

На правах рукописи



ЛЕСНИЦКИЙ ВИТАЛИЙ СЕРГЕЕВИЧ

**ПРИМЕНЕНИЕ ПОЛИАКРИЛАМИДНЫХ БУРОВЫХ РАСТВОРОВ ПРИ
УСТРОЙСТВЕ БАРЕТТ В ПЕСЧАНЫХ ГРУНТАХ**

Специальность 2.1.2 – Основания и фундаменты, подземные сооружения

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва -2024

Работа выполнена в Акционерном Обществе «Научно-исследовательский центр «Строительство», Научно-исследовательский, проектно-изыскательский и конструкторско-технологический институт Оснований и подземных сооружений им. Н.М. Герсеванова» (АО «НИЦ Строительство» - НИИОСП им. Н.М. Герсеванова).

Научный руководитель: **Доктор технических наук, доцент**
Шулятьев Олег Александрович

Официальные оппоненты: **Знаменский Владимир Валерианович**
доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский
Московский государственный строительный университет»
(НИУ МГСУ),
профессор кафедры «Механика грунтов и геотехника»
Осокин Анатолий Иванович
кандидат технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архи-
тектурно-строительный университет» (СПбГАСУ),
заведующий кафедры «Геотехника»

Ведущая организация ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный
архитектурно-строительный университет»
(НГАСУ (Сибстрин))

Защита состоится «10» октября 2024 года в 11:00 часов на заседании диссертационного совета 54.1.002.01, созданного на базе АО «НИЦ «Строительство», по адресу: 109428, г.Москва, ул. 2-я Институтская, д. 6, корпус 5 (конференц-зал НИИЖБ им. А.А. Гвоздева).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке по адресу: 109428, г. Москва, ул. 2-я Институтская, д. 6 и на сайте www.cstroy.ru.

Автореферат разослан «__» _____ 2024 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Шулятьев Станислав Олегович

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования

Устройство строительных конструкций в грунте является широко распространенной практикой. Таким образом выполняются элементы фундаментных конструкций (сваи, баретты), ограждение котлованов (стена в грунте) и противодиффузионные завесы. Разработку грунта для данных конструкций выполняют с одновременным заполнением траншеи буровым раствором, который обеспечивает устойчивость стенок траншеи, а затем замещается бетоном или специальным раствором.

Наиболее часто в качестве буровых растворов используются глинистые суспензии. Однако наряду с несомненными достоинствами глинистых суспензий, такими как возможность применения в большинстве видов грунтов, относительная дешевизна и др., имеются и серьезные недостатки, к которым относятся: сложность подготовки и регенерации суспензий, снижение сопротивления по грунтовой поверхности, а также сложность утилизации.

Поиск альтернативного решения привел исследователей к применению вначале полимерных добавок к глинистым суспензиям, улучшающих их свойства, а затем — и к полной его замене на полимерные растворы. Одним из наиболее перспективных материалов в этом направлении являются высокомолекулярные соединения на основе полиакриламида.

Степень разработанности темы исследований

Вопрос взаимодействия свай и баретт с грунтом исследовали J. B. Burland, J. Haninsch, T. H. Hanna, R. Katzenbach, A. Kedzi, A. Mandolini, N. Morgenstern, H. Muller-Kirchenbauer, J. Nash, Gk. Jones, A. Piaskowski, H. G. Polous., M. F. Randolph, G. Russo, G. Schneebeil, C. Viggani, T. Whitaker, А. А. Бартоломей, Б. В. Бахолдин, С. Г. Безволев, В. Г. Березанцев, И. А. Боков, В. Н. Голубков, А. Л. Готман, Н. З. Готман, А. А. Григорян, Е. Э. Девальтовский, А. М. Дзагов, Н. М. Дорошкевич, В. В. Знаменский, В. А. Ильичев, И. В. Колыбин, А. А. Луга, Л. В. Нуждин, В. М. Мамонов, Р. А. Мангушев, А. И. Полищук, А. Б. Пономорёв, Я. А. Пронозин, Д. Е. Разводовский, В. В. Сидоров, А. З. Тер-Мартirosян, З. Г. Тер-Мартirosян, В. Г. Федоровский, П. И. Ястребов.

Исследованиями возможности использования полимерных буровых растворов в строительстве занимались в основном С. Lam, S. A. Jefferis, H. Lesemann, R. Verst, M. Larisch, Б. М. Гуменский, Ю. Н. Литов.. Их исследования в основном посвящены технологическим аспектам использования растворов, таким как скорость подготовки к работе, возможность использования с насосным оборудованием, стабильность и экологичность растворов.

По накопленному опыту использования полимерных растворов отмечается высокая стабильность физико-химических свойств в течение многих месяцев, отсутствие тиксотропных свойств, малый расход сухого вещества, малое время приготовления и легкость утилизации.

При этом исследований, оценивающих взаимодействие растворов с грунтами и влияния растворов на несущую способность будущих конструкций опубликовано крайне мало. При этом большинство исследователей ограничивают возможность использования данных растворов в хорошо проницаемых грунтах из-за возможности их фильтрации в массив грунта.

Цель работы — разработка методики оценки устойчивости стенок траншей, заполненных полиакриламидным буровым раствором, и рекомендаций по определению несущей способности баретт, изготовленных в данных траншеях.

Задачи исследований

1. Выполнить анализ опыта использования полиакриламидных растворов (далее — полимерных) при устройстве фундаментов глубокого заложения.
2. Установить факторы, определяющие устойчивость стенок траншей в песчаных грунтах при использовании полимерного раствора.
3. Определить коэффициенты фильтрации полимерных растворов в песчаных грунтах.
4. Разработать методику расчета устойчивости стенок траншей при использовании полимерных растворов.
5. В полевых и лабораторных условиях исследовать влияние полимерных растворов на сопротивление грунта на боковой поверхности бетонных конструкций.
6. Разработать рекомендации по определению несущей способности баретт, выполненных под защитой полимерного раствора в песчаных грунтах.

Объект исследования — грунтовое основание, взаимодействующее с полимерным раствором в процессе устройства баретты.

Предмет исследования — устойчивость стенок траншей и несущая способность фундаментных конструкций, выполненных с использованием полимерных растворов.

Научная новизна

1. Предложена методика определения устойчивости стенок траншей при использовании полимерных растворов.
2. Установлены факторы, определяющие устойчивость стенок траншеи в песчаных грунтах при заполнении траншеи полимерным раствором, к которым относятся: геометрические размеры траншеи, прочностные свойства грунта, нагрузки, действующие на поверхность грунта, уровень подземных вод, уровень раствора в

траншее и глубина фильтрации раствора в массив грунта за время существования траншеи.

3. Разработаны рекомендации по назначению сопротивления грунта на боковой поверхности баретт в песчаном грунте, выполненных под защитой полимерного раствора.

