

УДК 627.8

ГАСАНОВ Е.Е., МАМЕДОВ Н.Дж.

Азербайджанский Университет Архитектуры и Строительства
tamedovnn17@gmail.com

ГЕОСИНТЕТИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ КАК ПРОТИВОФИЛЬТРАЦИОННЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ ЗЕМЛЯНЫХ ПЛОТИН

Введение. Земляные плотины относятся к числу наиболее распространённых гидротехнических сооружений в мировой практике. Их строительство в значительной степени зависит от наличия местных грунтовых ресурсов, а также характеризуется относительно более низкой стоимостью по сравнению с бетонными конструкциями. В то же время одной из ключевых инженерных задач при эксплуатации таких сооружений остаётся контроль фильтрации воды через тело плотины и её основание. Неконтролируемые фильтрационные процессы могут вызывать суффозию грунта, приводить к разрушению откосов и в крайнем случае становиться причиной аварийных ситуаций [1].

В качестве традиционного способа противофильтрационной защиты применяются глиняные ядра, экраны и понуры, но такие решения требуют значительных объёмов дефицитных глинистых материалов, отличаются высокой трудоёмкостью послойного уплотнения и длительными сроками строительства. В последние десятилетия в гидротехническом строительстве всё шире используются геосинтетические материалы (ГСМ), включая геомембраны, геосинтетические глиняные маты и геотекстиль. Их применение позволяет повысить эффективность противофильтрационных мероприятий при одновременном снижении затрат и трудоёмкости [2–3].

Для Азербайджана переход к геосинтетике особенно актуален: качественные глинистые грунты доступны далеко не во всех регионах страны, а темпы реализации водохозяйственных проектов остаются недостаточными. Настоящая работа посвящена обобщению современных данных о

геосинтетических противофильтрационных материалах и обоснованию целесообразности их применения при строительстве земляных плотин.

Материалы и методы. Исследование базируется на систематическом анализе научной литературы, опубликованной в период 2020–2026 гг., включая статьи, индексируемые в базах Web of Science и Scopus, а также нормативные документы (СП 39.13330.2012, Бюллетень ICOLD 164) и технические стандарты, регулирующие применение геосинтетических материалов. Отбор источников осуществлялся по следующим критериям: соответствие тематике противофильтрационных элементов земляных плотин, наличие количественных характеристик фильтрационных и механических свойств материалов, а также актуальность публикаций.

В качестве объектов исследования рассматриваются три типа геосинтетических материалов: геомембраны из полиэтилена высокой плотности (ПЭВП), геосинтетические глиняные маты (ГГМ / GCL) и геотекстиль. Оценка их противофильтрационных свойств проводилась с использованием закона Дарси (уравнение 1) и критерия критического гидравлического градиента (уравнение 2). Они являются основными расчётными зависимостями при анализе фильтрационной прочности противофильтрационных элементов [5–6].

Удельный фильтрационный расход определяется по следующей формуле:

$$q=kiA \quad (1)$$

где q – удельный фильтрационный расход ($\text{м}^3/\text{с}$); k – коэффициент фильтрации материала ($\text{м}/\text{с}$); i – гидравлический градиент (безразмерная величина); A – площадь поперечного сечения фильтрационного потока (м^2).

Критический гидравлический градиент, при превышении которого наступает фильтрационное разрушение, определяется по формуле ниже:

$$i_{cr} = \left(\frac{\rho_s}{\rho_w} - 1 \right) \cdot (1 - n) \quad (2)$$

где ρ_s – плотность частиц грунта ($\text{кг}/\text{м}^3$); ρ_w – плотность воды ($\text{кг}/\text{м}^3$); n – пористость грунта. Противофильтрационный экран считается эффективным при выполнении условия $i \leq i_{cr}$. Сравнительный анализ рассматриваемых решений выполнен в табличной форме на основе обобщённых данных.

