

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВРЕЖДАЕМОСТИ ГЕОМЕМБРАНЫ ЧАСТИЦАМИ ГРУНТА ЗАЩИТНЫХ СЛОЕВ



Лупачев О. Ю.,
начальник отдела гидротехнического строительства
НИИиПИ ТОМС, Санкт-Петербург

Геомембраны в гидротехническом строительстве

Применение синтетических полимерных материалов в качестве противофильтрационных элементов в гидротехническом строительстве началось еще в первой половине прошлого века. Первоначально это были «тонкие», толщиной 0,1–0,5 мм полиэтиленовые и поливинилхлоридные пленки. Рекомендации по проектированию пленочных противофильтрационных элементов гидротехнических сооружений приведены в «Инструкции по проектированию и строительству противофильтрационных устройств из полиэтиленовой пленки для искусственных водоемов» СН 551-82. Госстроя СССР, используемой проектировщиками более 20 лет.

Современные полимерные материалы обладают рядом существенных преимуществ перед другими противофильтрационными материалами, в том числе перед «тонкими» полиэтиленовыми пленками образца 80-х годов прошлого века. Они воспринимают значительные растягивающие напряжения, сохраняют прочность даже при больших деформациях, однородны по своему качеству, долговечны, технологичны и эффективны для применения в строительстве. Частично происшедшие изменения в области изготовления рулонных материалов учтены в «Рекомендациях по проектированию и строительству противофильтрационных устройств из полимерных рулонных материалов», разработанных ОАО «ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева, НИИ АКХ им. К. Д. Памфилова и ООО «Гидрокор».

Как правило все эти листовые материалы и конструкции из них, предназначенные для устройства противофильтрационных элементов различных сооружений, называют «геомембраны». Наиболее распространены геомембраны из полиэтилена (ПЭ) и поливинилхлорида (ПВХ).

Геомембраны могут быть армированными и неармированными. Армирующий материал может быть из тканого и нетканого геотекстиля, стекловолокна и других материалов. Изготавливают и перевозят геомембраны обычно в рулонах шириной от 1,5 до 10 м. Толщина геомембран колеблется, как правило, в диапазоне от 1,0 до 3,5 мм.

В настоящее время, как правило, водонепроницаемые мембраны входят в состав геокомпозитной конструкции гидротехнического сооружения, в которой водонепроницаемый элемент используется в сочетании с защитными прокладками, повышающими устойчивость конструкции против механических повреждений. В качестве защитных прокладок используются рубероид, различные рулонные пластмассо-

вые материалы, поролон, резина, стеклоткани и стеклосетки, а также тканые и нетканые геотекстили.

Геомембраны применяются при строительстве как земляных, так и бетонных плотин, а также при их ремонте. В бетонных плотинах геомембраны наклеиваются на верхнюю грань плотин, обеспечивая водонепроницаемость сооружения. В грунтовых плотинах из них выполняются диафрагмы или экраны.

Конструкции противофильтрационных элементов грунтовых сооружений с применением геомембраны весьма требовательны к гранулометрическому составу грунтов переходных зон между геомембраной и материалом упорных призм. Повреждаемость полимерных полотен частицами грунта зависит от размеров и геометрической формы частиц грунта. Повреждения пленки частицами грунта снижается при уменьшении крупности частиц грунта и при использовании грунтов с частицами округлой формы. Поэтому на практике наиболее часто переходные зоны выполняются из песка.

Экспериментальные исследования повреждаемости мембран

Исследование повреждаемости пленочного элемента частицами грунта защитных слоев достаточно просто. Необходимо исследуемый образец поместить в грунт, приложить к поверхности грунта заданную нагрузку, затем вынуть исследуемый образец из грунта и осмотреть его на предмет наличия сквозных повреждений. В случае если повреждения не обнаружены, эксперимент повторяется при большем значении приложенной нагрузки вплоть до достижения нагрузки, после приложения которой фиксируется сквозной прокол. Последнее максимальное значение нагрузки, при которой образец не был проколот, является допустимой нагрузкой при прокалывании пленочного элемента частицами грунта защитного слоя. Именно таким образом были выполнены экспериментальные исследования устойчивости полиэтиленовых пленок к прокалыванию частицами грунта защитных слоев, проводившиеся в 50–80-е годы прошлого века и лежащие в основе используемых нормативных документов, регламентирующих применение пленочных противофильтрационных элементов гидротехнических сооружений, в первую очередь СН 551-82.