Теоретическая значимость

1. Установлено, что глубина фильтрации полимерного раствора из траншеи в окружающий массив грунта определяет общую устойчивость стенок траншеи и локальную устойчивость отдельных частиц на ее поверхности.
2. Получена зависимость коэффициента фильтрации полимерного раствора в песчаном грунте от его вязкости и проницаемости грунта.
3. Установлено отсутствие негативного влияния полимерного раствора на сдвиговую прочность песчаного грунта и на сопротивление сдвигу образцов песчаного грунта по бетонной поверхности.

Практическая значимость

1. Адаптирована математическая модель нестационарной фильтрации воды к задаче по определению глубины фильтрации полимерного раствора через стенки траншеи при изготовлении баретт.
2. Экспериментально подтверждено повышение несущей способности буровых свай, изготовленных с использованием полимерного бурового раствора в сравнении со сваями, изготовленными под бентонитовой суспензией в песчаных грунтах.
3. Установлен коэффициент условия работы по боковой поверхности свай и баретт в песчаных грунтах при бетонировании под полимерным раствором.

Методология и методы исследований

В диссертационной работе применялись теоретические и экспериментальные методы исследования. Экспериментальные лабораторные исследования грунтов и опытные испытания свай выполнялись в соответствии с требованиями действующих нормативных документов. Эксперименты в лабораторных лотках организованы по условию простого подобия. Численные исследования осуществлялись в сертифицированном программном комплексе Plaxis 2D.

Личный вклад автора:

- выполнение обзора и анализ опыта использования полимерных растворов при устройстве фундаментов глубокого заложения;
- постановка цели и задач исследования;
- разработка программы и проведение экспериментальных исследований по обеспечению устойчивости стенок траншей в песчаных грунтах при использовании полимерного раствора;

- определение коэффициентов фильтрации полимерных растворов в песчаных грунтах;
- разработка программы и проведение экспериментальных исследований по нестационарной фильтрации полимерных растворов в песчаных грунтах;
- численное моделирование процесса фильтрации растворов в песчаном грунте;
- разработка программы и проведение экспериментальных исследований по влиянию полимерных растворов на сопротивление грунта на боковой поверхности бетонных конструкций;
- разработка методики расчета устойчивости стенок траншей при использовании полимерных растворов;
- разработка рекомендаций по определению несущей способности баретт, выполненных под защитой полимерного раствора в песчаных грунтах;
- подготовка и написание публикаций по выполненной работе.

На защиту выносятся

1. Зависимость общей устойчивости стенок траншеи и локальной устойчивости отдельных частиц на ее поверхности от глубины фильтрации раствора за время существования траншеи.
2. Методика оценки устойчивости стенок траншеи, заполненной полимерным раствором.
3. Установленный коэффициент условия работы по боковой поверхности свай и баретт в песчаных грунтах при бетонировании под полимерным раствором.
4. Рекомендации по определению несущей способности свай на боковой поверхности баретт при использовании полимерного бурового раствора.

Степень достоверности результатов

Достоверность результатов исследований обеспечена:

- применением стандартных и апробированных методов определения прочностных свойств грунта и фильтрационных его характеристик;
- применением классических методов расчета механики грунтов;
- применением сертифицированного геотехнического программного комплекса при выполнении численных расчетов;
- сопоставлением результатов лабораторных испытаний с результатами натурного эксперимента и результатами математического моделирования.

Апробация работы

Основные результаты исследований докладывались и обсуждались на конференциях: II Всероссийская конференция с международным участием «Фундаменты глубокого заложения и геотехнические проблемы территорий» (Пермь, 2021 год); Международная научно-техническая

конференция по геотехнике «Современные теоретические и практические вопросы геотехники: новые материалы, конструкции, технологии и методики расчетов» (GFAC, 2021 год);
X Международный форум «Строительный форум 100+», г. Екатеринбург, 2022 год;
VIII Международный форум «Строительный форум 100+», г. Екатеринбург, 2020 год;
V Международный форум «Строительный форум 100+», г. Екатеринбург, 2018 год.

Внедрение результатов исследования

Результаты исследований были учтены при разработке следующих нормативных документов:

— СП 45.13330.2017 Земляные сооружения, основания и фундаменты. П.14 Сооружения, возводимые способом «стена в грунте».

— СП 412.1325800.2018. Конструкции фундаментов высотных зданий и сооружений. Правила производства работ. 5 Требования к используемым материалам. 5.1 Требования к бентонитовому и полимерному растворам.

Публикации

По материалам выполненной работы опубликовано 4 работы, из них 2 статьи в журналах, включенных в перечень рецензируемых научных изданий по списку ВАК РФ (3,01 печатных листа, из них 2,2 выполнены автором) и 1 публикация в сборнике трудов конференций. Общий объем публикаций 5,09 печатных листа, из них лично автором выполнены 2,80 печатных листа.

Соответствие паспорту специальности

Согласно сформулированной цели работы, её научной новизны, установленной теоретической и практической значимости диссертация соответствует паспорту специальности 2.1.2. Основания и фундаменты, подземные сооружения по пункту 3 «Разработка новых методов расчёта и моделирования высокоэффективных конструкций, способов и технологий устройства подземных сооружений промышленного и гражданского назначения», пункту 8 «Разработка новых методов прогноза, расчёта, испытаний, принципов конструирования и создания высокоэффективных технологий устройства подпорных и противодиффузионных конструкций, анкеров и распорных систем, дренажных систем, водопонижения и гидроизоляции для фундаментостроения и подземного строительства».

Структура и объем работы

Диссертационная работа состоит из введения, 4 разделов, заключения, списка литературы, включающего 110 наименований, в том числе 52 на иностранном языке (на английском — 49, на немецком — 2, на французском — 1). Полный объем диссертации — 131 страница. Диссертация содержит 62 рисунка и 25 таблиц.

Основное содержание работы

Во введении обоснована актуальность темы, описаны методология и методы исследования, научная новизна, теоретическая и практическая значимости работы.

В первой главе проведен анализ технической литературы по применению полиакриламидных буровых растворов в строительстве. Приведены данные о химических и физических свойствах водных растворов полиакриламида, методы оценки устойчивости стенок траншей и используемые подходы к исследованию прочности контакта «конструкция – грунт».

В результате обзора состояния исследования отмечено, что наибольшее количество работ посвящено технологическим аспектам использования полиакриламидных растворов (подготовка, взаимодействие с землеройным и вспомогательным оборудованием, утилизация и т. п). Согласно которым для данных растворов характерна высокая стабильность физико-химических свойств в течение многих месяцев, отсутствие тиксотропных свойств, для их приготовления требуется меньше сухого вещества в сравнении с бентонитовой суспензией, малое время приготовления и легкость утилизации.

При этом вопрос взаимодействия полимерных растворов с грунтами исследован в недостаточной мере. Так, например, известно, что полимерные растворы обладают способностью фильтроваться через проницаемые грунты, но процесс этот исследован крайне слабо, из-за чего чаще всего область применения ограничивают слабопроницаемыми грунтами. Необходимо оценить возможность использования растворов в хорошо проницаемых грунтах, например, в песках.

Опыт использования полимерных буровых растворов показывает, что несущая способность свай, выполненных под защитой полимерного раствора, зачастую оказывается выше, чем у аналогичных свай, изготовленных под защитой глинистой суспензией. Однако вопрос влияния полимерных буровых растворов на несущую способность свай и баретт не проработан в должной мере и требует дальнейшего исследования. Необходимо оценить влияние растворов на механические свойства грунтов и на несущую способность выполняемых конструкций.