Результаты

1. Геомембраны из полиэтилена высокой плотности (ПЭВП). Среди геосинтетических противофильтрационных материалов геомембраны из полиэтилена высокой плотности (ПЭВП) получили наибольшее распространение в гидротехническом строительстве. Их производят экструзионным способом из первичного сырья с добавлением 2–3% технического углерода для защиты от УФ-излучения, а также стабилизаторов и антиоксидантов. Типичная толщина составляет 0,5–3,0 мм, однако для плотин, где требуется повышенная надёжность, применяются полотна толщиной 2,0–4,0 мм. Конкретное значение определяется типом конструкции, действующими нагрузками и условиями эксплуатации [5, 7].

Ключевое достоинство ПЭВП-геомембраны состоит в исключительно низкой водопроницаемости: коэффициент фильтрации не превышает 1×10^{-12} м/с, что на несколько порядков ниже, чем у уплотнённых глинистых грунтов [5]. Материал химически стоек в диапазоне pH 2–12, выдерживает разрывную нагрузку 25–40 кН/м и удлинение при разрыве 200–400%,

что позволяет воспринимать деформации основания без потери герметичности. Диапазон рабочих температур составляет от -50 до $+60^\circ\text{C}$ [5, 7].

Геомембрану укладывают на верхней откос плотины либо устанавливают в теле сооружения в виде вертикальной диафрагмы. Полотна соединяют термосваркой клиновым или экструзионным методом; прочность шва должна составлять не менее 95% прочности основного материала [14]. Поверх уложенной геомембраны отсыпают защитный слой грунта толщиной не менее 30 см, предохраняющий её от механических повреждений в процессе эксплуатации [5].

2. Геосинтетические глиняные маты (ГГМ / GCL). ГГМ представляет собой многослойный композит: два слоя геотекстиля, скреплённых иглопрокалыванием, удерживают между собой равномерно распределённый натриевый бентонит природного происхождения. Иглопрокалывание обеспечивает прочность на сдвиг в диапазоне 15–65 кПа и сохраняет целостность конструкции при укладке на крутых откосах [9–11].

Противофильтрационные свойства ГГМ определяются набуханием бентонита при контакте с водой: в процессе гидратации натриевый бентонит в пресной воде увеличивается в объёме в 10–17 раз (типичные значения для природного Na-бентонита; в минерализованных или жёстких водах набухание может быть существенно меньше) и формирует плотный гелеобразный барьер с коэффициентом фильтрации не более 5×10^{-11} м/с, что сопоставимо с фильтрационным сопротивлением нескольких метров уплотнённого глинистого грунта [11–12]. При локальном повреждении бентонит самостоятельно расширяется и закрывает возникшие дефекты. Это свойство самовосстановления выгодно отличает ГГМ от монолитных экранов.

Отдельного внимания заслуживают результаты Konishi et al. (2025), полученные в центрифужных испытаниях. При

увеличении угла укладки ГГМ в ступенчатых конструкциях характер разрушения принципиально меняется: вместо сдвига по плоскости контакта с матом начинает развиваться независимая деформация откоса. Это означает, что для крутых углов установки традиционные расчёты скользящего тела могут давать неконсервативные оценки устойчивости [12].

3. Геотекстиль в системах фильтрации и дренажа. Геотекстиль представляет собой тканый или нетканый полимерный материал. В противофильтрационных системах он выполняет роль фильтра и разделительного слоя. Геотекстиль удерживает мелкодисперсные частицы грунта от выноса в дренажные элементы и не допускает смещения слоёв с различным гранулометрическим составом. Там, где природные гравелистые материалы для обратных фильтров недоступны или дефицитны, он становится единственной практичной альтернативой [3].

В дренажных системах низового откоса и основания плотины применяются нетканые водопроницаемые геотекстили, коэффициент фильтрации которых не уступает аналогичному показателю защищаемого грунта. В составе многослойной системы с геомембраной или ГГМ геотекстиль дополнительно предохраняет противофильтрационный элемент от проколов и истирания. Характеристики контакта на границе раздела слоёв устанавливаются по результатам испытаний на сдвиг по интерфейсу [5, 15].

