

## ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ



УДК 624.137.5

### Перспективные методы укрепления береговой линии и строительства на нестабильных грунтах

**В.В. Гарашко**

Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

#### Аннотация

Береговая эрозия и нестабильность грунтов представляют собой серьезные проблемы при строительстве гидротехнических сооружений, особенно в условиях изменения климата и увеличения антропогенной нагрузки. В данной статье рассматриваются современные методы укрепления береговой линии и стабилизации слабых грунтов, включая применение гибридных шпунтовых конструкций, химическую и механическую стабилизацию, а также использование геосинтетических материалов. В качестве примера практического применения этих технологий анализируются конструктивные решения, реализованные при строительстве Багаевского гидроузла на реке Дон. Обоснованы преимущества комбинированных методов стабилизации грунтов, предлагаются рекомендации по выбору технологий в зависимости от геологических условий местности. В результате проведенного анализа установлено, что применение комбинированных методов стабилизации грунтов, в частности геосинтетиков и гибридных шпунтовых конструкций, позволяет снизить эксплуатационные затраты и повысить долговечность гидротехнических сооружений. Практическое значение работы заключается в возможности применения представленных рекомендаций при проектировании аналогичных объектов в условиях нестабильных грунтов.

**Ключевые слова:** укрепление берегов, стабилизация грунтов, шпунтовые ограждения, геосинтетики, гидротехнические сооружения, Багаевский гидроузел, механическая стабилизация, химическая стабилизация, эрозия берегов

**Для цитирования.** Гарашко В.В. Перспективные методы укрепления береговой линии и строительства на нестабильных грунтах. *Молодой исследователь Дона*. 2025;10(3):35–40.

### Advanced Methods of Coastline Strengthening and Construction on Unstable Soils

**Vladimir V. Garashko**

Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

#### Abstract

The coastal erosion and soil instability are the serious problems arising during construction of the hydraulic structures, especially in the context of climate change and anthropogenic load growth. The article studies the advanced methods of coastline strengthening and weak soil stabilization including installation of hybrid sheet pile structures, application of chemical and mechanical stabilization techniques and use of geosynthetics. The design solutions implemented during construction of the Bagaevsky hydroelectric complex on the river Don have been analysed as an example of real life application of these methods. The advantages of the combined methods of soil stabilization have been substantiated, and recommendations for selecting the technology depending on the geological conditions of an area have been proposed. Based on the conducted analysis, it has been found that the use of combined methods of soil stabilization, in particular, the use of geosynthetics and hybrid sheet pile structures can reduce the operating costs and increase durability of the hydraulic structures. The practical value of the article consists in the possibility of applying the presented recommendations while designing the similar facilities constructed on unstable soils.

**Keywords:** coastal strengthening, soil stabilization, sheet pile structures, geosynthetics, hydraulic structures, Bagaevsky hydroelectric complex, mechanical stabilization, chemical stabilization, coastal erosion

**For Citation.** Garashko VV. Advanced Methods of Coastline Strengthening and Construction on Unstable Soils. *Young Researcher of Don*. 2025;10(3):35–40.

**Введение.** Строительство и эксплуатация гидротехнических сооружений имеют неотделимую связь с необходимостью обеспечения устойчивости береговой линии и стабилизации грунтов, особенно в условиях водонасыщенных и слабых почв. Нестабильность берегов и дна водоемов приводит к эрозии, осадке сооружений и риску их разрушения. В условиях глобального изменения климата и усиления антропогенного давления данные проблемы становятся все более актуальными [1].

Существующие методы укрепления берегов и стабилизации грунтов включают механическое уплотнение, химическое закрепление, применение шпунтовых конструкций и использование геосинтетических материалов. Однако их эффективность значительно зависит от геологических условий конкретной местности, что требует комплексного подхода к выбору оптимального метода укрепления береговой линии.

Гидротехническое укрепление, включающее строительство подпорных стен, волнорезов и каскадных сооружений, является важным элементом защиты берегов. В отличие от локальных стабилизационных технологий, такие методы обеспечивают значительное снижение воздействия водных потоков и повышают долговременную устойчивость береговых линий.

В России примеров применения современных технологий в гидротехническом строительстве, таких как Багаевский гидроузел, возводимый на реке Дон, достаточно. Данный проект предусматривает использование гибридных шпунтовых конструкций и методов стабилизации грунтов для обеспечения прочности и долговечности сооружения [2]. Опыт его строительства может быть перенесён на проектирование аналогичных гидротехнических объектов.