Во второй главе представлены результаты исследования возможности использования полимерных растворов для обеспечения устойчивости стенок в песчаных грунтах. В качестве образцов грунта использовались пески крупные однородные и пески средние однородные, которые укладывались в лоток с плотностью.

Для проведения исследования взаимодействия полимерных растворов с песчаными грунтами были отобраны материалы от ведущих международных компаний Bauer, PDSCo. Inc и отечественные материалы от ТД «Полифлок», г. Ленинск-Кузнецкий. Эксперимент проводился в

специально изготовленном стеклянном лотке с размерами 300x386x492 (ДxШxВ). Лоток разделен на 2 части подвижной перегородкой. В левую часть лотка укладывался грунт, в правую заливался полимерный раствор, после чего перегородка извлекалась.

Установлено, что сразу после подъема перегородки полимерный раствор начинает проникать в песчаный грунт, формируя область замачивания. Процесс развивается во времени, и при достижении областью замачивания критического размера происходит обрушение вертикальной стенки грунта. Перед обрушением вертикальной стенки грунта наблюдается процесс «осыпания» отдельных частиц грунта с вертикальной поверхности. Хронологическое развитие описанного процесса приведено на Рисунке 1.

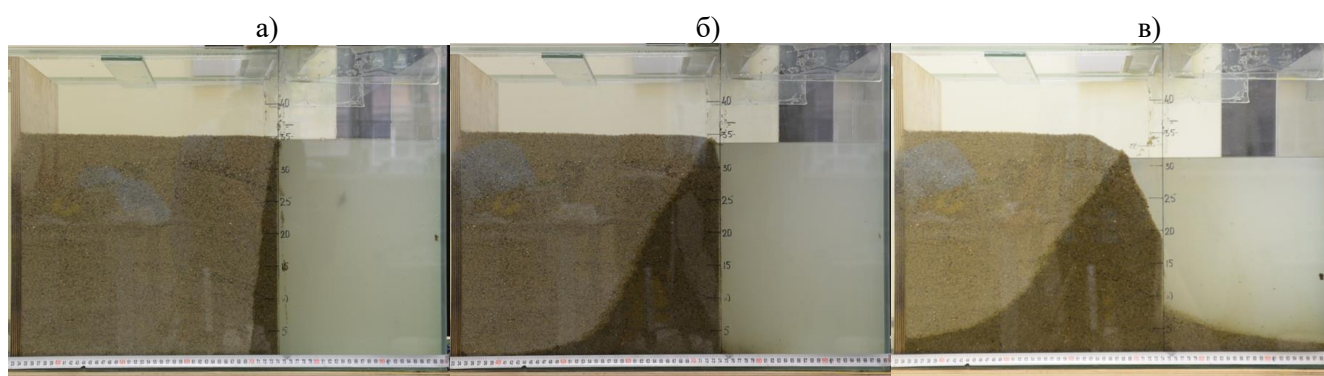


Рисунок 1 — Развитие процесса потери устойчивости вертикальной стенки грунта при взаимодействии с полимерным раствором:

а) начальная стадия фильтрации раствора в грунт — стенка устойчива; б) развитие области замачивания — начало процесса «осыпания» отдельных частиц; в) обрушение стенки грунта

С физической точки зрения объяснение процессов, наблюдаемых в эксперименте, можно представить в следующем виде (Рисунок 2). Удерживает частицы грунта от падения сила трения T между частицей и вертикальным массивом грунта, возникающая в результате гидродинамического давления раствора N .

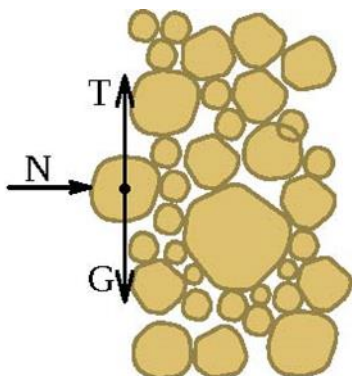


Рисунок 2 — Силы, действующие на частицы грунта вертикальной стенки траншеи

Сдвигает частицу грунта вниз сила G собственного веса с учетом взвешивающего действия раствора. В этом случае устойчивость частиц грунта будет обеспечена, если будет выполняться условие:

$$T = N \operatorname{tg} \phi \geq G ,$$

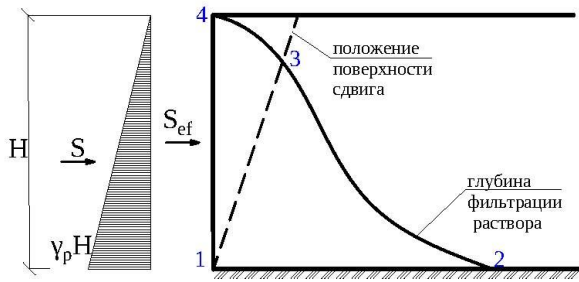


Рисунок 4 — Расчетная схема определения коэффициента рассеивания давления раствора (A — общая площадь фильтрации раствора [1, 2, 3, 4]; A_1 — площадь фильтрации внутри призмы обрушения [1, 3, 4])

В результате фильтрации раствора он проникает глубже поверхности сдвига (Рисунок 4), и часть его давления будет распространяться на несмещаемый объем грунта. Принимая линейное распределение давления по глубине фильтрации, значение силы S_{ef} , удерживающей призму обрушения, может быть определено для плоской задачи следующим образом:

$$S_{ef} = \frac{A_1}{A} S = k_n S, \quad (4)$$

где, $S = L \cdot H \cdot \gamma_p$ — сила от гидростатического

давления раствора в траншее, кН; $k_n = \frac{A_1}{A}$ — коэффициент рассеивания давления раствора. Тогда условие устойчивости призмы грунта может быть записано в следующем виде

$$S_{ef} = \frac{A_1}{A} S = k_n S > W \quad (5)$$

где W — горизонтальная составляющая сдвигающей силы от собственного веса грунта.

Уравнение 5 позволяет объяснить наблюдаемую в эксперименте потерю устойчивости стенки грунта. В начальной стадии глубина фильтрации раствора незначительна и находится внутри призмы обрушения, и вся сила от давления раствора приложена к ней и поддерживает ее от обрушения; с течением времени раствор проникает глубже поверхности сдвига и часть давления начинает действовать на несмещаемый объем грунта. В результате доля давления, удерживающая призму обрушения, сокращается. При дальнейшем увеличении глубины фильтрации происходит обрушение вертикальной стенки.

Таким образом, и общая устойчивость стенок грунта, и устойчивость отдельных частиц на вертикальной поверхности обеспечивается гидродинамическим давлением фильтрующегося раствора и ключевым фактором оценки устойчивости при использовании полимерного раствора становится прогноз глубины его фильтрации во времени.

