

Министерство сельского хозяйства Российской Федерации

Федеральное государственное научное учреждение  
«РОССИЙСКИЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ МЕЛИОРАЦИИ»  
(ФГНУ «РосНИИПМ»)

УДК 626.823.91.001.63

Ю. М. Косиченко, Е. И. Шкуланов, Г. Л. Лобанов,  
Е. А. Савенкова, А. М. Кореновский

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПРОТИВОФИЛЬТРАЦИОННЫХ  
ОБЛИЦОВОК МЕЛИОРАТИВНЫХ КАНАЛОВ**

Научный обзор

Новочеркасск 2011

## Содержание

Введение .....	3
1 Современное состояние вопроса по борьбе с фильтрационными потерями.....	4
2 Анализ современных конструкций противофильтрационных облицовок .....	8
3 Анализ современных полимерных материалов, применяемых для облицовок каналов.....	26
3.1 Пленочные материалы .....	29
3.2 Листовые материалы .....	31
3.3 Геомембраны .....	32
4 Анализ методов расчета противофильтрационных облицовок .....	33
4.1 Определение расстояний между деформационными швами в монолитных бетонных и железобетонных противофильтрационных облицовках при их смерзании с ложем канала.....	37
4.2 Определение предельного расстояния между температурно-усадочными швами в монолитной бетонной противофильтрационной облицовке.....	38
4.3 Расчет конструкции противофильтрационной облицовки каналов при морозном пучении основания .....	39
4.4 Расчет толщины противопучинистой «шубы» под противофильтрационными облицовками каналов .....	40
4.5 Расчет параметров деформационных швов в противофильтрационных облицовках каналов .....	40
4.6 Расчет допускаемых наполнений каналов для монолитных бетонных, железобетонных и сборных из предварительно напряженных плит противофильтрационных облицовок .....	43
4.7 Расчет фильтрации из облицованных каналов .....	44
5 Анализ состояния нормативной документации в области проектирования противофильтрационных облицовок.....	48
Заключение .....	54
Список использованной литературы.....	55

## Введение

На территории Российской Федерации в настоящее время действует большое количество различных нормативных документов в сфере проектирования противofильтрационных покрытий оросительных каналов (ВСН, СНиП, ГОСТ и т.д.), большинство из которых технически и морально устарели, т.е. не соответствуют научно-техническому уровню в отрасли. Высокий уровень потерь воды при транспортировке воды по оросительным каналам составляет более 4,8 км<sup>3</sup> в год (или более 30 % от объема использования), что требует разработки совершенных конструкций противofильтрационных покрытий и новых правил их проектирования с использованием современных материалов.

Целью научно-исследовательской работы является:

- указать на недостатки традиционных конструкций противofильтрационных облицовок;
- проанализировать современные полимерные материалы, применяемые при строительстве противofильтрационных облицовок;
- проанализировать состояние нормативно-методической документации в области проектирования противofильтрационных облицовок;
- дать предложения о включении отдельных положений нормативных и методических документов в Проект свода правил;
- проанализировать методы расчета противofильтрационных облицовок;
- разработать проект свода правил «Противofильтрационные покрытия оросительных каналов. Правила проектирования».

## 1 Современное состояние вопроса по борьбе с фильтрационными потерями

Одним из крупнейших потребителей пресной воды в мире является орошаемое земледелие, которое в большинстве случаев размещается в зонах с ее острым дефицитом. Для орошения в мире и у нас в России в основном (на 95 %) используются воды поверхностного стока, зарегулированного в реках системами водохранилищ, с последующей транспортировкой воды к орошаемым массивам, системой открытых каналов разного уровня (магистральные, межхозяйственные, внутрихозяйственные и т.д.).

Фильтрационные потери из открытой проводящей сети приводят не только к непродуктивным потерям ценного и, в общем, ограниченного такого природного ресурса, как пресная вода, но и существенно ухудшают мелиоративную обстановку орошаемых и прилегающих к ним территорий, требующих дополнительных затрат на устройство дренажа и других мероприятий, предупреждающих вывод мелиорированных земель из сельскохозяйственного оборота.

На каналах оросительных систем, выполненных в земляном русле, наблюдаются значительные потери воды на фильтрацию, достигающие до 40-50 % от водозабора.

В таблице 1 приведены сведения по потерям на фильтрацию некоторых каналов России.

**Таблица 1 – Потери на фильтрацию некоторых каналов России**

Наименование канала	Грунты основания	Глубина канала	Фильтрационные потери л/(сут.·м <sup>2</sup> )	Год наблюдений
1	2	3	4	5
Земляные необлицованные каналы				
Большой Ставропольский канал БСК-1	суглинки	2,85	204	1973
Канал ОС на р. Чегем	галечники	0,41	157	1971
Канал «Аксыра»	суглинки	0,72	159	1976
Левая ветвь Правоягорлыкского канала	лессовидные суглинки	2,2	110-160	1968
Облицованные каналы				
БСК-3	суглинки	3,0	11-45	1981-1983

Продолжение таблицы 1

1	2	3	4	5
Распределительный канал Бг-Р-7 Багаево-Садковской ОС	суглинки	1,5-2,0	3-40	1985
Канал ЛКХ-1 Прохладненской ОС	глинистые грунты	-//-	2,8-6,6	1972

Как показывают данные таблицы 1, потери на фильтрацию необлицованных каналов превышают допустимые значения в 5-10 раз, что приводит к заболачиванию близлежащих территорий и ухудшению эколого-мелиоративного состояния орошаемых земель (засолению).

Следует отметить то, что каналы в земляном русле в процессе эксплуатации подвержены заилению, оплыванию и зарастанию сорной растительностью и кустарником.

Традиционно применяемые грунтовые противофильтрационные экраны, получаемые методами поверхностного и послойного уплотнения, как показывают исследования, разуплотняются через 2-3 года и требуют первоначального конструкционно-технологического восстановления, что ограничивает их использование.

Борьбу с фильтрационными потерями можно проследить на примере США. В начале прошлого века (1910-1920 гг.) в США было широко распространено строительство орошаемых земель без противофильтрационной защиты проводящей оросительной сети и искусственного дренажа. Столкнувшись с печальными последствиями орошения при отсутствии дренажа, фермеры начали вкладывать средства в его строительство. К 1930 году процент дренированных земель резко возрос и составил 17,9 % всего фонда орошаемых земель.

Основной причиной подъема уровня грунтовых и увеличения площади засоленных земель являются фильтрационные потери из открытой транспортирующей и из поливной сети. Поэтому специалисты США считают, что проблема дренажа при существующей технике орошения не может быть снята с повестки дня. Чтобы ее снять, необходимо резко повы-

силь КПД проводящей сети и создать поливную технику, обеспечивающую жесткое регулирование выдачи расчетных поливных норм.

К 1960 году КПД систем повысился до 0,51-0,53, но далеко не достиг принимаемого в проектах значения (0,65).

Наиболее радикальное средство борьбы с потерями воды на фильтрацию – противофильтрационные покрытия на каналах, которые начали особенно интенсивно применять в послевоенные годы.

Большой интерес представляют работы, связанные с реконструкцией оросительной сети на действующих оросительных системах. Для этих целей в бюро мелиорации создана технология и машина для укладки бетонопленочного экрана на откосы и дно канала под водой без остановки его работы. Технология разработана для устройства противофильтрационной облицовки на действующем Всеамериканском канале (Южная Калифорния) на участке длиной 64 км и шириной по дну 40 м (глубина воды 5 м, заложение откосов 2, расход 250 м<sup>3</sup>/с). В ходе работы в канале глубина воды понижалась до 1 м, а скорость ее движения до 1 м/с, чтобы предотвратить размыв свежееуложенного бетона под водой. В бетон добавляли химдобавки против вымыва цемента. Большое внимание в США уделяется разработке новых конструкций противофильтрационных облицовок с применением защитных, пленочных и синтетических материалов. Такие облицовки обеспечивают отвод профильтровавшейся через бетон воды в дренажную систему.

С 1982 г. Бюро мелиорации США изучает возможность применения незащищенных грунтом эластичных мембран из полиэтилена, высокопрочного или армированного – хлорсульфатного или хлорированного. Отсутствие земляного покрытия позволяет сразу обнаруживать повреждения облицовки.

Исследования фильтрационных потерь из каналов показывают, что очаги новых повреждений возникают при очистке их от растительности и донных отложений.

В результате реализации программы по борьбе с фильтрационными потерями из проводящей оросительной сети, по состоянию на 1986 год, на каналах Бюро мелиорации было облицовано 10560 км каналов.

Все действующие каналы оросительных систем в штатах Калифорния и Аризона облицованы монолитным бетоном толщиной 7-8 см. Общая протяженность магистральных каналов в США на этот период составляла 25,8 тыс. км. КПД облицованных открытых транспортирующих каналов достигает 0,99.

Одновременно со строительством противофильтрационных одежд и закрытых оросительных систем началась работа, направленная на повышение эффективности использования воды, в процессе выполнения этой программы были пересмотрены и упрощены технические условия на строительство покрытий для повышения эффективности использования средств механизации, доказана нецелесообразность повсеместного применения железобетонных покрытий, проведена стандартизация форм и размеров поперечного сечения каналов, благодаря чему стало возможным применение стандартных опалубок. Была разработана скользящая опалубка, опирающаяся на дно, для непрерывного бетонирования каналов малых поперечных сечений. Разработаны также новые методы и приборы для определения потерь воды на фильтрацию.

Борьба с фильтрационными потерями транспортирующей оросительной сети путем устройства противофильтрационных облицовок ведется во всех, в т.ч. развивающихся, странах.

Так, в Республике Верхняя Вольта в 1972 году построен магистральный канал пропускной способностью 2,5 м<sup>3</sup>/с и протяженностью 20 км в бетонной противофильтрационной облицовке.

В Израиле вся магистральная сеть, на площади 255 тыс. га орошения, построена в противофильтрационной облицовке, полностью исключая фильтрационные потери. В Алжире транспортирующая сеть, построенная

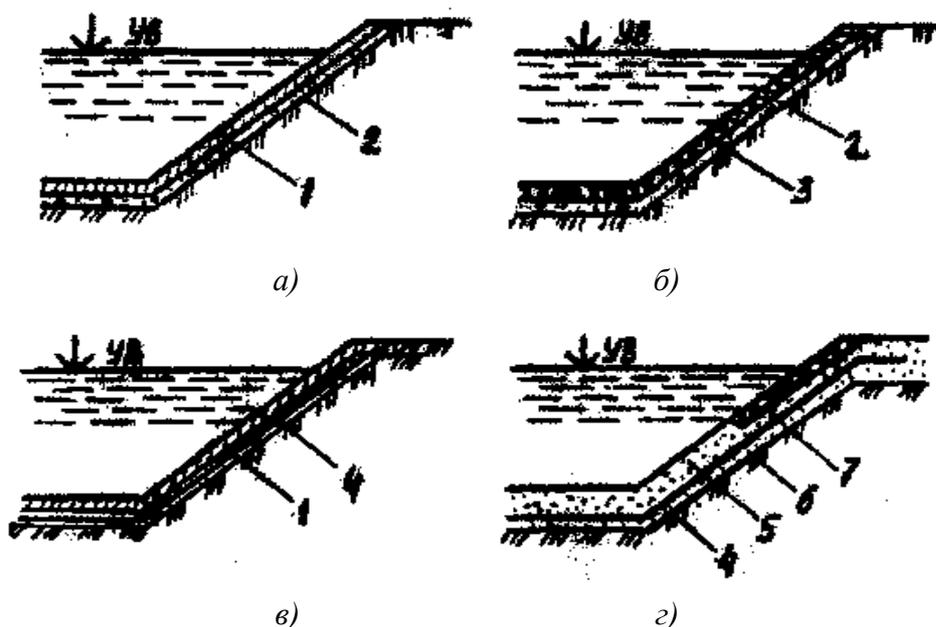
с помощью французских специалистов, вся выполнена в противофильтрационной изоляции и КПД сети равен 0,99.

В Иране магистральный канал «Киркук-Адхейм» длиной 37 км и пропускной способностью  $Q = 300 \text{ м}^3/\text{с}$  выполнен в бетонопленочной облицовке, практически полностью исключая фильтрационные потери.

В России в 70-80-х годах для более эффективной борьбы с фильтрационными потерями воды на каналах интенсивно начали применять в практике строительства оросительных систем различные типы простых и сложных (комбинированных) противофильтрационных покрытий. Защитные покрытия стали выполнять с учетом климатических, грунтовых и гидрогеологических условий.

## 2 Анализ современных конструкций противофильтрационных облицовок

Основные конструктивные типы противофильтрационных облицовок и экранов на оросительных каналах представлены на рисунке 1.



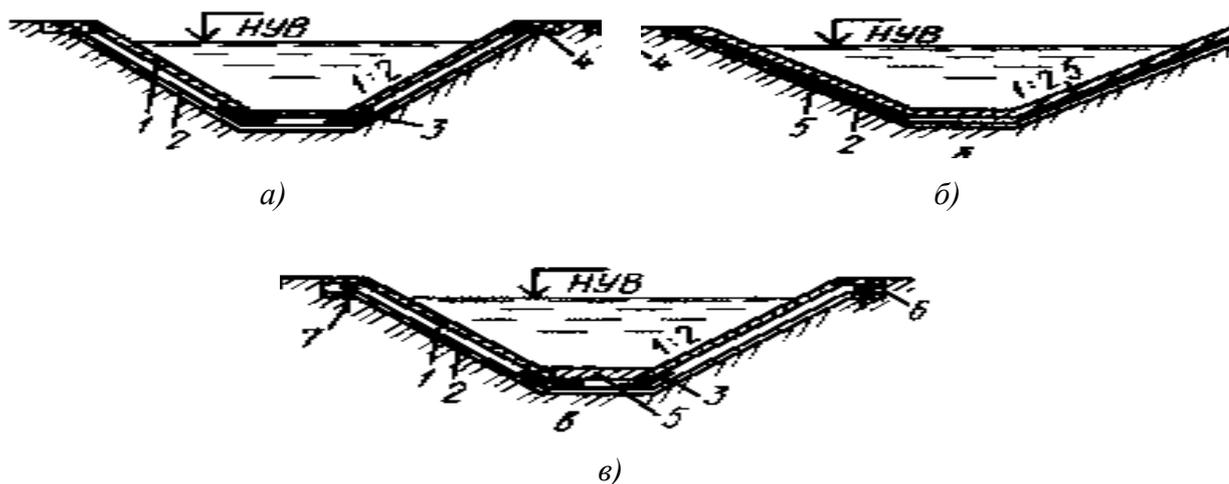
*a* – бетонные и железобетонные; *б* – асфальтобетонные; *в* – бетонопленочные; *г* – грунтопленочные; 1 – бетонное покрытие; 2 – подстилающий слой щебня; 3 – слой асфальтобетона; 4 – пленочный противофильтрационный экран; 5, 6 – грунт; 7 – крепление камнем

**Рисунок 1 – Типы противофильтрационных облицовок и экранов**

Бетонные и железобетонные облицовки по своей прочности, долговечности и технологии производства работ имеют определенные преимущества перед другими типами покрытий. Однако они имеют и недостатки: сложность работ, влияние изменения температур на растрескивание покрытия; наиболее слабым звеном их являются швы, способы герметизации которых оказываются неэффективными, и особенно швы с горячими битумными мастиками, долговечность которых не превышает 5-10 лет [1, 2].

