СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ. ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ. НАНОМАТЕРИАЛЫ И НАНОТЕХНОЛОГИИ.

УДК 691.175:627.8

DOI: 10.22227/2305-5502.2020.2.4

Прочность и деформируемость геомембран разных видов

А.С. Просвирыков¹, М.П. Саинов², А.О. Зверев³, Р.В. Лукичев²

¹Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»

(НИТУ «МИСиС»); г. Москва, Россия;

²Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет

(НИУ МГСУ); г. Москва, Россия;

³ПАО «РусГидро»; г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. В гидротехнике используются геомембраны из разных типов материалов, но преобладают геомембраны из поливинилхлорида (ПВХ) и полиэтилена (ПЭ), они считаются наиболее эффективными. Однако использование в качестве противофильтрационных элементов (ПФЭ) грунтовых плотин геомембран из термореактивных геосинтетиков (ПВХ и ПЭ) имеет ряд недостатков. ПВХ со временем может потерять свои свойства из-за потери пластификатора, а ПЭ подвержен трещинообразованию при температурных воздействиях. Поэтому необходимо рассматривать альтернативные варианты использования геомембран других видов. С этой целью исследованы деформативность и прочность геомембраны из термореактивного материала (хлорсульфированный полиэтилен — CSPE), а также геомембраны из каучукоподобного синтетика (этилен-пропиленовый диеновый мономер — EPDM).

Материалы и методы. Испытания образцов геомембран на одноосное растяжение проводились с помощью разрывной машины, которая фиксирует в ходе эксперимента изменение растягивающей силы и деформации продольного удлинения. Изменение площади поперечного сечения образцов измерялось с помощью электронного штангенциркуля.

Результаты. Установлено, что из рассмотренных видов геомембран (ПЭ, ПВХ, CSPE и EPDM) самой прочной является геомембрана из армированного CSPE, а самой деформируемой — геомембрана из EPDM. Геомембрана из армированного CSPE имеет прочность на растяжение свыше 100 МПа, ее прочность примерно в 5 раз выше, чем у геомембран из ПВХ и ПЭ. По деформируемости геомембрана из армированного CSPE близка к мембранам из ПЭ. Геомембрана из EPDM имеет модуль линейной деформации около 1 МПа, она способна удлиняться в несколько раз без потери прочности.

Выводы. По соотношению «прочность – деформируемость» геомембраны из EPDM могут составить конкуренцию геомембранам из ПВХ.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: геомембрана, прочность, модуль линейной деформации, гипалон, хлорсульфированный полиэтилен, CSPE, этилен-пропиленовый диеновый мономер, EPDM

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Просвирыков А.С., Саинов М.П., Зверев А.О., Лукичев Р.В. Прочность и деформируемость геомембран разных видов // Строительство: наука и образование. 2020. Т. 10. Вып. 2. Ст. 4. URL: <http://nso-journal.ru>
DOI: 10.22227/2305-5502.2020.2.4

Strength and deformability of different types of geosynthetic barriers

Alexey S. Prosviryakov¹, Mikhail P. Sainov², Andrei O. Zverev³, Roman V. Lukichev²

¹National University of Science and Technology MISiS (NUST MISiS); Moscow, Russian Federation;

²Moscow State University of Civil Engineering (National Research University)

(MGSU); Moscow, Russian Federation;

³Public Joint-Stock Company Federal Hydro-Generating Company — RusHydro; Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Water engineering facilities utilize geosynthetic barriers of various materials, but the most common are polyvinylchloride (PVC) and polyethylene (PE) considered to be the most efficient. However, the utilization of thermoset geosynthetics (PVC and PE) as watertight elements of the geosynthetic barriers of earth dams has also a number of drawbacks. In the course of time, PVC can lose its properties due to plasticizer loss, whereas PE is susceptible to cracking at thermal impacts. That is why it is necessary to consider geosynthetic barriers of other types as alternatives. For this purpose, we studied the deformability and the strength of geosynthetic barriers of thermoset material (chlorosulfonated polyethylene — CSPE), as well as of a rubber-type synthetic material (ethylene-propylene diene monomer — EPDM).

Materials and methods. Sample testing of geosynthetic barrier materials for monoaxial extension was conducted by means of a tensile-testing machine, which records during the experiment the changes of the tensile force and the longitudinal extension. The changes of the cross-section area of the samples were measured by means of a digital side caliper.

Results. It was determined that of the considered geosynthetic barrier types (PE, PVC, CSPE and EPDM) the strongest one is the reinforced CSPE type and the most deformable is the EPDM barrier. Reinforced CSPE geosynthetic barrier has a tensile strength above 100 MPa, it is approximately 5 times higher than that of PVC and PE barriers. By deformability, reinforced CSPE barrier is similar to PE barriers. An EPDM geosynthetic barrier has the linear deformation modulus around 1 MPa, it is capable of a multiple extension without loss of strength.

Conclusions. By strength vs. deformability ratio, EPDM geosynthetic barriers can compete with PVC barriers.

KEYWORDS: geosynthetic barrier, strength, linear deformation modulus, Hypalon, chlorosulfonated polyethylene, CSPE, ethylene-propylene diene monomer, EPDM

FOR CITATION: Prosviryakov A.S., Sainov M.P., Zverev A.O., Lukichev R.V. Strength and deformability of different types of geosynthetic barriers. *Stroitel'stvo: nauka i obrazovanie* [Construction: Science and Education]. 2020; 10(2):4. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2020.2.4 (rus.).

ВВЕДЕНИЕ

Геомембраны, рулонные геосинтетические изделия, имеют большие перспективы для применения в качестве противофильтрационных элементов плотин и дамб. Они используются в гидротехнике с 1950-х годов, сначала для гидроизоляции каналов и водоемов, а затем для гидроизоляции плотин [1, 2]. В 1957 г. в США резервуар Daisetta глубиной 3,7 м на площади 32 000 м² был покрыт покрытием из бутилкаучука толщиной 2,25 мм.

Первая плотина с противофильтрационным элементом (ПФЭ) на базе геосинтетика была построена в 1959 г. в Италии. Это — плотина Contrada Sabetta высотой 32,5 м в Италии [3, 4]. ПФЭ данной плотины состоит из двух слоев мембраны толщиной 2 мм, которая выполнена из полиизобутилена (оппанола). А в 1960 г. в Чехословакии была построена земляная плотина Dobsina высотой 10 м, ПФЭ которой устроен в виде пленки толщиной 0,9 мм из поливинилхлорида (ПВХ).

Приведенные примеры показывают, что на начальном этапе осуществлялся поиск наиболее подходящих для гидроизоляции гидротехнических сооружений геосинтетических изделий и применялись геосинтетики разных типов. Часто использовали толстые мембраны из каучукоподобных материалов (например, полиизобутилен). Но также предпринимались попытки применять тонкие пленки из термореактивных пластмасс (ПВХ и полиэтилена — ПЭ). Предпочтение отдавали толстым мембранам, поскольку тонкие пленки (толщиной 0,3–0,6 мм) могли получить механические повреждения при контакте с частицами грунта.

Для снижения опасности прокола были созданы геомембраны — геосинтетические рулонные изделия толщиной в несколько миллиметров. Термин «геомембрана» введен в 1977 г. [5] для того, чтобы отличать рулонные изделия большей толщины от тонких пленок. Кроме того, для защиты геомембраны от прокола стали использовать слои геотекстиля. Перечисленные новые технические решения позволили резко снизить опасность проколов и «открыли дорогу» использованию в качестве

ПФЭ изделий из ПВХ и ПЭ. Впервые геомембрана из полиэтилена высокой плотности (англ. — HDPE) и прочности применена в 1972 г. в Германии.

Увеличение толщины геосинтетических изделий дало возможность увеличить срок их службы. По оценке D. Cazuffi [6], увеличение толщины геомембраны в 2 раза увеличивает срок ее службы в 4 раза. По данным эксплуатации построенных сооружений, он составляет не менее 30 лет даже при самых неблагоприятных условиях.

На современном этапе основное распространение в гидротехнике получили геомембраны из ПВХ и ПЭ, в то время как каучукоподобные материалы (полиизобутилен, бутилкаучук и др.) используются редко.

