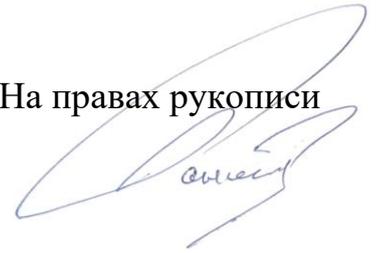


На правах рукописи



Пантелеев Юрий Игоревич

**ПРОТИВОКАРСТОВАЯ ЗАЩИТА ЛИНЕЙНЫХ  
СООРУЖЕНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ  
ГЕОСИНТЕТИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ**

2.1.2. Основания и фундаменты, подземные сооружения

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Москва – 2025

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Российский университет транспорта» РУТ (МИИТ)

Научный руководитель: доктор технических наук  
**Готман Наталья Залмановна**

Официальные оппоненты: **Пономарев Андрей Будимирович**  
доктор технических наук, профессор,  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II», кафедра «Промышленное и гражданское строительство», заведующий кафедрой  
**Уткин Михаил Михайлович**  
кандидат технических наук,  
главный специалист карстологических исследований АО «Гео Палитра».

Ведущая организация Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «**Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет**»

Защита состоится 17 декабря 2025 г., в 10:00 на заседании диссертационного совета 40.2.002.01 на базе федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Российский университет транспорта» по адресу: 127994, г. Москва, ул Образцова, д. 9, стр. 9 (ул. Часовая, д. 22/2, стр. 1, ауд. 329).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте РУТ (МИИТ), [www.miit.ru](http://www.miit.ru).

Автореферат разослан «    » ноября 2025 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Артюшенко Игорь Александрович

**Актуальность темы исследования.** В соответствии с нормативным законодательством Российской Федерации, при проектировании линейных сооружений на карстоопасных территориях предусматривается выполнение защитных противокарстовых мероприятий. Основная их цель заключается в обеспечении безопасности объектов во время всего их жизненного цикла.

К линейным сооружениям относятся автомобильные и железные дороги, которые имеют значительную протяженность и могут проходить по многокилометровым карстоопасным территориям. В этих условиях стандартные геотехнические и конструктивные методы противокарстовой защиты не применимы.

Решением данной проблемы может стать применение геосинтетических материалов. При этом для повышения эффективности защиты на геоматериал могут устанавливаться тензодатчики, позволяющие в режиме реального времени отслеживать все деформационные процессы.

В данной работе представлены результаты исследований по применению геосинтетических материалов для армирования основания дорожной насыпи, обеспечивающих противокарстовую защиту дороги.

Суть данной технологии заключается в частичной стабилизации основания линейного сооружения, то есть деформации возможны, но ограничены расчетными значениями. Геоматериал выполняет функцию поддержки сооружения до устранения последствий карстовых деформаций в основании.

Существующие методы расчета разработаны для оценки эффективности применения геосинтетических материалов при образовании карстовых деформаций по типу «провал» в основании насыпи, при этом размер провала является основным расчетным параметром.

Однако, образованию провала в основании предшествуют карстовые процессы в карстующихся грунтах, залегающих на глубине от 10-ти до 50-ти метров ниже основания дорожной насыпи, с образованием в них карстовых полостей и карстовых деформаций в основании дорожной насыпи по типу «проседание». В случае глинистых покровных толщ над карстующимися грунтами, в основании которых возможен рост карстовой полости значительных размеров, размер «мульды проседания» также может быть критичным для дороги.

В результате выполненных исследований установлены закономерности изменения усилий и деформаций геосинтетического материала, а также осадок дорожной насыпи, в зависимости от диаметра полости, высоты дорожной насыпи и расстояния до кровли карстующихся грунтов, на основе которых разработаны аналитические методы расчета.

Выполнение таких исследований и совершенствование методов проектирования противокарстовой защиты линейных сооружений, а именно дорог разного назначения, позволит повысить эффективность и надежность проектных решений, поэтому тема исследования является актуальной и имеет практическую ценность.

**Степень разработанности темы исследования.** Российскими и зарубежными учеными выполнено большое количество как теоретических, так и экспериментальных исследований, направленных на изучение напряженно-деформированного состояния основания зданий и сооружений при образовании карстовых деформаций.

Исследованием процессов образования карстовых деформаций в основании зданий и сооружений занимались многие отечественные и зарубежные ученые: Е.С. Ашпиз, Г.М. Шахунянц, Э.С. Аргал, В.П. Хоменко, А.Л. Готман, Н.З. Готман, А.В. Аникеев, В.В. Толмачев, В.П. Хоменко, Э.И. Мулюков, Е.А. Сорочан, В.И. Мартин, Ш.Р. Незамутдинов, Н.С. Метелюк, Г.М. Троицкий, В.А. Илюхин, В.А. Гарбер, А.И. Травкин, В.И. Шейнин, М.М. Уткин, А.В. Шапошников, А.Б. Пономарев, Андрейчук В.Н., G. Aderhold, В.Ф. Beck, F. Reuter, P.T. Milanovic, P. Delmas и др.

По результатам исследований выделено 2 типа карстовых деформаций, а именно «провал» и «проседание», которые следует учитывать при проектировании противокарстовой защиты, в том числе и для линейных сооружений.

Существенный вклад в изучение особенности работы геосинтетического материала, в том числе и с целью противокарстовой защиты линейного сооружения, внесли следующие ученые А.Б. Пономарев, Д.Г. Золотозубов, В.Г. Офрихтер, В.И. Клевеко, В.Ф. Барвашов, А.А. Бартоломей, В.Д. Казарновский, Т.П. Кашарин, А.И. Ким, Н.Н. Русак, Л.М. Тимофеева, Е.В. Щербин, В.М. Юмашев, А. Alexiew, Н. Brandl, Н. Girard, J.P. Giroud, R.M. Koerner, A. Paul, Н. Perrier, F. Schlosser, S. Schwerdt, J. Sobolewski, T. Uscimura, H.Vidal и другие ученые.

Предложены методы расчета и подбора геосинтетического материала, уложенного в основание дорожной насыпи, на образование карстовых деформаций по типу «провал».

**Цель и задачи исследования.** Целью работы является совершенствование методики проектирования противокарстовой защиты дорожной насыпи с использованием геосинтетических материалов.

Для достижения поставленной цели решались следующие **задачи**:

- выполнить анализ существующего расчетного и экспериментального опыта проектирования противокарстовой защиты дорог, сформулировать задачи исследования;
- выполнить лабораторные, численные и теоретические исследования и установить закономерности взаимодействия геосинтетического материала с грунтом над карстовой полостью в карстующихся грунтах;
- проанализировать результаты выполненных исследований и разработать аналитические методы расчета для определения усилий и относительных деформаций геоматериала, а также осадок дорожного полотна, над карстовой полостью в карстующихся грунтах;
- разработать методику расчета и проектирования противокарстовой защиты дороги с использованием геосинтетических материалов.

**Объектом исследования** является основание дорожной насыпи на карстующихся грунтах.

**Предметом исследования** является взаимодействие геосинтетического материала с основанием дорожной насыпи при развитии карстовых деформаций.

**Научная новизна** работы состоит в следующем:

- предложено выполнять расчет усилий и деформаций геосинтетического материала в основании линейного сооружения при условии образования карстовых деформаций по типу «проседание»;

- обосновано, что расчетным параметром карстопроявлений для условий образования карстовых деформаций по типу «проседание» является максимальный диаметр карстовой полости в карстующихся грунтах, при котором свод над полостью устойчив и полость не «всплывает» под основание дорожной насыпи;

- выявлены закономерности изменения усилий и деформаций геосинтетического материала, а также осадок дорожного полотна, над карстовой полостью в карстующихся грунтах, в зависимости от диаметра полости, высоты дорожной насыпи и расстояния до кровли карстующихся грунтов;

- по результатам сопоставления испытаний геосинтетического материала в разрывной машине и в грунтовом лотке установлено, что с учетом взаимодействия геоматериала с грунтом, его жесткость увеличивается;

- разработаны аналитические методы расчета усилий и относительных деформаций геосинтетического материала, а также осадок основания, в зависимости от диаметра полости, высоты дорожной насыпи и расстояния до кровли карстующихся грунтов;

- обоснована необходимость оценки устойчивости откосов насыпи, армированной геоматериалом, при образовании карстового провала в основании насыпи.