Несмотря на наличие традиционных методов укрепления берегов, в ряде случаев их эффективность оказывается недостаточной, обусловленной влиянием гидрологических факторов, изменениями в составе грунта и растущими антропогенными нагрузками. Гипотеза исследования заключается в том, что применение гибридных методов стабилизации береговых линий в сочетании с современными инженерными решениями (геосинтетики, инъекционная стабилизация) увеличит устойчивость гидротехнических сооружений и сократит эксплуатационные затраты.

Целью данной статьи является анализ перспективных методов укрепления береговых линий и стабилизации слабых грунтов, а также их практическое применение на примере строительства Багаевского гидроузла. В рамках исследования рассматриваются современные технологии защиты берегов от эрозии и осадки, механические и химические методы стабилизации грунтов, применение геосинтетических материалов в гидротехническом строительстве и сравнительный анализ эффективности различных методов. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании и строительстве гидротехнических сооружений, а также для разработки новых технологий защиты берегов.

### **1. Современные технологии укрепления берегов с использованием гибридных шпунтовых конструкций**

Гибридные шпунтовые конструкции представляют собой сочетание нескольких типов материалов, таких как сталь, бетон и композиты, что существенно повышает их устойчивость к механическим и климатическим нагрузкам [3]. Использование этих конструкций становится особенно актуальным в рамках гидротехнических сооружений, эксплуатируемых в сложных условиях, где традиционные материалы подвержены быстрой эрозии. Современные разработки в области проектирования шпунтовых ограждений направлены на улучшение их устойчивости к гидродинамическому давлению, абразивному износу и сезонным колебаниям температуры.

Основные преимущества гибридных конструкций проявляются в устойчивости к коррозии, долговечности и снижении затрат на обслуживание. Так, комбинированное использование металлических и железобетонных элементов снижает риск электрохимической коррозии, значительно продлевая срок службы конструкции. Применение антикоррозионных покрытий и катодной защиты помогает минимизировать потери прочности. Долговечность гибридных шпунтовых стен может достигать 60 лет и более благодаря рациональному распределению напряжений между материалами. Гибридные конструкции требуют менее частого ремонта по сравнению с традиционными стальными стенами, что в свою очередь снижает эксплуатационные расходы и вероятность внеплановых восстановительных работ.

При проектировании гибридных шпунтовых конструкций широко применяются методы численного моделирования, что позволяет детально оценить распределение напряжений и прогнозировать поведение конструкции под нагрузкой. Наиболее распространены методы конечных элементов (МКЭ), позволяющие анализировать влияние различных факторов, от геометрии конструкции до характеристик грунта. Контроль качества осуществляется в несколько этапов, начиная с входного контроля материалов и заканчивая нагрузочными испытаниями. Современные методы диагностики включают лазерное сканирование, ультразвуковой контроль сварных швов и мониторинг осадков с помощью инклинометров.

В Европе гибридные шпунтовые стены активно применяются в портовых сооружениях, и такие технологии стали стандартом в Германии и Нидерландах для защиты портов от размывания и деформаций. При проектировании таких конструкций учитываются не только механические нагрузки, но и долгосрочные эффекты, вызванные осадкой грунта и изменениями климата. В России такие конструкции применяются при укреплении берегов Волги и Дона [4]. Например, Багаевский гидроузел на реке Дон представляет собой значимый проект, где используются гибридные конструкции с металлическими шпунтовыми стенами и железобетонными анкерами.

Согласно исследованию Масленникова Л.Е. [2], важным аспектом строительства стало изменение конструктивных решений пульпопровода и шпунтовых стен для повышения их устойчивости. При проектировании учитывались не только внешние нагрузки, но и динамическое взаимодействие конструкции с грунтовым основанием. Для оценки устойчивости шпунтовых стен широко используется моделирование гидродинамических процессов. В рамках этого подхода учитываются такие параметры, как скорость потока воды и его воздействие на шпунтовую стену, гидростатическое давление на конструкцию при различных уровнях воды и влияние ледовых нагрузок в зимний период.

Применение гибридных стен позволяет перераспределить нагрузки, уменьшая концентрацию напряжений в отдельных участках. Расчёты показывают, что внедрение железобетонных анкеров снижает уровень напряжений в стали до 40 %, что значительно продлевает срок службы конструкции.