Согласно сведениям конгресса по большим плотинам (ICOLD)¹, для гидроизоляции плотин в большинстве случаев применяются геомембраны из пластифицированного ПВХ (англ. — PVC-P). Это объясняется их высокой прочностью и эластичностью. Известно, что по соотношению «прочность — деформируемость» ПВХ превосходит ПЭ [7].

Реже используются геомембраны из ПЭ. Они нашли свое применение для изоляции хранилищ отходов горной промышленности, твердых бытовых отходов благодаря химической стойкости ПЭ ко многим химическим веществам. В работе [8] для устройства закрытых ПФЭ рекомендуется использовать HDPE, так как он имеет высокий срок службы.

Однако вопрос о выборе типа геосинтетических изделий для применения в ПФЭ плотин еще не закрыт окончательно. Например, во франкоязычных странах (Франция, Канада) часто применяются битумные геомембраны [9, 10]. Такие толстые геомембраны способны к значительным деформациям, химически стойки и могут эксплуатироваться в суровых климатических условиях.

Это связано с тем, что ПВХ и ПЭ обладают не только важными преимуществами, но и некоторыми недостатками. Существенным недостатком

¹ ICOLD. Geomembrane sealing systems for dams. Design principles and review of experience. 2010. Bulletin 135.

PVC-Р является то, что со временем количество пластификатора уменьшается и его свойства изменяются, он становится более хрупким и жестким. Данное обстоятельство дает основание сомневаться в длительности срока службы ПФЭ в виде геомембран из ПВХ.

В отличие от PVC-Р ПЭ не содержит большого количества добавок, поэтому он считается более долговечным. Однако у ПЭ есть существенный недостаток — он слишком жесткий по сравнению с грунтом. Согласно исследованию [11], модуль линейной деформации ПЭ достигает 1000 МПа. Из-за высокой жесткости температурные воздействия могут вызвать в геомембране из ПЭ образование трещин. В труде [12] приведен пример трещинообразования в ПФЭ полигона твердых бытовых отходов.

Соответственно, необходимо принимать во внимание варианты использования альтернативных типов и видов геомембран.

Следует отметить, что все геосинтетики, используемые в геомембранах, принято классифицировать¹ на четыре большие группы: термопластичные, термореактивные, каучукоподобные и битумные². ПВХ, ПЭ, а также полипропилен принадлежат к одной группе — к термопластичным геосинтетикам. Поэтому нами принято решение учитывать свойства геосинтетиков других групп.

Термореактивными геосинтетическими материалами являются хлорсульфированный полиэтилен (англ. — CSPE) и этилен-пропиленовый сополимер. К каучукоподобным геосинтетикам относятся полиизобутилен, бутилкаучук и этилен-пропиленовый диеновый мономер (англ. — EPDM). Для исследований свойств геосинтетиков других видов нами были выбраны CSPE и EPDM.

CSPE также известен под торговой маркой «гипалон». Его преимуществом является высокая стойкость к ультрафиолетовому излучению и озону, что позволяет использовать его на открытых участках. По данным работы [13], CSPE имеет высокий срок службы. В прошлом он активно применялся до тех пор, пока на рынке не появился сопоставимый по свойствам, но более дешевый ПЭ высокой плотности. Высокая стоимость — основной недостаток CSPE, ориентировочная стоимость 1 м² такой геомембраны составляет 4500 руб. По этой причине в настоящее время геомембраны из CSPE применяются только для гидроизоляции небольших водоемов [14] и хранилищ токсичных отходов.

Необходимо отметить, что сегодня применяется армированный CSPE, т.е. CSPE-R. Благодаря армированию полиэфирной (полиэстерной) сеткой CSPE-R имеет высокую прочность. По своим каче-

ствам он превосходит HDPE, особенно по работе при отрицательных температурах. Но в последнее время CSPE применяется редко, так как в 1990-х годах появился гибкий Flexible Polypropylene (fPP), более стойкий к отрицательным температурам.

В качестве еще одной из альтернатив мы рассмотрели один из термореактивных, каучукоподобных материалов EPDM. Он начал применяться с 1963 г., но в основном, как кровельный материал. Однако существуют примеры его использования и для гидроизоляции резервуаров воды [15, 16]. Преимущества EPDM — его высокая эластичность с сохранением исходной формы, EPDM относится к эластомерам. По данным ICOLD, EPDM имеет почти такую же высокую химическую стойкость, как HDPE. Он достаточно долговечен и применяется на открытых участках гидроизоляции [8]. Недостаток EPDM, как и всех каучукоподобных материалов, — то, что они не могут быть соединены свариванием, соединяются внахлест с помощью клея.

В работе [16] проанализированы результаты многолетней эксплуатации геомембран из HDPE, PVC и EPDM на трех разных резервуарах на территории Испании. Авторы пришли к выводу, что у каждого из типов геомембран имеются свои преимущества и недостатки, выбор типа геомембраны для применения в большей степени зависит от экономических условий и требований конкретного проекта.

Однако для возможности сравнения геомембран разных типов необходимо иметь подробную информацию об их свойствах и качествах. О свойствах CSPE и EPDM известно немного.

Первые испытания различных типов геомембран были проведены в 1980-х годах. В публикации [17] приведены результаты испытаний геомембран разных типов, проведенных Rigo и Cazzuffi. Из рис. 1 видно, что наибольшую прочность и жесткость имеют геомембраны из HDPE и полипропилена (PP). Однако в диаграмме деформирования этих геомембран имеется участок, где проявляются пластические свойства их материалов. По достижении некоторых критических удлинений HDPE и PP значительно удлиняются без приложения дополнительных нагрузок.

На фоне HDPE и PP геомембрана из ПВХ (PVC) характеризует себя с положительной стороны. Она имеет высокую прочность на растяжение (почти 20 МПа), но при этом модуль ее деформации не превышает 7 МПа (рис. 1).

По результатам испытаний [17] геомембраны из термореактивного (CSPE) и каучукоподобного (бутилкаучук) геосинтетика существенно уступают по прочности ПЭ и ПВХ. Их прочность составляет около 10 МПа (рис. 1). Их преимуществом является то, что они более деформируемы. Модуль линейной деформации бутилкаучука составляет лишь около 2 МПа.

² Строго говоря, битумные геомембраны не являются синтетическими изделиями. К геосинтетикам битумные геомембраны относят потому, что они армируются геосинтетическими нитями.

Рис. 1. Результаты испытаний разных типов геомембран на одноосное растяжение [17]: 1 — хлорсульфированный полиэтилен (CSPE); 2 — бутилкаучук; 3 — хлорированный полиэтилен (CPE); 4 — поливинилхлорид (PVC); 5 — полипропилен (PP); 6 — полиэтилен высокой плотности (HDPE); 7 — битумная геомембрана, армированная полиэстеровыми нитями

Несколько иные результаты испытаний геосинтетиков приведены в трудах конгресса по большим плотинам (ICOLD)¹, заимствованных из источника [11]. По этим данным, HDPE и ПВХ имеют примерно одинаковую прочность на растяжение, которая составляет около 16 МПа (рис. 2). Существенно более высокую прочность имеет геомембрана из хлорсульфированного полиэтилена (CSPE-R), которая достигает 50 МПа. Это — примерно в 5 раз больше,

чем в работе [11]. Скорее всего, это различие объясняется армированием CSPE полиэфирными (полиэстерными) нитями.

Рис. 2 также иллюстрирует тот факт, что CSPE-R и HDPE — очень жесткие материалы. ПВХ выгодно отличается от них. Попытка снизить жесткость ПЭ путем снижения его плотности является неудачной. Линейный ПЭ низкой плотности (англ. — LLDPE) существенно уступает ПВХ по прочности, имея примерно ту же деформируемость.

Нами также проведены испытания геомембран из ПЭ и ПВХ, распространенных на современном рынке [7, 18]. Было установлено, что прочность на растяжение составляет: ПЭ — около 18 МПа; ПВХ — не более 7 МПа. При одноосном растяжении прочность ПВХ достигла 20 МПа [18]. Модуль линейной деформации ПЭ составляет примерно 50–200 МПа, а у ПВХ — 12–25 МПа.