4. Применение перфорированных пластиковых дренажных труб в экранных земляных плотинах. В экранных земляных плотинах перспективным инженерным решением является применение дренажных устройств нового типа на основе перфорированных пластиковых труб. Их рациональное размещение в теле сооружения позволяет управлять фильтрационным потоком, корректировать положение депрессионной кривой и обеспечивать отвод фильтрационных вод на оптимальном расстоянии от противофильтрационного экрана.

Применение данной конструкции способствует сокращению длины фильтрационного пути, снижению гидравлических градиентов и перераспределению зон фильтрационного давления, что в целом повышает фильтрационную устойчивость и эксплуатационную надёжность земляной плотины.

Геометрический параметр экранного элемента. Ширина по гребню экранного элемента b_c в глиняных (глинисто-суглинистых) экранных плотинах определяется выражением:

$$b_c = b - \frac{t_{or}}{\sin \theta} + \frac{t_{or}}{\sin \theta} \cdot \frac{\kappa_b}{\kappa_e} = b + \frac{t_{or}}{\sin \theta} \left(\frac{\kappa_b}{\kappa_e} - 1 \right), \quad (3)$$

где b – ширина гребня плотины; t_{or} – толщина экранного элемента; θ – угол откоса; κ_b – коэффициент фильтрации основания; κ_e – коэффициент фильтрации экрана.

Фильтрационная модель. Для описания фильтрационного потока в зоне между противофильтрационным экраном и дренажным устройством используется уравнение плоской установившейся фильтрации, основанное на законе Дюпюи:

$$\frac{q}{\kappa_b} = \frac{h_c^2 - (h + h_d)^2}{2L_c} \quad (4)$$

где q – расход фильтрационного потока; κ_b – коэффициент фильтрации основания; h_c – начальный напор; h – текущая ордината депрессионной кривой; h_d – дополнительный напор от влияния дренажа; L_c – длина фильтрационного участка.

Ордината депрессионной кривой определяется по формуле:

$$h_e = \sqrt{H^2 \left(1 - \frac{t_{or}}{L_{opt}} \cdot \frac{\kappa_b}{\kappa_e} \sin \theta \right) - t_{or}^2 \cos^2 \theta} \quad (5)$$

где H – полный напор; L_{opt} – оптимальная длина фильтрационного пути.

При этом форма депрессионной кривой вдоль участка фильтрации описывается зависимостью:

$$y = \sqrt{\left[h_e^2 - \left(2 q \frac{(L_e - x)}{\kappa_b} \right) \right]} \quad (6)$$

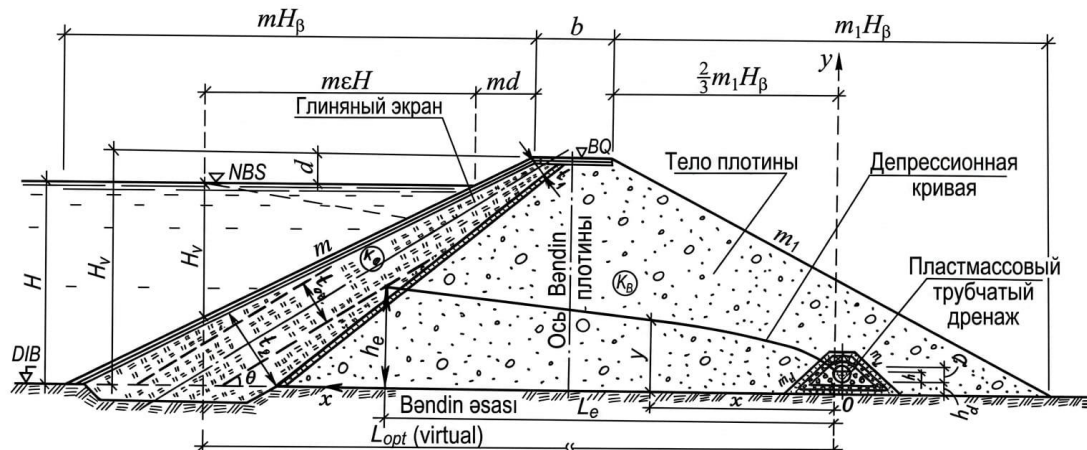


Рисунок 1. Схема расчёта фильтрации в теле экранной земляной плотины с усовершенствованной дренажной конструкцией трапецидального поперечного сечения