В лабораторных условиях были выполнены определения коэффициентов фильтрации полимерных растворов в образцах песчаного грунта. В качестве грунта использовались пески средней крупности и крупные из которых готовились образцы плотного и рыхлого сложения. В качестве раствора был использован анионоактивный полиакриламид со степенью гидролиза 20 % в концентрациях 2, 4 и 6 г/л и вода. Вязкость растворов и воды определены в капиллярном вискозиметре по ГОСТ 10028–81, в воронке ВБР-2 и в воронке Марша (Таблица 1) Фильтрация

выполнялась при температуре 20 ± 2 °С. Полученные значения коэффициентов фильтрации приведены в Таблице 2.

Таблица 1 — Вязкость и концентрация растворов

Наименование жидкости	Кинематическая вязкость по ГОСТ 10028–81 в приборе ВПЖ-1 [мм ² /с]	Условная вязкость в ВБР-2 [с]	Условная вязкость в воронке Марша [с]
Вода	1,0	15	26
раствор концентрация 2 г/л	35,7	28,3	51,4
тоже 4 г/л	182,4	52,1	94,4
тоже 6 г/л	517,8	70,0	122

Таблица 2 — Результаты определения коэффициентов фильтрации

Наименование жидкости	Значение коэффициента фильтрации для грунтов, м/сут			
	Песок ср. крупности		Песок крупный	
	рыхлый $\rho = 1,59$ г/см ³	плотный $\rho = 1,86$ г/см ³	рыхлый $\rho = 1,60$ г/см ³	плотный $\rho = 1,83$ г/см ³
Вода	16,5	10,5	69,2	23,1
раствор концентрация 2 г/л	0,418	0,270	1,78	0,592
тоже 4 г/л	0,061	0,051	0,295	0,127
тоже 6 г/л	0,035	0,021	0,135	0,040

Анализируя полученные данные, отмечено, что фиксируемое снижение коэффициентов фильтрации соответствует закону фильтрации Дарси для вязких жидкостей, согласно которому коэффициент фильтрации вязкой жидкости в грунте определяется кинематической вязкостью жидкости и проницаемостью грунта:

$$k = \frac{k_{п}\gamma}{\mu} = \frac{k_{п}g}{\nu}$$

где $k_{п}$ — коэффициент проницаемости грунта, м²; ν — кинематическая вязкость жидкости, мм²/с; g — ускорение свободного падения, м/с². Определив проницаемость грунта через коэффициент фильтрации воды и ее кинематическую вязкость, коэффициент фильтрации раствора в грунте может быть определён следующим образом:

$$k_p = \frac{\nu_B}{\nu_p} k_B \quad (6)$$

где k_B — коэффициент фильтрации воды в грунте, м/сут; ν_B — кинематическая вязкость воды, мм²/с; ν_p — кинематическая вязкость раствора, мм²/с. На Рисунке 5 приведены результаты лабораторного определения коэффициентов фильтрации и их расчетное значение, определенное по зависимости (6). Можно отметить, что условие 5 в целом выполняется для всех выполненных лабораторных исследований.

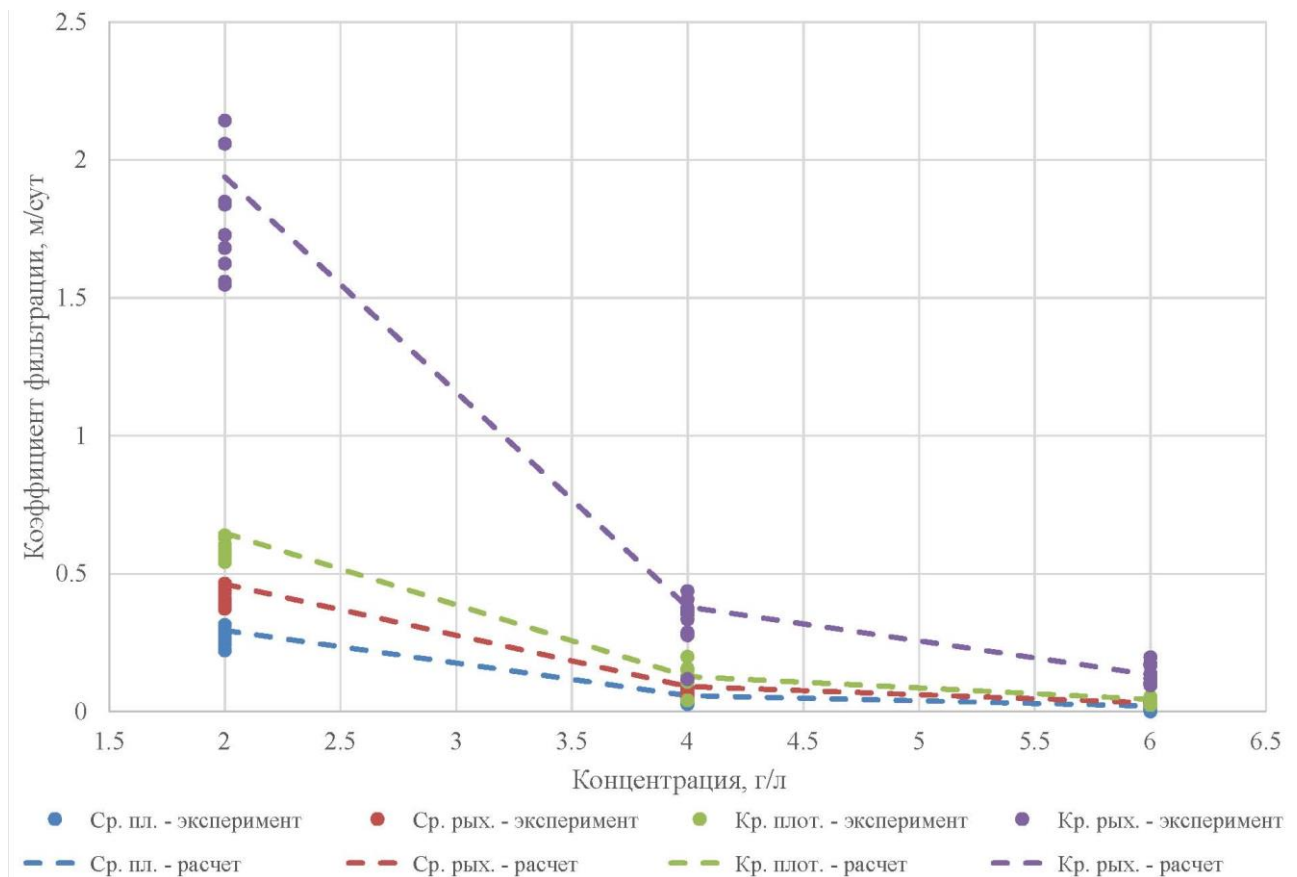


Рисунок 5 — Коэффициенты фильтрации полимерного раствора в песчаных грунтах данные эксперимента и расчетные значения

На следующем этапе исследования выполнялась верификация существующей модели нестационарной фильтрации воды из программы Plaxis к задаче по нестационарной фильтрации раствора через стенки траншеи. Она выполнялась по результатам сравнения результатов эксперимента и математического моделирования. Эксперимент проводился в специально сконструированном и изготовленном плоском акриловом лотке размерами $160 \times 10 \times 50$ см (Д \times Ш \times В), схема лотка приведена на Рисунке 6. Лоток разделен на три камеры, между которыми установлены перфорированные перегородки. В центральную камеру укладывали сухой песок с требуемой плотностью, в левую камеру подавали раствор, уровень которого поддерживали в течение всего опыта.