Экраны из асфальтобетона обладают высокой водонепроницаемостью и морозоустойчивостью. Работы по устройству таких покрытий могут быть полностью механизированы. Толщина асфальтобетонных покрытий составляет 5-8 см. К их недостаткам можно отнести то, что в летний период они размягчаются и легко пробиваются растительностью [3].

Противофильтрационные экраны из полимерных пленочных материалов нашли наибольшее применение на оросительных каналах. Основные конструктивные типы включают пленочный противофильтрационный элемент, подстилающий грунтовый слой и защитное покрытие из грунта, монолитного бетона и сборных железобетонных плит [4] (рисунок 2).



*a* – сборные; *б* – монолитные; *в* – сборно-монолитные; 1 – сборные железобетонные плиты; 2 – полиэтиленовая пленка; 3 – защитные прокладки; 4 – заплечики из монолитного бетона; 5 – монолитный бетон; 6 – заплечики из сборных железобетонных элементов; 7 – металлические шпильки

**Рисунок 2 – Конструкции бетонопленочных облицовок**

Они выполняются из пленочных (полиэтиленовых, поливинилхлоридных пленок толщиной 0,2-0,4 мм) и листовых материалов (бутилкаучуковых листов толщиной 1-3 мм). В зависимости от вида защитного покрытия экраны с применением полимерных пленок разделяют на четыре основных типа: бетонопленочные, грунтопленочные, поверхностные и комбинированные [5, 6].

Бетонопленочные облицовки нашли наибольшее применение на средних и малых оросительных каналах. Грунтопленочные экраны используются для различного рода водоемов и крупных оросительных каналов. Толщину защитного слоя грунта назначают не менее 0,5 м из условия неповреждаемости пленки строительными механизмами [4, 7]. Для предотвращения подмыва защитного слоя в зоне волнобоя устраивается защитный слой из каменной наброски, галечника или щебня по песчано-гравийной подготовке. В бетонопленочных облицовках в качестве покрытия по пленке применяют: железобетонные плиты; монолитный бетон при механизированной укладке; монолитный бетон или железобетон при укладке вручную на отдельных участках при небольших объемах работ; комбинированное покрытие из монолитного бетона по дну и сборных железобетонных плит на откосах. При устройстве бетонопленочной облицовки с покрытием из сборных железобетонных плит заложение откосов канала принимают не более 1:1,5, а с покрытием из монолитного бетона или железобетона – 1:2. В сборных бетонопленочных облицовках заделка стыков бетоном – жесткая без герметизации, что, прежде всего, предотвращает повреждения пленки от внешних воздействий. В качестве сборного защитного покрытия принимают предварительно напряженные железобетонные плиты (НПК) размером  $6 \times 1,0 \times 0,06$ ;  $6 \times 1,5 \times 0,06$ ;  $6 \times 2 \times 0,06$  м с содержанием арматуры 30-40 кг/м<sup>3</sup>; сборные железобетонные плиты с выпусками арматуры размером  $3 \times 2 \times 0,1$  м, вибропрокатные плиты толщиной 0,08 м и другие плиты. Плиты НПК применяют для строительства каналов с глубиной воды до 3 м при максимальной высоте волны 0,5 м и толщине

льда 0,5 м. При прохождении канала в гравелистых или галечниковых грунтах с целью исключения повреждения пленочного экрана устраивают подготовку толщиной 10-15 см из песка или супеси с крупностью частиц не менее 5 мм. Главными преимуществами грунтопленочных экранов являются их малая стоимость, высокая противофильтрационная эффективность и технологичность [8].

Однако, несмотря на довольно широкое использование в водохозяйственном строительстве грунтопленочных экранов и бетонопленочных облицовок, они имеют определенные недостатки, ограничивающие область их применения и требующие их совершенствования.

Применение облицовок из сборных железобетонных плит рекомендуется с целью повышения долговечности каналов для следующих условий [9, 10]:

- наличие в районе строительства канала баз строительной индустрии и отсутствие в этих районах местных карьеров нерудных материалов;

- необходимость устройства облицовок каналов, протрасированных в жарких безводных районах, где приготовление монолитного бетона, укладка его и уход за ним сопряжены со значительными трудностями и затратами;

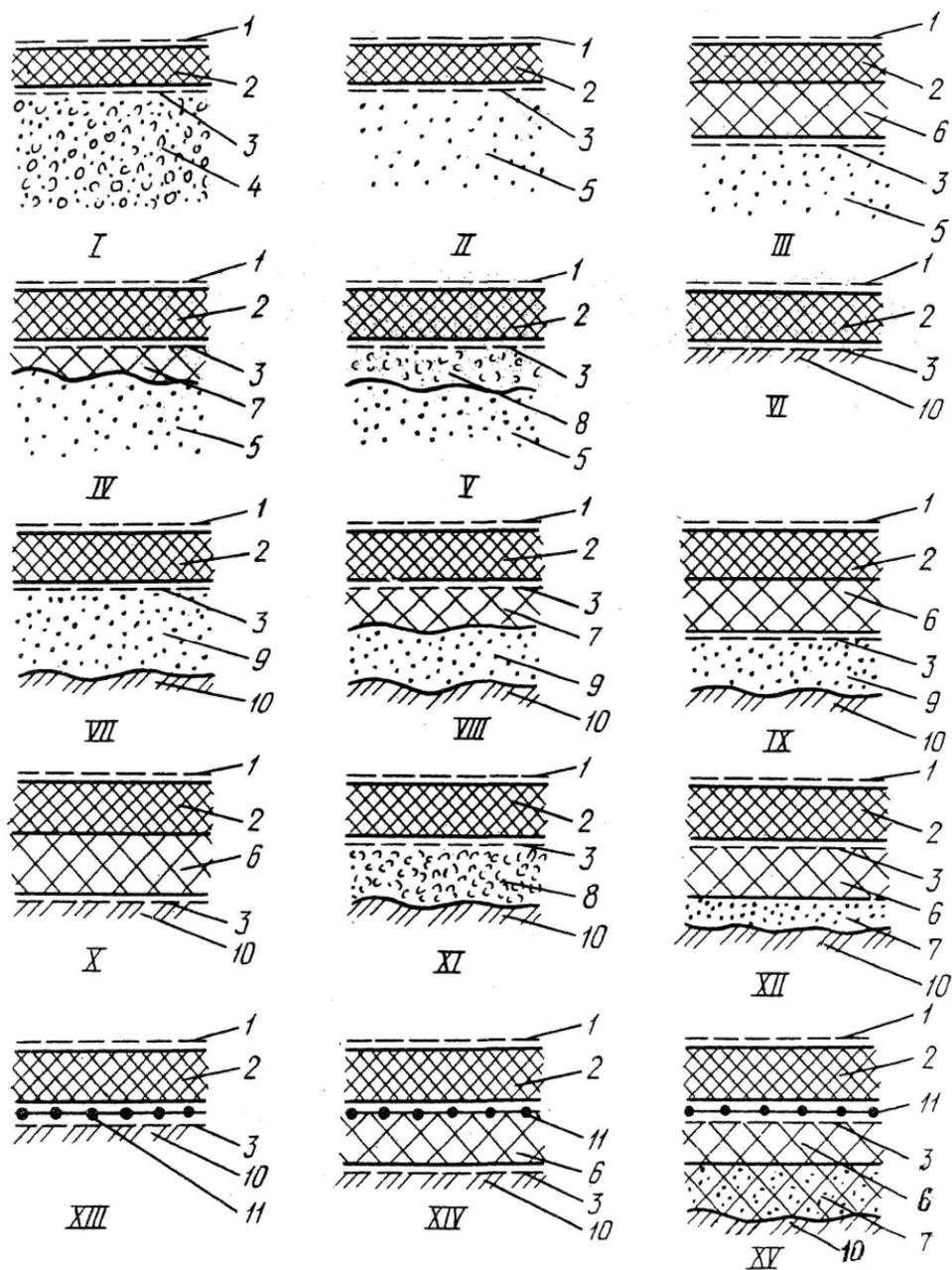
- необходимость облицовки каналов в труднодоступных для транспорта районах, где будет затруднена перевозка большого количества строительных материалов или большие расстояния транспортирования бетонной смеси;

- необходимость круглогодичного ведения работ;

- отсутствие бетоноукладочных комплексов и других средств механизации для принятых в проекте параметров канала.

Гораздо эффективнее, но менее рентабельно, устройство асфальтобетонных облицовок.

Основные конструкции асфальтобетонных облицовок представлены на рисунке 3.



1 – поверхностная обработка; 2 – асфальтобетонное покрытие; 3 – слой, обработанный гербицидом; 4 – гравелистый и песчано-гравелистый грунт основания; 5 – песчаный грунт основания; 6 – пористый асфальтобетон или черный щебень; 7 – слой битумно-песчаной смеси, устраиваемой методом смешивания на месте, или смеси, изготовленной в смесителе; 8 – слой щебня, отсева или гравия; 9 – слой песка; 10 – связной грунт основания (глина, суглинок, растительный грунт, супесчаный грунт, насыщенный водой); 11 – армирующий рулонный материал

**Рисунок 3 – Основные конструкции асфальтобетонных облицовок**

Производственный процесс устройства экранов и креплений из горячего гидротехнического асфальтобетона или асфальтополимербетона включает следующие основные технологические операции: подготовку основания под облицовку; устройство слоев подготовки и переходных слоев;

укладку и уплотнение гидротехнической асфальтобетонной смеси; поверхностную обработку покрытия [11].

Основание под асфальтобетонную облицовку должно быть ровным, сухим, без пыли и комков, воспринимать без заметных деформаций строительные и эксплуатационные нагрузки. Кроме того, грунтовое основание должно быть стерилизовано (обработано гербицидами). Исходя из отмеченных требований к основанию, подготовка его в общем случае содержит следующие операции: профилировку, планировку, стерилизацию и уплотнение [12].

Земляные работы должны выполняться таким образом, чтобы исключить операцию планировки и профилировки основания под облицовку. Перед проведением планировочных и профилировочных работ с помощью нивелира выполняются разбивочные работы, которые позволяют соблюсти проектные отметки поверхности основания, ровность кромок, границ и др. (используются, кроме нивелира, визирки, наносятся отметины, полосы и пр.).

После планировки грунт основания стерилизуется путем розлива по нему водного раствора гербицида. Распределение раствора гербицида производят автоцистернами, используя разбрызгивающую насадку на шланге цистерны, поливочно-моечными машинами, садовыми опрыскивателями или обычными окрасочными краскопультами. Планировщик или машину для рытья канала можно снабдить емкостью для раствора гербицида и трубопроводами для подачи его на откос, не используя насос.

Если предусмотрена обработка основания битумными материалами (слой подготовки), то с этой операцией совмещают и стерилизацию грунта, вводя водорастворимые гербициды в эмульсию или пасту. Если же эти операции нельзя совместить, то вначале производят стерилизацию грунта. Грунт обрабатывается гербицидами до укладки щебеночных или асфальтовых слоев, но не менее чем за сутки до укладки облицовки и не более чем за 15-20 дней.

Грунт основания должен уплотняться, если модуль деформации его составляет менее 10 МПа. Если в конструкции облицовки предусмотрено устройство переходного слоя из щебня, то уплотняется щебень. Для уплотнения основания используют те же механизмы, что и для окончательного уплотнения асфальтобетонного покрытия, но часто более тяжелые.

Укладка переходных слоев производится после разбивочных работ. Для устройства переходных слоев используются щебень, втрамбовываемый в грунт основания, черный щебень, пористый асфальтобетон, холодные и теплые асфальтобетонные смеси, которые распределяются и уплотняются теми же механизмами, что и гидротехнические асфальтобетонные смеси, используют более тяжелые уплотняющие машины.

Асфальтобетонную или асфальтополимербетонную гидротехническую смесь укладывают на сухое, непромерзшее основание или переходный слой при температуре воздуха: весной и летом – не ниже + 5 °С, а осенью – не ниже + 10 °С. Смесь укладывают при помощи асфальтоукладчиков, и лишь при небольшом объеме работ распределение осуществляют вручную [13, 14].

Смесь распределяется по основанию равномерным слоем толщиной 5-10 см с учетом, что толщина окончательно уплотненного и сформированного слоя асфальтобетона на 25-30 % меньше толщины свежераспределенного слоя. Укладываемая смесь должна иметь температуру 140-170 °С. Перед укладкой выполняются разбивочные работы.

Для обеспечения сцепления покрытия с основанием и отдельных слоев многослойного покрытия между собой поверхность основания или ранее уложенного и уплотненного слоя грунтуется битумной эмульсией, жидким, горячим или разжиженным битумом с расходом 0,5-1,0 л/м<sup>2</sup>. На малых каналах асфальтобетонная смесь распределяется асфальтоукладчиком сразу по всему периметру канала. На крупных каналах укладывается слой покрытия вначале на откосы, затем на дно канала, что исключает попадание комков грунта в места сопряжений покрытия откоса с покрыти-

ем дна; подобным образом устраиваются облицовки и экраны на дамбах и плотинах, где имеют место аналогичные сопряжения.

Укладку асфальтобетона на оросительных каналах глубиной до 1,5 м и с длиной периметра поперечного сечения до 10 м производят профильными асфальтоукладчиками – скользящими формами, укладываемыми смесь сразу по всему периметру канала. Укладку асфальтобетона на откосах длиной от 4 до 16 м каналов, имеющих постоянную или малоизменяющуюся длину откоса, производят мостовыми асфальтоукладчиками (продольными и поперечными). На откосах каналов, имеющих длину откоса более 10-16 м, укладку асфальтобетона производят бункерными укладчиками, в том числе дорожными асфальтоукладчиками [15].