Описанная методика исследования повреждаемости пленки (геомембран) имеет три существенных недостатка:

1. Для получения одного экспериментального значения величины нагрузки, при которой происходит прокалывание пленки, необходимо провести серию опытов.

2. Результат серии опытов является непрямым определением значения величины разрушающей нагрузки.

3. Понятие «прокол пленки» в подобных экспериментах является неоднозначным и требует доопределения. Это может быть:

- ♦ визуально обнаруживаемый прокол;
- ♦ прокол, определяемый при помощи физических методов исследования образца, после освобождения его от действия нагрузки;
- ♦ прокол, определяемый только при приложении к пленке нагрузки, и т. д.

С целью исследования повреждаемости современных геомембран из толстых полиэтиленовых пленок было выполнено исследование повреждаемости геомембраны частицами грунта защитных слоев, отсыпанных из различных грунтов, под действием статической нагрузки, прикладываемой к поверхности грунта защитного слоя.

Была поставлена задача экспериментально проверить обоснованность требований п. 2.5 СН 551-82, накладывающих существенные ограничения при проектировании защитных слоев и противофильтрационных элементов применительно к конструкциям противофильтрационных элементов с современными мембранами: «Для создания грунтовых слоев (подстилающего и защитного) следует, как правило, применять песчаные грунты с частицами максимальной крупности до 5 мм. Применение дробленых и естественных грунтов с крупнозернистыми частицами неокатанной формы не допускается», а также определить численные значения предельной нагрузки, которые способна выдержать исследуемая геомембрана для различных фракций грунта защитных слоев.

При подготовке эксперимента ставилась задача избежать тех недостатков, которые имели место при проведении подобных испытаний в прошлом.

Эксперимент проводился в два этапа: предварительный, в ходе которого конструировались и опробовались составные элементы и параметры экспериментальной установки, и основной этап, собственно эксперимент, состоящий из 18 серий испытаний опытных образцов.

Перед проектируемым экспериментом ставились следующие задачи:

1. Получение численного значения нагрузки, при которой происходит прокол геомембраны частицами защитных слоев грунта (в результате каждого испытания).
2. Фиксация прокола геомембраны в момент времени, когда испытываемый образец находится под воздействием разрушающей нагрузки (в режиме реального времени).
3. Инструментальная фиксация момента прокола геомембраны.

Успешному проведению эксперимента способствовало использование в опытной установке индикатора нарушения герметичности геомембраны — электрогальванического индикатора прокола геомембраны. Работа индикатора основана на принципе гальванического элемента. С обеих сторон геомембраны располагаются положительный (медный) и отрицательный (алюминиевый) электроды. Электропроницаемая геомембрана из полиэтилена помещена в слабощелочную среду, являющуюся электролитом с pH = 9,0. При приложении к геомембране разрушающей нагрузки происходит прокол геомембраны, в результате которого гальванический элемент начинает вырабатывать электрический ток напряжением 0,67 В, фиксирующийся вольтметром.

Конструкция электрогальванического индикатора прокола геомембраны оказалась настолько удачной, что позволила провести все запланированные испытания без единого отката индикатора.



Рис. 1. Общий вид экспериментальной установки

В Лаборатории сопротивления материалов ГОУ СПбГПУ (Санкт-Петербургский государственный политехнический университет) была собрана опытная установка (рис. 1).

Основным элементом установки является пресс, развивающий нагрузку до 100 тс.

Испытываемый образец собирался в стальном цилиндре диаметром 320 мм и высотой 250 мм. Для проведения каждого испытания использовался новый образец геомембраны и новая порция щебня.

В исследовании использовались импортные высококачественные геомембраны различной толщины, изготовленные из полиэтилена низкого давления высокой плотности. Геомембраны испытывались без защитных прокладок и с защитными прокладками из дорнита. В качестве защитных слоев использовались две фракции гранитного щебня, изготовленного по ГОСТ 12536-79:

- ♦ щебень фр. 5–20 мм;
- ♦ щебень фр. 20–40 мм.

Всего было произведено 18 серий испытаний по 5 испытаний в каждой серии, всего 90 испытаний прорыва геомембраны в результате ее прокола частицами защитных слоев грунта. Испытания производились в изотермических условиях при температуре воздуха в лаборатории +23 °С (±1 °С).

Сводная ведомость проведенных экспериментов представлена в таблице.