**Методология и методы исследования.** Достижение цели исследования и решение задач осуществлялось с использованием следующих методов:

- анализ и синтез – при уточнении и конкретизации проблемы расчета линейных сооружений при действии карстовых деформаций в обзоре литературы; при разработке аналитических методов расчета усилий и деформаций в геоматериале при действии карстовых деформаций и рекомендаций по выполнению численных расчетов;

- обобщение – при обобщении опыта расчетов основания дорожной насыпи, армированного геоматериалом, на карстоопасных площадках;

- сравнение – при обосновании характеристик расчетной модели для численных исследований взаимодействия геоматериала и основания при образовании карстовых деформаций;

- моделирование – при составлении численных моделей для моделирования поведения геоматериала в основании дорожной насыпи.

Для решения поставленных задач в части аналитических и численных исследований использовались методы теории упругости, теории пластичности, теории прочности Мора-Кулона и др. При выполнении численных исследований

были использованы компьютерные программы, реализующие метод конечных элементов. Анализ и интерпретация результатов численного исследования выполнялась с использованием метода наименьших квадратов.

**Положения, выносимые на защиту:** результаты исследований, на базе которых разработаны предложения по расчету оснований линейных сооружений, армированных геосинтетическим материалом, на закарстованных территориях, включающие:

- предложение по выполнению расчета усилий и деформаций геосинтетического материала в основании линейного сооружения при условии образования карстовых деформаций по типу «проседание»;

- обоснование расчетного параметра карстовых деформаций по типу «проседание», которым является максимальный диаметр карстовой полости в карстующихся грунтах, при котором свод над полостью устойчив и полость не «всплывает» под основание дорожной насыпи;

- закономерности изменения усилий и деформаций геосинтетического материала, а также осадок дорожного полотна, над карстовой полостью в карстующихся грунтах, в зависимости от диаметра полости, высоты дорожной насыпи и расстояния до кровли карстующихся грунтов;

- экспериментальное обоснование увеличения жесткости геоматериала, взаимодействующего с грунтом;

- аналитические методы расчета усилий и относительных деформаций геосинтетического материала, а также осадок основания, в зависимости от диаметра полости, высоты дорожной насыпи и расстояния до кровли карстующихся грунтов;

- предложения по дополнительному расчету устойчивости откосов насыпи автомобильной дороги при образовании карстового провала.

**Степень достоверности** основывается на:

- применении классических методов механики грунтов и строительной механики, апробированных методов численного моделирования с использованием верифицированных программных комплексов;

- удовлетворительной сходимости результатов численных исследований и лабораторных исследований, опубликованных в научной литературе, а также аналитических решений и результатов численных исследований.

**Апробация результатов.** Основные результаты работы докладывались на заседаниях кафедры «Автомобильные дороги, аэродромы, основания и фундаменты» ФГАОУ «Российский университет транспорта», на внутренних научно-практических конференциях «Неделя науки» в период с 2019 по 2023г.; на международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы проектирования, строительства и эксплуатации автомобильных дорог, аэродромов и транспортных сооружений» в 2021 г.; на 80-ой международной научно-методической и научно-исследовательской конференции МАДИ в 2022 г.; на IV международной научно-технической конференции «Механика грунтов в геотехнике и фундаментостроении» (Новочеркасск) в 2022 г.; на геофоруме

«Обмен опытом применения инновационных геосинтетических материалов на объектах транспортной инфраструктуры» Huesker, МАДИ в 2023 г.

По теме диссертации опубликовано 7 работ, из них: 2 работы в рецензируемых научных изданиях.

**Теоретическая и практическая значимость работы** заключается в следующем:

– теоретическая значимость в том, что выявлены закономерности изменения усилий и деформаций геосинтетического материала, а также осадок дорожного полотна, при образовании карстовых деформаций по типу «проседание»;

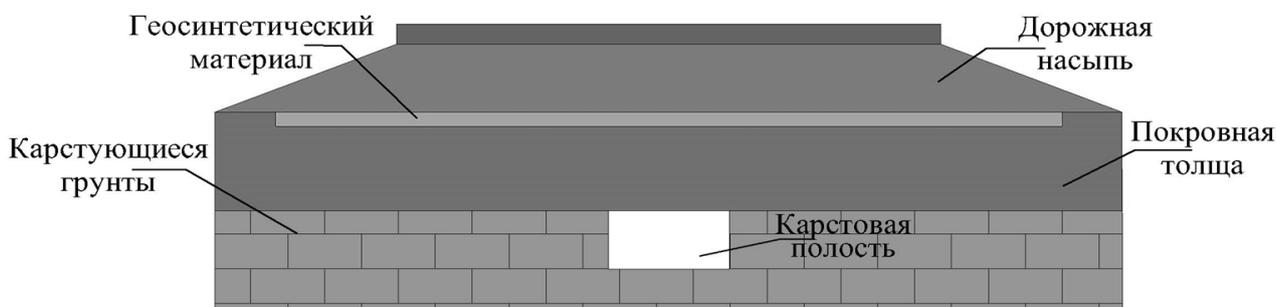
– практическая значимость состоит в разработке методики проектирования противокарстовой защиты дорожной насыпи с использованием геосинтетических материалов, учитывающей все варианты возможных карстовых деформаций. Разработанная методика ориентирована на применение в практике проектирования линейных сооружений (дорог) на закарстованных территориях.

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы, включающего 135 наименований. Работа изложена на 134 страницах машинописного текста, содержит 42 рисунка, 23 таблицы.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** приводится общая характеристика работы, дается краткое обоснование актуальности выбранной темы, сформулированы цели и задачи исследования.

**В первой главе** произведен анализ нормативной базы проектирования на карстоопасных участках, выявлена проблема отсутствия учёта особенностей проектирования линейных сооружений, проходящих по карстовым территориям. Анализируя зарубежную нормативную базу и опыт защиты авто мобильных дорог от карстовых деформаций, выделена технология армирования основания земляного полотна над существующими и потенциально возможными карстовыми полостями высокопрочными геосинтетическими материалами (рисунок 1).



**Рисунок 1 – Армированная дорожная насыпь над полостью в карстующихся грунтах**

Рассмотрены основные противокарстовые мероприятия. Описаны расчетные аналитические методики для проектирования противокарстовой защиты путем армирования геосинтетическими материалами и практика применения системы сигнализации карстовой опасности, установленной на геосинтетическом материале.

Обоснована необходимость выполнения расчетов не только на образование карстового провала прогнозируемого размера в основании дороги, но и на образование мульды проседания над растущей карстовой полостью в карстующихся грунтах. Актуальным является разработка аналитических методов определения усилий и деформаций геосинтетического материала в зависимости от диаметра полости, высоты дорожной насыпи и расстояния до кровли карстующихся грунтов.

Сформулированы основная цель и задачи исследований, включающих проведение и анализ лабораторных экспериментов, численное моделирование поведения армированного грунта, теоретические исследования.

**Во второй главе** представлены результаты лабораторных исследований взаимодействия геосинтетического материала с грунтом, проседающим над карстовой полостью.

Так как в условиях карстовых деформаций по типу «проседание» обрушение покровной толщи не происходит, геосинтетический материал воспринимает деформации совместно с грунтовым основанием насыпи, а относительные деформации геоматериала, взаимодействующего с грунтом, снижаются по сравнению с относительными деформациями геоматериала, испытанного в соответствии с ГОСТ 55030-2012 в разрывной машине.