На горизонтальных участках гидросооружений укладка асфальтобетона производится по общепринятой технологии в дорожном строительстве с использованием дорожных асфальтоукладчиков.

При устройстве слоев облицовки в них неизбежны технологические швы (сопряжение рядом расположенных полос, вновь укладываемого участка с уложенным ранее), качественному выполнению которых уделяется особое внимание.

Края ранее уложенной полосы срезают со скосом на участке шириной две-три толщины слоя ровно по шнуру и смазывают горячим, разжиженным или жидким битумом. Срезать края целесообразно сразу после уплотнения слоя, пока смесь еще не остыла окончательно. Уже остывший и сформировавшийся слой обрезают примерно под 45° пневмомолотом или перфоратором. Для лучшего сопряжения край ранее устроенного покрытия разогревается. Места сопряжений уплотняют особенно тщательно, добиваясь в этих местах необходимой плотности и полной однородности фактуры покрытия. При правильном выполнении сопряжения незаметны, а плотность асфальтобетона такая же, как и на остальных участках покрытия.

При укладке вручную асфальтобетонную смесь подают к месту укладки либо автосамосвалами, либо бадьями с секторными затворами и

краном, распределяют по подготовленной поверхности совковыми лопатами, тщательно прорабатывают граблями, а затем разравнивают металлическими движками. Инструмент нагревают в передвижных жаровнях.

Для соблюдения заданной толщины слоя на участках укладки устанавливают маяки из асфальтобетонной смеси, высота которых должна равняться толщине уплотненного покрытия, или укладывают переносные рейки. В последнем случае рейки длиной до 6 м или рамки из тонких реек устанавливают перед укладкой смеси, чтобы создать ровную кромку покрытия и предохранить слой от раскатывания у краев при уплотнении.

Уплотнение смеси производится непосредственно после ее укладки в две стадии, следующие друг за другом. На первой стадии осуществляется предварительное уплотнение смеси механизмами вибрационного действия до коэффициента уплотнения 0,97-0,99 (отношение объемной массы образцов из предварительно уплотненной массы к объемной массе образцов, уплотненных по стандартной методике в лаборатории) при высокой начальной температуре смеси (140-170 °С), малых удельных статических и динамических давлениях на смесь и в кратчайший промежуток времени. Окончательное уплотнение (вторая стадия) производится при более низких температурах смеси (менее 130 °С), при больших удельных статических и динамических давлениях на смесь до коэффициента уплотнения, равного 1 (или до остаточной пористости уплотненной смеси не более 3 %).

Предварительное уплотнение обеспечивается рабочими органами асфальтоукладчика или самостоятельными уплотняющими машинами. Механизмы для предварительного уплотнения выбирают с таким расчетом, чтобы они при высокой температуре смеси (150-170 °С) не «утопали» в распределенном слое, что возможно при малых удельных статических и динамических давлениях на смесь. Такими параметрами обладают виброкатки конструкции ВНИИГ, входящие в комплект уплотнителя для откосов.

Для окончательного уплотнения используют серийно выпускаемые дорожные вибрационные и гладкие катки, предпочтительны вибрацион-

ные. При этом необходимо учитывать, что несущая способность предварительно уплотненного слоя смеси значительно зависит от температуры слоя. Поэтому для данного конкретного катка находят такой температурный интервал смеси, при котором может происходить интенсивное ее уплотнение данным механизмом. Верхняя граница интервала определяется условием, заключающимся в том, что уплотняющий механизм не должен разрушать слой смеси, «утопать» в нем. Нижняя граница интервала определяется температурой, при которой уплотнение смеси данным уплотнителем практически прекращается, нижняя граница устанавливается испытанием вырубков из покрытия и визуально.

После последнего прохода уплотняющего механизма на поверхности покрытия не должно оставаться от него заметных следов (волн, впадин, гребешков, поверхностных трещин и т.п.). Пригодность выбранного для окончательного уплотнения смеси механизма определяют после испытания вырубков из покрытия; остаточная пористость асфальтобетона в вырубках должна быть не более 3 % или равна остаточной пористости образцов из этой смеси, уплотненных в лаборатории по стандартной методике. Если анализ вырубков показывает недостаточность уплотнения, то используют более тяжелый каток или увеличивают интенсивность уплотнения [16].

Конструкцию уплотнителя выбирают в соответствии с конструкцией асфальтоукладчика. На малых каналах, где используется профильный асфальтоукладчик, предварительное уплотнение обеспечивается по всему периметру канала рабочими уплотняющими органами его, обычно вибрационного, действия. Окончательное уплотнение смеси обеспечивается самостоятельным многопроходным уплотнителем на весь периметр канала, перемещающимся вслед за асфальтоукладчиком вдоль оси канала.

На крупных каналах и бассейнах уплотнение асфальтобетона осуществляется отдельными уплотнителями для откосов и дна, причем многократность проходов уплотнителя на откосе достигается его многократным

движением между подошвой и гребнем откоса с одновременным медленным перемещением вдоль гребня.

На откосах длиной до 25 м виброкатки как при предварительном, так и при окончательном уплотнении совершают челночное перемещение сразу на всей длине откоса; на откосах же длиной более 25 м виброкатки предварительного уплотнения, движущиеся вслед за асфальтоукладчиком, на участке длиной 5-10 м совершают челночные движения, постепенно поднимаясь по откосу вместе с укладчиком.

Поверхностная обработка асфальтобетонного покрытия производится распределением жидкого, горячего, разжиженного битума, а также битумной эмульсии или пасты по поверхности покрытия тонким сплошным слоем равномерной толщины при расходе 1-2,5 кг/м<sup>2</sup>.

Поверхностная обработка производится после устранения всех дефектов и заделки мест взятия вырубков в покрытии не позже, чем через месяц после постройки, пока поверхность не насытится пылью и не потеряет способность к хорошему сцеплению со слоем обработки.

Для распределения жидкого, горячего или разжиженного битума, а также битумно-полимерного сплава используют автогудронаторы, разбрызгивающее устройство которых выносится на консоли. Возможно также подвешивать разбрызгивающее устройство на каком-либо самоходном грузоподъемном механизме, а битум подавать к этому устройству по шлангу под давлением от автогудронатора или битумовоза.

Насосами, установленными на автогудронаторах и битумовозах, нельзя перекачивать битумные пасты. Для их распределения по откосу целесообразно использовать скребки-распределители с опорной поверхностью из толстой жесткой резины, на которых устанавливается расходный бачок для материала, а перемещение их по обрабатываемой поверхности осуществлять с помощью лебедки.

Предпочтение при поверхностной обработке следует отдавать таким механизмам и технологии, которые обеспечивают на обрабатываемой по-

верхности устройство слоя битума минимальной толщины при полной сплошности этого слоя и хорошем его сцеплении с покрытием.

Асфальтобетонные и асфальтополимербетонные экраны и крепления особенно эффективны при полной и комплексной механизации их строительства. Схемы комплексной механизации работ на объекте строительства различны для различных гидротехнических сооружений, а также связаны с использованием тех или других машин для выполнения операций.

Работы на оросительных каналах организуются по схеме:

- земляное ложе канала, проходящего в выемке или в уплотненной насыпи, образовано роторным экскаватором типа ЭТР-201Б, при этом, благодаря точному выдерживанию отметок верха насыпи, машиной точно выдерживается отметка дна канала и весь его профиль; стерилизация грунта ложа канала производится при помощи навесного оборудования, установленного за рабочими органами экскаватора; т.к. насыпь предварительно уплотнена, то в настоящей схеме не предусмотрено уплотнение грунта в ложе канала; если же такое уплотнение необходимо, то вслед за экскаватором перемещается второй уплотнитель; укладка асфальтобетонной смеси по всему периметру канала производится прицепным профильным асфальтоукладчиком типа МБ-21, в виде скользящей формы, включающим бункер, распределительные и рабочие органы для предварительного уплотнения покрытия и тяговую лебедку; асфальтоукладчик перемещается вдоль канала с помощью самоходного якоря типа МБ-20, состоящего из трактора Т-100-МБ со стрелой; стрела якоря имеет на конце виброанкер, который перед началом работы асфальтоукладчика внедряется в грунт бермы на противоположной к трактору стороне канала, обеспечивая неподвижность трактора и приложение тягового усилия к укладчику по оси канала; загрузка укладчика смесью производится либо непосредственно из автосамосвалов, либо при помощи крана с бадьями;

- предварительное уплотнение смеси в покрытии производится вибробрусом и заглаживающим брусом асфальтоукладчика, а окончательное –

многопроходным уплотнителем типа МБ-22, перемещающимся вдоль оси канала и уплотняющим покрытие по всему периметру канала;

- контроль степени уплотнения уложенного покрытия осуществляется передвижной измерительной лабораторией, снабженной ультразвуковой аппаратурой для оперативного контроля качества асфальтобетона непосредственно при проходах уплотнителя, а также инструментом для взятия кернов или вырубок из готового покрытия и весами для взвешивания асфальтобетона из вырубок, которые затем передаются для испытания в лабораторию асфальтобетонного завода; поверхностная обработка готового покрытия битумным вяжущим после заделки мест взятия вырубок и устранения замеченных дефектов производится автогудронатором 6 с консольным распределителем.

Работы по строительству асфальтобетонных облицовок на откосах длиной от 4 до 16 м каналов, дамб и бассейнов организуются в соответствии со схемой: для планировки основания используются многоковшовые экскаваторы типов ЭМ-201А, ЭМ-302 на рельсовом ходу; рельсовый путь из отдельных рельсовых секций укладывается с помощью автокрана на гребне дамбы под нивелир; для планировки гребня используется бульдозер на тракторе Т-100ГП или ДТ-75, которым также перемещаются секции рельсового пути по мере передвижения машин; использование рельсового пути обеспечивает работу планировщика и укладчика «след в след», чем гарантируется постоянная толщина укладываемого слоя покрытия; обработку откоса водным раствором гербицида производят оборудованием типа ОГ-16, состоящим из прицепляемой к планировщику емкости на тележке и навешиваемого на раму планировщика распределительного трубопровода, связанного с емкостью; уплотнение основания после стерилизации его осуществляется виброуплотнителем типа ВС с двумя виброкатками, который либо прицеплен к планировщику, либо перемещается самостоятельно; асфальтовая смесь распределяется по откосу мостовым асфальтоукладчиком типа САУ-25, также на рельсовом ходу; для перемеще-

ния нижней тележки у подошвы откоса уложена нитка рельсового пути; перемещение этой нитки по мере движения укладчика и планировку основания осуществляет второй бульдозер; загрузка укладчика смесью производится непосредственно из автосамосвалов грузоподъемностью до 7,5 т на гребне или у подошвы откоса; вслед за асфальтоукладчиком перемещаются два виброуплотнителя типа ВС с виброкатками, обеспечивающие предварительное и окончательное уплотнение смеси; один из виброуплотнителей может быть прицеплен к асфальтоукладчику, второй перемещается самостоятельно и может делать остановки и перемещаться назад до полного уплотнения смеси; при укладке двухслойной асфальтобетонной облицовки используются два комплекта асфальтоукладчика с виброуплотнителями, движущимися в потоке друг за другом; поверхностная обработка готового покрытия производится автогудронатором, который снабжается выносным распределительным трубопроводом, опирающимся на откос; контроль уплотнения смеси и качества готового слоя облицовки осуществляется передвижной лабораторией [9].

Работы по строительству асфальтобетонного экрана или крепления на откосах длиной 10-25 м дамб, плотин, бассейнов могут быть организованы с использованием бункерного асфальтоукладчика Е-1 и виброуплотнителя В-4: планировка откоса производится бульдозером или грейдером, поддерживаемым тросом лебедки экскаватора, стоящего на гребне дамбы; при планировке механизм перемещается либо снизу вверх по откосу, либо вдоль дамбы; стерилизация грунта осуществляется поливочно-моечными машинами или другим оборудованием, применяемым для этой цели в сельском хозяйстве; для уплотнения основания применяются вибрационные или гладкие катки из серийно выпускаемых, перемещаемые по откосу тяговым тросом экскаватора; асфальтоукладчик Е-1 используется для укладки переходного слоя, причем его конструкция позволяет укладывать слой с ровной поверхностью на недостаточно ровном основании; этот же укладчик или второй экземпляр укладчика Е-1 распределяет поверх пере-

ходного слоя также слой из плотного гидротехнического асфальтобетона, укладчик перемещается по откосу с помощью гусеничного экскаватора с оборудованием драглайна; с его же помощью укладчик устанавливается на гребне под загрузку смесью, которая осуществляется либо непосредственно из автосамосвалов (если укладчик снабжен приемным бункером), либо с помощью бадей с секторными затворами; уплотнение материала переходного слоя и предварительное уплотнение слоя из гидротехнического асфальтобетона осуществляется уплотнителем с двумя виброкатками, прицепляемым к экскаватору жесткой тягой, которая предотвращает смещение тележки уплотнителя к откосу под действием виброкатков; поверхностная обработка покрытия осуществляется автогудронатором, перемещаемым по откосу снизу вверх с помощью тяговой лебедки экскаватора или перемещающимся вдоль дамбы самостоятельно, либо по гребню (при наличии консольного распределителя), либо непосредственно по откосу (тогда трактор на гребне через тросовые тяги должен удерживать машину от бокового смещения вниз по откосу).

Практика показывает, что применение в сборных облицовках полимерной пленки в качестве противофильтрационного экрана также не дает должного эффекта, так как в процессе укладки железобетонных плит пленочный экран повреждается. В таблице 2 [17] приведено сравнение зарубежной и отечественной пленки для облицовки оросительных каналов.

