic Concrete Cores for Embankment Dam. – Vaidekke: Norwegian Geotechnical Institute, 1993. – 88 с.

² Vaschetti, G., Verdel, V., Scuro, A. Polymeric Geomembranes In New Rockfill Dams: 2 Case Histories. 16h International Symposium on Water Management and Hydraulic Engineering. 2019. Pp. 305–314.



4. Adikari, G.S.N., Valstad, T., Kjoernsli, B., Hoeg, K. Behaviour of Storvatn Dam, Norway - a case of prediction versus performance. Publikasjon - Norges Geotekniske Institutt. 1988. 173. Pp. 1–8. URL: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-0024188869&partnerID=40&md5=899811420136619f5697a1e0719320fa>.
5. Sharifi Soltani, A., Litkouhi, S. Asphalt Concrete Core of Meijaran Dam in Brief. *Dam Engineering Journal*. 2010. XX (January 2010). Pp. 235–253. DOI:10.3233/978-1-60750-031-5-494
6. Núcleo, E.M., Zonadas, D.E.B. Estudo da Compactação de Misturas Solo-Emulsão Para Emprego em Núcleo de Barragem Zoneadas. 2017. (January). DOI:10.20906/CPS/CB-03-0009.
7. Saxegaard, H. Nemiscau-1 dam: The first asphalt core dam in North America. *International Journal on Hydropower and Dams*. 2009. 16(4). Pp. 63–65. URL: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-79955052078&partnerID=40&md5=2fe973aa0b7eae15c702a760aff8726f>.
8. Wang, W., Höeg, K., Zhang, Y. Design and performance of the Yele asphalt-core rockfill dam. *Canadian Geotechnical Journal*. 2010. 47(12). Pp. 1365–1381. DOI:10.1139/T10-028.
9. Cao, X.-X., He, Y.-L., Xiong, K., Liu, B. Effects of Wenchuan earthquake on Yele Dam. *Yantu Lixue/Rock and Soil Mechanics*. 2010. 31(11). Pp. 3542–3548. URL: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-78650466996&partnerID=40&md5=5ba588f0713f628a9801251e149d0515>.
10. He, Y.-L., Liu, J.-L., Xiong, K. Seismic response of Yele dam during Wenchuan Earthquake. *Sichuan Daxue Xuebao (Gongcheng Kexue Ban)/Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition)*. 2009. 41(3). Pp. 157–164. URL: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-67649237117&partnerID=40&md5=aa34497cbe5167dcf9364aa99092b583>.
11. Feng, S., Wang, W., Hu, W., Deng, Y., Yang, J., Wu, S., Zhang, C., Höeg, K. Design and performance of the Quxue asphalt-core rockfill dam. *Soils and Foundations*. 2020. 60(4). Pp. 1036–1049. DOI: 10.1016/j.sandf.2020.06.008.
12. Uspenskii, V. V., Kuznetsov, E.I. Analysis and prediction of asphalt-concrete core wall settlement of the Boguchany HPP rockfill dam during the period of construction completion. *Power Technology and Engineering*. 2017. 50(5). Pp. 501–505. DOI:10.1007/s10749-017-0739-6.
13. Wang, Z., Hao, J., Yang, J., Cao, Y., Li, X., Liu, S. Experimental study on hydraulic fracturing of high asphalt concrete core rock-fill dam. *Applied Sciences (Switzerland)*. 2019. 9(11). DOI:10.3390/app9112285.
14. Access, O. Seismic deformation analysis of a rockfill dam with a bituminous concrete core *Seismic Deformation Analysis of a Rockfill Dam with a Bituminous Concrete Core*. 2010. DOI:10.1088/1757-899X/10/1/012106.
15. Gao, J., Dang, F., Ma, Z. ScienceDirect Investigation for the key technologies of ultra-high asphalt concrete core rockfill dams. *Soils and Foundations*. 2019. 59(6). Pp. 1740–1757. DOI:10.1016/j.sandf.2019.07.013. URL: <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2019.07.013>.
16. Gao, J., Dang, F., Ma, Z., Xue, Y., Ren, J. applied sciences Improvement Methods for Reduction of the High Stress of Ultra-High Asphalt Concrete Core Dams. 2019. 2017. DOI:10.3390/app9214618.
17. Zhang, J., Wang, J., Cui, H. Causes of the abnormal seepage field in a dam with asphaltic concrete core. *Journal of Earth Science*. 2016. 27(1). Pp. 74–82. DOI:10.1007/s12583-016-0623-6.
18. Min, W., Heqing, Z., Dongdong, C. Research and Application on Seepage Detection and Repair of Anti-Seepage System for Earth-Rockfill Dam with Asphalt Concrete Core. 2018. 4(4). Pp. 101–106. DOI:10.11648/j.ajwse.20180404.13.
19. Wang, W., Hu, K., Feng, S., Zhao, R. Case Studies in Construction Materials A case study on asphalt core construction rate for the Zhaobishan embankment dam. *Case Studies in Construction Materials*. 2020. 13. DOI:10.1016/j.cscm.2020.e00418. URL: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2020.e00418>.