Испытания ПЭ и ПВХ в условиях двухосного растяжения проводились также в Китае [19]. Несмотря на некоторые отличия результатов, свойства геомембран из ПЭ и ПВХ можно считать более-менее изученными.

Однако информации об испытаниях геомембраны из EPDM в научно-технической литературе практически нет. Лишь в публикации [15] приведена информация, что прочность EPDM на растяжение соответствует 12,6 МПа. В труде [8] приведены данные об удлинении геомембраны из EPDM толщиной 1 мм на 640 % при усилии 10 кН/пог.м.

Поэтому нами была осуществлена попытка оценить экспериментальным путем прочность и деформируемость малоизвестных типов геомембран — EPDM и CSPE.

Рис. 2. Деформируемость и прочность геомембран разных типов, по данным Koerner [10] и ICOLD: а — одноосное растяжение; б — двухосное (симметричное) растяжение; CSPE-R — хлорсульфированный полиэтилен, армированный полиэфирными (полиэстерными) нитями; HDPE — полиэтилен высокой плотности; LLDPE — линейный полиэтилен низкой плотности; PVC — поливинилхлорид

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

При испытаниях геомембран на растяжение использовалась методика, установленная ГОСТ Р 53226-2008 «Полотна нетканые. Методы определения прочности». Как правило, одноосному растяжению подвергался образец шириной 50 мм, рабочей длиной 100 мм.

Для каждого из испытываемых материалов были подготовлены несколько образцов. Образцы разных типов геомембран отличались по толщине. Образцы из HDPE имели исходную толщину 1 мм, из ПВХ — 3,75 мм; из CSPE — 1,83 мм; из EPDM — 0,9 мм.

Для проведения экспериментов использовалась универсальная испытательная машина Zwick Z250. Растягивающее усилие наращивалось до тех пор, пока не происходил разрыв образца или было достигнуто предельное расхождение зажимов разрывной машины. Скорость перемещения подвижной траверсы составляла 100 мм/мин. В процессе испытания с помощью программного обеспечения TestXpert в реальном времени осуществлялась запись диаграммы растяжения в координатах «усилие – удлинение». Удлинение определялось по расстоянию между захватами.

Искомые величинами, характеризующими поведение геомембраны при статических нагрузках, являлись следующие:

- максимальное растягивающее усилие $\sigma_{\max}$;
- относительное удлинение $\varepsilon_{\max}$, соответствующее $\sigma_{\max}$;
- секущий модуль линейной деформации E_c , соответствующий моменту достижения $\sigma_{\max}$ и $\varepsilon_{\max}$.

Относительные деформации определялись приближенно, исходя из теории малых деформаций, по формуле:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0},$$

где ΔL — зафиксированное в эксперименте удлинение образца в рассматриваемый момент времени; L_0 — исходная длина образца.

Учитывая пластический характер деформирования геосинтетических материалов, величина $\sigma_{\max}$ не эквивалентна прочности на одноосное растяжение.

Величина $\sigma_{\max}$ определялась по формуле:

$$\sigma_{\max} = \frac{N_{\max}}{A},$$

где $N_{\max}$ — максимальное растягивающее усилие, зафиксированное в эксперименте; A — площадь поперечного сечения образца в момент восприятия $N_{\max}$.

Секущий модуль деформации определялся по формуле:

$$E_c = \frac{\sigma_{\max}}{\varepsilon_{\max}}.$$

Однако при проведении испытаний геомембран имелось несколько технических сложностей, которые не позволяли точно определить величины ΔL и A .

Во-первых, при растяжении наблюдалось «выскальзывание» образцов из зажимов. За счет увеличения длины образца снижались зафиксированные экспериментом деформации его удлинения. Это снижало точность результатов экспериментов.

Во-вторых, оборудование не позволяет в реальном времени фиксировать деформации поперечного сечения. Для этого требовалось отдельно проводить измерения размеров поперечного сечения. Они проводились с помощью электронного штангенциркуля.

В-третьих, для проведения замеров деформаций поперечного сечения требовалось на некоторое время останавливать испытание. За время проведения замеров наблюдалось накопление деформаций удлинения за счет ползучести материала испытываемых образцов.

Эти технические сложности снижали точность получаемых результатов и вели к отклонению условий проведения эксперимента от методики, установленной ГОСТ.

Самую большую неточность в результаты эксперимента вносила неточность определения величины A . Это вызвано несколькими причинами:

- существовала погрешность измерений, связанная с изменением формы поперечного сечения в процессе эксперимента, она могла отклоняться от прямоугольной;
- площадь, как правило, относится к другому моменту времени, отличающемуся от наиболее опасного;
- наиболее опасное сечение (с меньшей площадью) определялось приближенно, «на глаз».

Чтобы оценить влияние неточностей определения величины A на точность определения величин $\sigma_{\max}$ и E_c , были определены их условные значения. При вычислении условных значений площадь поперечного сечения A принималась равной исходной A_0 для начала эксперимента. Определенные через A_0 условные значения величин $\sigma_{\max}$ и E_c соответствуют их верхним, предельным значениям.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Результаты испытаний образцов геомембран разных типов представлены на рис. 3, 4.

На рис. 3 показан вид образцов геомембран после испытаний.

Приведенные на рис. 4 графики выражают изменение относительной деформации ε образца в зависимости от растягивающего усилия N . Графики представлены для одного из образцов каждого типа мембраны. В работе [18] более подробно представлены результаты проведенных нами испытаний ПВХ и ПЭ.

Рис. 3. Вид образцов после испытаний: *a* — образец из CSPE после разрушения; *b* — образец из EPDM (испытания не доведены до разрушения)

Графики (рис. 4) наглядно показывают, что испытанные типы геомембран сильно различаются по своим свойствам и характеру поведения.

Образцы из HDPE, достигнув деформации около 10 %, начали интенсивно удлиняться в условиях отсутствия роста растягивающей силы (рис. 4, *a*). Максимальное растягивающее усилие, которое восприняла геомембрана из HDPE, составило около 1 кН. Достигнуть разрыва образцов из HDPE не удалось даже при удлинении на 500 %. Таким образом, для геомембран из HDPE величина $\sigma_{\max}$ соответствует не пределу прочности, а пределу текучести.

Иначе деформировались образцы геомембраны из CSPE. После достижения усилия 1000 Н они продолжали сопротивляться растяжению, деформаций текучести не наблюдалось (рис. 4, *b*). Геомембраны из CSPE смогли выдержать усилие почти в 10 кН (1 тс), после чего порвались (рис. 3, *a*). Отличие характера деформаций геомембраны из CSPE объясняется, по-видимому, армированием полиэфирами.

Характер деформирования образцов геомембран из ПВХ (PVC) и EPDM принципиально отличался от деформаций геомембран из HDPE и CSPE.

a

b

c

d

Рис. 4. Результаты испытаний образцов геомембран на растяжение: *a* — полиэтилен высокой плотности; *b* — хлорсульфированный полиэтилен; *c* — поливинилхлорид; *d* — этилен-пропиленовый диеновый мономер

1. В процессе нагружения они удлинялись существенно больше — в несколько раз относительно исходного размера, что говорит об их высокой деформативной способности. Образцы из ПВХ перед нарушением целостности удлинились примерно в 6 раз (рис. 4, *с*). Еще большую деформируемость проявили образцы из EPDM, кроме того, они выскальзывали из зажимов, поэтому их испытание представляло значительные трудности. Только в одном случае удалось довести образец до разрыва. При этом образец удлинился более чем в 12 раз.

2. Образцы ПВХ (PVC) и EPDM проявляли свои свойства эластомеров. После прекращения действия нагрузки (при нагрузках меньше разрушающих) они возвращались в почти исходную форму. Однако при этом характер деформаций образцов ПВХ и EPDM несколько отличался. На рис. 4, *с* видно, что образцы из ПВХ после достижения усилия около 2,5 кН начали интенсивно удлиняться без дополнительных нагрузок, т.е. получали некоторые пластические деформации.

Образцы из EPDM не получали практически никаких пластических деформаций (рис. 4, *д*), но при повторном нагружении проявляли большую податливость.