Фильтрация выполнялась либо до момента, когда граница области замачивания достигала задней перфорированной стенки, либо когда прекращалось видимое увеличение области замачивания.

В результате выполнения опыта были получены форма области замачивания и изменение ее во времени. В эксперименте использовались грунты и растворы, такие же, как и при лабораторных определениях коэффициентов фильтрации.

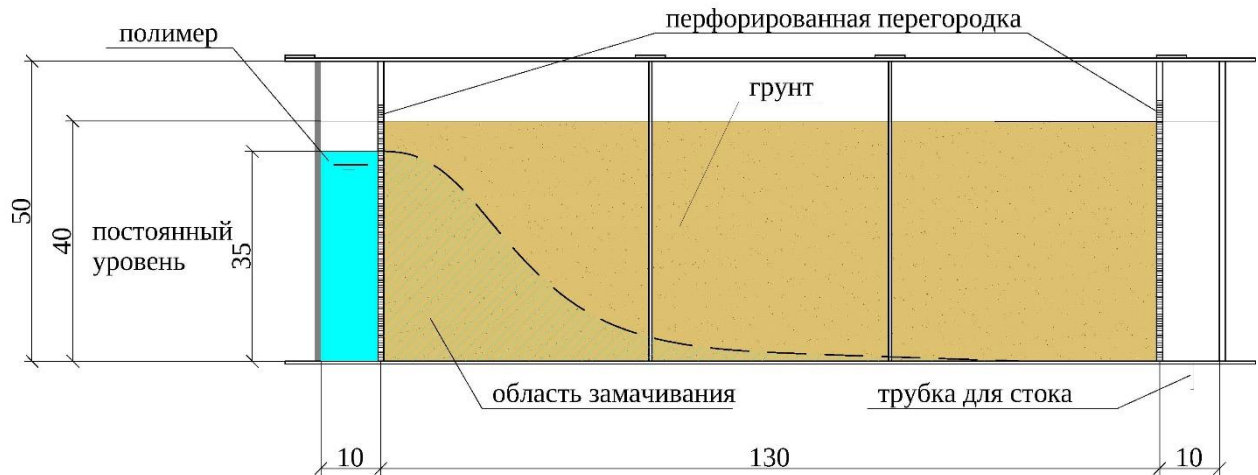


Рисунок 6– Схема опытного лотка

Процесс неустановившейся фильтрации, происходящий в экспериментальном лотке, моделировали в программе Plaxis 2d, на основе закона Дарси с использованием коэффициентов фильтрации полученных в ходе лабораторных работ (Таблица 2). На Рисунке 7 приведены характерные результаты наблюдений и математического моделирования.

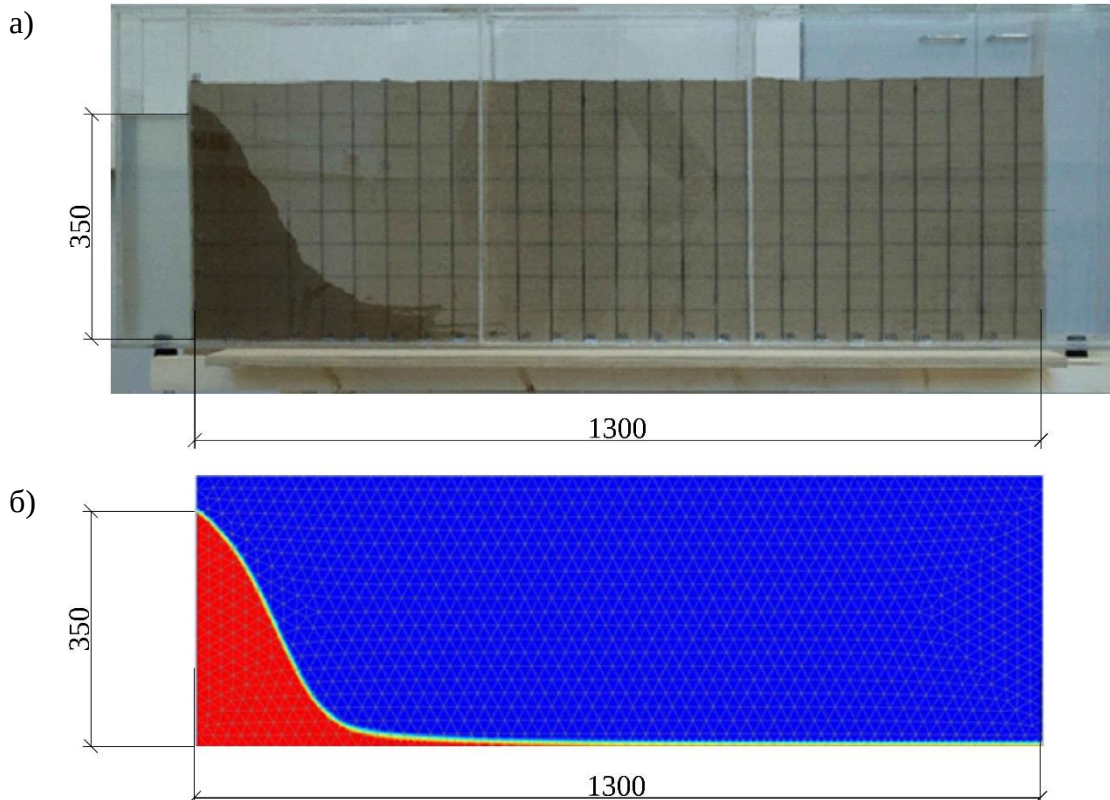


Рисунок 7 — Фильтрация раствора с концентрации 4 г/л в песке средней крупности, плотном — через 47 часов после начала опыта:

а) результаты наблюдений; б) результаты моделирования

Сравнение результатов наблюдений и математического моделирования показало, что максимальная относительная ошибка между площадью замачивания по результатам

моделирования и натуральных наблюдений при фильтрации воды в песке средней крупности и крупном составила 18 %, а ее среднее значение — около 10 %.

При математическом описании фильтрации полимерного раствора рассмотренная выше относительная ошибка увеличивается, ее максимальное значение составляет 36 %, а среднее значение составляет 17 %.

В целом, по нашему мнению, полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что фильтрация растворов полимера в песчаных грунтах может быть описана с достаточной для строительных задач методом математического моделирования на основе линейного закона Дарси.

В третьей главе исследовано влияние полиакриламидных растворов на прочностные свойства грунтов и на прочность контакта «бетон – грунт». В лабораторных исследованиях были использованы пески крупного, среднего и мелкого состава. Характеристики использованных растворов приведены в Таблице 3.