**Таблица 2 – Сравнение пленки Firestone Pond Liner и ПЭВП (полиэтилен повышенной плотности) для облицовки оросительных каналов**

Проведенные испытания устойчивости к различным факторам	Материал	
	Firestone Pond Liner	ПЭВП
	1 мм	1,5 мм
1	2	3
Устойчивость к солнечному свету (открытый воздух)	E	E
Устойчивость к растрескиванию под напряжением	E	F
Устойчивость к растрескиванию (все причины)	E	F
Устойчивость к жару (жаркий, засушливый климат)	G	G
Устойчивость к тепловому расширению/сжатию	E	P

Продолжение таблицы 2

1	2	3
Устойчивость к воздействию сточных вод/почвы	E	E
Легкость установки панелей	G	G
Легкость соединения в полевых условиях (удобство для владельца)	G	P
Легкость подсоединения к дополнительным приспособлениям	G	G
Легкость ремонта в полевых условиях	E	P
Установка при низкой температуре	E	F
Ломкость при низкой температуре (зона шва)	E	F
Соответствие подложке	E	P
Устойчивость к проколу	G	F
Общие характеристики ровной укладки	E	P
Устойчивость к повреждениям при установке (полевые условия)	G	F
Устойчивость к появлению складок при установке	E	P
Устойчивость к натяжению при установке	G	F
Устойчивость к смещению грунта (поверхностное трение)	E	P
Склеивание с бетонными конструкциями	E	NR
Общая долговечность	E	E
Средняя стоимость за мил. толщины/кв. фут.	G	E
Общий класс сравнения	G-E	F-G
Примечание: E = отлично; G = хорошо; F = удовлетворительно; P = плохо; NR = не рекомендуется.		

Исследования проводились в PVC Geomembrane Institute Technical Reference совместно с R.K. Frobels & Associates Geosynthetic Consulting Engineers и показывают значительное превосходство зарубежной пленки практически по всем рассмотренным показателям.

В США, Европе, странах Азии геосинтетические материалы применяются более 50 лет и хорошо зарекомендовали себя [18, 19]. На этом фоне интересен опыт Беларуси, где геосинтетика и геомембраны начали использовать сравнительно недавно.

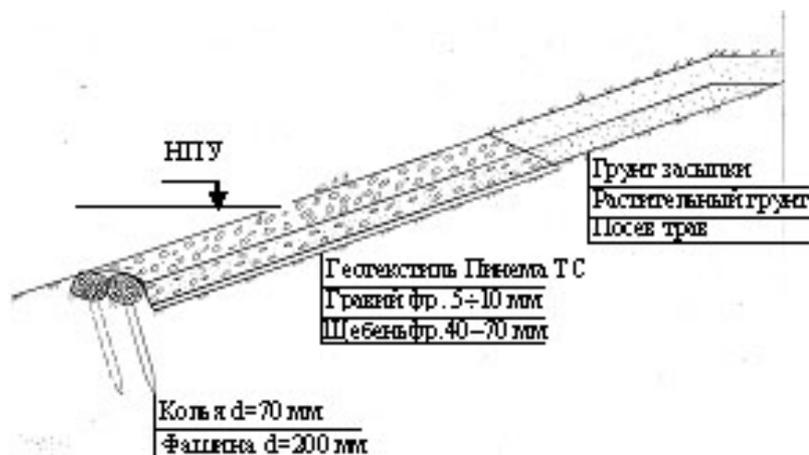
Эффективным способом защиты от фильтрации и эрозии на ряде мелиоративных объектов республики стало крепление откосов гибким покрытием – биополотном. Это геосинтетический материал, изготавливаемый из отходов иглопробивного полотна и полиэфирного волокна в виде двухслойного ковра с внесением между слоями семян трав (производитель – ОАО «БелФА», г. Жлобин). Рулон материала раскатывают по спла-

нированному откосу канала на слой растительного грунта. После укладки биополотно присыпают слоем почвы толщиной 3-5 мм, обеспечивающим удерживание влаги и более плотное прилегание материала к откосу. После прорастания семян образуется устойчивое покрытие, на длительный срок защищающее земляную поверхность от ветровой и водной эрозии. Откосы каналов, укрепленные биополотном, по сравнению с традиционным способом биологического крепления посевом трав, обладают более высокой противозерозионной устойчивостью. В 1,5-2 раза уменьшается степень заиления дна каналов и, соответственно, снижаются затраты на их очистку. Материал обеспечивает высокую надежность покрытия и срок службы до 15 лет [20].

На территории Гродненской области выполнены работы по восстановлению белорусской части Августовского канала. Это уникальное гидротехническое сооружение, построенное 180 лет назад как водный путь для перевозки грузов из бассейна рек Вислы и Немана к Балтийскому морю, включало в себя 29 водопропускных плотин, 18 шлюзов, 14 мостов и 24 объекта для обслуживания канала. По территории Беларуси проходит пятая часть (22 км) его пути. Реконструкция канала была связана с различными техническими сложностями, где использование современных строительных материалов обеспечило возведение надежных и долговечных конструкций. Для защиты откосов канала от разрушения использован геотекстильный материал «Пинема», укладываемый на откос в зоне переменного уровня воды с покрытием грунтовой засыпкой (рисунок 4).

Геотекстиль «Пинема» также использовали при восстановлении конструкций 4-й камеры судоходного шлюза «Немново», крупнейшего на всей протяженности канала. Подход к шлюзу выполнен в виде направляющих пал, в поперечном сечении представляющих собой подпорную стенку. Ее нижняя часть устроена из железобетонного шпунта, забиваемого на глубину 4 м от дна котлована. Для предотвращения суффозии грунта

через стыки шпунтовой стенки с тыловой ее части выполнена укладка геотекстиля.



**Рисунок 4 – Укрепление откосов Августовского канала**

Для укрепления откосов шлюза также эффективно применение георешеток, уложенных по откосу с закреплением анкерами. Ячейки георешетки заполняются растительным грунтом с последующим посевом трав.

Геосинтетические материалы получили широкое распространение при строительстве и реконструкции дренажных систем гидромелиоративной сети.

Пластмассовый дренаж обладает более высокой водопропускной способностью по сравнению с керамическим, асбесто-цементным и другими видами дренажей, а также хорошими деформационными и прочностными свойствами, что особенно важно в случае его укладки на слабых грунтах [21, 22].

Одна из основных причин ухудшения работоспособности дренажа и снижения срока его службы – его заиливание, отложение в полостях дренажных труб частиц грунта, солей, железистых соединений. Это ведет к снижению эффективности отвода дренируемых вод от сооружений или частей конструкций. Для обеспечения надежной и долговечной работы трубчатых дрен широко применяют рулонные защитно-фильтрующие материалы, производимые на белорусских предприятиях: иглопробивной нетканый синтетический материал (ОАО «Пинема», г. Пинск), нетканый полипропи-

леновый материал спанбонд (ПО «Химволокно», г. Светлогорск), полиэфирное иглопробивное полотно (ПО «Химволокно», г. Могилев) и другие. Многолетний опыт эксплуатации гончарных и пластмассовых дрен, защищенных рулонными фильтрами, показал их высокие работоспособность и фильтрационные характеристики. Рулонные геосинтетические материалы также получили распространение благодаря высокой технологичности при механизированном способе укладки дренажа, особенно при поставке на объект полностью подготовленных к укладке на заводе пластмассовых труб, обернутых фильтрующим материалом. На поверхность перфорированных пластмассовых труб наносят защитную бесшовную фильтрующую оболочку из волокнисто-пористого полиэтилена или покрывают трубы нетканым иглопробивным полотном.

### **3 Анализ современных полимерных материалов, применяемых для облицовок каналов**

В качестве защитного прокладочного материала используются следующие марки геотекстиля: Tyrag SF27, Tyrag SF40, Polyfelt TS10, Polyfelt TS20, Polyfelt TS30, Polyfelt F60. Материалы Tyrag – термоскрепленные, Polyfelt – иглопробивные. Все отобранные материалы под нагрузкой 20 кПа имеют небольшую толщину: от 0,25 мм (Tyrag SF27) до 2,8 мм (Polyfelt F60). Стоимость их колеблется в пределах от 0,5 до 0,9 евро за 1 м<sup>2</sup> [23].

В качестве противофильтрационного материала могут быть использованы листовые полимерные материалы на основе полиолефинов толщиной 1 мм («Пластполимер», «Пластик»), на основе бутилкаучука – «бутилкор-С» толщиной 2 мм («Нижнекамскнефтехим»), «Таурус»(Венгрия), «Мицубиси» (Япония), армированный полимерный материала «Гипалон» (США) толщиной 0,5-1 мм, битумно-полимерный материала «Теранап Т.Р.» (Франция) толщиной 4 мм [24].

В практике гидротехнического строительства полимерными пленками обычно называют различные рулонные материалы, имеющие толщину

менее 1,0 мм. При большей толщине материал называют листовым. Пленки могут быть изготовлены практически из всех полимерных материалов. Состав материала пленки, как правило, включает в себя, помимо основного полимера, различные стабилизаторы, пластификаторы, красители, наполнители в виде органических или минеральных волокон, нитей, тканей и т.п. По аналогии с классификацией полимерных материалов, полимерные пленки целесообразно классифицировать, положив в основу их физико-механические свойства, структуру и отношение к нагреванию.

В зависимости от физико-механических свойств материала, пленки могут быть жесткими, полужесткими, мягкими и эластичными.

Жесткие пленки – твердые материалы с высоким модулем упругости (выше  $1 \cdot 10^3$  МПа) и малым удлинением при разрыве.

Полужесткие пленки – твердые материалы со средним модулем упругости ( $4 \cdot 10^2 - 1 \cdot 10^3$  МПа), с высоким относительным удлинением при разрыве.

Мягкие пленки – материалы с низким модулем упругости ( $20 - 4 \cdot 10^2$  МПа) и большой величиной относительного удлинения при разрыве.

Эластичные пленки – материалы с модулем упругости ниже 20 МПа, значительно деформирующиеся при растяжении. Деформация или большая ее часть у эластичных пленок исчезает после снятия нагрузки при нормальной температуре с относительно большой скоростью (практически мгновенно).

По физическим структурным признакам полимерные пленки можно разделить на три основные группы: 1) изотропные и ориентированные аморфные; 2) кристаллические; 3) изотропные и ориентированные кристаллические [25].

Структура пленок зависит от введения в них различных наполнителей, поэтому пленки можно также делить на ненаполненные и наполненные. В качестве наполнителей применяют порошки (сажа, кварцевая мука, мел, тальк и др.), волокнистые материалы (асбестовое волокно, стеклово-

локно и др.), а также слоистые материалы (бумага, различные ткани, металлические сетки, холсты и др.). В последнем случае имеет также смысл называть пленки армированными.

Наполнители снижают стоимость полимеров, поэтому их введение экономически целесообразно. Вместе с тем наполнители модифицируют пленки и нередко способствуют улучшению их свойств, повышают химическую стойкость, теплостойкость, твердость, долговечность и др. [26, 27].

Наряду с наполнителями в пленки вводят пластификаторы, красители, стабилизаторы и другие вещества. В этом случае пленки называют пластифицированными, окрашенными и стабилизированными. Пластификаторы применяют для придания пленкам определенных свойств, в основном повышенной деформационной способности. Пластификаторы желательно иметь водонерастворимыми, малолетучими и при эксплуатации пленочных конструкций не вызывающими отрицательных изменений начальных характеристик материала. В качестве пластификаторов используют сложные эфиры, цинковую кислоту, стеарат алюминия и др.

Красители применяются для придания пленкам определенного цвета в декоративных целях, а также для управления степенью нагрева пленок солнечными лучами. Красители должны быть стойкими во времени. В качестве красителей применяют органические (нигрозин, пигмент желтый, хризозин и др.) и минеральные пигменты (охра, сурик, окись хрома и др.).

Стабилизаторы вводят в пленки с целью исключения или замедления различных окислительно-деструктивных и структурирующих процессов, вызывающих старение материала. В качестве стабилизаторов используют газовую сажу (светостабилизатор), стеарат свинца, трехосновной сульфат свинца (термостабилизаторы) и др. [28].

Ниже кратко рассмотрены методы получения и основные физико-механические свойства пленочных и листовых полимерных материалов, применяемых в гидротехническом строительстве для борьбы с фильтрацией. В современном гидротехническом строительстве для создания противо-

фильтрационных экранов на каналах и водоемах нашли широкое применение пленочные противофильтрационные материалы (полиэтиленовая и поливинилхлоридная пленка, бутилкаучук), различные листовые полимерные материалы (Бутилкор – С; Армобитэп; Бронеизол и др.) и геомембраны.

### 3.1 Пленочные материалы

Полиэтиленовая пленка изготавливается из полиэтилена. Полиэтилен является одним из наиболее изученных полимеров. Он представляет собой продукт полимеризации этилена. Известны три основных промышленных метода получения полиэтилена: соответственно при высоком (1200-1500 ат), низком (до 10 ат) и среднем (30-40 ат) давлении. Способ получения полиэтилена в значительной степени обуславливает его свойства. Для изготовления пленок, главным образом применяют полиэтилен высокого давления или низкой плотности (ПЭНП).

В установках, где происходит полимеризация, полиэтилен получают в виде гранул. Полиэтиленовую пленку изготавливают, в основном, методом раздува. После раздува образовавшаяся пленка наматывается на барабан в виде плоского рукава. Однако иногда пленка предварительно разрезается и наматывается в один слой, а при большом диаметре рукава укладывается вчетверо или другим способом [29].

Поливинилхлорид представляет собой термопластичный материал, получаемый полимеризацией винилхлорида. Полимеризацию винилхлорида осуществляют в водной эмульсии в присутствии эмульгаторов и инициаторов. При применении водорастворимых инициаторов и эмульгаторов типа синтетических мыл поливинилхлорид образуется в водной фазе в виде устойчивой тонкодисперсной взвеси (ПВХ – Е). Если применяются эмульгаторы коллоидного типа, образуются более крупные частички полимера, взвешенные в жидкой фазе (ПВХ – С). В случае блочной полимеризации процесс протекает в массе жидкого мономера, в котором растворен инициатор (ПВХ – М). В зависимости от условий полимеризации, меняются свойства получаемого полимера [30].

Для экранирования гидротехнических сооружений в подавляющем большинстве случаев применяют пленку из пластифицированного ПВХ. В России ПВХ пленка не нашла широкого применения из-за недостаточной морозостойкости. Поливинилхлоридная пленка, в отличие от полиэтиленовой пленки, не только сваривается, но и склеивается [31].

Бутилкаучук, или полиизобутиленовый каучук, представляет собой сополимер изобутилена с небольшим количеством бутадиена. Различные добавки могут придать бутилкаучуку всевозможные цвета – от бледно-голубого до красно-коричневого. Бутилкаучуковые пленки производятся методом каландрирования, поэтому их ширина невелика. Бутилкаучук стоек к действию кислот, щелочей, сложных эфиров, спиртов, растительных масел и набухает лишь в ароматических и алифатических растворителях. Полимер нетоксичен и не является питательной средой бактерий и грибков. Стыковка бутилкаучуковых пленок осуществляется с помощью склеивания и вулканизации [32].