Разрывное усилие, т.е. усилие, при котором произошел разрыв образца, составило: для ПВХ — около 2,5 кН (рис. 4, *с*), для EPDM — почти 350 Н. Таким образом, прочность на растяжение ПВХ оказалась примерно в 7 раз выше, чем у EPDM. Однако это говорит также о том, что EPDM почти на порядок более деформируем, чем ПВХ.

По графикам на рис. 4 были вычислены искомые величины $\varepsilon_{\max}$, $\sigma_{\max}$ и E_c , результаты вычислений представлены в табл. Необходимо отметить, что для «жестких» материалов (HDPE, CSPE-R) изменение площади поперечного сечения геомембран

ны в процессе эксперимента практически не влияет на величины $\sigma_{\max}$ и E_c . Для «мягких» материалов (PVC и EPDM) приходится условно принять, что за счет уменьшения площади поперечного сечения при вытягивании мембраны величины «прочности» $\sigma_{\max}$ и модуля деформации E_c увеличиваются примерно в 2 раза.

Вычисления предельного растягивающего напряжения $\sigma_{\max}$ позволили оценить прочность геомембран на растяжение.

По результатам вычислений $\sigma_{\max}$ в геомембранах из HDPE и PVC составляет примерно 20 МПа. Это согласуется с данными других авторов [11, 17]. Однако можно отметить, что прочность геомембраны из PVC в условиях одноосного растяжения существенно выше, чем прочность в условиях двухосного растяжения. По сведениям R.M. Koerner [11], она составляет 14 МПа (рис. 2, *б*), а по нашим данным — 7 МПа [6].

Анализ данных таблицы показывает, что самой прочной из представленных типов геомембран является геомембрана CSPE-R. Ее прочность превышает 100 МПа. По сравнению с предельным растягивающим напряжением в геомембранах из HDPE и PVC, прочность CSPE-R примерно в 5 раз выше.

Максимальное значение растягивающего напряжения $\sigma_{\max}$ в геомембране из EPDM составило около 10 МПа. Это соотносится с данными [15]. Можно отметить, что EPDM лишь примерно в 2 раза уступает по прочности HDPE и PVC.

Вычисления величины E_c (секущий модуль линейной деформации, соответствующий $\sigma_{\max}$) позволили оценить деформируемость геомембраны при восприятии растягивающих усилий.

Было установлено, что секущий модуль линейной деформации геомембран из двух видов полиэтилена (HDPE, CSPE) примерно одинаков

Табл. Результаты вычислений параметров прочности и деформируемости геомембран разных типов

Материал геомембраны	HDPE	CSPE-R	PVC	EPDM
Максимальное усилие $N_{\max}$, Н	1076	9983	2637	241
Исходные размеры поперечного сечения, мм	50×1	50×1,83	50×3,75	50×1
Исходная площадь поперечного сечения, мм ²	50	91,5	187,5	50
Относительная линейная деформация $\varepsilon_{\max}$, соответствующая максимальному усилию, %	10,2	45,8	241	1000
Условное максимальное напряжение $\sigma_{\max}$, МПа	21,5	109	14,1	4,82
Условный секущий модуль линейной деформации, соответствующий максимальному усилию E_c , МПа	211	238	5,8	0,48
Соотношение $\sigma_{\max}/E_c$	0,10	0,46	2,4	10
Площадь в расчетном сечении, мм ²	48	80	92	≈ 25
Максимальное напряжение, МПа	22,4	125	28,6	≈ 10
Секущий модуль линейной деформации E_c , соответствующий максимальному усилию, МПа	220	273	11,9	≈ 1

и составляет около 200÷300 МПа. Это примерно соотносится с указанными в работе [18].

Модуль линейной деформации геомембраны из ПВХ (PVC) примерно на порядок меньше, чем у полиэтиленовых геомембран (см. табл.). А деформируемость геомембран из EPDM примерно на два порядка выше, чем у ПЭ.

Такая высокая растяжимость геомембран из EPDM дает им преимущества перед другими видами геомембран, так как при работе в сооружении важно не абсолютное значение прочности на растяжение, а соотношение «прочность – деформируемость». Чем ниже деформируемость геомембраны, тем ниже значения возникающих в ней напряжений, и, соответственно, выше запас прочности.

Анализ таблицы показывает, что по соотношению «прочность – деформируемость» геомембраны из CSPE более эффективны, чем геомембраны из HDPE. Однако еще более высокое соотношение имеют геомембраны из PVC и EPDM. Вследствие высокой растяжимости геомембраны из EPDM обладают наиболее высоким потенциалом для обеспечения прочности на растяжение, геомембраны из ПВХ существенно уступают им в этом отношении.

Но геомембраны из EPDM имеют и большую стоимость. На сегодняшний день ориентировочные стоимости геомембран (некой осредненной толщины) составляют: HDPE — 150 руб./м², LDPE — 125 руб./м², ПВХ (PVC) — 250 руб./м², гипалон (CSPE) — 4500 руб./м², EPDM — 650 руб./м². Сравнение цен позволяет сделать некоторые выводы:

- несмотря на то, что по техническим параметрам ПВХ превосходит ПЭ, его основным преимуществом является меньшая стоимость. Поэтому в обозримой перспективе соперничество ПВХ и ПЭ будет сохраняться;
- несмотря на высокую прочность и химическую стойкость, гипалон (CSPE) уступает геомембранам иных типов по другим техническим параметрам и экономической эффективности. Этот материал не имеет перспектив широкого применения

для устройства противофильтрационной защиты плотин;

- несмотря на более высокую стоимость, геомембраны из EPDM могут составить конкуренцию геомембранам традиционных типов (из ПВХ и ПЭ). По стоимости геомембраны из EPDM уступают примерно в 3 раза геомембранам из ПВХ (PVC), но они более выгодны в применении с технической точки зрения. Для более точных выводов необходимы исследования других свойств и качеств EPDM — его долговечности и стойкости к воздействиям различных видов.

ВЫВОДЫ

Исследование позволило изучить прочностные и деформативные свойства широкого спектра типа геомембран — термопластичных, термореактивных и каучукоподобных. Это дает возможность делать более обоснованные выводы о выборе типа геомембран для использования в качестве ПФЭ грунтовых плотин.

Армированный полиэфирами нитями CSPE (гипалон) является более прочным материалом, чем HDPE. Однако оба типа полиэтиленовых геомембран имеют примерно одинаковую деформируемость.

Геомембраны из EPDM являются еще более деформируемыми, чем геомембраны из PVC. При этом они имеют высокую прочность. Геомембраны из ПВХ уступают им по соотношению «прочность – деформируемость».

Все рассмотренные типы геомембран обладают высокой прочностью, что позволит им в большинстве случаев сохранять свою целостность при деформациях грунтового массива. Однако наиболее предпочтительным является использование геомембран из ПВХ и из термопластичных полимеров, так как они имеют наиболее высокое соотношение «прочность – деформируемость». Выбор типа геомембран в большей степени определяется требованиями экономической целесообразности и условиями эксплуатации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Глазовский В.Б., Сольский С.В., Лопатина М.Г., Дубровская Н.В., Орлова Н.Л. Геосинтетические материалы в гидротехническом строительстве // Гидротехническое строительство. 2014. № 9. С. 23–27.
2. Саинов М.П., Зверев А.О. Противофильтрационные элементы грунтовых плотин из геосинтетических материалов // Инновации и инвестиции. 2018. № 1. С. 202–210.
3. Cazzuffi D. The use of geomembranes in Italian dams // International Water Power & Dam Construction. 1987. Vol. 39. No. 3. Pp. 17–21.
4. Рельтов Б.Ф., Кричевский И.Е. Перспективы применения рулонных пластмасс в качестве экранов плотин из местных материалов // Гидротехническое строительство. 1964. № 1. С. 29–32.
5. Giroud J.P., Perfetti J. Classification des textiles et mesure de leurs propriétés en vue de leur utilisation en geotechnique // Proceedings of the International

Conference on the Use of Fabrics in Geotechnics. Session 8, Paris, France, 1977. Pp. 345–352.

6. Cazzuffi D., Giroud J.P., Scuero A., Vaschetti G. Geosynthetic barriers systems for dams // 9th International Conference on Geosynthetics. 2010. Pp. 115–163.