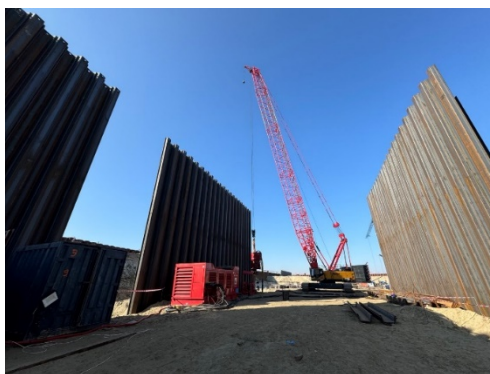


Рис. 1. Монтаж шпунтовых стенок шлюза Багаевского гидроузла

На рис. 1 изображён этап строительства шлюза Багаевского гидроузла — возведение его правой и левой стенок с использованием металлических шпунтовых конструкций. Данные элементы образуют основу будущих гидротехнических сооружений и впоследствии будут усилены железобетонными элементами, формируя гибридные шпунтовые стены. Такая технология обеспечивает прочность и долговечность шлюза, снижая нагрузки на его основание и предотвращая деформации конструкции.

По данным исследований, гибридные шпунтовые стены с железобетонными анкерами способны выдерживать нагрузки до 1,5–2 раза выше, по сравнению с традиционными стальными шпунтовыми конструкциями, при этом срок их службы составляет не менее 50 лет. Например, в проекте Багаевского гидроузла гибридные конструкции позволили сократить общие затраты на строительство на 18 %, а расчётный срок службы увеличился на 30 % [2]

## 2. Методы стабилизации слабых грунтов при строительстве гидротехнических сооружений

Одним из важнейших направлений стабилизации грунтов является гидротехническое укрепление. Этот метод включает комплекс инженерных решений, направленных на снижение размыва береговой линии и улучшение устойчивости грунтов под воздействием гидродинамических нагрузок.

Таблица 1

Методы стабилизации грунтов: описание, преимущества и недостатки

Метод стабилизации	Описание	Преимущества	Недостатки
Химическая стабилизация	Введение полимеров, силикатов и цементных растворов	Повышает прочность и водонепроницаемость	Высокая стоимость материалов
Механическая стабилизация	Уплотнение грунтов, армирование георешетками	Простота внедрения, эффективность	Не всегда применимо на водонасыщенных грунтах
Биостабилизация	Использование корневых систем растений и микроорганизмов	Экологичность, дешевизна	Требует длительного периода адаптации
Гидротехнические методы	Подпорные стены, волнорезы, каскадные сооружения	Уменьшает гидродинамическое воздействие	Дороговизна и сложность реализации

Химическая стабилизация особенно эффективна в условиях высоких подземных вод [5]. Механическая стабилизация широко применяется в дорожном строительстве и для защиты от оползней [6]. Биостабилизация — перспективный метод, использующий природные процессы укрепления грунта.

При строительстве Багаевского гидроузла особое внимание уделяется стабилизации слабых грунтов. Основные методы включают химическую стабилизацию грунтов с помощью инъекционного закрепления цементными растворами, а также механическую стабилизацию, предусматривающую глубокое уплотнение и армирование геосетками. В.Н. Шура и коллеги [7] подчеркивают, что применение этих методов позволяет минимизировать осадки конструкции и увеличить её долговечность.

Гидротехнические методы стабилизации включают в себя строительство подпорных стен, волнорезов и укрепления берегов при помощи каскадных конструкций, которые эффективно снижают воздействие водных потоков на грунт. Конкретно в проекте Багаевского гидроузла применяются бетонные противодиффузионные экраны, позволяющие снизить водопроницаемость грунтов до 90 % [7].

### 3. Применение геосинтетиков для повышения устойчивости конструкций в водонасыщенных грунтах

Геосинтетики — материалы, предназначенные для стабилизации грунтов, предотвращения эрозии и повышения прочности конструкций. Их использование позволяет существенно снизить затраты и увеличить срок службы гидротехнических объектов [8].