Испытания проводились в следующей последовательности:

1. На приставном столике собирается образец для испытаний.
2. Образец в сборе перемещается под пресс.
3. Производится ступенчатое нагружение образца.
4. Фиксируется момент прокола геомембраны.
5. Образец выдвигается из-под прессы. Извлекается и осматривается геомембрана, фиксируется прокол.
6. На геомембрану наносится маркировка проведенного испытания с указанием информации о толщине геомембраны, наличии и толщине защитных прокладок из дорнита, крупности частиц грунта обсыпки и величине нагрузки, при которой произошел прокол.

Степень нагружения в каждом испытании составляет 5–10% от нагрузки прорыва. После увеличения нагрузки на ступень образец удерживается в течение 5 минут под постоянной нагрузкой, корректируемой в автоматическом или ручном режиме

Таблица 1. Сводная ведомость проведенных экспериментов

№ п/п	Толщина пленки t, мм	Фракции грунта защитных слоев					
		Щебень фр. 5–20 мм			Щебень фр. 20–40 мм		
		Без прокладок	Прокладки 450 г/м ²	Прокладки 900 г/м ²	Без прокладок	Прокладки 450 г/м ²	Прокладки 900 г/м ²
Исследование прокалывания геомембраны частями грунта							
	1,0 мм	5	5	5	5	5	5
	1,5 мм	5	5	5	5	5	5
	2,0 мм	5	5	5	5	5	5



Рис. 2. Вид образца пленочной мембраны после испытания и нанесения маркировки

Расшифровка маркировки: испытание образца № 1 с мембраной t = 2,0 мм без защитных прокладок (серия 1.10) с фракцией щебня 20–40 мм. Усилие, развиваемое прессом в момент прокола геомембраны 11,2 тс. Кругок в нижней части образца отмечает точку прокола

системой управления прессом. Для предотвращения зависания грунта на стенках цилиндра дважды при каждом ступенчатом увеличении нагрузки производится сотрясение образца в цилиндре ударами молотка по его боковой наружной стенке.

Вид образца пленочной мембраны после испытания и нанесения маркировки представлен на рис. 2.

Во всех сериях испытаний в рамках каждой серии выполнялся единый для серии порядок приготовления опытного образца: подстилающий и укрывающий защитные слои выполнялись из одной фракции щебня, защитные прокладки, подстилающие и укрывающие пленочный элемент геомембраны, были одинаковой плотности.

Анализ результатов и предложение по расчету геомембраны

Полученные в сериях испытаний значения результатов испытаний подчиняются нормальному распределению случайных величин. Анализ полученных результатов показал, что средние значения измерений отсутствуют грубые погрешности.

На рис. 3 и 4 представлены диаграммы результатов испытаний геомембраны, рассчитанные с обеспеченностью 95%.

Полученные результаты экспериментов обобщены автором эмпирической формулой для вычисления необходимой толщины пленочного элемента геомембраны в зависимости от толщины защитных прокладок из дорнита и максимальной крупности щебня защитных слоев обсыпки геомембраны:

$$\delta = 0,35 \sqrt{\frac{D_{max} \times P}{K_{п}}};$$

где δ — толщина пленочного элемента геомембраны, мм; D_{max} — максимальная крупность частиц грунта защитного слоя, мм; P — значение расчетной нагрузки на геомембрану, МПа; K_п — коэффициент влияния защитной прокладки из дорнита. Коэффициент влияния защитной прокладки, принимаемый:

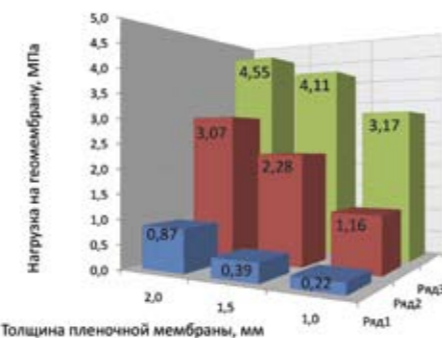


Рис. 3. Результаты испытаний геомембраны t = 1,0 мм, t = 1,5 мм и t = 2,0 мм с защитными слоями из щебня фр. 5–20 мм. Значения нагрузки указаны в МПа:

Ряд 1 — геомембрана без защитных прокладок; ряд 2 — геомембрана с защитными прокладками 450 г/м²; ряд 3 — геомембрана с защитными прокладками 900 г/м²