7. Зверев А.О., Саинов М.П., Лукичев Р.В. Результаты экспериментального исследования полимерных геомембран на двухосное растяжение // Вестник Евразийской науки. 2018. Т. 10. № 4. С. 27. URL: <https://esj.today/PDF/35SAVN418.pdf>

8. Koerner R.M., Hsuan Y.G., Koerner G.R. Life-time predictions of exposed geotextiles and geomembranes // Geosynthetics International. 2017. Vol. 24. Issue 2. Pp. 198–212. DOI: 10.1680/jgein.16.00026

9. Меглен Ж., Брель Б., Гордин А. Использование битумной геомембраны Coletanche для гидроизоляции дамбы хвостохранилища медного рудника и ее поведение при землетрясении в 7,5 баллов // Гидротехника. 2013. № 3. С. 73–75.

10. Брель Б., Меглен Ж., Мизар И. Использование битумных геомембран (BGM) Soletanche в суровых климатических условиях // Гидротехника. 2013. № 2 (31). С. 67–69.

11. Koerner R.M. Designing with geosynthetics. 5th edn. Prentice Hall, 2005. 816 p.

12. Rowe R.K., Sangam H.P., Lake C.B. Evaluation of an HDPE geomembrane after 14 years as a leachate lagoon liner // Canadian Geotechnical Journal. 2003. Vol. 40. Issue 3. Pp. 536–550. DOI: 10.1139/t03-019

13. Schoenbeck M.A. Durability of chlorosulfonated polyethylene geomembrane seams after accelerated aging tests // Geotextiles and Geomembranes. 1990.

Vol. 9. Issue 4–6. Pp. 337–341. DOI: 10.1016/0266-1144(90)90024-7

14. Roades S. Emergency water supply: The upper Chiquita reservoir // Geosynthetics. 2011. Vol. 29. Issue 5. Pp. 20–24.

15. Blanco M., Castillo F., Touze-Foltz N., Amat B., Aguiar E. Behaviour of an EPDM geomembrane 18 years after its installation in a water reservoir // International Journal of Geomate. 2015. Vol. 9. Issue 1. Pp. 1348–1352. DOI: 10.21660/2015.17.4137

16. Blanco M., Castillo F., Soriano J., Noval A.M., Touze-Foltz N. Comparative study of three different kinds of geomembranes (PVC-P, HDPE, EPDM) used in the waterproofing of reservoirs // Eurogeo 5. Valencia, Spain, 2012. Pp. 46–54.

17. Rigo J-M., Cazzuffi D.A. Test standards and their classification // Identification and Performance Testing. 1991. Pp. 18–50.

18. Лукичев Р.В., Складнев М.К., Черваков К.С. Исследование деформируемости и прочности полимерных геомембран при одноосном растяжении // Дни студенческой науки : сб. докл. науч.-техн. конф. по итогам научно-исследовательских работ студентов Института гидротехнического и энергетического строительства. 2019. С. 65–70.

19. Wu H., Shu Y., Jiang X., Ren Z. Biaxial tensile mechanical property of geomembrane used as high membrane faced rockfill dam: key technology of high membrane faced rockfill dam (III) // Advances in Science and Technology of Water Resources. 2015. Vol. 35. Issue 1. Pp. 16–22.

Поступила в редакцию 30 октября 2019 г.

Принята в доработанном виде 26 февраля 2020 г.

Одобрена для публикации 29 мая 2020 г.

ОБ АВТОРАХ: **Алексей Сергеевич Просвирыков** — кандидат технических наук, старший научный сотрудник; **Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС» (НИТУ «МИСиС»);** 119049, г. Москва, Ленинский пр-т, д. 4; SPIN-код: 4583-7084; Scopus: 6504131852; ResearcherID: A-6787-2012; ORCID: 0000-0001-9113-2735; pro.alex@mail.ru;

Михаил Петрович Саинов — кандидат технических наук, доцент кафедры гидравлики и гидротехнического строительства; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ);** 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; SPIN-код: 2369-9626, Scopus: 6506150284; mp_sainov@mail.ru;

Андрей Олегович Зверев — главный специалист; **Публичное акционерное общество «РусГидро» (ПАО «РусГидро»);** 117393, г. Москва, ул. Архитектора Власова, д. 51; SPIN-код: 9900-7570, Scopus: 57200372710; zvrev_0591@mail.ru;

Роман Валерьевич Лукичев — бакалавр; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ);** 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; lukichev.r1@gmail.com.

INTRODUCTION

Geosynthetic barriers are promising roll products for use as watertight elements of weirs and dams. They have been used in water works since 1950s, initially, as water barriers of channels and basins, then, as water barriers for weirs [1, 2]. In 1957, in the USA, Daisetta reservoir of 3.7 m depth and 32,000 m² surface area was covered with a coating of butyl rubber of 2.25 mm thickness.

The first weir with a watertight element (WTE) on geosynthetic barrier base was built in 1959, in Italy. It was Contrada Sabetta weir with 32.5 m height [3, 4]. The WTE of this weir is constituted by two geosynthetic layers each one with 2 mm thickness, made of polyisobutylene (Oppanol). In 1960, in Czechoslovakia, Dobsina earth dam was built with a height of 10 m with a WTE of 0.9 mm thick PVC film.

The examples above demonstrate that the initial stage was a period of search for the most suitable geosynthetic materials for water barriers of water works, and different types of geosynthetic barrier materials were utilized. Often, thick membranes of rubber-type materials were used (e.g. polyisobutylene). There were also attempts to use thin thermoset polymer films (polyvinylchloride and polyethylene). Preferred, however, were thick membranes since thin films (0.3...0.6 mm) could be mechanically damaged at contact spots with soil particles.

To mitigate the risk of puncture, geosynthetic barriers were developed as roll products with thicknesses of several millimeters. The term “geosynthetic barrier” was introduced in 1977 [5] to tell thick roll products from thin films. In addition, filtram layers started to be used for protection of the geosynthetic barrier against punctures. The above-listed new technical solutions allowed for drastic reduction of the risk of puncture and made the way free for use of polyvinylchloride (PVC) and polyethylene (PE) products as watertight elements. For the first time, a geosynthetic barrier of strong high-density polyethylene (HDPE) was utilized in 1972 in Germany.

In addition, the increased thickness of geosynthetic barrier products allows for their prolonged service life. As evaluated by Cazuffi [6], when the thickness of the geosynthetic barrier is doubled its service life is increased by 4 times. Based on the operation data of the erected facilities, it makes at least 30 years even in the most unfavorable conditions.

For the time being, the water engineering utilizes mostly PVC and PE geosynthetic barriers, whereas rubber-type materials (polyisobutylene, butyl rubber, etc.) are seldom used.

In accordance with the data of the International Congress of Large Dams (ICOLD)¹ weir water barriers are mostly made of geosynthetic barriers of plasti-

cized PVC (PVC-P). This is due to their high strength and elasticity. It is well-known that PVC has a better strength vs. deformability ratio than that of PE [7].

Geosynthetic barriers of PE are used not so often. They have been utilized for isolation of the mining waste, solid domestic waste due to the broad range of the chemical resistance of PE. The paper [8] recommends for closed WTE HDPE material, since it has a long service life.

However, the matter of the selection of the geosynthetic product type to be used as WTE of weirs has not been yet finally settled. E.g., francophone countries (France, Canada) often use bituminous geosynthetic barriers [9, 10]. These thick barriers accommodate considerable deformations, are chemically resistant and can be used in severe climate conditions.

The reason for that was that PVC and PE have not only important advantages but also certain drawbacks. An essential drawback of plasticized PVC (PVC-P) is that, in the course of time, the quantity of the plasticizer gets less with corresponding increase of its fragility and stiffness. It gives reasons for doubts concerning the service life of WTE as geosynthetic barriers of PVC.

In respect to PVC-P, PE does not contain such a number of additives that is why it is considered to be more durable. However, there is an essential drawback inherent to PE: it is excessively rigid, as compared with the soil. Based on the data from [11], the linear deformation modulus of PE can reach 1,000 MPa. Due to the high rigidity, temperature impacts could cause cracking of a PE geosynthetic barrier. The paper [12] shows an example of cracking in the WTE of a dump of solid domestic waste.