Таблица 2

Виды геосинтетиков и их применение

Вид геосинтетика	Основная функция	Применение
Геотекстиль	Фильтрация и армирование	Дренажные системы, укрепление откосов
Георешетки	Предотвращение размыва грунтов	Армирование дорожных и береговых конструкций
Геомембраны	Гидроизоляция	Подземные и гидротехнические сооружения

Применение геосинтетических армирующих материалов позволяет снизить осадку основания конструкции на 35–40 % и повысить несущую способность грунта на 25 %. Например, в проекте Багаевского гидроузла геотекстиль использован для стабилизации откосов, что позволило сократить расходы на отсыпку грунта на 12 % по сравнению с традиционными методами [5].

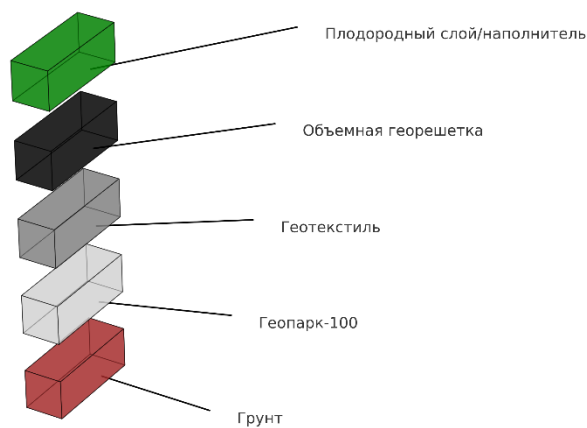


Рис. 2. Схема применения геосинтетиков для укрепления береговой линии

Геосинтетические материалы активно применяются в гидротехническом строительстве. Их использование в комбинации с подпорными стенами и волнорезами позволяет значительно повысить устойчивость береговой линии и предотвратить разрушение склонов и откосов. Применение геосинтетиков позволяет предотвратить оползни, уменьшить нагрузку на фундамент и улучшить дренажные свойства грунта [9].

### 4. Сравнительный анализ перспективных методов

В рамках сравнительного анализа различных методов укрепления берегов и стабилизации грунтов была проведена оценка их экономической эффективности, долговечности, простоты реализации и экологичности. В таблице 3 представлены основные технологии, используемые в гидротехническом строительстве, включая гибридные шпунтовые конструкции, химическую и механическую стабилизацию, геосинтетики, биостабилизацию, а также гидротехнические укрепления.

При выборе технологии важно учитывать не только первоначальные затраты, но и долгосрочные эксплуатационные характеристики. Например, гидротехническое укрепление, хотя и требует значительных инвестиций на этапе строительства, обеспечивает высокую долговечность и устойчивость к внешним природным воздействиям. В то же время биостабилизация является наиболее экологически безопасным методом, но требует длительного периода адаптации.

В таблице 3 приведены данные для сравнительного анализа перечисленных методов, что позволяет определить оптимальный вариант в зависимости от условий строительства и характеристик грунта.

Таблица 3

## Сравнительный анализ перспективных методов

Метод	Экономическая эффективность	Долговечность	Простота реализации	Экологичность
Гибридные шпунтовые конструкции	Средняя	Высокая	Средняя	Средняя
Химическая стабилизация	Высокая	Высокая	Средняя	Низкая
Механическая стабилизация	Средняя	Средняя	Высокая	Средняя
Геосинтетики	Высокая	Высокая	Высокая	Высокая
Биостабилизация	Низкая	Средняя	Низкая	Высокая
Гидротехническое укрепление	Средняя	Высокая	Средняя	Средняя

Опыт строительства крупных гидротехнических объектов, таких как Багаевский гидроузел, показал, что наиболее эффективными являются комбинированные методы стабилизации. В частности, сочетание гидротехнических сооружений с геосинтетическими материалами и механическими методами уплотнения грунтов позволяет добиться максимальной долговечности и устойчивости конструкций. Исследования показывают, что комплексный подход снижает риск размыва берегов на 40–50 % и увеличивает срок службы инженерных сооружений на 20–30 %. Выбор метода зависит от особенностей конкретного объекта строительства и характеристик грунта.

**Заключение.** В статье рассмотрены перспективные методы укрепления береговой линии и стабилизации нестационарных грунтов, среди которых наибольший интерес представляют гибридные шпунтовые конструкции, которые являются комбинацией материалов для повышения долговечности, геосинтетики как технологичный и экономичный способ укрепления грунтов, а также биостабилизация как экологически чистый и перспективный метод.

Гидротехнические методы укрепления, в частности строительство подпорных сооружений, зарекомендовали свою эффективность в сочетании с механическими и химическими методами стабилизации. Это особенно актуально для объектов, находящихся под воздействием сильных гидродинамических факторов, таких как Багаевский гидроузел.