За рубежом бутилкаучук нашел широкое применение при экранировании гидросооружений. В нашей стране бутилкаучук выпускается в сравнительно небольшом объеме и в связи с этим лишь ограниченно используется при противотрационной защите сооружений.

В таблице 3 представлены основные физические свойства полиэтиленовой, поливинилхлоридной пленки и бутилкаучук.

**Таблица 3 – Физико-механические свойства полимерных пленочных материалов**

Свойство	Полиэтиленовая пленка	Поливинилхлоридная пленка	Бутилкаучук
1	2	3	4
Объемная масса, г/см <sup>3</sup>	0,92-0,94	1,23-1,40	1,10-1,35
Предел текучести при растяжении, МПа	12-16	10-25	2-14
Относительное удлинение при разрыве, %	150-600	140-400	350-1500
Модуль упругости, МПа	50-250	2-8	5
Удельная ударная вязкость, Дж/см <sup>2</sup>	Не разрушается	Не разрушается	Не разрушается

Продолжение таблицы 3

1	2	3	4
Теплостойкость, °С	-60-75	-25-50	-40-60
Водопоглощение за 30 суток, %	0,035-0,22	0,5 – ПВХ-С 5,0 – ПВХ-Е	0,1-1,0
Коэффициент линейного расширения, 1/°С	$1,5 \cdot 10^{-4}$ - $9,4 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-4}$ - $2,5 \cdot 10^{-4}$	$0,15 \cdot 10^{-4}$ - $1,2 \cdot 10^{-4}$
Твердость по Бринеллю, МПа	14-25	25-32	8-15

### 3.2 Листовые материалы

В отечественной практике гидротехнического строительства листовые полимерные противofильтрационные материалы не нашли широкого применения и использовались в качестве противofильтрационных элементов облицовок каналов лишь на опытных участках.

У нас в стране первым примером применения поверхностных противofильтрационных экранов из полимерных бутилкаучуковых материалов явился экран на распределительном канале БТ-Р-5 Азовской оросительной системы Ростовской области.

Опытное строительство поверхностного противofильтрационного экрана из полимерного материала на основе бутилкаучука – бутилкор-С на канале БТ-Р-5 было выполнено в 1977 г. [33].

Бутилкор-С представляет собой полувулканизированную резину толщиной 0,9-3,0 мм, поставляемую в рулонах в комплекте с клеем БК-НМ (бутилкаучуковый компаунд низкомолекулярный). Бутилкор-С изготавливается по следующей рецептуре (в частях массы: бутилкаучук – 100; сажа газовая ГД-100 – 50; сажа ТР-10 – 50; парафин – 5; окись цинка – 5; каптакс – 1; тиурам – 1,5; сера – 1,5). Основные физико-механические характеристики материала представлены в таблице 4.

«Армобитэп» – противofильтрационный материал, состоящий из стекловолоконной основы, покрытый битумно-каучуковым вяжущим, включающим битум, каучук (дивинилстирольный термоэластопласт или бутилкаучук). Для противofильтрационного материала используется стеклоткань марок Т-13 (ГОСТ 19170-73), ТСТ<sub>2</sub> (МРТУ 6-11-118-69). Физико-

механические свойства листового полимерного материала «Армобитэп» представлены в таблице 5 [34].

**Таблица 4 – Физико-механические свойства и размеры «Бутилкора-С» (по ТУ 103376-77)**

Предел прочности при разрыве МПа (кгс/см <sup>2</sup> ), не менее	1,96
Относительное удлинение при разрыве, %	350-850
Температура хрупкости (морозостойкость), °С	- 40
Плотность, г/см <sup>3</sup>	1,15-1,35
Удельная масса, кг/м <sup>2</sup>	1,8-2,4
Толщина, мм	1,6±0,2
Ширина, мм	800±10
Длина, м	10

**Таблица 5 – Физико-механические свойства и размеры «Армобитэпа» (по ТУ 103376-77)**

Температура размягчения битумно-каучукового вяжущего °С, не ниже	85
Температура хрупкости битумно-каучукового вяжущего (морозостойкость) °С, не выше	- 30
Общая масса битумно-каучукового вяжущего, кг/м <sup>2</sup>	2,0-3,5
Водопоглощение, г/м <sup>2</sup>	25
Водонепроницаемость образца диаметром 100 мм при гидростатическом давлении, атм	0,8
Толщина материала, мм	3-5
Ширина полотна, мм	1000

### 3.3 Геомембраны

Согласно ASTM D4439, «геомембрана – это экран или непроницаемый слой из синтетического материала, используемый в геотехнике для контроля движения жидкости в объектах, сооружениях или системах искусственного происхождения». Геомембраны изготавливаются в виде тонких гибких листов, которые применяются, прежде всего, в качестве кровельного покрытия, покрытий и облицовки хранилищ для жидких или твердых материалов, для фундаментов и подземных сооружений (транспортные туннели, стоянки), а также в гео- и гидротехнике. В настоящее время за рубежом по объему продаж геомембраны занимают первое место среди геосинтетической продукции.

Основными исходными полимерами для многих синтетических геомембран являются полиэтилен (PE), полиамид (PA), полипропилен (PP),

полиэфир (PET) , каучук (DM) [35, 36].

Рулонные полимерные гидроизоляционные мембраны изготавливаются из:

- полиэтилена высокого давления и высокой плотности (HDPE) обладают высокими прочностными характеристиками. Используются для строительства накопителей жидких и твердых промышленных отходов, полигонов ТБО, гидроизоляционного и антикоррозийного покрытия бетонных, кирпичных металлических и прочих поверхностей, в том числе емкостей для питьевой воды;

- полиэтилена низкого давления и высокой плотности (LDPE), обладают высокой эластичностью и используются при строительстве сооружений в просадочных грунтах, локализации несанкционированных и заброшенных свалок, рекультивации полигонов твердых бытовых и промышленных отходов, гидроизоляции тоннелей и других подземных сооружений;

- полиэтилена высокого давления высокой плотности, повышенной пластичности (LLDPE);

- полиэтилена высокого давления, высокой плотности, особо высокой пластичности с сигнальным слоем (VLDPE) (Tunnel membrane);

- полиэтилена высокого и низкого давления высокой плотности с шероховатой поверхностью с одной или обеих сторон.

По химическому составу геомембрана состоит из полиэтилена – 97 %, газовой сажи – 2,5 % (светостабилизатор) и малых количеств термостабилизаторов и антиоксидантов [37].

#### **4 Анализ методов расчета противофильтрационных облицовок**

При расчете параметров противофильтрационных облицовок следует учитывать все виды нагрузок, действующие на облицовку в процессе ее возведения и эксплуатации, в том числе:

- смерзание облицовки по контакту с ложем канала;
- температурно-усадочные деформации в бетоне при укладке в облицовку;

- воздействие напора воды в канале и со стороны грунтовых вод;
- волновые и ледовые нагрузки, возникающие в зоне изменения эксплуатационного горизонта воды в канале и т.д.

Для расчета водопроницаемости и эффективности противofильтрационных облицовок каналов на стадии проектирования необходимо иметь следующие данные:

- геометрические размеры канала;
- расчетную проектную глубину в канале;
- предполагаемый тип противofильтрационной облицовки;
- литологический разрез по трассе канала;
- фofильтрационные свойства грунтов;
- глубину залегания уровня грунтовых вод;
- расстояние до приканального дренажа или естественных понижений местности.

*Методика расчета толщины противofильтрационной облицовки в каналах на просадочных грунтах*

В имеющихся научных работах в этом направлении сделано крайне мало, выделим [38-40]. В ВСН 33-2.2.06-86 «Оросительные системы на просадочных грунтах» этот вопрос также освещен крайне мало.

Применительно свода правил предлагается использовать расчет, приведенный в «Руководстве по применению грунтово-пленочных экранов в земляных сооружениях оросительных систем».

Поверочный расчет толщины пленочного покрытия в сооружениях, возводимых на просадочных грунтах, производится для проверки принятой в проекте толщины пленки, с учетом неравномерности просадочных деформаций подэкранового основания (1):

$$\delta = \frac{kqf\Delta S}{2\sigma_{\text{т}} \varepsilon_{\text{доп}}}, \quad (1)$$

где  $k$  – коэффициент условий работы (для оросительных каналов 1,0-1,1);  
 $q$  – удельное давление воды и грунта на пленку, МПа;

$f$  – коэффициент трения грунта оснований по пленке определяется по справочным данным;

$\sigma_T$  – предел текучести пленочного материала, МПа, определяемый лабораторными испытаниями;

$\varepsilon_{\text{доп}}$  – допустимая относительная деформация для пленочного материала;

$\Delta S$  – относительное смещение двух смежных просадочных блоков, см;  $\Delta S$  устанавливается путем компрессионных испытаний или по объекту аналогу.

#### *Методика расчета заложения экранированных откосов*

Допустимую крутизну экранированных откосов определяют следующие факторы:

- устойчивость защитного слоя, которая, в свою очередь, зависит от угла внутреннего трения грунта, сил сцепления (для связных грунтов);
- коэффициент трения грунта по пленке;
- гидродинамическое давление.

Проанализировав методики расчета заложения экранированных откосов, можно сделать вывод о целесообразности применения в своде правил методики, представленной в «Руководстве по применению грунтово-пленочных экранов в земляных сооружениях оросительных систем». Расчетная схема представлена на рисунке 5.

Необходимым условием правильного выбора заложения откоса является то, чтобы отношение удерживающих сил к сдвигающим  $K$  было больше или равно коэффициенту запаса  $K_3$ , т.е. обеспечивалось неравенство:

$$K = \frac{N_2 f + C_{AO} + N_1 f_2 (\operatorname{tg} \alpha - f_1) \sin \beta}{T_2 + T_1 (1 + \operatorname{ctg} \alpha) \cos \beta} \geq K_3, \quad (2)$$

где  $T_1$  и  $T_2$  – тангенциальные составляющие давления грунта призм грунта;

$N_1$  и  $N_2$  – нормальные составляющие давления грунта;

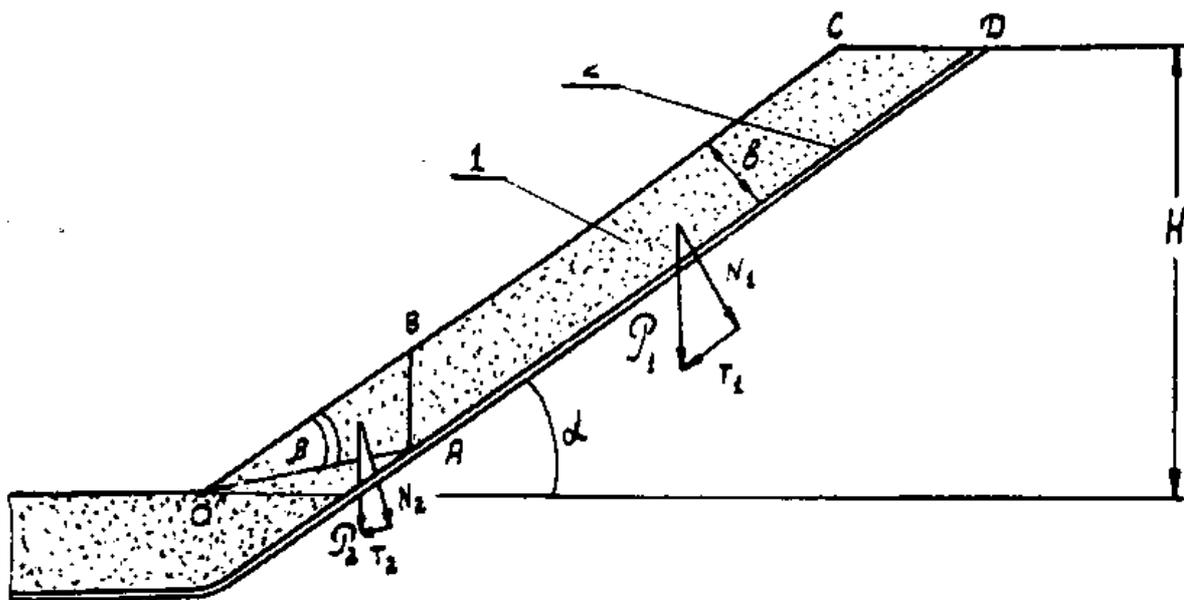
$f$  – коэффициент трения грунта защитного слоя по пленке;

$f_2$  – коэффициент внутреннего трения грунта защитного слоя;

$\alpha$  – угол наклона откоса к горизонту;

$C_{AO}$  – сила сцепления по плоскости АО;

$\beta$  – угол между поверхностью откоса и плоскость сдвига.



1 – защитный слой грунта; 2 – пленочное покрытие;  $B$  – толщина защитного слоя;  
 $H$  – высота откоса;  $\alpha$  – угол наклона откоса к горизонту

### Рисунок 5 – Схема сил, действующих в защитном слое

Проведя анализ этого уравнения, можно сделать следующие выводы:

- угол оползания  $\beta$  находится в пределах от 0 до  $\alpha$  и соответствует тому значению угла, для которого отношение удерживающих сил к сдвигающим имеет минимальное значение;

- для связных грунтов углы  $\beta$  и  $\alpha$  по своему значению близки друг к другу;

- для практических целей можно принять  $\beta$  равным углу  $\alpha$ .

Для расчета устойчивости откосов, сложенных несвязными грунтами, используется зависимость, приведенная в работе [41].

#### 4.1 Определение расстояний между деформационными швами в монолитных бетонных и железобетонных противofильтрационных облицовках при их смерзании с ложем канала

Экологически безопасная противofильтрационная облицовка должна исключать образование трещин в ее элементах при эксплуатации в различных инженерно-геологических и гидрогеологических условиях. Поэтому расчет бетонных и железобетонных противofильтрационных облицовок оросительных каналов необходимо производить по предельным состояниям первой группы в предположении упругой работы бетона из условия ограничения величин краевых сжимающих и растягивающих напряжений.

Учитывая, что силы смерзания облицовки канала с основанием приложены к ее нижней плоскости, расчет прочности бетонной плиты, воспринимающей внецентренное сжатие при деформациях от отрицательных от температур, ведем по формулам СНиП 2.06.08-87 [42] и СНиП 2.06.01-86 [43].