Consequently, use of alternative types and kinds of geosynthetic barriers should be taken into account.

It should be noted that all geosynthetic barrier materials are generally classified¹ in four large groups: thermoplastic, thermoset, rubber-type and bituminous². PVC, PE, as well as polypropylene belong to the same group of thermoplastic geosynthetic materials. That is why we made up our mind to study the properties of geosynthetic materials of the other groups.

Thermoset geosynthetic materials are, for example, chlorosulfonated polyethylene (CSPE) and ethylene-propylene copolymer. Rubber-type geosynthetic materials include polyisobutylene, butyl rubber and ethylene-propylene diene monomer (EPDM). As objects for property studying of alternative types of geosynthetic materials, we selected CSPE and EPDM.

CSPE is also known as “Hypalon”. It has the advantage of high resistance to ultraviolet radiation and ozone, which makes it usable in open areas. Based on the data of [13], CSPE has a long service life. It was actively used in the past until high-density polyethyl-

² To be accurate, bituminous geomembranes are not synthetic products. Bituminous geomembranes are assigned to geosynthetic barriers just because they are reinforced with geosynthetic filaments.

¹ ICOLD. Geomembrane sealing systems for dams. Design principles and review of experience. 2010. Bulletin 135.

ene (HDPE) was brought to the market, being of similar properties, but cheaper. The high price is the main drawback of CSPE, being appr. RUB 4,500 per 1 m². That is why, for the time being, CSPE geosynthetic barriers are only used as water barriers of small basins [14] and toxic waste storages.

It should be noted that currently reinforced CSPE (CSPE-R) is used. Due to polyester net reinforcement, CSPE-R obtains high mechanical strength. Its properties exceed those of HDPE, especially in environments with temperatures below zero. However, in the recent time, CSPE has been rarely used, since in the 1990s Flexible Polypropylene (fPP) appeared being even more resistant to low temperatures.

As one more alternative, we analyzed one of thermoset rubber-type materials – the ethylene-propylene diene monomer (EPDM). Its use started in 1963, however, mostly as roof material. Nevertheless, storage tank water barrier applications were also known [15, 16]. The advantage of EPDM is its high elasticity with return to the original shape since EPDM is an elastomer. Based on ICOLD data, EPDM has almost the same chemical resistance as HDPE. It is sufficiently durable and can be used in exposed water barrier areas [8]. The drawback of EPDM like that of all rubber-type materials is the impossibility of welding, the water barrier parts must be overlapped and glued together.

The paper [16] analyzes the results of many years of service of geosynthetic barriers of HDPE, PVC and EPDM in three different reservoirs in Spain. The authors came to a conclusion that every type of geosynthetic barriers has both benefits and drawbacks, the selection of a geosynthetic barrier is mostly stipulated by the economic situation and by specific project requirements.

Comparative studies of the different types of geosynthetic barriers require detailed information on their respective properties and qualities. However, the properties of CSPE and EPDM are not well-known.

The first tests of different geosynthetic barrier types date back in the 1980s. The paper [17] contains test results of different geosynthetic barrier types obtained by Rigo and Cazzuffi. From Fig. 1 it is obvious, that the highest strength and stiffness are demonstrated by HDPE and polypropylene (PP) geosynthetic barriers. However, the deformation diagrams of these geosynthetic barriers show a section where plastic properties of their materials are displayed. Having reached certain critical extension lengths, HDPE and PP stretch further without any additional force being applied.

Being compared with HDPE and PP, a geosynthetic barrier of PVC looks attractive. It has a very high tensile strength (almost 20 MPa), thereby, its deformation modulus does not exceed 7 MPa (Fig. 1).

Based on the test results [17], geosynthetic barriers of thermoset (CSPE) and rubber-type (butyl rubber) material are definitely behind PE and PVC in terms of strength. Their strength is around 10 MPa (Fig. 1).

Fig. 1. Monoaxial extension test results of different geosynthetic barrier materials [17]: 1 — chlorosulfonated polyethylene (CSPE); 2 — butyl rubber; 3 — chlorinated polyethylene (CPE); 4 — polyvinylchloride (PVC); 5 — polypropylene (PP); 6 — high-density polyethylene (HDPE); 7 — bituminous geomembrane with polyester filament reinforcement

Their advantage is their higher deformability. The linear deformation modulus of butyl rubber is only about 2 MPa.

Slightly different values of geosynthetic materials tests can be found in the papers of the International Congress of Large Dams (ICOLD)¹, taken from [11]. Based on that data, HDPE and PVC feature approximately equal tensile strength of about 16 MPa (Fig. 2). Essentially stronger is the geosynthetic barrier of chlorosulfonated polyethylene (CSPE-R), with a tensile strength of 50 MPa. It is approximately 5 times the value given in [11]. The reason for the difference is evidently the reinforcement of CSPE with polyester filaments.

Fig. 2 also illustrates the fact that CSPE-R and HDPE are very stiff materials. In this aspect, PVC is definitely ahead of them in deformability. Attempts to soften the polyethylene by lowering of its density were a failure. Linear low density polyethylene (LLDPE) is far behind the PVC in terms of strength with approximately the same deformability.

We also tested geosynthetic barriers of polyethylene and polyvinylchloride, not common in the contemporary market [7, 18]. The tensile strength values were determined as follows: appr. 18 MPa for polyethylene; max. 7 MPa for PVC. At monoaxial extension, the strength of PVC reached 20 MPa [18]. The linear deformation modulus of polyethylene is appr. 50...200 MPa, that of PVC lies within 12...25 MPa.

Monoaxial extension tests of PE and PVC were also conducted in China [19]. In spite of certain differences of the obtained results, the properties of PE and PVC geosynthetic barriers are deemed to be more or less thoroughly studied.

Fig. 2. Deformability and strength of geosynthetic barriers of different types, based on the data by Koerner [10] and ICOLD: *a* — monoaxial extension; *b* — bi-axial (symmetrical) extension; CSPE-R — chlorosulfonated polyethylene with polyester filament reinforcement; HDPE — high-density polyethylene; LLDPE — linear low density polyethylene; PVC — polyvinylchloride.

However, almost no data on EPDM geosynthetic barrier tests can be found in scientific and technical sources. Only the paper [15] contains information that the tensile strength of EPDM is equal to 12.6 MPa. Paper [8] provides elongation data of EPDM geosynthetic barrier of 1 mm thickness as 640 % at 10 kN/running m specific force.

That is why we undertook an attempt of experimental evaluation of the strength and the deformability of less known geosynthetic barrier types, such as EPDM and CSPE.

MATERIALS AND METHODS

Extension tests of geosynthetic barriers were conducted in accordance with the method of GOST R 53226-2008 “Non-woven webs. Methods of strength measurement”. As a rule, for monoaxial extension, a sample of 50 mm width and 100 mm effective length was taken.

For each of the materials under test, several samples were prepared. The samples of different geosynthetic barrier types had different thickness. The initial thickness values were as follows: 1 mm for HDPE samples, 3.75 mm for PVC samples, 1.83 mm for CSPE samples, 0.9 mm for EPDM samples.

The experiments were conducted in Zwick Z250 all-purpose test machine. The applied extension force was increased till the rupture of the sample or till the ultimate outward positions of the sample clamps were reached. The travel rate of the movable cross-beam was 100 mm/min. A real-time force vs. elongation diagram was recorded by TestXpert software. The elongation was measured between the sample clamps.

The values to be found for the characteristics of the behavior of the geosynthetic barrier under static loads were:

- maximum extending force $\sigma_{\max}$;
- relative elongation $\varepsilon_{\max}$, corresponding to $\sigma_{\max}$;
- secant linear deformation modulus E_c , corresponding to the moment of time when $\sigma_{\max}$ and $\varepsilon_{\max}$ are reached.

Other deformations were determined approximately, based on the small-deflection theory, by the formula:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0},$$

where ΔL is the recorded elongation of the sample in the specific moment of time; L_0 — initial sample length.

Considering the plastic nature of the deformation of geosynthetic barrier materials, the value $\sigma_{\max}$ is not equivalent to the monoaxial tensile strength.