Дальнейшие исследования должны быть направлены на создание комбинированных технологий, которые позволят улучшить эффективность и сократить затраты на строительство и эксплуатацию гидротехнических сооружений. Результаты исследования показывают, что сочетание механической и химической стабилизации в комплексе с геосинтетическими материалами позволяет сократить деформации сооружений в 2–2,5 раза и увеличить срок их службы на 30–40 %. В частности, анализ строительства Багаевского гидроузла подтверждает, что использование данных технологий позволяет сократить эксплуатационные затраты на 15–20 % за счет уменьшения частоты ремонтных работ [6].

## Список литературы

1. Офицеров В.Е. Современные технологии стабилизации грунтов с помощью биоцементации. *Научный аспект*. 2024;36(1):4599–4606. URL: [https://na-journal.ru/pdf/nauchnyi\\_aspekt\\_1-2024\\_t36\\_web.pdf#page=29](https://na-journal.ru/pdf/nauchnyi_aspekt_1-2024_t36_web.pdf#page=29) (дата обращения: 01.03.2025).
2. Масленников Л.Е. О состоянии строительства Багаевского гидроузла на реке Дон. *ГИДРОТЕХНИКА*. 2021;3(64):5–7. URL: [https://elibrary.ru/download/elibrary\\_46639571\\_21941811.pdf](https://elibrary.ru/download/elibrary_46639571_21941811.pdf) (дата обращения: 01.03.2025).
3. Сухов А.А., Троянов С.С., Никифорова Д.Н. Современные технологии и инструментальные средства обеспечения безопасной эксплуатации гидротехнических сооружений и мелиоративных систем в условиях природных и техногенных поражений с подготовкой информационно-вычислительных систем коллективного пользования на примере песчаного карьера в предместье г. Цимлянск в междуречье р. Кумшак и цимлянского водохранилища. *Вестник мелиоративной науки*. 2021;(1):25–34. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=45695254> (дата обращения: 01.03.2025).

4. Якунина Т.В., Вагин А.Р., Токарева М.В. Современные технологии для гидротехнических сооружений. В: *Труды конференции «Актуальные аспекты и приоритетные направления развития транспортной отрасли».* Санкт-Петербург, 14–15 ноября 2019 года. Москва: Издательство «Перо»; 2019. С. 395–401. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=42794534> (дата обращения: 01.03.2025).

5. Мухамеджанов Г.К., Мухамеджанова О.Г. Тенденции и перспективы развития производства и потребления геосинтетических материалов в России и странах таможенного союза. *Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века.* 2014;6(185):16–20. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=22602469> (дата обращения: 01.03.2025).

6. Прокопов А.Ю., Адоньев Н.А. Обзор зарубежного опыта инженерной защиты морских берегов и склонов. *Современные тенденции в строительстве, градостроительстве и планировке территорий.* 2024;3(1):27–47. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=65672790> (дата обращения: 01.03.2025).

7. Шкура В.Н., Баев О.А., Шевченко А.В. Рыбоходно-нерестовый комплекс в составе Багаевского гидроузла на реке Дон. *Мелиорация и гидротехника.* 2022;12(4):349–366.

8. Королев М.В. К вопросу о перспективах развития геомеханических испытаний. В: *Труды общероссийской научно-практической конференции «Перспективы развития инженерных изысканий в строительстве в Российской Федерации».* Москва, 01–03 декабря 2021 года. Москва: Геомаркетинг; 2021. С. 51–58. URL: <https://elibrary.ru/jfxvxx> (дата обращения: 01.03.2025).

**Об авторах:**

**Владимир Владимирович Гарашко**, магистрант кафедры технологии строительного производства Донского государственного технического университета (344022, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, ул. Социалистическая, 162), [ssuccessfuul@ya.ru](mailto:ssuccessfuul@ya.ru)

**Конфликт интересов:** авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.**

**About the Author:**

**Vladimir V. Garashko**, Master's Degree Student of the Construction Technology Department, Don State Technical University (162, Sotsialisticheskaya Str., Rostov-on-Don, 344022, Russian Federation), [ssuccessfuul@ya.ru](mailto:ssuccessfuul@ya.ru)

**Conflict of Interest Statement:** the author declares no conflict of interest.

**The author has read and approved the final manuscript.**