ОБСУЖДЕНИЕ

Полученные результаты дают возможность выполнить сравнительный анализ рассматриваемых противофильтрационных решений. В таблице 1 приведено сопоставление геосинтетических и

традиционных конструкций по основным технико-экономическим показателям. Показатели приведены в обобщённом виде и могут варьироваться в зависимости от условий эксплуатации и типа конструкции.

Таблица 1.

Сравнение противофильтрационных решений для земляных плотин

Параметр	Глиняное ядро	Геомембрана ПЭВП	ГГМ (GCL)	Геотекстиль
Коэффициент фильтрации	10^{-7} – 10^{-8} м/с	$<10^{-12}$ м/с	$<10^{-11}$ м/с	Высокий
Срок службы	50+ лет	20–50 лет	30–50 лет	25–40 лет
Самозалечивание	Ограниченное	Нет	Да	Нет
Зависимость от местных материалов	Высокая	Нет	Нет	Нет
Скорость монтажа	Низкая	Высокая	Высокая	Высокая
Объём земляных работ	Большой	Малый	Малый	Малый

Данные таблицы 1 наглядно показывают, что геосинтетические материалы превосходят традиционные глинистые ядра как по водонепроницаемости, так и по технологичности возведения. ПЭВП-геомембраны обеспечивают минимальную фильтрацию, ГГМ выигрывают за счёт

самозалечивания при динамических нагрузках и осадках основания. Каждый тип материала занимает свою нишу в зависимости от условий конкретного объекта.

Обзор публикаций за 2020–2026 гг. выявляет две устойчивые тенденции. Первая состоит в переходе от однослойных к многослойным системам: конструкции,

сочетающие геомембрану, ГГМ и геотекстиль, стабильно показывают более высокую надёжность, что подтверждается в том числе обзором *Frontiers in Built Environment* (2026) [13]. Вторая тенденция касается сейсмостойкости. Lu et al. (2025) продемонстрировали, что горизонтальное армирование с шагом 4 м и длиной полос 20 м повысило коэффициент запаса устойчивости с 1,279 до 1,503 для конкретной плотины в сейсмоактивной зоне [8]. Абсолютные значения эффекта зависят от геотехнических условий площадки.

Долгосрочная эффективность геосинтетических систем определяется тремя факторами: правильным выбором материала, качеством монтажа и соответствием реальным условиям эксплуатации. Marchiori et al. (2025) констатируют, что, несмотря на накопленный мировой опыт, вопросы долговечности геосинтетических барьеров в агрессивных химических средах и надёжности однослойных систем при локальных повреждениях остаются недостаточно изученными [7]. Это обстоятельство следует учитывать при проектировании, особенно в регионах со специфической гидрохимической обстановкой.

По сравнению с традиционными решениями геосинтетика существенно сокращает объём земляных работ и ускоряет строительство: отпадает необходимость в послойном уплотнении глины, снижается зависимость от местных грунтовых ресурсов, а технология монтажа значительно проще. Конкретный экономический эффект определяется условиями площадки и проектными решениями. Первоначальные затраты на геосинтетические материалы, как правило, выше, чем на традиционный глинистый экран. Однако меньшие трудозатраты и больший срок службы нередко перекрывают эту разницу, что делает геосинтетику перспективным решением для гидротехнического строительства Азербайджана.