The value $\sigma_{\max}$ was determined by the formula:

$$\sigma_{\max} = \frac{N_{\max}}{A},$$

where $N_{\max}$ is the maximum extending strength recorded in the experiment; A is the cross-section area of the sample at the moment of the accommodation of $N_{\max}$.

The secant deformation modulus was determined by the formula:

$$E_c = \frac{\sigma_{\max}}{\varepsilon_{\max}}.$$

However, during geosynthetic barriers testing, there were several technical problems which did not allow for accurate determining of the values ΔL and A .

Firstly, the samples tended to slip out of the clamps. Due to the added extra length of the sample, the elongation records were below the actual values. The phenomenon worsened the results of the experiments.

Secondly, the equipment does not allow to register real-time cross-section deformations. For that, separate cross-section area measurements were required. They were conducted by means of a digital side caliper.

Thirdly, for cross-section deformation measurements, the test had to be stopped for a while. During those measurements the elongation tended to accumulate due to the creep strain of the material of the samples under test.

These technical problems worsened the accuracy of the obtained results and lead to deviations of the test conditions from the prescribed method specified by GOST.

The worst contribution to the total error of the experimental results was the inaccuracy of the determining of the value A . That was caused by several factors. Firstly, there was a measurement error in connection with the shape of the cross-section during the experiment, it could deviate from the rectangular one. Secondly, the cross-section measurements were not synchronized with the elongation records, referring to moments of time different from the most strained one. Thirdly, the location of the most strained section (with the smallest cross-section) was determined only visually.

In order to evaluate the influence of the inaccuracies of A on the accuracy of determining the values $\sigma_{\max}$ and E_c , their rated values were determined. During the calculation of the rated values, A cross-section area was taken equal to the initial value A_0 for the start of the experiment. Determined via A_0 , the rated values of the quantities $\sigma_{\max}$ and E_c correspond to their upper limit values.

RESULTS

The test results of the geosynthetic barrier samples of different types are shown in fig. 3, 4.

Fig. 3 shows the appearance of the geosynthetic barrier samples after the tests.

The diagrams in Fig. 4 display the change of the relative sample deformation ε in dependence on the extending force N . The diagrams are provided for one

of the samples of each geosynthetic barrier type. Paper [18] gives a more detailed presentation of the results we obtained during the tests of PVC and PE samples.

The represented diagrams (fig. 4) illustrate that the tested geosynthetic barrier types differ greatly from one another by their properties and behavior.

HDPE samples which reached a deformation of appr. 10 % started to elongate intensively in absence of the growth of the extending force (Fig. 4, *a*). The maximum extending force accommodated by HDPE geosynthetic barrier was appr. 1 kN. A rupture of a HDPE sample could not be achieved even at an elongation of 500 %. Thus, for HDPE geosynthetic barriers, the quantity $\sigma_{\max}$ is not the tensile strength, but the yield strength.

CSPE geosynthetic barrier samples had a different deformation behavior. After 1000 N force was gained, they were still resisting the extension, no yield was observed (Fig. 4, *b*). CSPE geosynthetic barrier samples could withstand a force of almost 10 kN (1 tf), whereafter a rupture occurred (Fig. 3, *a*). The difference of the deformation behavior of CSPE geosynthetic barrier is obviously stipulated by polyester filament reinforcement.

The deformation behavior of PVC and EPDM geosynthetic barrier samples was generally different from that of HDPE and CSPE geosynthetic barriers.

Firstly, during the loading their elongation was larger — a multiple of the initial size, being the evidence of their high deformation capacity. PVC samples elongated by 6 times before losing the integrity (Fig. 4, *c*). Even higher deformability was demonstrated by EPDM samples, besides that, they tended to slip out of the clamps, that is why the test procedure produced considerable problems. Only in one case the sample could be brought to rupture. Thereby, the sample elongated by more than 12 times.

Secondly, the PVC and EPDM samples demonstrated their elastomer properties. After the loading is stopped (at loads below the rupture value) they almost returned to the initial shape. Thereby, the deformation behavior of the PVC and EPDM was slightly different. Fig. 4, *c* shows that the PVC samples started to intensively elongate without extending force increase after 2.5 kN threshold that is obtained certain plastic deformations.

Fig. 3. Appearance of the samples after tests: *a* — CSPE sample after rupture; *b* — EPDM sample (the rupture could not be achieved)

Fig. 4. Extension test results of geosynthetic barrier samples: *a* — high-density polyethylene; *b* — chlorosulfonated polyethylene; *c* — polyvinylchloride; *d* — ethylene-propylene diene monomer

The EPDM samples almost never obtained any plastic deformations (Fig. 4, *d*), but displayed increased resilience at further load gain.

The breaking load, that is the force recorded at sample rupture, was appr. 2.5 kN for PVC (Fig. 4, *c*), and almost 350 N for EPDM. Thus, the tensile strength of PVC was 7 times higher than that of EPDM. However, it is, in the same time, the evidence that EPDM is almost by an order more deformable than PVC.

Based on the diagrams in Fig. 4, the values of the quantities of interest $\varepsilon_{\max}$, $\sigma_{\max}$ and E_c were determined, see the table for the results. It should be noted that for “stiff” materials (HDPE, CSPE-R), the change of the cross-section area of the geosynthetic barrier sample during the test has almost no influence on the values $\sigma_{\max}$ и E_c . For “soft” materials (PVC and EPDM), we should accept as a thumb rule that due to the reduction of the cross-section area of the sample during the elongation of the material, the values of the “strength” quantities $\sigma_{\max}$ and of the deformation modulus E_c get almost double.

The calculations of the limit extension strain $\sigma_{\max}$ allowed for the evaluation of the tensile strength of the geosynthetic barriers.

Based on the results of the calculation of $\sigma_{\max}$ in HDPE and PVC geosynthetic barriers, it is approximately 20 MPa. It matches well the data of other authors [11, 17]. In addition, it should be noted, however, that the strength of a PVC geosynthetic barrier at monoaxial extension is essentially higher than the strength at bi-axial extension. Based on the data by Koerner [11], it makes 14 MPa (Fig. 2, *b*), whereas our data are 7 MPa [6].

The analysis of the table data demonstrates that the strongest of the presented geosynthetic barriers selection is CSPE-R. Its strength exceeds 100 MPa. Based on the analysis of the ultimate extension strain in HDPE and PVC geosynthetic barriers, the strength of CSPE-R is almost 5 times higher.

The maximum value of the extension strain $\sigma_{\max}$ in EPDM geosynthetic barrier was appr. 10 MPa. It matches well the data in [15]. It should be noted that EPDM is behind HDPE and PVC in terms of strength only by 50 %.

The calculations of the quantity E_c (the secant linear deformation modulus corresponding to $\sigma_{\max}$) allowed for the assessment of the deformability of the geosynthetic barrier during the accommodation of the extension forces.

Table. Calculation results of strength and deformability of different geosynthetic barrier types

Geosynthetic barrier material	HDPE	CSPE-R	PVC	EPDM
Maximum force $N_{\max}$, N	1.076	9.983	2.637	241
Initial dimensions of the cross-section, mm	50×1	50×1.83	50×3.75	50×1
Initial cross-section area, mm ²	50	91.5	187.5	50
Relative elongation $\varepsilon_{\max}$, corresponding to the maximum force, %	10.2	45.8	241	1,000
Rated maximum strain $\sigma_{\max}$, MPa	21.5	109	14.1	4.82
Rated secant linear deformation modulus corresponding to the maximum force E_c , MPa	211	238	5.8	0.48
Ratio $\sigma_{\max}/E_c$	0.10	0.46	2.4	10
Area in the calculation cross-section, mm ²	48	80	92	≈25
Maximum strain, MPa	22.4	125	28.6	≈10
Secant linear deformation modulus E_c corresponding to the maximum force, MPa	220	273	11.9	≈1

It was determined that the secant linear deformation modulus of geosynthetic barriers of two types of polyethylene (HDPE, CSPE) is almost the same, lying within the range of 200...300 MPa. It matches well the data in [18].

The linear deformation modulus of a PVC geosynthetic barrier is approximately by an order less than that of polyethylene geosynthetic barriers (see Table). The deformability of EPDM geosynthetic barriers is approximately by two orders higher than that of polyethylene.