При проектировании противofильтрационных облицовок, для определения расстояния между деформационными швами в монолитных бетонных облицовках при их смерзании с ложем канала рекомендуется использовать формулу, приведенную в [44]:

$$l_6 \leq \frac{0,6h(R_b - 3,5R_{bt})}{\sigma_c}, \quad (3)$$

где  $l_6$  – длина бетонной плиты (расстояние между швами), м;

$h$  – толщина бетонной плиты, м;

$R_b$  – расчетное сопротивление бетона осевому сжатию для предельных состояний первой группы, МПа;

$R_{bt}$  – расчетное сопротивление бетона осевому растяжению для предельного состояния первой групп, МПа;

$\sigma_c$  – напряжение смерзания плиты облицовки с основанием, МПа.

Железобетонные облицовки отличаются от бетонных большей проч-

ностью, сопротивляемостью трещинообразованию, деформациям от просадки, набухания и морозного пучения грунтов, а также более высокой эксплуатационной надежностью.

Арматура в монолитных железобетонных облицовках, как правило, укладывается в один ряд (в растянутой зоне работы железобетонной облицовки). Укладку арматуры в два ряда нельзя признать рациональной не только из экономических соображений, но и вследствие технологических факторов, так как в этом случае сильно усложняется производство работ.

Расстояние между деформационными швами в железобетонных облицовках при их смерзании с ложем канала следует определять по формуле

$$l_{ж.б} \leq -\frac{P}{2} + \sqrt{\left(\frac{P}{2}\right)^2 + q}, \quad (4)$$

где

$$P = \frac{h}{\sigma_c} (3,6\mu R_s - 0,45R_b);$$

$$q = \frac{\mu \cdot h^2}{\sigma_c} (4,7R_b \cdot R_s - 3,2R_s^2 \cdot \mu).$$

#### **4.2 Определение предельного расстояния между температурно-усадочными швами в монолитной бетонной противofильтрационной облицовке**

Используя выводы работы Г. И. Горчакова [45] и проанализировав работы [46, 47, 48], выполненные на основании многолетних натуральных исследований, предельное расстояние между температурно-усадочными швами в монолитной бетонной противofильтрационной облицовке рекомендуется определять по формуле, учитывающей снижение напряжений в бетоне при усадке вследствие пластических деформаций, как того требует «Инструкция ...» [34]:

$$l_{\max} = 3,16\sqrt{h} \cdot \arcsin h \frac{\varepsilon \cdot E}{\varepsilon \cdot E - 1,75R_{bt}}, \quad (5)$$

где  $h$  – толщина слоя облицовки, м;

$\varepsilon$  – величина относительной усадочной деформации;

$E$  – модуль упругости бетона в начальный период его твердения, МПа;

$R_{bt}$  – предел прочности бетона при растяжении для предельного состояния первой группы, МПа.

### 4.3 Расчет конструкции противофильтрационной облицовки каналов при морозном пучении основания

Анализ результатов исследований и нормативных документов [42, 43] показал недостатки метода расчетов конструкции противофильтрационной облицовки каналов при морозном пучении основания и позволил рекомендовать для разработки проекта свода правил использовать специально разработанную и уточненную методику [49].

Изгибающий момент ( $M_{н.ж.б.}$ ) в предварительно напряженной железобетонной плите определяется по формуле

$$M_{н.ж.б.} \leq 0,87t_0^2 (\mu_n \cdot R_s + \mu \cdot R_s) \cdot \left( 1 - 0,65 \frac{\mu_n \cdot R_s + \mu \cdot R_s}{R_b} \right), \quad (6)$$

где  $t_0^2$  – толщина бетонной плиты, см;

$\mu_n$  – коэффициент армирования для напрягаемой арматуры;

$R_s$  – расчетное сопротивление арматуры растяжению для предельного состояния первой группы, МПа;

$\mu$  – коэффициент армирования для ненапрягаемой арматуры;

$R_b$  – расчетное сопротивление бетона осевому сжатию для предельных состояний первой группы, кПа.

#### 4.4 Расчет толщины противопучинистой «шубы» под противофильтрационными облицовками каналов

Толщина противопучинистого слоя «шубы» под облицовками каналов в период зимней эксплуатации определяются по зависимости:

$$t_{\text{ш}} = \frac{A \left[ h_n - \left( \frac{t_c}{\lambda_c} + \frac{t_6}{\lambda_6} \right) \lambda_r \right] - B t_6 \lambda_6 - C_i}{A \frac{\lambda_r}{\lambda_{\text{ш}}} + B \gamma_{\text{ш}}}, \quad (7)$$

где  $A = \sigma_n [0,66b_3 - 0,33m(\Delta H + t_n)]$ ;

$$B = 0,00005(\Delta H \sqrt{1 + m^2} + b_3).$$

$C_i$  принимается в зависимости от типа облицовки:

- для монолитной бетонной облицовки

$$C_1 = \frac{0,46R_{bt}t_6^2}{m\Delta H + b_3};$$

- для монолитной железобетонной облицовки

$$C_2 = \frac{0,78\mu t_6^2}{m\Delta H + b_3};$$

- для сборной облицовки из предварительно напряженных плит

$$C_3 = \frac{0,87t_6^2}{m\Delta H + b_3} (\mu_n R_s + \mu R_s) \left( 1 - 0,65 \frac{\mu_n R_s + \mu R_s}{R_b} \right).$$

#### 4.5 Расчет параметров деформационных швов в противофильтрационных облицовках каналов

Анализ методов расчета деформационных швов и расстояний между ними, предложенных Ф. Ф. Губиным, Н. В. Макридиным, С. Я. Выгодским, З. Г. Травиным, А. Ф. Чичаевым, Л. Я. Бондарем, И. Я. Бялером, А. Р. Гвенетадзе и др. [50, 51], показал, что они нуждаются в систематизации и доработке ввиду противоречивости некоторых рекомендаций, недоучета совокупности воздействия на швы и облицовку каналов всех экс-

платационных факторов и свойств новых полимерных и битумно-полимерных герметизирующих материалов. Так, расчеты, выполненные согласно отмеченным рекомендациям вышеуказанных авторов, приводят к разноречивым результатам.

Натурные исследования, выполненные различными научно-исследовательскими и проектными организациями (ВНИИГиМ, ВНИИ ВОДГЕО, Волгогипроводхоз, ВНИИПТЦЭОиТМР, УкрНИИГиМ, НГМА и др.) [52, 53], в течение многих лет позволили установить, что основные потери воды из облицованных каналов происходят через деформационные швы и трещины в бетоне.

В процессе эксплуатации каналов неизбежно возникают деформации оснований, проявляющиеся в виде просадок, размывов, набухания и морозного пучения подстилающих грунтов. Под действием этих деформаций происходят разгерметизация деформационных швов и межэлементных соединений, образование трещин в бетоне и разрушение облицовки, в результате чего резко снижаются противofильтрационная способность, экологическая безопасность и срок службы облицовки.

Основное требование, предъявляемое к деформационным швам облицовок каналов, – герметичность и надежность в процессе эксплуатации.

При проектировании противofильтрационных облицовок важно правильно выбрать герметизирующий материал для заполнения швов и обоснованно назначить их размеры.

Для определения ширины швов из герметиков-эластомеров, практически не изменяющих своих деформационных свойств под влиянием температуры, рекомендуется зависимость, учитывающая температурные деформации грунтов основания и показатели физико-механических свойств герметиков [54, 55]:

$$B_{ш} \geq \frac{\Delta h + \alpha \cdot L \cdot (t_{\max} - t_{\min})}{0,01 \cdot \varepsilon \cdot k} \geq [\delta], \quad (8)$$

где  $B_{ш}$  – ширина деформационной шва, см;

$\Delta h$  – предельно-высотное смещение одной плиты относительно другой, составляющее не более 40 % предельной величины общей ожидаемой деформации основания [56, 57], см;

$\alpha$  – коэффициент линейного расширения бетона, град.<sup>-1</sup>;

$L$  – расстояние между деформационными швами, см;

$t_{max}$  – максимальная температура воздуха, наблюдающаяся в регионе строительства, °С;

$t_{min}$  – минимальная температура воздуха в зимнее время, наблюдающаяся в регионе строительства, °С;

$\varepsilon$  – относительной удлинение при разрыве образцов герметика, выдержанных на воздухе, %;

$k$  – коэффициент, учитывающий снижение деформативности упругого герметика в результате внешних воздействий и длительного напряжения (для тиоколовых мастик  $k = 0,25$ );

$[\delta]$  – минимальная ширина шва, при которой герметик сохраняет упругие свойства, см.

Для определения ширины швов из битумно-полимерных герметиков, деформативные свойства которых зависят от температуры окружающего воздух, рекомендуется следующая формула:

$$B_{ш} \geq \frac{\Delta h}{0,01 \cdot \varepsilon_2 \cdot k_2} + \frac{\alpha \cdot L \cdot (t_{max} - t_{min})}{0,01 \cdot \varepsilon_1 \cdot k_1} \geq [\delta], \quad (9)$$

где  $\varepsilon_1$  – среднее значение показателя относительного удлинения герметика при разрыве в диапазоне эксплуатационных температур от  $t_{max}$  до  $t_{min}$ , %;

$\varepsilon_2$  – среднее значение показателя относительного удлинения герметика при разрыве в диапазоне температур, при которых имеют место неравномерные деформации основания, морозное пучение от 0 до минус 40 °С, %;

$k_1$  – коэффициент усталости материала заполнения шва, учитывающий снижение деформативности герметика при долговременной работе в диапазоне эксплуатационных температур от  $t_{\max}$  до  $t_{\min}$ ;

$k_2$  – коэффициент усталости материала заполнения шва, учитывающий снижение деформативности герметика в результате длительной работы в области положительных или отрицательных температур.

#### **4.6 Расчет допускаемых наполнений каналов для монолитных бетонных, железобетонных и сборных из предварительно напряженных плит противофильтрационных облицовок**

При заполнении водой канала в облицовке возникает изгибающий момент от сил веса воды и собственного веса конструкции.

Экологически безопасная противофильтрационная облицовка должна исключать образование трещин в бетоне при заполненном водой канале.

Допустимое наполнение каналов, исключающее образование трещин в монолитной бетонной из предварительно напряженных плит облицовки, определяется по формуле

$$H_{\sigma} \leq R_{bt} \left[ \frac{1907h^2}{L^2} + \frac{70LE_0}{(1-\mu_0^2)hE} \right] - 2,4h, \quad (10)$$

где  $H_{\sigma}$  – допустимое наполнение каналов в монолитно бетонной облицовке, м;

$R_{bt}$  – расчетное сопротивление бетона осевому растяжению для предельного состояния первой группы, МПа;

$h$  – толщина бетонной плиты, м;

$L$  – длина плиты (расстояние между швами облицовки), м;

$E_0$  – модуль деформации подстилающих грунтов, МПа;

$E$  – модуль упругости бетона, МПа;

$\mu_0$  – коэффициент Пуассона для грунтов основания.

Допустимое наполнение каналов, исключающее образование трещин

в железобетонной из предварительно напряженных плит облицовке определяется по формуле

$$H_{\text{ж.б.}} \leq \mu R_s \left[ \frac{3254h^2}{L^2} + \frac{264LE_0}{(1 - \mu_0^2)hE} \right] - 2,4h, \quad (11)$$

где  $H_{\text{ж.б.}}$  – допустимое наполнение каналов в железобетонной облицовке, м;

$\mu$  – коэффициент армирования бетона;

$R_s$  – расчетное сопротивление арматуры растяжению для предельного состояния первой группы, МПа.

Допустимое наполнение каналов, исключающее образование трещин в сборной из предварительно напряженных плит облицовке, определяется по формуле

$$H_{\text{н.ж.б.}} \leq (\mu_n R_s + \mu R_s) \left( 1 - 0,65 \frac{\mu_n R_s + \mu R_s}{R_b} \right) \left( \frac{3594h^2}{L^2} + \frac{292E_0}{(1 - \mu_0^2)hE} \right) - 2,4h, \quad (12)$$

где  $H_{\text{н.ж.б.}}$  – допустимое наполнение каналов в сборной облицовке, м;

$\mu_n$  – коэффициент армирования для напрягаемой арматуры;

$R_b$  – расчетное сопротивление бетону осевому сжатию для предельных состояний первой группы, МПа.

#### 4.7 Расчет фильтрации из облицованных каналов

Фильтрация из облицованных каналов может быть свободной, при которой фильтрационный поток из канала не связан с естественным грунтовым потоком и не взаимодействует с ним, и несвободной (с подпором), при которой фильтрационный поток связан с естественным грунтовым потоком и взаимодействует с ним (т.е. подпирается грунтовым потоком).

Согласно работам Н. Н. Веригина и С. В. Васильева [58], различают фильтрацию из облицованных каналов с неполным заполнением пор зоны аэрации под облицовкой, если соблюдается следующее неравенство:

$$\frac{k_1}{k'_{\text{обл}}} > \frac{h_0 + \delta_0 + H_{\text{к}}}{\delta_0}, \quad (13)$$

и наоборот, когда это неравенство не выполняется, просачивание грунтов зоны аэрации происходит с полным заполнением пор,

где  $k_1$  – коэффициент фильтрации грунта основания;

$k'_{\text{обл}}$  – осредненный коэффициент фильтрации облицовки;

$h_0$  – глубина воды в канале;

$\delta_0$  – толщина облицовки;

$H_{\text{к}}$  – капиллярный вакуум грунта, равный  $(0,5 - 0,7)h_{\text{к}}$ ;

$h_{\text{к}}$  – высота капиллярного поднятия воды в грунте.

Для расчета свободной фильтрации из облицованных каналов известны также другие зависимости, представленные С. Ф. Аверьяновым [59], А. А. Угинчусом [47], Р. М. Горбачевым [60].

Расчет фильтрационных потерь из каналов с облицовкой при установившейся свободной фильтрации производят по зависимостям, предложенным Н. Н. Веригиным, С. В. Васильевым [58] (без учета разряжения под облицовкой), по формуле С. Г. Хлебникова [61] (с учетом разряжения под облицовкой). Также Я. А. Пустыльниковым [62, 63] на основании теоретических и экспериментальных исследований была получена формула для расчета свободной фильтрации воды из экранированных каналов, учитывающая действие по подошве экрана отрицательного давления, снижение водопроницаемости подстилающего грунта за счет движения при неполном заполнении пор.