Проведённое исследование показало, что геосинтетические материалы, включая геомембраны ПЭВП, геосинтетические глиняные маты и геотекстиль, могут рассматриваться как эффективная и технологичная альтернатива традиционным глинистым противофильтрационным элементам земляных плотин. К их основным преимуществам относятся крайне низкая водопроницаемость, в частности коэффициент фильтрации геомембран ПЭВП менее 10^{-12} м/с, независимость от наличия местных глинистых ресурсов, высокая скорость монтажа, сокращение объёмов земляных работ, а также способность ГГМ к самовосстановлению при повреждениях.

Результаты современных исследований показывают, что применение многослойных геосинтетических систем, включающих геомембрану, ГГМ и геотекстиль, способствует повышению как фильтрационной надёжности, так и сейсмической устойчивости земляных плотин. Так, в исследовании Lu et al. [8] геосинтетическое армирование горизонтальными слоями повысило коэффициент запаса устойчивости с 1,279 до 1,503, то есть примерно на 17%. Эти данные получены применительно к конкретной плотине в сейсмически активной зоне. Абсолютные значения прироста для других объектов будут зависеть от геотехнических условий и параметров армирования.

В качестве перспективного направления дальнейших исследований можно выделить разработку методик проектирования геосинтетических противофильтрационных систем с учётом инженерно-геологических условий Азербайджана, уровня сейсмичности и доступности материалов на строительном рынке. Полученные результаты могут быть использованы как теоретическая основа при выполнении расчётов и разработке проектных решений в рамках диссертационных исследований.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

ЛИТЕРАТУРА

1. Фролов М.Н. Фильтрационные деформации в грунтовых плотинах и методы борьбы с ними // Гидротехническое строительство, 2021, № 3, С. 12-19.
2. Scuero A., Vaschetti G. Geomembranes in Dam Engineering // IntechOpen, 2022. DOI: 10.5772/intechopen.1000175.
3. Chatrabhuj, Meshram K. Use of geosynthetic materials as soil reinforcement: an – alternative eco-friendly construction material //Discover Civil Engineering, 2024, Vol. 1(1), Art. 41. DOI: 10.1007/s44290-024-00050-6.
4. ICOLD Bulletin 164. Internal Erosion of Existing Dams, Levees and Dikes, and their Foundations, Paris: ICOLD, 2017, 170 p.
5. Koerner R.M. Designing with Geosynthetics, 6th ed., Xlibris Corporation, 2012, 914p.
6. СП 39.13330.2012. Плотины из грунтовых материалов, М.: Минрегион России, 2012, 106 с.
7. Marchiori L., Albuquerque A., Andrade Pais L. et al. Geoenvironmental Engineered Structures for Water Protection: Challenges and Perspectives for Sustainable Liners //Sustainability, 2025, Vol. 17(5), Art. 1850. DOI: 10.3390/su17051850.
8. Lu C., Ahmad S., Mohammad Z. et al. Enhanced Stability and Liquefaction Resistance of Earth Dams With a Proposed Method of Geosynthetic Reinforcements //Advances in Civil Engineering, 2025, Art. 2827855. DOI: 10.1155/adce/2827855.
9. Bouazza A. Geosynthetic clay liners //Geotextiles and Geomembranes, 2002, Vol. 20(1), P. 3-17. DOI: 10.1016/S0266-1144(01)00025-5.
10. Zornberg J.G., McCartney J.S. Analysis of a large database of GCL internal shear strength results //Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2009, Vol. 135(2), P. 209-223. DOI: 10.1061/(ASCE)1090-0241(2009)135:2(209).
11. Priya S., Kumar A. Design of Core of Earthen Dam by Replacement with Geosynthetic Clay Liner //Proceedings of IGS India, 2023, P. 1-8, URL: <https://igs.org.in/storage/proceedings-uploads/TH-06-22-160523072320.pdf>.
12. Konishi Y., Izumi A., Ohya S. et al. Effect of the Installation Angle of the Geosynthetic Clay Liners on the Deformation Characteristics of Earth-fill Dam Embankments // International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering, 2025. DOI: 10.1007/s40891-025-00676-1.
13. Geosynthetics in dams and water reservoirs under slope instability conditions: state of the art and challenges in geotechnical engineering // Frontiers in Built Environment, 2026. DOI: 10.3389/fbuil.2026.1793867.
14. Koerner G.R., Koerner R.M. Long-term temperature monitoring of geomembranes in dam, canal and landfill projects // Geotextiles and Geomembranes, 2012, Vol. 34, P. 72-77. DOI: 10.1016/j.geotexmem.2012.02.005.
15. Liu Z., Shi J., Lin H., Zhang Y. Strength Characteristics of a Smooth HDPE Geomembrane/Nonwoven Geotextile Interface Based on a Novel Ring Shear Apparatus // Polymers, 2023, Vol. 15(11), Art. 2497. DOI: 10.3390/polym15112497.