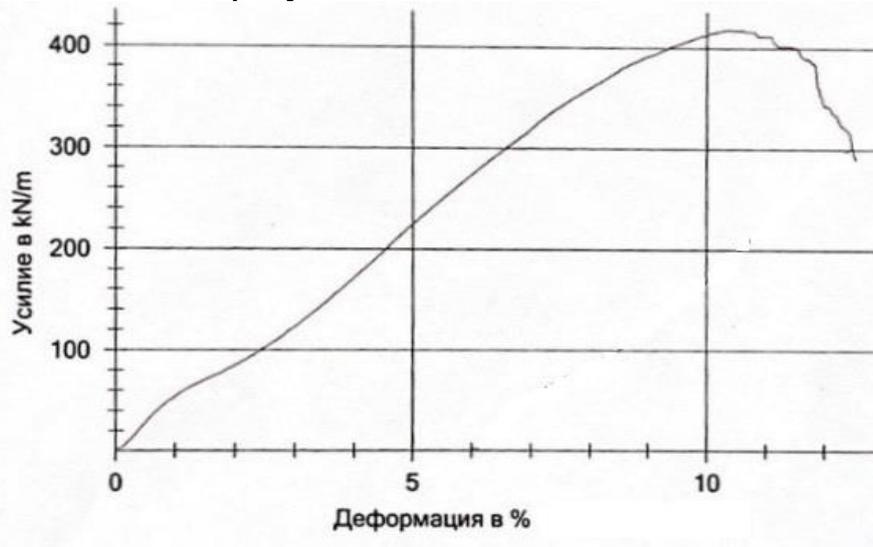
В процессе испытания геосинтетического материала в разрывной машине формируются данные, позволяющие выявить зависимость относительных деформаций от растягивающих усилий.

Сравнив экспериментальные данные относительных деформаций растяжения геоматериала в грунтовой лотке с экспериментальными данными, полученными на разрывной машине, определен коэффициент, корректирующий относительные деформации геоматериала, взаимодействующего с грунтом, в условиях карстовых деформаций по типу «проседание».

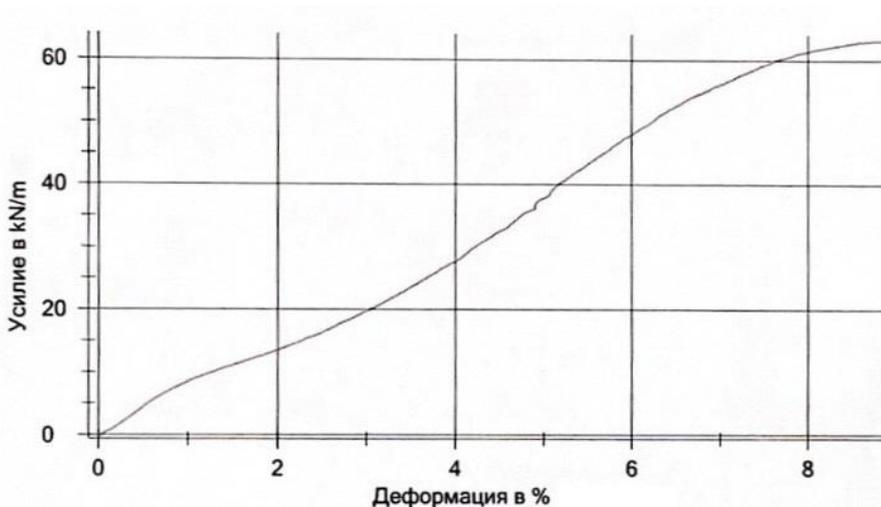
Относительные деформации растяжения геоматериала в грунтовой лотке получены по результатам анализа результатов физического эксперимента (экспериментальные исследования Пономарева А.Б. и Золотозубова Д.Г.). В лотке смоделирован участок дорожного полотна с полостью в основании и были измерены максимальные усилия и относительные деформации в продольном и поперечном направлении в геоматериале, взаимодействующем с грунтом.

По прочностным характеристикам геоматериал, испытанный в лотке с грунтом, аналогичен геосинтетическому материалу Huesker Stabilenka 400, прочность которого составляет в продольном направлении –  $F=400$  кН/м, а в поперечном направлении –  $F=50$  кН/м. Этот геоматериал был испытан в разрывной машине в соответствии с ГОСТ 55030-2012.

По результатам испытаний построены графики зависимости относительной деформации геосинтетического материала от растягивающих усилий, примеры графиков представлены на рисунках 2 и 3. Всего выполнено 6 испытаний.



**Рисунок 2 – Результаты испытания в разрывной машине. График зависимости растягивающих усилий от деформаций для геосинтетического материала Huesker Stabilenka 400 в продольном направлении**



**Рисунок 3 – Результаты испытания в разрывной машине. График зависимости растягивающих усилий от деформаций для геосинтетического материала Huesker Stabilenka 400 в поперечном направлении**

По результатам испытания в грунтовом лотке величины относительного удлинения армирующего элемента, взаимодействующего с грунтом, не превысили 1,4% в продольном и 3,1% в поперечном направлении, при этом растягивающие усилия составили 118 кН/м и 29 кН/м соответственно.

Результаты испытаний этого же геоматериала в разрывной машине и их статистическая обработка при усилиях растяжения в продольном и поперечном

направлении 118 кН/м и 29 кН/м представлены в Таблице 1. Так как коэффициент вариации  $C_p < 10 \%$ , разброс данных не существенный.

**Таблица 1 – Результаты испытания геоматериала в разрывной машине**

Прочность геоматериала, кН/м	Усилия в геоматериале, кН/м	Деформации при испытании в разрывной машине, $\varepsilon$ (%)						$\varepsilon_{\text{ср}}$ , (%)	Среднеквадратичное отклонение, $\sigma_p$	Коэффициент вариации, $C_p$ (%)
		Номер испытания								
		1	2	3	4	5	6			
400	118	2,7	2,8	2,9	2,8	2,8	3,1	2,85	0,14	4,84
50	29	4,2	4,3	4,4	4,2	4,3	4,4	4,3	0,09	2,08

Сравнение результатов этих 2-х испытаний (в грунтовом лотке и в разрывной машине) показывает следующее. При анализе относительных деформаций (удлинений) геосинтетического материала (Таблица 2) было установлено, что при растяжении геоматериала на разрывной машине, величина деформаций значительно больше, чем при испытании в грунтовом лотке. Это можно объяснить тем, что при испытании в грунтовом лотке появляется взаимодействие геоматериала с грунтом, то есть растягивающие усилия в геоматериале воспринимаются также и окружающим грунтовым массивом, что и снижает относительные деформации геоматериала.

**Таблица 2 – Относительные деформации геосинтетического материала**

Прочность геоматериала, кН/м	Растягивающие усилия в геоматериале, кН/м	Относительные деформации $\varepsilon$ при испытании в грунтовом лотке, %	Относительные деформации $\varepsilon_{\text{max}}$ при испытании в разрывной машине, %
400	118	1,4	2,85
50	29	3,1	4,3

По результатам сравнения экспериментальных данных определен коэффициент, корректирующий относительные деформации геоматериала, взаимодействующего с грунтом:

$$f_d = \frac{\varepsilon_{\text{max}}}{\varepsilon}, \quad (1)$$

где  $f_d$  - коэффициент, учитывающий работу геоматериала в грунтовой среде;

$\varepsilon_{\text{max}}$  - относительное удлинение геоматериала, определенное в разрывной машине;

$\varepsilon$  - относительное удлинение геоматериала при испытании в грунтовом лотке.

Расчет выполнен для продольного и поперечного направления геосинтетического материала:

$$f_{d \text{ продольное}} = \frac{2,85}{1,4} = 2,03, \quad (2)$$

$$f_{d \text{ поперечное}} = \frac{4,3}{3,1} = 1,38. \quad (3)$$

Этот коэффициент также может условно характеризовать увеличение жесткости геоматериала, взаимодействующего с грунтом, в условиях его деформирования в грунтовой среде ( $E_{A_{гр}} = f_d * E_A$ ). Для геоматериала типа Huesker Stablenka 400 он может быть принят равным 2, а для других типов геосинтетического материала он принимается на основании экспериментальных исследований.

**В третьей главе** анализируются результаты численных и теоретических исследований основания насыпи линейного сооружения, усиленного геосинтетическим материалом, при условии образования карстовой полости в карстующихся грунтах до критических размеров, при которых не происходит “всплытие” полости и образование провала в основании насыпи.

По результатам численных исследований разработан инженерный метод расчета усилий и относительных деформаций геосинтетического материала, а также размера мульды проседания в зависимости от диаметра полости в карстующихся грунтах, расстояния до кровли карстующихся грунтов, высоты насыпи и жесткости геоматериала. Данные результаты позволяют выполнить поверочные расчеты геосинтетического материала, выбранного из расчета на образование провала, а также могут быть использованы при установке на геоматериале тензодатчиков. В этом случае по результатам измерения относительных деформаций геосинтетического материала представляется возможность контроля динамики роста полости в карстующихся грунтах.