Таблица 3 — Основные показатели полиакриламидных растворов

Наименование бурового раствора	Основные показатели	
	Расход сухого вещества, кг/м ³	Условная вязкость по воронке Марша, с
Тип 1 — Полиакриламидный раствор со степенью гидролиза 30%	4,0	160
Тип 2 — Полиакриламидный раствор со степенью гидролиза 25%	4,0	100
Тип 3 — Полиакриламидный раствор со степенью гидролиза 20%	4,0	80

Исследование влияния полимерного (полиакриламидного) раствора на сдвиговую прочность песчаного грунта выполнена по результатам сопоставительных испытаний по схеме консолидированно-дренированного (медленного) одноплоскостного среза образцов грунта, пропитанных полимерным раствором и дистиллированной водой в соответствии с ГОСТ 12248–2020. По результатам сделан вывод о том, что для песков средней крупности и крупных разница в полученных значениях не превышает статистического разброса значений, то есть наличие полимерного раствора не оказывает существенного влияния на их прочностные свойства. В случае мелких песков насыщение пор грунта раствором приводит к незначительному увеличению сопротивления сдвигу в сравнении с образцами, заполненными водой.

Исследование прочности контакта «бетон – грунт» выполнялось по схеме одноплоскостного среза по контактному слою «бетон – песчаный грунт» в модернизированном приборе одноплоскостного среза конструкции ПСГ-3М «Гидропроекта», в котором вместо нижнего штампа (нижней обоймы срезывателя) закреплялись бетонные плашки (Рисунок 8). Сравнивая

результаты проведенных испытаний образцов грунта, пропитанных полимерным раствором и пропитанных дистиллированной водой, можно сделать вывод о том, что для песков мелких, средней крупности и крупных разница в полученных значениях не превышает статистического разброса значений, то есть наличие полимерного раствора не оказывает существенного влияния на сопротивление сдвигу образцов грунта по бетонной поверхности.

а)



б)



Рисунок 8 — Модернизированный прибор «Гидропроекта» ПСГ-3М:
а) общий вид прибора, подготовленного к испытаниям; б) образец грунта после проведения испытания

Результаты экспериментов позволили сделать предположение о том, что конструкции, изготовленные в песчаном грунте под защитой полимерного раствора, будут обладать большей несущей способностью по боковой поверхности, чем сваи, изготовленные в скважинах с глинистой суспензией.

Для проверки предположения, на опытной площадке были изготовлены натурные сваи диаметром 250 мм и длиной 4,5 м. Конструкция опытной сваи была принята исходя из следующих инженерно-геологических условий опытной площадки (Рисунок 9):

— до глубины 3,0 м в разрезе представлены суглинки и супеси, частично — строительным мусором;

— песчаные грунты, являющиеся предметом исследования, расположены в интервале глубин 3,2 ÷ 4,7 м на этой глубине сформировано бетонное тело сваи);

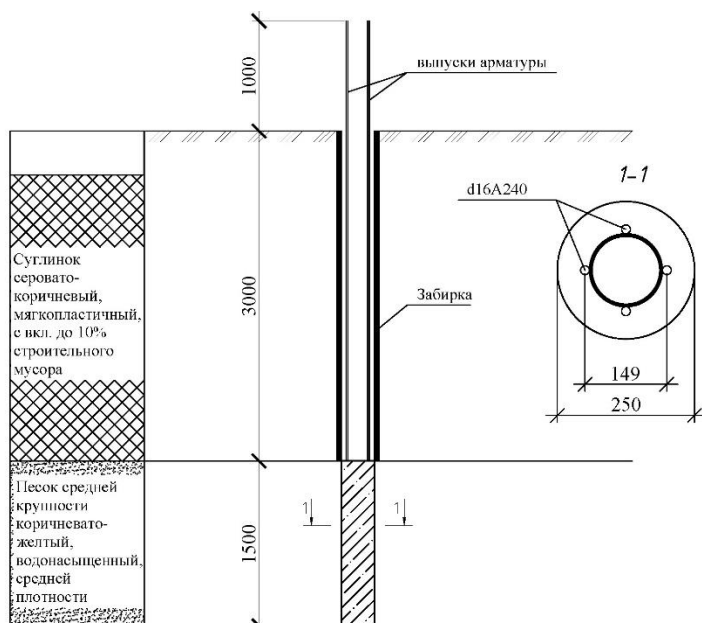


Рисунок 9 — Конструкция опытной сваи

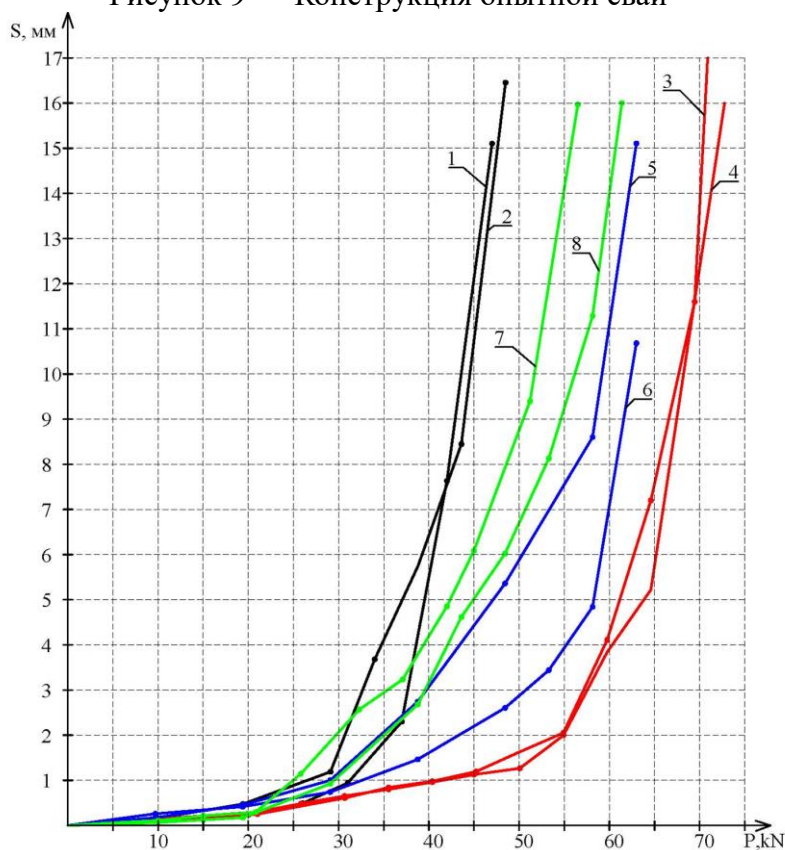


Рисунок 10 – Результаты испытания свай на выдергивающую нагрузку

1, 2 — испытания свай, выполненных под защитой бентонитовой суспензии;

3, 4 — то же под защитой раствора «Тип 1»; 5, 6 — «Тип 2»; 7, 8 — «Тип 3»

— для исключения трения по боковой поверхности в верхней части сваи каждую сваю откапывали до глубины 3,0 м; вокруг сваи устанавливали деревянную забирку и выполняли обратную засыпку).

На опытной площадке для каждого бурового раствора изготавливали по две опытные сваи.