Such high extendability of EPDM geosynthetic barriers offers benefits relative to other geosynthetic barrier types since in the facility it is not just the absolute tensile strength that matters, but the strength vs. deformability ratio. The lower the deformability of the geosynthetic barrier, the lower are the values of therein occurring strains, consequently, the strength reserve is higher.

The table analysis shows that in terms of the strength vs. deformability ratio CSPE geosynthetic barriers are more effective than HDPE geosynthetic barriers. However, still higher ratios are pertinent to PVC and EPDM geosynthetic barriers. Due to high extendability, EPDM geosynthetic barriers have the highest potential to ensure the required tensile strength, PVC geosynthetic barriers are essentially behind them in this aspect.

However, EPDM geosynthetic barriers are also expensive. For the time being, approximate prices of geosynthetic barriers (with average thickness) are as follows: HDPE — RUB 150/m², LDPE — RUB 125/m², PVC — RUB 250/m², Hypalon (CSPE) — RUB 4,500/m², EPDM — RUB 650/m². The matching of the prices allows for certain conclusions:

- in spite of the fact that technically PVC is ahead of PE, its main benefit is the lower price. That is why, in the nearest future, PVC and PE will compete further;

- notwithstanding the high strength and chemical resistance, Hypalon (CSPE) is behind geosynthetic barriers of other types in other technical parameters and economic efficiency. This material is scarcely promising in terms of broad range of application for watertight elements of weirs and dams;

- in spite of a higher price, EPDM geosynthetic barrier are well-competitive with traditional geosynthetic barrier types (PVC and PE). The price of a geosynthetic barrier of EPDM is approximately a triple of that of geosynthetic barriers of PVC, offering, however, more benefits in the technical aspect. For more accurate conclusions, studies of other properties and qualities of EPDM are required, like durability and resistance to impacts of different nature.

CONCLUSIONS

Our investigation allowed for a study of strength and deformation properties of a broad spectrum of geosynthetic barrier types – thermoplastic, thermoset and rubber-type. It enables one to make more substantiated conclusions on the selection of a geosynthetic barrier type as watertight elements of earth dams.

CSPE reinforced with polyester filament (Hypalon) is a stronger material than HDPE. However, both of these types of polyethylene-based geosynthetic barriers have approximately equal deformability.

Geosynthetic barriers of EPDM are even more deformable than PVC geosynthetic barriers. Thereby they both feature high strength. But PVC geosynthetic barriers are behind them in terms of strength vs. deformability ratio.

All considered geosynthetic barrier types feature high strength allowing in most cases for retained integrity at deformations of the soil beds. Most preferable, however, is using geosynthetic barriers of PVC and of ther-

moplastic polymers due to their most favorable strength vs. deformability ratio. The geosynthetic barrier type selection is mostly defined by the requirements of the economical advisability and the operation environment.

REFERENCES

1. Glagovskiy V.B., Sol'skiy S.V., Lopatina M.G., Dubrovskaya N.V., Orlova N.L. Geosynthetic materials in hydraulic engineering construction. *Hydraulic Engineering*. 2014; 9:23-27. (rus.).
2. Sainov M.P., Zverev A.O. Seepage control elements of embankment dams from geosynthetics. *Innovation and Investment*. 2018; 1:202-210. (rus.).
3. Cazzuffi D. The use of geomembranes in Italian dams. *International Water Power & Dam Construction*. 1987; 39(3):17-21.
4. Rel'tov B.F., Krichevskiy I.E. Prospects for the Use of Roll Plastics as Dam Wallings of Local Materials. *Hydro-engineering Construction*. 1964; 1:29-32. (rus.).
5. Giroud J.P., Perfetti J. Classification des textiles et mesure de leurs propriétés en vue de leur utilisation en géotechnique. *Proceedings of the International Conference on the Use of Fabrics in Geotechnics*. Session 8, Paris, France, 1977; 345-352.
6. Cazzuffi D., Giroud J.P., Scuero A., Vascchetti G. Geosynthetic barriers systems for dams. *9th International Conference on Geosynthetics*. 2010; 115-163.
7. Zverev A.O., Sainov M.P., Lukichev R.V. Results of experimental studies of polymer geomembranes biaxial tension. *The Eurasian Scientific Journal*. 2018; 4(10):27. URL: <https://esj.today/PDF/35SAVN418.pdf> (rus.).
8. Koerner R.M., Hsuan Y.G., Koerner G.R. Lifetime predictions of exposed geotextiles and geomembranes. *Geosynthetics International*. 2017; 24(2):198-212. DOI: 10.1680/jgein.16.00026
9. Meglen Zh., Brel' B., Gordin A. The use of bitumen geomembrane Coletanche for waterproofing the dam of the tailings of a copper mine and its behavior during an earthquake of 7.5 points. *Hydraulic Engineering*. 2013; 3:73-75. (rus.).
10. Brel' B., Meglen Zh., Mizar I. Use of Sotetanche bitumen geomembrane (BGM) in harsh environments. *Hydraulic Engineering*. 2013; 2(31): 67-69. (rus.).
11. Koerner R.M. *Designing with Geosynthetics*. 5th edn. Prentice Hall, 2005; 816.
12. Rowe R.K., Sangam H.P., Lake C.B. Evaluation of an HDPE geomembrane after 14 years as a leachate lagoon liner. *Canadian Geotechnical Journal*. 2003; 40(3):536-550. DOI: 10.1139/t03-019
13. Schoenbeck M.A. Durability of chlorosulfonated polyethylene geomembrane seams after accelerated aging tests. *Geotextiles and Geomembranes*. 1990; 9(4-6):337-341. DOI: 10.1016/0266-1144(90)90024-7
14. Roades S. Emergency water supply: The Upper Chiquita Reservoir. *Geosynthetics*. 2011; 29(5):20-24.
15. Blanco M., Castillo F., Touze-Foltz N., Amat B., Aguiar E. Behaviour of an EPDM geomembrane 18 years after its installation in a water reservoir. *International Journal of Geomate*. 2015; 9(1):1348-1352. DOI: 10.21660/2015.17.4137
16. Blanco M., Castillo F., Soriano J., Novat A.M., Touze-Foltz N. Comparative study of three different kinds of geomembranes (PVC-P, HDPE, EPDM) used in the waterproofing of reservoirs. *Euro-geo 5*. Valencia, Spain, 2012; 46-54.
17. Rigo J-M., Cazzuffi D.A. Test standards and their classification. *Identification and Performance Testing*. 1991; 18-50.
18. Lukichev R.V., Skljadnev M.K., Chervakov K.S. The study of the deformability and strength of polymer geomembranes under uniaxial tension. *Days of student science: collection of reports of a scientific and technical conference based on the results of research work by students of the Institute of Hydrotechnical and Power Engineering*. 2019; 65-70. (rus.).
19. Wu H., Shu Y., Jiang X., Ren Z. Biaxial tensile mechanical property of geomembrane used as high membrane faced rockfill dam: key technology of high membrane faced rockfill dam (III). *Advances in Science and Technology of Water Resources*. 2015; 35(1):16-22.

Received October 30, 2019

Adopted in a revised form on February 26, 2020.

Approved for publication May 29, 2020.

B I O N O T E S: **Alexey S. Prosviryakov** — Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher; **National University of Science and Technology MISiS (NUST MISiS)**; 4 Leninsky av., Moscow, 119049, Russian Federation; SPIN-code: 4583-7084; Scopus: 6504131852; ResearcherID: A-6787-2012; ORCID: 0000-0001-9113-2735; pro.alex@mail.ru;

Mikhail P. Sainov — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Hydraulics and Hydraulic Engineering Department; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; SPIN-code: 2369-9626, Scopus: 6506150284; mp_sainov@mail;

Andrei O. Zverev — chief specialist; **Public Joint-Stock Company Federal Hydro-Generating Company — RusHydro**; 51 Architect Vlasova st., Moscow, 117393, Russian Federation; SPIN-code: 9900-7570, Scopus: 57200372710; zverev_0591@mail.ru;

Roman V. Lukichev — bachelor; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; lukichev.rl@gmail.com.