С помощью теоретических исследований решена задача определения максимального прогиба геоматериала и дорожного полотна над карстовой полостью при образовании мульды проседания, размер которой зависит от диаметра полости и расстояния до кровли карстующихся грунтов.

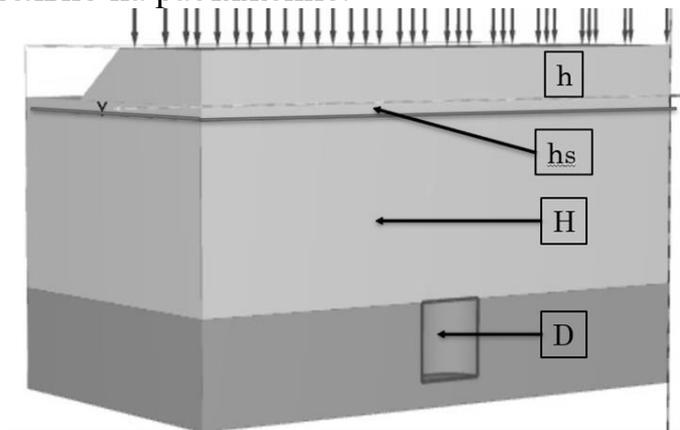
Методика проведения численных исследований включает следующее:

- выполнение верификации расчетной модели для проведения численных экспериментов;
- проведение полного факторного эксперимента для определения наиболее значимых варьируемых факторов, влияющих на усилия в геосинтетическом материале;
- анализ проектных решений и инженерно-геологических условий земляного полотна на карстоопасных участках линейного сооружения (на примере автомобильной дороги) и подготовка исходных данных для численных расчетов;
- выполнение численных расчетов, анализ результатов расчета и разработка аналитических инженерных методов расчета армированного основания.

Численные расчеты выполнялись в плоской и пространственной постановке с использованием верифицированных программных комплексов PLAXIS 2D и 3D. Расчетная модель PLAXIS 3D приведена на рисунке 5. Для моделирования поведения грунта использовалась упругопластическая модель Мора-Кулона.

Размеры расчетной области определены из условия отсутствия влияния его на результаты расчета, а узлы на вертикальных границах области закреплены по X и Y на горизонтальной границе - по Z. Как показывают исследования российских ученых подземных выработок, уже на расстоянии  $3r$  от границ выработки (где  $r$  – радиус выработки) наблюдается лишь незначительное изменение напряжений, которым можно пренебречь. Поэтому расчетная область в горизонтальном направлении может быть принята не менее  $4d$ , где  $d$  – расчетный диаметр карстовой полости в карстующихся грунтах.

Армирующий геосинтетический материал моделируется с помощью специального элемента с параметром нормальной (осевой) жесткости EA, работающий исключительно на растяжение.



**Рисунок 5 – Расчетная модель численных исследований**

Численное моделирование поэтапного образования полости и роста ее размеров выполнялись с использованием конечноэлементной модели грунтового массива путем исключения ослабленных зон (зон локальной потери устойчивости) вокруг карстовой полости при постоянном контроле условий равновесия свода.

Контроль равновесия системы ( $M_{stage}=1$ ) выполняется при каждом новом положении свода до тех пор, пока очередное исключение ослабленных зон не приведет к полной потере устойчивости системы ( $M_{stage}<1$ ), характеризующей начало прогрессирующего разрушения.

Расчет выполнялся в следующей последовательности:

- определяется исходное НДС грунтового массива;
- выполняется серия расчетов с поэтапным увеличением размеров карстовой полости в карстующихся грунтах, а в процессе выполнения расчетов контролируется рост «свода обрушения» над карстовой полостью.

Верификация расчетной модели выполнена путем сопоставления результатов численного моделирования с результатами испытаний геоматериала над полостью в лотке с грунтом. Описание этого эксперимента представлено в главе 2.

Расчеты выполняются только при условии «устойчивых сводов», т.е. «всплытие» карстовой полости не происходит при достижении полости

значительных размеров. Выполнение данного условия наблюдается для глинистых покровных толщ над карстующимися грунтами.

По результатам расчета определяются усилия в геосинтетическом материале при варьировании размера карстовой полости в карстующихся грунтах ( $D$ , рисунок 5), мощности покровной толщи ( $H$ , рисунок 5) и высоты насыпи ( $h$ , рисунок 5). Наибольшая значимость данных варьируемых факторов при определении усилий в геоматериале определена по результатам факторного эксперимента.

Характеристики варьируемых факторов, а также характеристики грунтов покровной толщи, карстующихся грунтов и насыпи линейного сооружения определены по результатам анализа проектных решений и инженерно-геологических условий строительства земляного полотна на карстоопасных участках автомобильной дороги М-12 «Москва – Нижний Новгород – Казань».

Принята следующая вариация исходных данных:

- высота автодорожной насыпи ( $h$ ) от 2 до 6 м;
- расстояние до кровли карстующихся грунтов ( $H$ ) - 5, 10, 15 и 20 м;
- диаметр полости в карстующихся грунтах ( $D$ ) от 2 до 6 метров;
- глубина заложения геоматериала ( $h_s$ ) – 1 м;
- жесткость геосинтетического материала  $E_A$  – 1700 кН/м.

Характеристики грунтов дорожной насыпи и основания представлена в таблице 3.

**Таблица 3 – Характеристики грунтов расчетной модели**

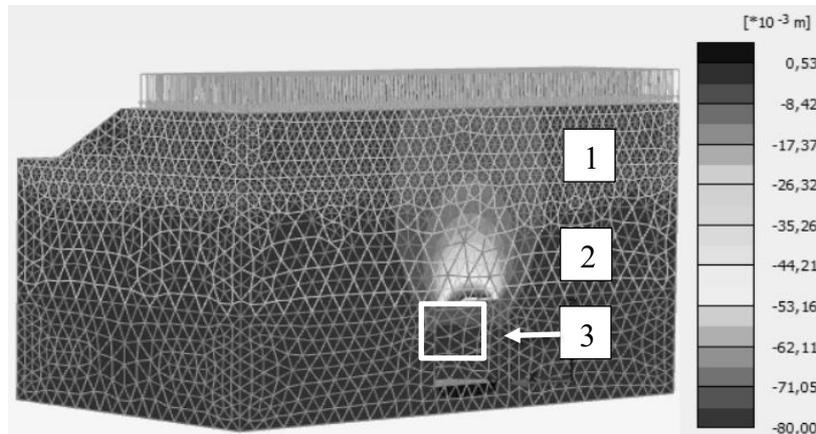
Параметр	Карстующиеся грунты	Покровная толща	Дорожная Насыпь
Наименование	Известняк	Суглинок	Песок
Удельный вес, кН/м <sup>3</sup>	18,9	19,0	18,0
Модуль деформации, кН/м <sup>2</sup>	120 000	20 000	28 000
Удельное сцепление, кН/м <sup>2</sup>	700	30	1
Угол внутреннего трения, °	30	17	28
Коэффициент Пуассона	0,29	0,35	0,30

По результатам расчета определялись также размеры мульды проседания основания и устойчивость откосов дорожной насыпи.

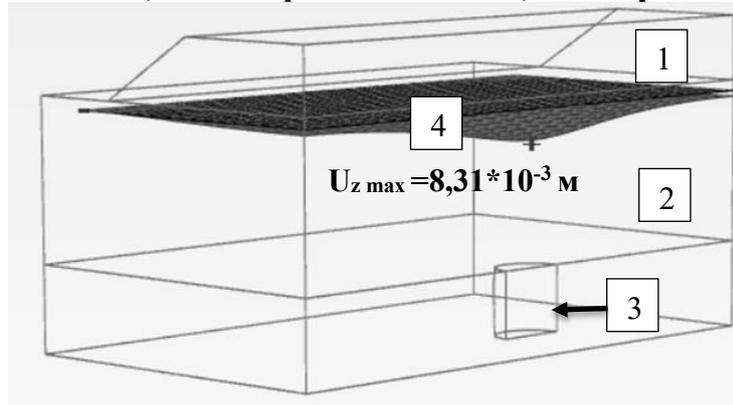
Всего произведено 60 расчетов в пространственной постановке и 18 расчетов в плоской постановке. По результатам расчетов в плоской постановке оценивалась динамика изменения напряженно – деформированного состояния армированного основания, а по результатам расчетов в пространственной постановке разработаны аналитические решения для определения усилий и деформаций в геосинтетическом материале при росте карстовой полости в карстующихся грунтах.