УДК 627.8

Гасанов Э.Э., Мамедов Н.Дж.

*Азербайджанский Университет
Архитектуры и Строительства
mamedovnn17@gmail.com*

Геосинтетические материалы как противофильтрационные элементы земляных плотин

АННОТАЦИЯ

В статье исследуются современные геосинтетические материалы, применяемые при устройстве противофильтрационных элементов земляных плотин. Выполнен обзор научных публикаций 2020–2026 гг. и нормативных документов, а также анализ основных типов геосинтетики, включая геомембраны из полиэтилена высокой плотности (ПЭВП), геосинтетические глиняные маты (ГГМ) и геотекстиль, с учётом их фильтрационных, механических и

эксплуатационных характеристик. Показано, что применение геосинтетических материалов по сравнению с традиционными глинистыми экранами позволяет сократить трудоёмкость строительства, уменьшить объёмы земляных работ. При этом исключается зависимость от местных глинистых ресурсов и повышается долговечность противофильтрационных систем. Установлено, что использование геосинтетики способствует повышению сейсмической устойчивости плотин. В отдельных исследованиях армирование горизонтальными слоями обеспечивало прирост коэффициента запаса устойчивости порядка 17%, применительно к конкретным условиям объекта. Обоснована эффективность применения многослойных систем (геомембрана +ГГМ+ геотекстиль) при проектировании противофильтрационных элементов земляных плотин в условиях дефицита местных глинистых материалов.

Ключевые слова: геосинтетические материалы, земляные плотины, геомембрана ПЭВП, геосинтетический глиняный мат (ГГМ), геотекстиль, бентонит, сейсмическая устойчивость.

УДК 627.8

Hasanov E.E., Mammadov N.J.
*Azerbaijan University of Architecture and
Construction*
mamedovnn17@gmail.com

Geosynthetic materials as anti-seepage

Redaksiyaya daxil olma/Received 04.06.2026

Çapa qəbul olunma/Accepted for publication 02.07.2026

elements of earth dams

ABSTRACT

The article examines modern geosynthetic materials used in the construction of anti-seepage elements of earth dams. A review of scientific publications from 2020 to 2026 and relevant regulatory documents was conducted, along with an analysis of the main types of geosynthetics, including high-density polyethylene (HDPE) geomembranes, geosynthetic clay liners (GCL), and geotextiles, considering their filtration, mechanical, and operational characteristics. It is shown that, compared to traditional clay barriers, geosynthetic materials reduce construction labor intensity, decrease earthwork volumes, eliminate dependence on local clay resources, and improve the durability of anti-seepage systems. It is established that the use of geosynthetics can increase seismic stability; in one case study, horizontal reinforcement layers improved the factor of safety by approximately 17%, subject to the specific conditions of the structure. The effectiveness of multilayer systems, including geomembrane, GCL, and geotextile, is substantiated.

Keywords: geosynthetic materials, earth dams, HDPE geomembrane, geosynthetic clay liner (GCL), geotextile, bentonite, seismic stability.

*Məqaləyə AzMİU-nun "Meliorasiya və su təsərrüfatı tikintisi" kafedrasının dosenti
A.Ə. Mürsəlov rəy vermişdir.*