По формуле И. В. Кононова производится расчет фильтрационных потерь из каналов с облицовкой при установившейся подпертой фильтрации в однородном грунте:

$$Q_{\Phi} = \frac{K'_{\text{обл}}}{\delta_0} \left[ h_0^2 \sqrt{1 + m_0^2} + \Delta h (b + m_0 \delta_0) \right]. \quad (14)$$

Также такой расчет можно выполнить по видоизмененной формуле А. А. Угинчуса [47]:

$$Q_{\phi} = K'_{\text{обл}} \frac{h_0}{\delta_0} \left[ b + (2h_0 - \Delta h \sqrt{1 + m_0^2}) \right],$$

где  $\Delta h$  – превышение уровня воды в канале над уровнем грунтовых вод.

Фильтрационные потери из облицованных каналов в случае устоявшейся подпертой фильтрации для наиболее распространенной в природе схемы двухслойного грунта с учетом влияния симметрично расположенного приканального дренажа определяют по формуле А. Я. Олейника [64].

Дополнительное фильтрационное сопротивление, обусловленное применением облицовки, вычисляется по формуле

$$\Phi_{\text{обл}} = 2\delta_0 \frac{k_1}{k'_{\text{обл}}}. \quad (15)$$

В случае подпертой фильтрации из облицованного канала при отсутствии приканального дренажа расчетная зависимость для одностороннего погонного оттока, согласно А. Я. Олейнику [64], имеет вид:

$$q_k = \frac{TH}{\Phi_k + \Phi_{\text{обл}} + \sqrt{\frac{Tz_0}{\varepsilon_n}}}, \quad (16)$$

где  $H = h_k - h'_0$ ,

$$T = k_1 \left( h_0 + \frac{h_k - h_0}{2} \right) + k_2 m_2,$$

$h'_0$  – глубина грунтовых вод над границей раздела грунтовых слоев;

$z_0$  – критическая глубина залегания уровня грунтовых вод при  $\varepsilon = 0$ ;

$\varepsilon_n$  – интенсивность испарения на поверхности почвы.

Согласно С. В. Васильеву и Н. Н. Веригину [58], при фильтрации из облицованного канала стадия свободной фильтрации, когда уровень грунтовых вод поднимается до дна канала. Эти положения очень хорошо

согласуются с результатами натуральных исследований А. Г. Алимова [65]. Я. А. Пустыльников [64] придерживается несколько иного мнения и считает, что фильтрация из экранированного канала будет свободной при расстоянии от уровня грунтовых вод до подошвы, превышающим высоту капиллярного поднятия подстилающего грунта. Однако этот критерий не подтверждается результатами натуральных исследований по фактическому определению фильтрационных потерь из облицованных каналов.

Таким образом, свободная фильтрация будет иметь место до тех пор, пока уровень грунтовых вод не поднимется выше подошвы облицовки.

При отсутствии естественных понижений и приканального дренажа подъем уровня грунтовых вод под каналом определяется по формуле [44]:

$$\Delta h \sqrt{T} = k'_{\text{обл}} \frac{h_0 + \delta_0}{\delta_0} \cdot \frac{B_{\text{к}}}{2} \cdot \sqrt{\frac{z_0}{\varepsilon_{\text{п}}}}, \quad (17)$$

где  $T = k_1 \left( h_0 + \frac{\Delta h}{2} \right) + k_2 m_2$ ;

$$\Delta h = h_{\text{к}} - h_0.$$

Отсюда найдем зависимость для определения максимальной ординаты уровня грунтовых вод:

$$h'_{\text{к}} = \frac{Q_{\text{ф}}}{2} \sqrt{\frac{z_0}{\varepsilon_{\text{п}} E} + h_0}, \quad (18)$$

где  $T = k_1 \left( h_0 + \frac{h'_{\text{к}} - h_0}{2} \right)$  – для однослойного основания;

$Q_{\text{ф}}$  – расход фильтрации.

Анализ методов фильтрационных расчетов облицованных каналов, предложенных С. Г. Хлебниковым, Я. А. Пустыльниковым, С. В. Васильевым, Н. Н. Веригиным и др. [58, 61, 62], показал, что критерии перехода свободной фильтрации в подпертую нуждаются в обосновании и уточнении, так как они значительно отличаются друг от друга.

## **5 Анализ состояния нормативной документации в области проектирования противофильтрационных облицовок**

В России в 70-80-х годах прошлого столетия для более эффективной борьбы с фильтрационными потерями воды на каналах интенсивно начали применять в практике строительства оросительных систем различные типы простых и сложных (комбинированных) противофильтрационных покрытий. Защитные покрытия стали выполнять с учетом климатических, грунтовых и гидрогеологических условий.

Согласно Водной Стратегии РФ на период до 2020 году, потери воды при транспортировке должны сократиться к 2020 года вдвое, которые в настоящее время на оросительных системах составляют 4,8 км<sup>3</sup>/год. Сокращение потерь предполагается обеспечить за счет реконструкции и модернизации оросительных сетей и устройства противофильтрационной облицовки каналов.

В ближайшие годы (в период 2007-2015 гг.), в соответствии с Федеральной целевой программой «Сохранение и восстановление плодородия почв с.-х. назначения и агроландшафтов как национального достояния России на 2006-2010 годы», предусмотрено проведение работ по реконструкции и строительству отдельных очередей Большого Ставропольского, Донского магистрального и Саратовского каналов, где на участках в земляном русле будут выполнены противофильтрационные защитные покрытия с применением современных полимерных материалов. Однако существующая в настоящее время нормативная документация не позволяет проектировать противофильтрационные облицовки на современном уровне, с применением новых технологий строительства и материалов.

В связи с этим возникла необходимость проанализировать и пересмотреть существующие нормативные документы, в свете появления новых технологий строительства и появления новых материалов.

Согласно СНиП 2.06.03-85 «Мелиоративные системы и сооружения» [66] (пункт 2.147.), каналы оросительных систем необходимо проектиро-

вать с применением противофильтрационных покрытий. Устройство каналов без противофильтрационных покрытий допускается при обеспечении коэффициента полезного действия для магистрального канала, его ветвей не менее 0,90, а распределителей различных порядков и оросителей – не менее 0,93. Для сравнения, в США в 90-х годах, согласно расчетам Бюро мелиораций, было получено значение КПД не менее 0,99 для облицовок с пленочным, грунтовым и гравийным покрытием. Применение комбинированных противофильтрационных защит на каналах снижает фильтрационные потери оросительной воды в 5-10 раз, в зависимости от качества облицовок и устойчивости основания.

В настоящее время проектирование противофильтрационных облицовок оросительных каналов ведется преимущественно по ВТР-П-7-75 «Руководству по проектированию магистральных и межхозяйственных каналов оросительных систем», которое базируется (ссылается) на отмененные СНиПы (СНиП II.52-74 и СНиП II-И.14-69).

В действующем СНиП 3.07.03-85 «Мелиоративные системы и сооружения» 7 раздел содержит только общие сведения об устройстве противофильтрационных облицовок оросительных каналов. Более полно вопрос проектирования отражен в СНиП III-45-76 Правила производства и приемки работ «Сооружения гидротехнические, транспортные, энергетические и мелиоративных систем», но с появлением новых материалов и технологий часть положений этого документа, касающаяся технологии производства работ, охраны труда и контроля качества деформационных швов, утратила актуальность.

В действующем СНиП 3.07.03-85 «Мелиоративные системы и сооружения» (пункт 7.1) сказано: При устройстве монолитных и сборных бетонных и железобетонных, асфальтобетонных противофильтрационных облицовок необходимо соблюдать требования СНиП 3.07.01-85 «Гидротехнические сооружения речные», однако для проектирования оросительных каналов

указанные в нем нормы применимы с ограничениями, в силу специфики самого СНиПа.

При устройстве бетонопленочных облицовок и грунто-пленочных экранов следует соблюдать требования все того же СНиП 3.07.03-85 «Мелиоративные системы и сооружения», где для данного типа облицовок приводятся исключительно общие требования. Более подробно вопросы проектирования грунто-пленочных экранов нашли отражение в Руководстве по применению грунто-пленочных экранов в земляных сооружениях оросительных систем.

Практика показывает, что применение в сборных облицовках полимерной пленки в качестве противодиффузионного экрана также не дает должного эффекта, так как в процессе укладки железобетонных плит пленочный экран повреждается.

В ВСН 33-2.2.06-86 «Мелиоративные системы и сооружения. Оросительные системы на просадочных грунтах. Нормы проектирования» и ВСН 33-2.2.07-86 «Мелиоративные системы и сооружения. Оросительные системы на набухающих грунтах. Нормы проектирования» даны общие сведения об устройстве облицовок оросительных каналов на данных типах грунтов.

Основательно вопросы проектирования проработаны в ВТР-С-4-76 «Руководстве по устройству бетонопленочных облицовок оросительных каналов», разработанном УкрНИИГиМ и МР по проектированию, строительству и эксплуатации противодиффузионных облицовок оросительных каналов, разработанные в ГП ВНИИПТЦЭОиТМР, но вопросы по расчетам противодиффузионных облицовок приведены не в полном объеме, гораздо серьезней эта проблема разработана в МР «Теория определения параметров противодиффузионных облицовок оросительных каналов», разработанных в Приволжском НИИ эколого-мелиоративных технологий и «Инструкции по расчету водопроницаемости и эффективности противодиффузионных облицовок каналов», которая служит дополнением ВТР-П-7-75.

Проведенный анализ нормативной литературы по применению для герметизации швов битумно-полимерных мастик МГ-1 и герметика УТ-50 марки 2 показывает существенные недостатки, такие как:

- несовершенство технологий приготовления мастик и герметиков;
- сложная и экономически неэффективная технология производства работ;
- низкая экологическая безопасность.

Выпущенный в 1988 году «Комплект технологических карт на устройство гидроизоляции бетонных конструкций, облицовок и их стыков, с применением эпоксидных композиций и армогерметиков» также обладает рядом существенных недостатков:

- ввиду давности выпуска «Комплекта», изменилась технология производства эпоксидных композиций и армогерметиков;
- высокая рыночная стоимость делает их применение нерентабельным для целей заделки швов облицовки оросительных каналов.

Эти положения делают «Комплект» ограниченно применимым в производстве.

В 1987 году ВНИИводполимером разработаны «Временные рекомендации по применению полиэтиленовых листовых материалов в конструкциях противofильтрационных устройств водохозяйственных сооружений», в которых изложены специфические требования, которые следует учитывать при проектировании полиэтиленовых листов противofильтрационных устройств. Особое внимание уделено стыковым соединениям. В целом «Рекомендации ...» могут использоваться после их доработки.

Согласно СНиП 3.07.03-85 «Мелиоративные системы и сооружения», тип противofильтрационного покрытия следует назначать на основании сравнения технико-экономических показателей вариантов, в развитие этого положения в ФГНУ «РосНИИПМ» разработаны Рекомендации «Выбор эффективной и надежной противofильтрационной защиты русел открытых каналов при реконструкции оросительных систем».

Основные научные работы, касающиеся проектирования, конструкций, методов расчета, материалов приведены в таблице 6.

**Таблица 6 – Основные научные работы**

№ п/п	Название работы	Авторы	Краткая характеристика проработанных вопросов	Используемые в СП материалы работы
1	2	3	4	5
1	Защитные покрытия оросительных каналов	В. С Алтунин, В. А. Бородин, В. Г. Ганчиков, Ю. М. Косиченко	Приведены сведения по проектированию различных типов противофильтрационных облицовок. Организация технологии строительства	Проектирование различных типов противофильтрационных облицовок
2	Эксплуатационная надежность оросительных систем	В. Н. Щедрин, Ю. М. Косиченко, А. В. Колганов	Приводятся пути технического совершенствования оросительных систем и методы расчета фильтрации с позиции теории надежности	Методы расчета фильтрации из облицованных оросительных каналов с позиции теории надежности
3	Опыт строительства крупных каналов	П. А. Полад-Заде, Н. С. Грищенко, П. П. Чаталбашев	В работе обобщен опыт строительства мелиоративных каналов и устройства на них противофильтрационной облицовки	Технология производства работ при устройстве различных типов облицовки
4	Повышение эффективности и эксплуатационной надежности противофильтрационных облицовок оросительных каналов	А. В. Ищенко	В работе приведены конструкции и расчетные положения по проектированию и строительству противофильтрационных облицовок оросительных каналов	Конструкции и расчетные положения по проектированию
5	Каналы переброски стока	Ю. М. Косиченко	Обобщен опыт применения каналов переброски стока и каналов оросительных систем. Изложены основные проблемы строительства каналов в облицовке	Общие сведения и область применения. Расчет каналов в облицованных руслах

Продолжение таблицы 6

1	2	3	4	5
6	Новые материалы и конструкции на основе полимеров в водохозяйственном строительстве	В. Б. Резник	В работе содержатся основные характеристики и рекомендации по методам проектирования облицовок на основе полимеров	Методы проектирования облицовок на основе полимеров для противofильтрационной защиты оросительных каналов
7	Железобетонные конструкции в водохозяйственном строительстве	Ю. А. Тевелев, А. Н. Дмитриев	В главе 3 показаны расчеты и конструкции новых облицовок каналов	Материалы главы 3 по гибким плитам и их расчету
8	Современные противofильтрационные конструкции защитных облицовок каналов и водоемов	А. Г. Алимов	Работа, содержит не только описание конструкций противofильтрационных облицовок оросительных каналов, но и методы их расчета	Методы расчетов различных типов противofильтрационных облицовок
9	Комплекты машин и оборудования для строительства оросительных систем	Н. Ф. Хоменко, Г. С. Финин	Описаны условия подбора технологических комплексов машин и оборудования и технологические карты для устройства противofильтрационных облицовок оросительных каналов	Технологическая схема процесса выполнения работ; организация и технология производства работ; перечень машин и оборудования; рекомендуемый состав звена; потребность в материалах и материалах
10	Противofильтрационная защита каналов и водоемов	А. Г. Алимов	Приводятся сравнительные данные натуральных исследований работы деформационных швов противofильтрационных облицовок оросительных каналов	Конструкции деформационных швов и методы их расчета

Проведя анализ научной литературы, можно сделать вывод, что вопросы проектирования и строительства противofильтрационных облицовок изучены достаточно полно, но не нашли отражения в существующих нормативных документах.

## Заключение

Опыт, накопленный в России и за рубежом в течение последних 50 лет, доказывает возможность применения полимерных пленок и геомембран в гидротехническом строительстве в качестве основного противofильтрационного элемента в конструкциях облицовок оросительных каналов. Однако, существующая нормативно-методическая база в данной области разработана недостаточно, а ряд документов устарел и утратил значимость. В основном нормативная база разрабатывалась в 80-х годах прошлого столетия, и, видимо, на том этапе развития науки и техники была актуальна. В настоящее время потери на фильтрацию из необлицованных каналов составляют более 4,8 км<sup>3</sup> в год (или более 30 % от объема использования), что потребовало разработки свода правил, который регламентирует:

- материалы, применяемые в качестве противofильтрационных покрытий оросительных каналов;
- правила проектирования наиболее эффективных типов и конструкций противofильтрационных облицовок;
- расчеты противofильтрационных облицовок, используемые при проектировании.