На рисунке 6 представлены вертикальные перемещения грунта покровной толщи и насыпи автомобильной дороги над карстовой полостью, а на рисунке 7 деформации геосинтетического материала, который воспринимает нагрузки от

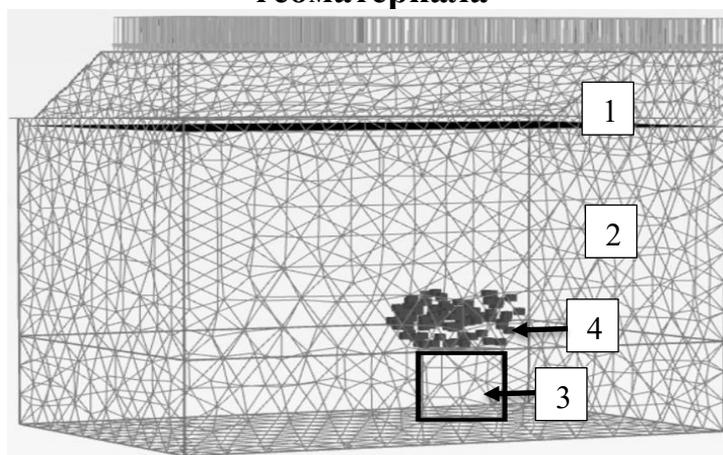
веса насыпи над полостью. На рисунке 8 показан свод в грунтах покровной толщи.



**Рисунок 6 – Вертикальные перемещения грунта покровной толщи и насыпи автомобильной дороги при образовании карстовой полости, где 1 – дорожная насыпь, 2 – покровная толща, 3 – карстовая полость**



**Рисунок 7 – Деформации геосинтетического материала при образовании карстовой полости, где 1 – дорожная насыпь, 2 – покровная толща, 3 – карстовая полость, 4 – эпюра вертикальных перемещений геоматериала**



**Рисунок 8 – Образование «свода обрушения» в грунтах покровной толщи при развитии карстовой полости в карстующихся грунтах, где 1 –**

**дорожная насыпь, 2 – покровная толща, 3 – карстовая полость, 4 – прогнозируемый свод обрушения, точки пластических деформаций**

Полученные результаты по всем моделям представлены в таблице 4. Графическая интерпретация результатов представлена на рисунке 9. В результате регрессионного анализа установлена связь между безразмерными параметрами  $\frac{N}{(EA)_{гр}}$  и  $\frac{D}{H}$ , где N – растягивающие усилия г.м. (кН/м),  $(EA)_{гр}$  – жёсткость геосинтетического материала взаимодействующего с грунтом, (кН/м); D – диаметр карстовой полости (м); H – мощность покровной толщи над карстующимися грунтами (м). Получены линейные зависимости вида  $y=ax+b$  (рисунок 9) с коэффициентом корреляции  $R^2 = 0,76$ .

Коэффициент «а» может быть принят постоянным и равным 0.0002, а коэффициент b непосредственно зависит от высоты автодорожной насыпи (h)

$$\frac{N}{(EA)_{гр}} = 0.0002 \frac{D}{H} + b. \quad (1)$$

Так как обрушение покровной толщи не происходит, геосинтетический материал воспринимает деформации совместно с грунтом основания насыпи, поэтому, значение параметра  $(EA)_{гр}$  в соответствии с исследованием, описанным в главе 2, принимается равный  $f_d (EA)$ , где EA – эксплуатационная жесткость геоматериала по ГОСТ 55030-2012.

$$\frac{N}{f_d EA} = (0.0002 \frac{D}{H} + b). \quad (2)$$

График зависимости коэффициента «b» от безразмерного параметра  $h_s/h$ , где  $h_s$  – глубина заложения геосинтетического материала (рисунок 5), представлен на рисунке 10.

**Таблица 4 – Результаты численного расчета растягивающих усилий**

Высота насыпи, м	Диаметр полости, м	Растягивающие усилия (кН/м) при мощности покровной толщи над карстовой полостью			
		5м	10м	15м	20м
2	2	0,932	0,488	0,399	0,315
	4	1,231	0,502	0,393	0,303
	6	1,625	0,581	0,372	0,244
3	2	0,692	0,737	0,584	0,468
	4	0,77	0,768	0,578	0,465
	6	1,207	0,863	0,572	0,454
4	2	0,714	0,803	0,862	0,586
	4	0,834	0,837	0,849	0,568
	6	1,39	0,965	0,841	0,527
5	2	0,931	1,083	0,916	0,753
	4	1,125	1,096	0,899	0,75
	6	2,01	1,258	0,872	0,683
6	2	0,495	1,263	1,297	0,983
	4	0,513	1,297	1,285	0,965
	6	0,795	1,542	1,27	0,902

Заменяя коэффициент  $b$  в формуле (2) функциональной зависимостью  $b=0,0001(h_s/h)^{-0,888}$ , получим зависимость растягивающих усилий в геосинтетическом материале от диаметра полости ( $D$ ) в карстующихся грунтах, мощности покровной толщи ( $H$ ), высоты автодорожной насыпи ( $h$ ), глубины заложения геоматериала ( $h_s$ ) и эксплуатационной жесткости геоматериала  $EA$

$$10^3 * N = f_d EA * (0.2 * \frac{D}{H} + 0,1 * (\frac{h_s}{h})^{-0,9}). \quad (3)$$

Используя формулу (3), получим зависимость диаметра полости от усилий в геоматериале

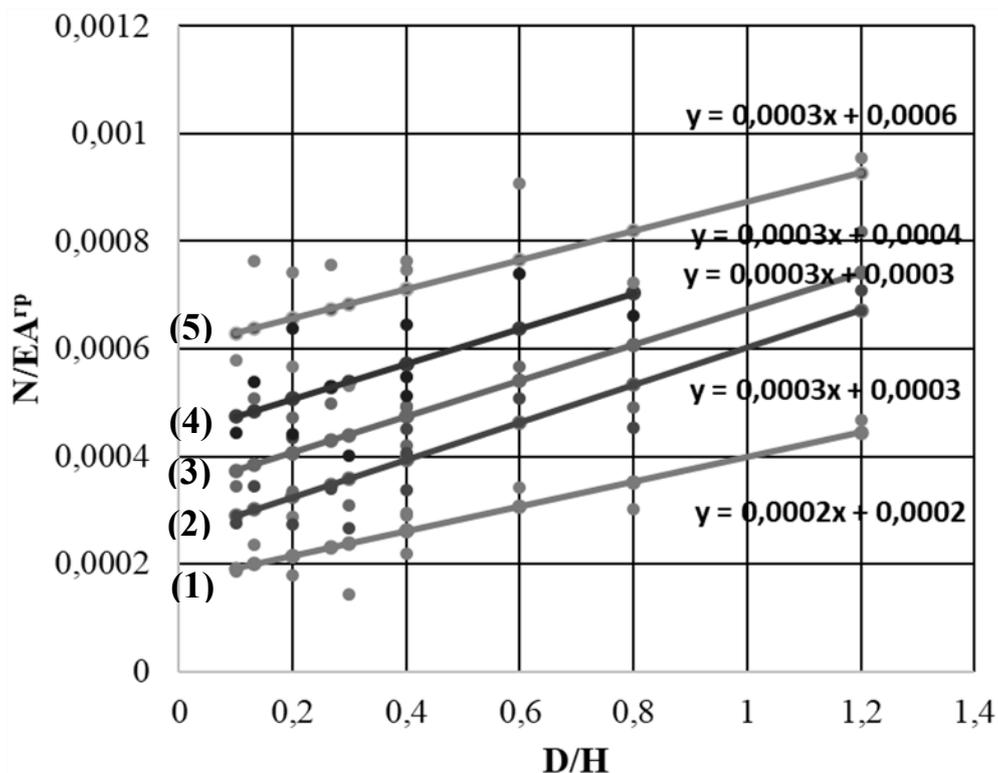
$$D = \frac{H}{0.2} * \left( \frac{N}{f_d EA} * 10^3 - 0,1 * (\frac{h_s}{h})^{-0,9} \right). \quad (4)$$