В качестве контрольных образцов были изготовлены две сваи под защитой бентонитовой суспензией.

После бурения скважин они заполнялись буровыми полиакриламидными растворами и бентонитовой суспензией. По результатам испытания свай на выдергивающую нагрузку установлено, что сопротивление по боковой поверхности свай, выполненных под защитой полимерного раствора, на 20 ÷ 46 % выше, чем у свай, выполненных с применением бентонитовой суспензией (Рисунок 10).

В четвертой главе приведены методика оценки устойчивости траншеи при ее заполнении полиакриламидным раствором и рекомендации по назначению сопротивления по боковой поверхности бетонных конструкций в грунте, выполненных под защитой полимерного раствора.



Рисунок 11 — Блок схема к расчету устойчивости траншеи с возможностью фильтрации раствора из нее

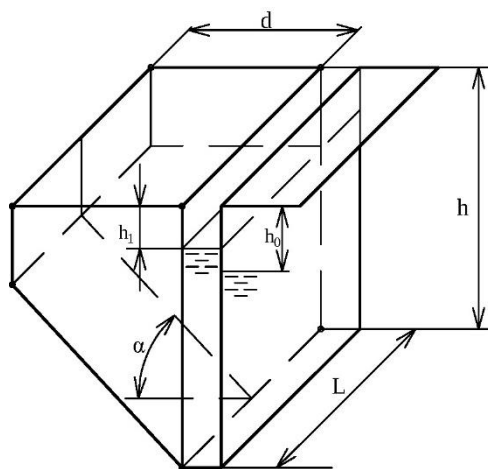


Рисунок 12 — Расчетные геометрические размеры призмы обрушения

В общем случае оценка устойчивости стенки траншеи может быть выполнен по порядку, указанному на схеме Рисунка 11.

Расчет устойчивости основан на предложенном А. Piaskowski и доработанном В. А. Ильичёвым и Л.Р. Ставницером решении, рассматривающим предельное равновесие призмы грунта. Призма обрушения грунта принимается в виде прямоугольной призмы (Рисунок 12) с шириной:

$$d = \frac{L}{3 \operatorname{tg} \varphi},$$

где, L — длина траншеи; φ — угол внутреннего трения грунта.

Глубина фильтрации раствора из траншеи определяются методом математического моделирования. Полученная глубина фильтрации раствора в массиве грунта используется для оценки локальной устойчивости отдельных частиц грунта и для оценки коэффициента рассеивания давления раствора.

Коэффициент устойчивости отдельных частиц определяется следующим образом

$$k_{st} = \frac{I \cdot \gamma_p \cdot \tan(\phi)}{\gamma_{sb}''} = \frac{\gamma_p \cdot \tan(\phi)}{\gamma_{sb}''} \frac{h_4}{k_n L} \geq 1 \quad (7)$$

где γ_p — удельный вес раствора, кН/м³; ϕ — угол внутреннего трения, град; γ_{sb}'' — удельный вес грунта с учетом взвешивающего действия раствора, кН/м³; h_4 — уровень раствора в расчетной точке; L — глубина фильтрации, определенная по результатам математического моделирования, м; $k_n = 2$ — коэффициент надежности к результатам определения глубины фильтрации раствора.

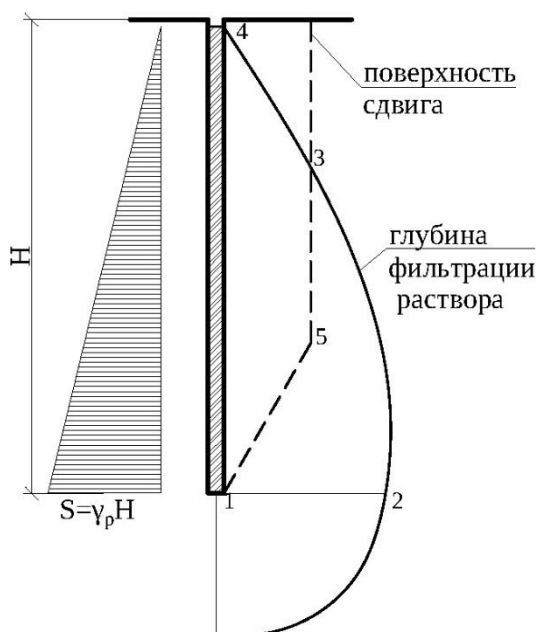


Рисунок 13 — Расчетная схема к оценке устойчивости траншеи

Коэффициент рассеивания давления раствора определяется следующим образом (Рисунок 13):

$$k_A = \frac{A_1}{k_n A},$$

где A — площадь фильтрации раствора на расчетной глубине (точки 1–2–3–4), м²; A_1 — площадь фильтрации в призме обрушения (точки 1–5–3–4), м².

Устойчивость призмы грунта является обеспеченной если выполняется следующее условие

$$S_{ef} = k_A \gamma_p H > W \quad (8)$$

где, γ_p — удельный вес раствора; кН/м³; H — уровень раствора, м; W — горизонтальная сдвигающая сила со стороны грунта, с учетом собственного веса

грунта, нагрузки на поверхности грунта и давление подземных вод, кН.

Рекомендации по назначению несущей способности баретт, работающих на сжимающую нагрузку, основаны на указаниях СП 24.13330.2021, согласно которым несущая способность баретт работающих на сжимающую нагрузку, следует определять по формуле

$$F_d = \gamma_c \left(\gamma_{R,R} R A + \gamma_{R,f} u \sum f_i h_i \right) \quad (9)$$

γ_c — коэффициент условий работы свай; в случае опирания ее на глинистые грунты со степенью влажности $S_R < 0.85$ и на лессовые грунты - $\gamma_c = 0,8$, в остальных случаях - $\gamma_c = 1,0$;

$\gamma_{R,R}$ — коэффициент надежности по сопротивлению грунта под нижним концом свай; $\gamma_{R,R} = 1$ во всех случаях, за исключением свай с камуфлетными уширениями и буроинъекционных свай по перечислению е) 6.5, для которых этот коэффициент следует принимать равным 1,3, и свай с

уширением, устраиваемых путем механического разбуривания грунта, бетонируемых насухо $\gamma_{R,R} = 0,5$ и бетонируемых подводным способом, для которых $\gamma_{R,R} = 0,3$;

R — расчетное сопротивление грунта под нижним концом баретты, кПа, принимаемое по п. 7.2.11 СП 24.13330.2021;

A — площадь пяты баретты, м²;

u — периметр поперечного сечения баретты, м;

$\gamma_{R,f}$ — коэффициент условий работы грунта на боковой поверхности сваи, принимаемый в песчаных грунтах при использовании полиакриламида равным 0,7;

f_i — расчетное сопротивление i -го слоя грунта на боковой поверхности ствола сваи, кПа, принимаемое по таблице 7.3 СП 24.13330, 2021.

Отсутствие заметного влияния полиакриламидного раствора на прочность контакта «бетон–грунт», позволяет назначить коэффициент условий работы по боковой поверхности баретт в песчаных грунтах $\gamma_{R,f} = 0,7$, что выше, чем при использовании глинистых суспензий $\gamma_{R,f} = 0,6$.