## Список использованной литературы

- 1 Алтунин В. С. Защитные покрытия оросительных каналов / В. С. Алтунин [и др.]. – М.: Агропромиздат, 1988. – 160 с.
- 2 Противофильтрационная одежда ирригационных каналов / под ред. С. Р. Оффенгендена. – М.: Колос, 1965.
- 3 Горбачев Р. М. Натурные определения фильтрации из каналов, экранированных бетонопленочной облицовкой / Р. М. Горбачев // Труды Средазгипроводхлопка. – Ташкент, 1974. – Вып. 5. – С. 108-113.
- 4 Панасенко Г. А. Применение пластмассовых пленок в качестве противофильтрационных покрытий / Г. А. Панасенко // Гидротехническое строительство. – 1967. – № 1. – С. 55-57.
- 5 Бутилкаучуковые покрытия – прогрессивный вид противофильтрационной защиты / Экспресс-информация // Мелиорация и водное хозяйство. – 1978. – Сер. 5. – Вып. 3. – С. 13-19.
- 6 Применение листовых бутилкаучуковых материалов в мелиорации / Ю. М. Косиченко [и др.] // Пластические массы. – М.: Химия, 1981. – № 1. – С. 50-51.
- 7 Отаф Ч. Водонепроницаемые пленки для противофильтрационных покрытий гидротехнических сооружений / Ч. Отаф // Инженерные сооружения; пер. с англ. – 1967. – № 2 – С. 20-23.
- 8 Ищенко А. В. Оптимальный уровень надежности противофильтрационных облицовок оросительных каналов / А. В. Ищенко / ФГОУ ВПО «НГМА». – Новочеркасск, 2006. – С. 82-89.
- 9 Науман К. Г. Строительство монолитных бетонопленочных облицовок каналов. / К. Г. Науман // Гидротехника и мелиорация. – 1985. – № 5. – С. 64-69.
- 10 Применение пластмасс в ирригации / В. В. Павловский [и др.]. – Ташкент: Изд-во АН УзССР, 1963. – 54 с.
- 11 Инструкция по проектированию и строительству противофильтрационных устройств из полиэтиленовой пленки для искусст-

венных водоемов. (СН 551-82). – М.: Стройиздат, 1983. – 40 с.

12 Полад-Заде П. А. Опыт строительства крупных каналов / П. А. Полад-Заде, Н. С. Грищенко, П. П. Чаталбашев. – М.: Колос, 1982. – 208 с.

13 Попченко С. Н. Асфальтобетонные облицовки и экраны гидротехнических сооружений / С. Н. Попченко, Ю. Н. Касаткин, Г. В. Борисов. – Л.: Энергия, 1970. – 172 с.

14 Жданов Ю. К. Асфальтобетонные крепления откосов гидротехнических сооружений / Ю. К. Жданов. – Л.: Энергия. 1985.

15 Наместников С. К. Технология и механизация работ при устройстве сборных асфальтополимербетонных облицовок каналов / С. К. Наместников // Материалы конференций и совещаний по гидротехнике. – 1986. – С. 181-185.

16 Наместников С. К. Облицовка оросительных каналов асфальтополимербетонными тюфяками / С. К. Наместников, О. П. Якобчук, В. С. Фомин // Монтажные работы в строительстве. – № 6. – 1986. – С. 12-14.

17 Панасенко Г. А. Применение пластмассовых пленок в качестве противодиффузионных покрытий / Г. А. Панасенко // Гидротехническое строительство. – 1967. – № 1. – С. 55-57.

18 Пчелкин А. Д. Использование пластических материалов в США для облицовки водоемов / А. Д. Пчелкин // Информ. бюллетень Мин. водного хозяйства Узб. ССР. – Ташкент. – 1959. – № 2. – С. 44-45.

19 Науман К. Г. Новые синтетические пленки, применяемые в зарубежной практике ирригационного строительства / К. Г. Науман, А. А. Миронов // Экспресс-информация. Серия 7. – Вып. 5. – М.: ЦБНТИ Минводхоза СССР, 1981.

20 Фонсов Е. Б. Облицовки крупных каналов (по материалам обследований Большого Ставропольского канала) / Е. Б. Фонсов, Л. Л. Зарецкая // Экспресс-инф. ЦБНТИ МСХ СССР, Сер. 5. – Вып. 8. – 1987. – С. 9-16.

21 Косиченко Ю. М. Оценка эффективности дренажных устройств комбинированных противofiltrационных облицовок / Ю. М. Косиченко, А. В. Ищенко, И. И. Салженикина // Гидротехнические сооружения и вопросы эксплуатации оросительных систем / ЮжНИИГиМ. – Новочеркасск, 1986. – 10 с.

22 Косиченко Ю. М. Эффективность совместного применения противofiltrационной облицовки и приканального дренажа / Ю. М. Косиченко, А. В. Ищенко // Гидротехнические сооружения и вопросы эксплуатации оросительных систем / ЮжНИИГиМ. – Новочеркасск, 1987. – 7 с.

23 Резник В. Б. Новые материалы и конструкции на основе полимеров в водохозяйственном строительстве. – Киев: Будивельник, 1987. – 176 с.

24 Григорьев Г. П. Полимерные материалы / Г. П. Григорьев, Г. Я. Ляндзберг, А. Г. Сирота. – М.: Высшая школа, 1966. – 260 с.: ил.

25 Гисаку Пленки из полимеров / Гисаку. – Л.: Химия, 1971.

26 Справочник по пластическим массам / под ред. М. И. Гарбара, М. С. Акутина, Н. М. Егорова. – М.: Химия, 1967. – Ч. 1. – 462 с.: ил.

27 Свойства разветвленного полиэтилена, полученного с катализатором Циглера на носителях / Л. Ф. Шалаева [и др.] // Пластические массы. – 1975. – № 2. – С. 29-30.

28 Лауритцен Ч. У. Использование полиэтиленовой и виниловой пленок для уменьшения фильтрации воды из водоемов / Ч. У. Лауритцен // Сборник иностранной сельхоз. информации. – 1956. – № 9. – С. 69-70.

29 Карамян Г. А. Опыт применения полимерных пленок для борьбы с фильтрацией из водоемов / Г. А. Карамян // Гидротехника и мелиорация. – 1964. – № 1. – С. 34-38.

30 Конструкции и технологии строительства, полимерных противofiltrационных экранов на оросительных каналах и водоемах / Ю. М. Косиченко [и др.]; ЮжНИИГиМ. – Новочеркасск, 1985. – 11 с.

31 Косиченко Ю. М. Новые конструкции полимерных противофильтрационных экранов / Ю. М. Косиченко, В. А. Белов // Гидротехника и мелиорация. – 1987. – № 11. – С. 57-61.

32 Сергеев Б. И. Противофильтрационные экраны из полимерных материалов на основе бутилкаучука / Б. И. Сергеев, Ю. М. Косиченко // Гидротехника и мелиорация. – 1979. – № 5. – С. 20-23.

33 Сергеев Б. И. Новый тип противофильтрационных экранов для покрытия каналов и водоемов / Б. И. Сергеев, Ю. М. Косиченко, Н. А. Евстратов // Информационный листок № 701-77 (Северо-Кавказский ЦНТИ), 1978.

34 Теплов Б. Ф. Изменение физико-механических свойств материалов из пластифицированного ПВХ со временем / Б. Ф. Теплов, Ю. В. Овчинников // Труды III межвузовской конференции по применению пластмасс в строительстве. – Казань: Татарск. кн. изд., 1972. – С. 213-214.

35 First Plastic Dam Lining Installed in New South Wales. – Power Farming and Better Farming Digest in Australia and New Zealand, 1958, №7, p. 131.

36 Gubbe L.-W. Granular – full dam protected by PVC membrane. – Civil engineering, USA, 1977, № 7, p.72-75.

37 Cazzuffi, D., “Long Term Performance of Exposed Geomembranes on Dams in Italian Alps”, Proceedings, Sixth International Conference on Geosynthetics, Atlanta, 1998.

38 Гвентадзе А. Р. Рациональная конструкция противофильтрационной облицовки для пучинистых и просадочных оснований / А. Р. Гвентадзе, В. Б. Резник, А. И. Левченко // Вопросы строительства и эксплуатации мелиоративных систем. – Киев, 1979. – С. 24-28.

39 Гибкие облицовки для каналов на просадочных грунтах / Ш. М. Махмудов [и др.] // Материалы конференций и совещаний по гидротехнике. Применение полимерных материалов в гидротехническом строительстве. – Л.: Энергия, 1980. – С.107-111.

40 Абдужабаров А. А. Гибкие противофильтрационные мембраны для облицовок каналов на просадочных грунтах / А. А. Абдужабаров, И. М. Шипилов, Б. Ф. Рябченко // Экспресс-информация. «Водохозяйственное строительство». – М., 1977. – Сер. 5. – Вып. 9. – С. 21-25.

41 Миронов А. А. Расчет устойчивости откосов каналов и водоемов с полимерным экраном / А. А. Миронов // Экспресс-информация – ЦБНТИ Минводхоза СССР, 1970. – Вып. 6.

42 СНиП 2.06.08-87. Бетонные и железобетонные конструкции гидротехнических сооружений. – М.: Госстрой СССР, 1987. – 32 с.

43 СНиП 2.06.01-86. Гидротехнические сооружения. Основные положения проектирования. – М.: Госстрой СССР, 1987, – 32 с.

44 Карпунин В. В. Теория определения параметров противофильтрационных облицовок оросительных каналов / В. В. Карпунин [и др.] // Методические рекомендации / ПНИИЭМТ. – Волгоград, 1999. – 50 с.

45 Горчаков Г. И. Растрескивание растворов и бетонов / Г. И. Горчаков // Сб. трудов МИСИ. – М., 1960. – Вып. 16. – С. 29-36.

46 Пунагин В. Н. Причины раннего трещинообразования бетона в условиях сухого жаркого климата / В. Н. Пунагин // Труды ТИИИМСХ. – Ташкент, 1973. – Вып. 59. – С. 137-143.

47 Защитные покрытия оросительных каналов / В. С. Алтунин [и др.]. – М.: Агропромиздат, 1988. – 170 с.

48 Руководство по проектированию бетонных и железобетонных конструкций гидротехнических сооружений / Гидропроект и др. – М., 1983. – 360 с.

49 Алимов А. Г. Проектирование облицовок каналов в пучинистых грунтах / А. Г. Алимов // Гидротехника и мелиорация. – 1986. – № 4. – С. 4, 19-24.

50 Губин Ф. Ф. Гидроэлектрические станции / Ф. Ф. Губин. – М.: Госэнергоиздат, 1949.

51 Бялер И. Я. Определение параметров монолитных облицовок каналов / И. Я. Бялер, А. Р. Гветенадзе // Гидротехника и мелиорация. – 1970. – № 11. – С. 70-72.

52 Родштейн А. Г. Уплотнители швов сборных железобетонных покрытий каналов / А. Г. Родштейн // Гидротехника и мелиорация. – 1960. – № 10. – С. 30-34.

53 Олехнович В. А. О качестве бетонных облицовок каналов в Украинской ССР / В. А. Олехнович // Гидротехника и мелиорация. – 1970. – № 1. – С. 32-39.

54 Алимов А. Г. О методике расчета деформационных швов в противofильтрационных облицовках оросительных каналов / А. Г. Алимов // Создание комплекса технически совершенных сооружений и конструкций для мелиоративных и водохозяйственных объектов: сб. науч. трудов ВО «Союзводпроект». – М., 1981. – Вып. 54. – С. 95-99.

55 Алимов А. Г. Расчет деформационных швов в противofильтрационных облицовках каналов / А. Г. Алимов // Информ. листок Волгоградского межотраслевого территориального центра научно-технической информации и пропаганды. – Волгоград, 1991. – № 507-90. – 3 с.

56 Савватеев С. С. Предельные величины деформаций оснований для сооружений оросительных систем / С. С. Савватеев, В. И. Зубков // Экспресс-информация ЦБНТИ Минводхоза СССР. – Сер. 5: Водохозяйственное строительство. – 1974. – Вып. 7. – С. 28-30.

57 Разработать рекомендации по противofильтрационным и берегоукрепительным мероприятиям на каналах переброски и распределения стока в регионе Нижнего Поволжья: (промежуточный научно-технический отчет за 1981 г.) / Волгогипроводхоз, арх. № 27450. – Волгоград, 1981. – 108 с.

58 Методы фильтрационных расчетов гидромелиоративных систем / С. В. Васильев [и др.]. – М.: Колос, 1970. – 440 с.

59 Аверьянов С. Ф. Фильтрация из каналов и ее влияние на режим грунтовых вод / С. Ф. Аверьянов – М.: Колос, 1982. – 576 с.

60 Горбачев Р. М. Расчет фильтрационных потерь из экранированных каналов (случай свободной установившейся фильтрации) / Р. М. Горбачев // Труды Средазгипрохлопок. – Ташкент, 1971. – Вып. 1. – С. 52-58.

61 Хлебников С. Г. Лабораторные исследования фильтрации из экранированных каналов и оценка расчетных формул / С. Г. Хлебников // Труды ГрузНИИГиМ. – Тбилиси, 1965. – Вып. 23. – С. 213-225.

62 Пустыльников Я. А. О расчете фильтрационных потерь из экранированных каналов / Я. А. Пустыльников // Гидравлика и гидротехника. – Киев, 1969. – № 8. – С. 115.

63 Пустыльников Я. А. Изучение фильтрации воды из экранированных каналов: автореф. дис. канд. техн. наук / Я. А. Пустыльников. – Ташкент, 1966. – 21 с.

64 Олейник А. Я. Фильтрационные расчеты вертикального дренажа / А. Я. Олейник. – Киев: Наукова думка, 1978. – 202 с.

65 Алимов А. Г. Результаты определения потерь воды на фильтрацию через монолитную бетонную облицовку при различном подпоре грунтовых вод / А. Г. Алимов, В. М. Иванов // Волгогипроводхоз. – Волгоград, 1977. – 4 с.

66 СНиП 2.06.03-85. «Мелиоративные системы и сооружения».