В соответствии с законом Гука относительные деформации геосинтетического материала ( $\epsilon$ ) определяются отношением  $\epsilon = \frac{N}{EA}$ , тогда после преобразования формулы (4) определим относительные деформации геоматериала

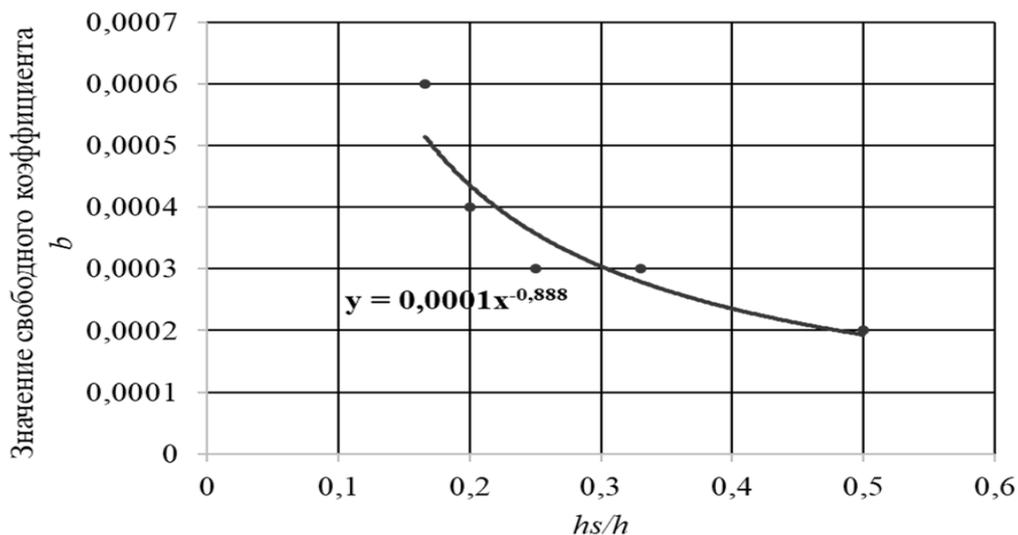
$$\epsilon = f_d * (0.2 * \frac{D}{H} + 0,1 * (\frac{h_s}{h})^{-0,9}) * 10^{-3} \quad (5)$$

и диаметр полости ( $D$ )

$$D = \frac{H}{0.2} * \left( \frac{\epsilon}{f_d} * 10^3 - 0,1 * (\frac{h_s}{h})^{-0,9} \right). \quad (6)$$

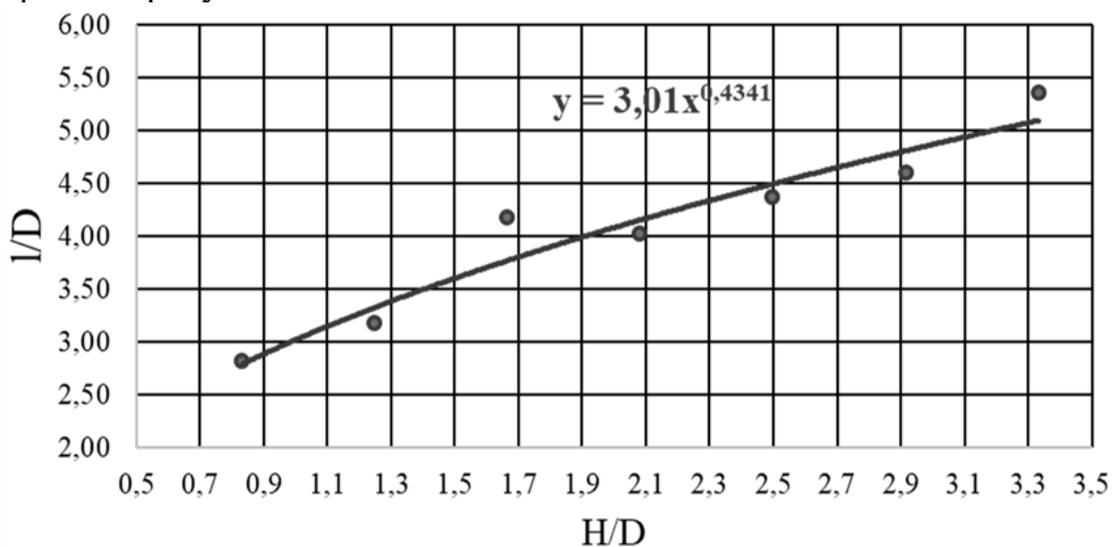


**Рисунок 9 – График зависимости усилий в геоматериале ( $N$ ) от жесткости геоматериала, взаимодействующего с грунтом ( $EA_{гр}$ ), диаметра полости  $D$  и мощности покровной толщи ( $H$ ) при высоте насыпи ( $h$ ): 2 м – (1), 3 м – (2), 4 м – (3), 5 м – (4), 6 м – (5)**



**Рисунок 10 – График зависимости коэффициента  $b$  от  $h_s/h$**

При проведении численного исследования так же определялся размер мульды проседания грунта основания насыпи в зависимости от мощности и модуля деформации грунта покровной толщи, высоты автодорожной насыпи, прочности геосинтетического материала. Результаты расчета представлены в виде графика на рисунке 11.



**Рисунок 11 – Зависимость размера мульды проседания от диаметра полости и толщины покровной толщи**

С помощью численного расчета и регрессионного анализа установлена связь между параметрами  $l$  и  $\frac{H}{D}$ , где  $l$  – размер мульды проседания, и получена степенная зависимость  $\frac{l}{D} = f\left(\frac{H}{D}\right)$  вида  $y=ax^n$  с коэффициентом корреляции  $R^2 = 0,84$

$$\frac{l}{D} = 3 * \left(\frac{H}{D}\right)^{0,43}. \quad (7)$$

Полученная формула (3) позволяет определить максимальные усилия, возникающие в геоматериале при росте полости в карстующихся грунтах до критических размеров, при которых не происходит “всплытие” полости под основание насыпи. Полученные формулы (5) и (6) позволяют также корректно

тарировать тензодатчики, установленные на геоматериал при заданных диаметрах карстового провала и по результатам измерений устанавливается начало процесса роста полости в карстующихся грунтах.

Полученная зависимость мульды проседания армированного основания над растущей карстовой полостью (7) используется в аналитическом расчете осадок дорожной насыпи (13).

Примеры расчетов противокарстовой защиты линейного сооружения (на примере автомобильной дороги) с использованием предложенных формул приведены в главе 4.

При стандартном расчете для проектирования противокарстовых мероприятий путем армирования основания геосинтетическим материалом, карстовый провал располагается в основании насыпи автомобильной дороги под проезжей частью и определяется относительное удлинение и растягивающие усилия в геоматериале, а также деформации дорожного полотна. Однако, возможен неблагоприятный вариант, когда карстовый провал (воронка) возникает в зоне откоса насыпи и поэтому не менее важным расчетным критерием защиты является устойчивость насыпи после образования карстовой воронки. Данный расчет не является обязательным в соответствии с действующими нормами и методиками. Но разрушение откосов вблизи карстовых воронок возможно, например такое разрушение зафиксировано на объекте «Автомобильная дорога Р-240 Уфа – Оренбург км 72 (Кальчировская гора)».

Для оценки влияния расчетных параметров карстовых деформаций на устойчивость откоса насыпи выполнены расчеты на основе численного моделирования напряженно-деформированного состояния основания с учетом армирующей прослойки основания насыпи из геосинтетического материала и проектных нагрузок с использованием верифицированного программного комплекса PLAXIS при условии образования карстового провала в основании дорожного полотна.