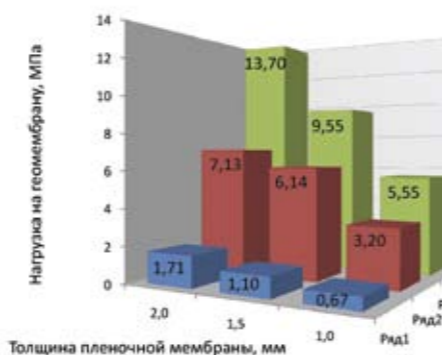


Рис. 4. Результаты испытаний геомембраны t = 1,0 мм, t = 1,5 мм и t = 2,0 мм с защитными слоями из щебня фр. 20–40 мм. Значения нагрузки указаны в МПа:

Ряд 1 — геомембрана без защитных прокладок; ряд 2 — геомембрана с защитными прокладками 450 г/м²; ряд 3 — геомембрана с защитными прокладками 900 г/м²

- при отсутствии прокладки или наличии прокладки плотностью до 100 г/м² включительно K_{п 100} = 1;
- при использовании прокладки плотностью 500 г/м² K_{п 500} = 5 и т. д.

Расчеты по предлагаемой формуле обеспечивают сходимость расчетной толщины полиэтиленовой пленки геомембраны с результатами испытаний не менее 15% во всем диапазоне полученных нагрузок.

Оценим влияние вариаций различных факторов на результат исследования:

1. Влияние факторов состояния окружающей среды.

Испытания проводились в изотермических условиях внутри помещения Лаборатории сопротивления материалов,

следовательно, при проведении испытаний удалось избежать вариаций значений модуля деформации полиэтилена при изменении температуры.

2. Приборная погрешность.

Показания индикатора нагрузки пресса дают погрешность измерений 1–2 %.

3. Вариации свойств используемых материалов.

Предполагается, что для всех фрагментов полиэтиленовой мембраны и дорнита, из которых были вырезаны исследуемые образцы, материал образцов обладал постоянными прочностными и деформативными характеристиками.

Согласно паспорту на геомембрану из полиэтиленовой пленки, толщина изготавливаемой геомембраны случайным образом варьируется в пределах ±10 % от значения толщины, указанного в паспорте. Например, исследуемая полиэтиленовая мембрана толщиной 1,0 мм в точке прокола может быть толщиной от 0,9 до 1,1 мм.

Согласно паспорту изготовителя, дорнит имеет допуск по плотности ±15 % от значения плотности, указанного в паспорте, т. е. в точке прокола мембраны с прокладками из дорнита плотностью 500 г/м² его фактическая плотность может находиться в диапазоне 425–575 г/м².

Гранулометрический состав щебня соответствует требованиям ГОСТ 12536-79, который не позволяет оценить влияние вариабельности крупности частиц щебня внутри одной стандартной фракции на результат исследования.

Несмотря на значительные возможные вариации факторов, влияющих на результат эксперимента, для всех 18 серий опытов величина доверительного интервала составила 6–25 % от численного значения разрушающей нагрузки.

Нагрузки на мембрану в сооружениях

Рассмотрим нагрузки, воспринимаемые геомембраной в грунтовом гидротехническом сооружении при основном сочетании нагрузок:

1. Нагрузки строительного периода, возникающие при движении машин и механизмов по поверхности защитных слоев геомембраны.
2. Нагрузки от давления грунта упорных призм плотины.
3. Нагрузки от действия гидростатического давления (об исследовании повреждаемости геомембраны под действием гидростатического давления будет рассказано в следующей статье).

Нагрузки строительного периода возникают за счет дополнительного давления на поверхность геомембраны от колес строительных машин и механизмов, перемещающихся по поверхности защитного слоя грунта. Как правило, дополнительная колесная нагрузка по величине не превышает 0,6–0,7 Мпа. Как видно из представленных диаграмм, условие сохранности мембраны при такой нагрузке не выполняется для геомембраны толщиной 1–1,5 мм без защитных прокладок при использовании щебня фракции 20–40 мм. Наличие защитных прокладок плотностью свыше 300 г/м² позволяет избежать повреждения геомембраны от действия нагрузки строительного периода.

Величина нагрузки от давления грунта упорных призм плотины зависит от высоты и конструкции плотины. Очевидно, что для плотин с экраном давление грунта на геомембрану будет меньше, чем для плотин с центральной диафрагмой.