Заключение

1. На основании выполненного обзора исследований, посвященных вопросам использования полимерных буровых растворов в строительстве, сделан вывод о том, что эти растворы достаточно успешно используются, для них характерны высокая стабильность физико-химических свойств, отсутствие тиксотропных свойств, малый расход сухого вещества в сравнении с бентонитовой суспензией, малое время приготовления и легкость утилизации. Однако исследований, посвященных вопросам взаимодействия полимерных растворов с грунтами, выполнено достаточно мало, и они требуют дополнительных исследований. Так, например, известно, что полимерные растворы достаточно хорошо фильтруются в проницаемых грунтах, но исследован этот процесс крайне слабо, из-за чего чаще всего область применения для полимерных растворов ограничивают слабопроницаемыми грунтами. Другим немаловажным вопросом является влияние растворов на механические свойства грунтов и в конечном счете — на несущую способность выполняемых конструкций; он также требует исследований.
2. В диссертационной работе представлены результаты исследований возможности использования полимерных (полиакриламидных) растворов для удержания стенок траншей в песчаных грунтах при изготовлении конструкций в грунте, таких как баретт и стена в грунте, а также экспериментальная оценка влияния полиакриламидных буровых растворов на трение по боковой поверхности баретт.
3. По результатам лабораторных экспериментальных работ установлено, что полимерные растворы в песчаных грунтах, в отличие от хорошо известных глинистых суспензий, не кольматируют поры грунта и не образуют на его поверхности пленки, а фильтруются в грунт, формируя область замачивания. По мере увеличения области замачивания устойчивость грунтовой стенки снижается, при этом может происходить как общая потеря устойчивости стенки траншеи, так и потеря устойчивости отдельных частиц грунта на ее поверхности. В целом устойчивость траншеи, заполненной полимерным раствором, в песчаных грунтах определяется ее геометрическими размерами, прочностными свойствами грунта, нагрузками, действующими на поверхность грунта, уровнем подземных вод, уровнем раствора в траншее и глубиной фильтрации раствора в массив грунта за время существования траншеи.

4. По результатам лабораторных исследований установлено, что фильтрация полимерных растворов в песчаных грунтах в целом подчиняется закону фильтрации Дарси для вязких жидкостей, согласно которому скорость фильтрации определяется кинематической вязкостью полимерного раствора и проницаемостью грунта. Проницаемость грунта может быть оценена по коэффициенту фильтрации воды, его значение обычно определяется в рамках стандартных инженерно-геологических изысканий. Кинематическая вязкость раствора зависит от концентрации раствора, степени гидролиза молекул полимера, его молекулярной массы и температуры окружающей среды и может быть определена в лабораторных условиях, например, в вискозиметрах капиллярного типа.
5. Для возможности использования математического моделирования для решения задачи по фильтрации раствора через стенки траншеи во времени была выполнена верификация существующей модели нестационарной фильтрации воды к задаче фильтрации полимерного раствора. Верификация выполнялась по результатам сравнения результатов эксперимента и математического моделирования. Сравнение результатов наблюдений и результатов математического моделирования показало, что максимальная относительная ошибка между площадью замачивания по результатам моделирования и натурными наблюдениями за фильтрацией воды в песке средней крупности и крупном составила 18 %, а ее среднее значение — около 10 %. При математическом описании фильтрации полимерного раствора рассмотренная выше относительная ошибка увеличивается, ее максимальное значение составляет 36 %, а среднее значение составляет 17 %. В целом, по нашему мнению, полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что фильтрация растворов полимера в песчаных грунтах может быть описана с достаточной для строительных задач методом математического моделирования на основе линейного закона Дарси.
6. Исследование влияния полимерного (полиакриламидного) раствора на сдвиговую прочность песчаного грунта выполнено по результатам сопоставительных испытаний по схеме консолидированно-дренированного (медленного) одноплоскостного среза в соответствии с ГОСТ 12248–2020 образцов грунта, пропитанных полимерным раствором и дистиллированной водой. По результатам сделан вывод о том, что для песков средней крупности и крупных разница в полученных значениях не превышает статистический разброс значений, то есть наличие полимерного раствора не оказывает существенного влияния на их

прочностные свойства. В случае мелких песков насыщение пор грунта раствором приводит к незначительному увеличению сопротивления сдвигу в сравнении с образцами, заполненными водой.

7. Оценка влияния наличия полиакриламидных растворов в объеме грунта на сдвиговую прочность контакта «бетон – грунт» выполнена в серии сопоставительных испытаний по сдвигу образцов грунта по бетонной поверхности. Сравнивая результаты проведенных испытаний образцов грунта, пропитанных полимерным раствором и пропитанных дистиллированной водой, установлено, что для песков мелких, средней крупности и крупных разница в полученных значениях не превышает статистического разброса значений, то есть наличие полимерного раствора не оказывает существенного влияния на сдвиговую прочность контакта «бетон – грунт».
8. В рамках натурных испытаний на опытной площадке были изготовлены опытные буровые сваи. После разработки скважин их заполняли буровыми полиакриламидными растворами и бентонитовой суспензией в качестве контрольного экземпляра. В результате испытания свай статической выдергивающей нагрузкой установлено, что сопротивление по боковой поверхности свай, выполненных под защитой полимерного раствора, в 1,2–1,46 раза выше, чем у свай, выполненных с применением бентонитового раствора.
9. Отсутствие заметного влияния полимерного раствора на прочность контакта «бетон – грунт» позволяет рекомендовать назначать коэффициент условий работы по боковой поверхности свай и баретт в песчаных грунтах $\gamma_{R,f} = 0,7$, что выше, чем при использовании глинистых суспензий $\gamma_{R,f} = 0,6$.

Список работ, опубликованных по теме диссертации

Статьи в изданиях, включенных в перечень рецензируемых научных изданий по списку ВАК РФ

1. Лесницкий, В. С. Лабораторные исследования сдвиговой прочности песчаного грунта, пропитанного полиакриламидным раствором/В.С. Лесницкий, Е.М. Хайбулина // Вестник НИЦ «Строительство». — 2021. — Т. 29. — №. 2. — С. 76–87.

2. Лесницкий, В.С. Устойчивость стенок траншей, заполненных полиакриламидным буровым раствором/В.С. Лесницкий// Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2024. № 3. — С. 30–45.

Публикации в изданиях, индексируемых Scopus:

3. Lesnitsky, V. Bearing capacity of bored piles made with polymer drilling mud/ V. Lesnitsky, O. Shulyatev, S. Shulyatev// Journal of Physics: Conference Series. — IOP Publishing, 2021. — V. 1928. — No 1. — P. 012035.

Публикации в рецензируемых научных журналах:

4. Шулятьев, О. А. Применение водорастворимых высокомолекулярных полимеров для устройства фундаментов из буронабивных свай, баретт и «стены в грунте» в песчаных грунтах/ О. А. Шулятьев, С.О.Шулятьев, О.А. Мозгачёва, В.С. Лесницкий// Вестник НИЦ «Строительство». — 2019. — Т. 20. — №. 1. — С. 131–139.