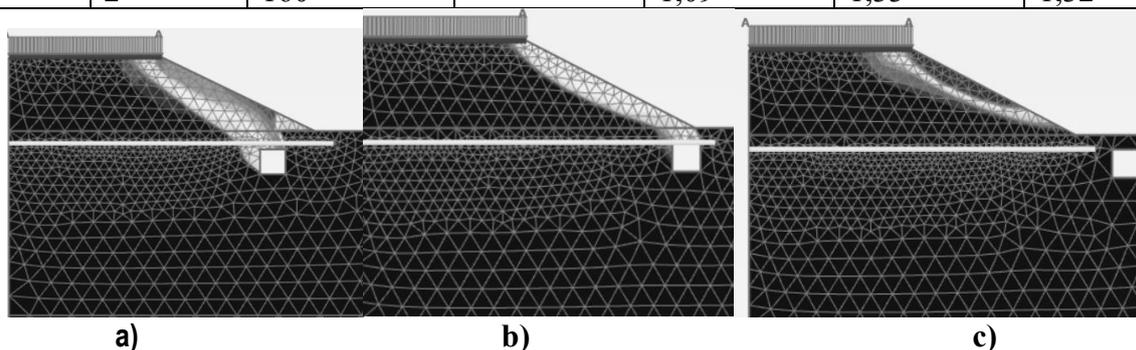
Условие достаточной устойчивости откосов насыпи при строительстве на специфических грунтах в соответствии с СП 34.13330.2021 п. 7.25 определяется ограничением величины коэффициента устойчивости ( $K_{уст} \geq 1.3$ ).

Коэффициент устойчивости откосов насыпи определяется соотношением сдвигающих и удерживающих сил по сдвиговой поверхности. По результатам численных расчетов установлено, что изменение формы сдвиговой поверхности при фиксированном диаметре провала под насыпью зависит от местоположения провала. Наиболее существенное снижение устойчивости (по сравнению с расчетами до образования провала) наблюдается для провала под откосом (рисунок 12).

Для подбора жесткости геосинтетического материала выполнены расчеты армированного дорожного полотна на образование карстового провала в основании под проезжей частью насыпи по существующим методикам.

**Таблица 5 – Значения коэффициента устойчивости насыпи**

Высота насыпи, м	Диаметр провала, м	Жесткость геоматериала, кН/м	Коэф. уст. насыпи до провала	Коэф. уст. провал под откосом, рис. 12 а)	Коэф. уст. провал в осн. откоса, рис. 12 б)	Коэф. уст. провал за осн. откоса, рис. 12 в)
4	1	60	1,31	1,28	1,29	1,3
	2	170		1,2	1,3	1,3
5	1	60	1,3	1,27	1,28	1,3
	2	170		1,22	1,25	1,29
6	1	60	1,35	1,29	1,32	1,35
	2	160		1,09	1,33	1,32



**Рисунок 12 – Поверхности сдвига при образовании карстового провала: а) провал под откосом; б) провал в основании откоса; в) провал за основанием откоса**

Результаты расчета устойчивости откоса насыпи автомобильной дороги (PLAXIS 2D), основание которой усилено геосинтетическим материалом (по существующим методикам), при образовании карстового провала размером 1-2м в основании откоса насыпи приведены в таблице 5.

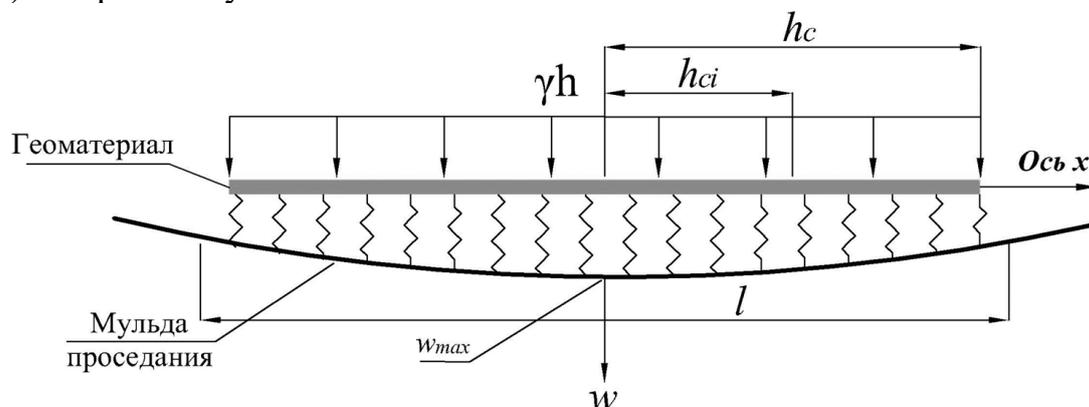
Анализ результатов, представленных в таблице 5, показывает, что при подборе геосинтетического материала в соответствии с существующими методиками требование устойчивости насыпи не соблюдается.

По результатам расчетов устойчивости откосов при образовании карстового провала под откосом в пространственной постановке (PLAXIS 3D) подтверждено, что при подборе геосинтетического материала только в соответствии с существующими методиками требование устойчивости насыпи не соблюдается. При этом увеличение прочности геоматериала не увеличивает устойчивость откосов, что может спровоцировать разрушение откосов дороги даже при условии армирования основания геосинтетическими материалами. Данные результаты обосновывают необходимость выполнения расчета устойчивости откосов дорожной насыпи, армированной геосинтетическим материалом, на образование карстового провала под откосом насыпи.

С целью оценки минимально необходимой зоны армирования основания насыпи, как меры противокарстовой защиты, решена задача определения максимальной осадки дорожной насыпи на основании, армированном геосинтетическим материалом, над карстовой полостью в карстующихся грунтах в зависимости от расстояния до кровли карстующихся грунтов (Н), диаметра

полости (D), высоты дорожной насыпи (h) и мульды проседания (l) Расчетная схема на рисунке 13.

В центре мульды (рисунок 13, x=0) осадка-максимальная, на краях мульды (x=l/2) она равны нулю.



**Рисунок 13 – Расчетная схема**

Насыпь, армированная геоматериалом, схематично может быть представлена как гибкая балка Эйлера-Бернулли на податливом основании (рисунок 13), а осадка балки может быть определена по результатам решения уравнения

$$E_2 I_2 \frac{d^4 w_2(x)}{dx^4} = \gamma h - k_2 w_2(x), \quad (10)$$

где,  $\gamma$  и  $h$  объемный вес и высота дорожной насыпи;  $E_2 I_2$  - изгибная жесткость балки (по предложению китайских ученых),  $k_2$ -коэффициент постели основания.

$$E_2 I_2 = \frac{h_c^3}{3} E_c + \sum_{i=1}^n E_g h_{g,i}^2, \quad (11)$$

где  $E_c$ - модуль деформации грунта насыпи;  $E_g$  -условный модуль деформации геоматериала на растяжение;  $h_c$ -расстояние от края геоматериала до центральной линии схемы.;  $h_{g,i}$  - расстояние от i-ого элемента до центральной линии схемы.

В результате решения уравнения (10) получим максимальную осадку  $w_2$  (X=0, рисунок 13), которая по аналогии со свободно опертой балкой с изгибной жесткостью  $E_2 I_2$  может быть представлена в виде

$$w_2 = \frac{\gamma h 5l^4}{384 E_2 I_2}, \quad (12)$$

где  $l$ -размер мульды проседания (рисунок 13).

Учитывая, что формула (12) соответствует цилиндрическому изгибу армированного основания над мульдой проседания, а изгиб армированного основания над мульдой проседания больше соответствует поперечному изгибу пластины, определен поправочный коэффициент К к формуле определения осадок (12), а максимальную осадку дорожной насыпи (X=0, рисунок 13) над мульдой проседания предложено определять по формуле:

$$w = \frac{\gamma h 5l^4}{384KE_2I_2} \quad (13)$$

Изгибная жесткость основания (11), армированного геосинтетиком, зависит от 2-х параметров: модуля деформации грунта основания и ширины армированного основания. Армирование основания на ширину менее мульды проседания существенно увеличивает максимальную осадку армированной дорожной насыпи.

Результаты, полученные с применением предложенных аналитических решений (3) и (13), сопоставлялись с результатами численных расчетов. Расхождение результатов не превысило 20%.

**В четвертом разделе** описана методика проектирования противокарстовой защиты автодорожной насыпи, основанная на исследовании, проведенном в диссертационной работе, а также применение этой методики при проектировании противокарстовой защиты дороги для закарстованных участков трассы М-12 «Москва – Нижний Новгород – Казань».