Для варианта плотины с центральной диафрагмой давление грунта на диафрагму плотины может достигать 0,022 МПа на каждый метр высоты плотины. Для плотин высотой до 30 м определяющим фактором нагрузки являются нагрузки строительного периода. Для более высоких плотин определяющим будет давление грунта упорных призм.

Выводы

1. Результаты выполненных серий испытаний позволяют утверждать об отсутствии технических ограничений высоты плотин с противофильтрационными элементами из геомембраны, состоящей из водонепроницаемой полиэтиленовой мембраны и защитных прокладок из дорнита в части повреждения ее частями грунта защитных слоев.

2. Предложена эмпирическая расчетная формула для определения необходимой толщины геомембраны в зависимости от действующей нагрузки, свойств защитных прокладок и крупности грунта защитных слоев.

3. Сочетание водонепроницаемой мембраны из полиэтилена низкого давления высокой плотности и защитных прокладок из дорнита представляет собой надежную, экономичную и технологичную в производстве конструкцию противофильтрационного элемента грунтовых плотин, рекомендуемую к широкому применению.

4. В качестве материала грунта защитных слоев геомембраны допустимо применение грунтов с частицами любой формы, в том числе монофракций щебня с максимальной крупностью частиц до 40–50 мм, приготовленного дроблением кристаллических изверженных пород.

5. Рекомендуемая к применению толщина мембраны из полиэтилена высокого давления низкой плотности составляет 1,5–2,5 мм.

6. Рекомендуемая к применению толщина защитных прокладок из дорнита составляет 500–1000 г/м².

7. Технико-экономическое сравнение стоимости мембраны из полиэтилена и защитных прокладок из дорнита показывает, что при современном уровне цен на материалы для повышения надежности геомембраны экономически выгоднее увеличивать толщину защитных прокладок из дорнита, а не толщину мембраны из полиэтилена.

Литература:

1. Лупачев О. Ю., Телешев В. И. Противофильтрационные элементы из геомембран. Опыт применения в гидротехническом строительстве // Инженерно-строительный журнал. 2009. № 6. С. 35–43.
2. Лупачев О. Ю., Телешев В. И. Применение геосинтетических материалов в гидротехническом строительстве в качестве противофильтрационных элементов плотин и дамб // Гидротехника. 2009. № 1. С. 71–75.
3. СНиП 33-01-2003. Гидротехнические сооружения. Основные положения проектирования. М.: Госстрой, 2003.
4. Инструкция по проектированию и строительству противофильтрационных устройств из полиэтиленовой пленки для искусственных водоемов. СН 551-82. М., Госстрой, 1988.
5. Рекомендации по проектированию и строительству противофильтрационных устройств из полимерных рулонных материалов. — Санкт-Петербург, 2010.
6. Ахмадиев М. В., Слюсарь Н. Н. Сравнительный анализ требований к организации оснований и конструкции верхнего рекультивационного покрытия полигонов ТБО // Научные исследования и инновации. 2010. Т. 4. № 4. С. 7–14.
7. Валиев Н. Г., Хайдаршин А. Н. Обеспечение водонепроницаемости основания штабеля при кучном выщелачивании // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал) Mining informational and analytical bulletin (scientific and technical journal). 2005. № 2. С. 231–235.
8. Гладштейн О. И. Применение геомембран для устройства противофильтрационных экранов объектов и сооружений хранения нефти и нефтепродуктов // Территория Нефтегаз. 2010. № 4. С. 50–51.
9. Гладштейн О. И. Особенности применения геосинтетических материалов в гидротехническом строительстве // Гидротехника. 2009. № 1. С. 69–70.
10. Глебов В. Д., Кричевский И. Е., Судаков В. Б., Лысенко В. П., Толкачев Л. А. Пленочные противофильтрационные устройства гидротехнических сооружений. — М., Энергия, 1976.
11. Лысенко В. П. Конструкции противофильтрационных пленочных экранов грунтовых плотин. — Л., ВНИИГ, 1975.
12. Радченко В. П., Семенов В. М. Геомембраны в плотинах из грунтовых материалов // Гидротехническое строительство. 1993. № 10.
13. Радченко В. П., Семенов В. М. Применение геосинтетических материалов для строительства плотин // Гидротехническое строительство. 1992. № 10.
14. Чумаганов А. П., Сирота Ю. Л. К вопросу водонепроницаемости через различные дефекты и повреждения в полиэтиленовых экранах гидротехнических сооружений // Гидротехника. 2009. № 2. С. 79–81.