Методика проектирования противокарстовой защиты линейных сооружений с насыпью, армированной геосинтетическим материалом в основании насыпи, имеет следующие особенности:

- выбор метода противокарстовой защиты определяется в зависимости от наличия карстовой полости в карстующихся грунтах (на момент проектирования) и, если она и не обнаружена, то определяющим фактором является время развития полости до критических размеров (предшествующих началу разрушения свода над полостью), определяемое известными в геотехнике методами;

- если полость уже образовалась (на момент проектирования) или время развития полости до критических размеров меньше нормативного срока эксплуатации, основными методами противокарстовой защиты являются: заполнение (тампонаж) карстовых полостей, закрепление закарстованных пород и (или) вышележащих грунтов и т. д., предусмотренные нормами на проектирование;

- если время развития полости до критических размеров больше нормативного срока эксплуатации линейного сооружения, а карстующиеся грунты перекрыты покровной толщей из глинистых грунтов, выполняется следующее: аналитический расчет на образование карстового провала диаметром, прогнозируемым в отчете ИГИ, в основании насыпи линейного сооружения с использованием существующих методов расчета и подбор геосинтетического материала необходимой прочности; расчет критического размера полости в карстующихся грунтах, при котором полость не «всплывает» в основание насыпи; поверочный расчет подобранного геоматериала на образование полости критического размера в карстующихся грунтах с использованием формул (3) и (5) и при необходимости подбор геосинтетического материала большей прочности; расчет осадок насыпи (13) и определение ширины зоны укладки геоматериала из условия не превышения расчетной осадки, допускаемой для данного линейного сооружения;

- после подбора геосинтетического материала в соответствии с вышеизложенными требованиями проверяется требование устойчивости откосов дорожной насыпи на армированном основании и при необходимости назначаются дополнительные противокарстовые мероприятия;
- при установке тензодатчиков на геоматериал строится график зависимости диаметра полости от относительных деформаций геоматериала с использованием формулы (6).

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

1. По результатам анализа опыта проектирования и расчетов оснований линейных сооружений на закарстованных территориях установлено, что наиболее эффективным мероприятием противокарстовой защиты является укладка геосинтетического материала (геоматериала) в основание, при этом традиционно применяются аналитические расчетные методики, в соответствии с которыми расчет производится на этапе образования карстового провала (воронки) в основании насыпи, размер которого является основным расчетным параметром.

2. На основании анализа результатов исследования процессов карстообразования в основании зданий и сооружений установлено, что появлению карстового провала в основании сооружения предшествует рост карстовой полости в карстующихся грунтах и образование «мульды проседания» в основании сооружения, которая при условии покровной толщи из глин может достигать значительных размеров. Неучет этого фактора при проектировании противокарстовой защиты может привести к аварийной ситуации.

3. Для эффективной защиты от карстопроявлений в основании линейного сооружения путем укладки геосинтетических материалов выполнены лабораторные, численные и теоретические исследования и разработана методика расчета, в которой в качестве расчетного параметра используется и размер карстового провала в основании насыпи, и размер полости в карстующихся грунтах, перекрытых глинистой покровной толщиной.

4. По результатам лабораторных исследований даны рекомендации по учету особенностей взаимодействия геоматериала с грунтовой средой. Установлено, что относительные деформации геоматериала, определенные в разрывной машине (по ГОСТ 55030-2012), минимум в 2 раза меньше, чем при растяжении этого же материала в лотке с грунтом, что использовано при анализе результатов численных исследований.

5. По результатам численных и теоретических исследований армированной дорожной насыпи при образовании и росте карстовой полости в карстующихся грунтах:

- разработаны аналитические решения для определения усилий и относительных деформаций в геосинтетическом материале в зависимости от диаметра карстовой полости в карстующихся грунтах, мощности покровной толщи над карстующимися грунтами, высоты дорожной насыпи, жесткости геоматериала;

– установлено, что укладка геосинтетического материала в основании насыпи не исключает потерю устойчивости насыпи при образовании провала под откосом и сформулированы требования для расчета устойчивости откосов при образовании карстового провала;

– получено аналитическое решение для определения максимальной осадки основания дорожной насыпи, армированном геосинтетиком, над карстовой полостью в карстующихся грунтах в зависимости от расстояния до кровли карстующихся грунтов, диаметра полости и ширины зоны армирования.

Результаты, полученные с применением предложенных аналитических решений, сопоставлялись с результатами численных расчетов. Расхождение результатов не превысило 20%.

6. По результатам выполненных исследований разработана методика проектирования противокарстовой защиты дороги с использованием геосинтетических материалов, отличающиеся от нормативной тем, что в качестве расчетного критерия принят не только расчетный диаметр карстового провала под дорожной насыпью, а также и максимальный расчетный диаметр карстовой полости в карстующихся грунтах. По результатам аналитических расчетов разработаны практические предложения по выбору геоматериала в зависимости от прогнозируемого диаметра карстового провала в основании дорожной насыпи и высоты дорожной насыпи.

7. В соответствии с предложенной методикой выполнены расчеты противокарстовой защиты автомобильной дороги М-12 «Москва – Нижний Новгород – Казань», а также разработаны предложения по установке тензодатчиков на геоматериал для контроля динамики роста полости в карстующихся грунтах.

8. Перспективными задачами развития поставленной темы является выполнение модельных испытаний оснований дорожных насыпей, армированных геосинтетическими материалами с установкой тензодатчиков на геоматериал с карстовыми деформациями по типу «провал» и «проседание», а также совершенствование численных и аналитических методов расчета усилий, деформаций геоматериала и осадок дорожного полотна.

## **СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

1. Готман, Н. З. Особенности расчета противокарстовой защиты автомобильных дорог с использованием геосинтетических материалов / Н. З. Готман, Ю. И. Пантелеев // ДОРОГИ И МОСТЫ. – 2021. – № 1(45). – С. 29-46.

2. Готман, Н. З. Проектирование противокарстовой защиты автомобильных дорог с использованием геосинтетических материалов и системы сигнализации / Н. З. Готман, Ю. И. Пантелеев // Construction and Geotechnics. – 2022. – № 3. – С. 5-14.

3. Пантелеев, Ю. И. Исследование НДС геосинтетических материалов, армирующих основание автомобильной дороги, над карстовой полостью / Ю. И. Пантелеев // Передовые инновационные разработки. Перспективы и опыт

использования, проблемы внедрения в производство. Сборник научных статей по итогам девятой международной научной конференции, г. Казань, 31 октября 2019 года. – 2019. – С. 142-144.

4. Готман, Н. З. Применение геосинтетических материалов как мера противокарстовой защиты / Н. З. Готман, Ю. И. Пантелеев // Аспирантские чтения. Сборник научных статей аспирантов ИПСС РУТ (МИИТ). Выпуск 3. Под общей редакцией Т.В. Шепитько. – 2020. – С. 57-59.

5. Готман, Н. З. Оценка влияния карстовой полости в основании автодорожной насыпи на усилия в геосинтетическом материале / Н. З. Готман, Ю. И. Пантелеев // Аспирантские чтения. Сборник научных статей аспирантов РУТ (МИИТ). Выпуск 4. Под общей редакцией Т.В. Шепитько. – 2021. – С. 188-193.

6. Готман, Н. З. Особенности расчета противокарстовой защиты автомобильных дорог с использованием геосинтетических материалов / Н. З. Готман, Ю. И. Пантелеев // Проектирование автомобильных дорог : Сборник докладов 80-й Международной научно-методической и научно-исследовательской конференции МАДИ, Москва, 24–28 января 2022 года. – 2022. – С. 98-108.

7. Готман, Н. З. Расчетные критерии при проектировании противокарстовой защиты автомобильных дорог с использованием геосинтетических материалов / Н. З. Готман, Ю. И. Пантелеев // Механика грунтов в геотехнике и фундаментостроении: материалы научно-технической конференции, г. Новочеркасск, 28–30 сентября 2022 года. – 2022. – С. 153-161.

Пантелеев Юрий Игоревич

## **ПРОТИВОКАРСТОВАЯ ЗАЩИТА ЛИНЕЙНЫХ СООРУЖЕНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГЕОСИНТЕТИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ**

2.1.2. Основания и фундаменты, подземные сооружения

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

---

Подписано в печать: 08.10.2025 г.

Формат 60x90/16

Объем 1,5 п.л.

Заказ №

Тираж 80 экз.

---

127994, Россия, г. Москва, ул. Образцова, д. 9, стр. 9