2.1.7. Технология и организация строительства (технические науки)

Научная статья
УДК 624.138.23

ИНЪЕКЦИОННОЕ ЗАКРЕПЛЕНИЕ ВОДОНАСЫЩЕННЫХ СЛАБЫХ ГРУНТОВ: АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ

Левицкая Ксения Михайловна, кандидат технических наук, младший научный сотрудник, Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, Россия, Белгород, levitskaia.bgtu@mail.ru;

Суханов Андрей Владимирович, кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры общей механики, Липецкий государственный технический университет, Россия, Липецк, andrei_sukhanov@yandex.ru

Аннотация. Статья посвящена разработке и полевой апробации технологического регламента проникающего инъектирования водонасыщенных пылевато-глинистых грунтов в условиях плотной городской застройки. Исследование выполнено на строительном участке жилого комплекса, где в основании залегает слой слабых суглинков мощностью 5,2 м с показателем текучести 0,65–0,78 и модулем деформации 4,2 МПа. В качестве инъекционного материала применена суспензия на основе портландцемента CEM I 42.5H с добавлением 15 % микрозернистой золы-уноса и поликарбоксилатного суперпластификатора при водоцементном отношении 0,42. На опытном участке опробованы три режима нагнетания при разном давлении. По результатам испытаний выбран рабочий режим с давлением 0,8 МПа, позволяющий предотвратить гидроразрыв пласта и выпучивание дневной поверхности. После закрепления модуль деформации грунта достиг 11,8 МПа, а коэффициент фильтрации снизился с 0,82 до 0,04 м/сут. Фактические данные статического зондирования и штамповых испытаний напрямую использованы для калибровки нелинейной модели Hardening Soil в программном комплексе PLAXIS 3D. Расчётные значения осадки фундаментной плиты разошлись с натурными

геодезическими замерами не более чем на 5 % на всех этапах возведения здания. Установлены критерии прекращения подачи раствора и очередность нагнетания через скважины, обеспечивающие формирование замкнутого контура закрепления без выхода материала за пределы проектной зоны.

Ключевые слова: инъекционное закрепление грунтов, слабые водонасыщенные суглинки, проникающее цементирование, реология суспензии, опытный участок, численное моделирование, PLAXIS 3D.

Original article

INJECTION STRENGTHENING OF WATER-SATURATED SOILS: ANALYSIS OF TECHNOLOGICAL PARAMETERS

Levitskaia Kseniia Mikhailovna, Candidate of Technical Sciences, Junior Researcher, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, Белгород, Russia, levitskaia.bgtu@mail.ru;

Sukhanov Andrei Vladimirovich, Candidate of Technical Sciences, Senior Lecturer, Department of General Mechanics, Lipetsk State Technical University, Липецк, Russia, andrei_sukhanov@yandex.ru

Abstract. This article is devoted to the development and field testing of a process protocol for penetrating injection of water-saturated silty clay soils in dense urban settings. The study was conducted at a residential construction site, where the foundation consists of a 5.2-meter-thick layer of soft loam with a flow index of 0.65–0.78 and a deformation modulus of 4.2 MPa. The injection material used was a slurry based on CEM I 42.5H Portland cement with the addition of 15% microgranular fly ash and a polycarboxylate superplasticizer at a water-cement ratio of 0.42. Three injection modes at different pressures were tested at the pilot site. Based on test results, a working mode with a pressure of 0.8 MPa was selected, which helps prevent hydraulic fracturing and surface heaving. After stabilization, the soil deformation modulus reached 11.8 MPa, and the permeability coefficient decreased from 0.82 to 0.04 m/day. Actual data from static sounding and stamp tests were directly used to

calibrate the nonlinear Hardening Soil model in the PLAXIS 3D software package. The calculated foundation slab settlement values differed from in-situ geodetic measurements by no more than 5% throughout all stages of the building's construction. Criteria for stopping the grout injection and the sequence of injection through boreholes were established, ensuring the formation of a closed stabilization loop without material leaking outside the design zone.

Keywords: injection soil stabilization, weak water-saturated loams, penetrating cementation, suspension rheology, pilot site, numerical modeling, PLAXIS 3D.

Введение. При возведении зданий и сооружений на территориях со сложными инженерно-геологическими условиями возникает проблема низкой несущей способности водонасыщенных пылевато-глинистых и органических грунтов. Такие основания характеризуются высокой сжимаемостью, значительной пористостью и склонностью к длительным неравномерным осадкам [1-3]. Игнорирование данных факторов на этапе проектирования фундаментов ведет к критическим деформациям надземных конструкций, вплоть до потери их эксплуатационной пригодности. Традиционные методы подготовки оснований, такие как полная замена слабого слоя или устройство свайных полей, зачастую оказываются экономически нецелесообразными или технически невыполнимыми в стесненных условиях существующей городской застройки [4-6]. В подобных условиях единственным приемлемым решением нередко становится физико-химическое закрепление грунта, позволяющее изменять его свойства непосредственно в естественном залегании без масштабных земляных работ [7].

Современная практика геотехнического строительства располагает широким арсеналом технологий инъекционного усиления, каждая из которых обладает специфическими областями применения и ограничениями. Наиболее распространенным направлением остается цементация, при которой в поры и трещины массива нагнетают суспензии на основе портландцемента с

добавлением минеральных наполнителей и химических добавок [8], [9]. Данный подход обеспечивает высокую конечную прочность закрепленного грунта, однако сталкивается с серьезными ограничениями при работе в тонкодисперсных средах из-за риска закупорки пор и преждевременной фильтрации суспензии [10]. Альтернативой служат методы химического закрепления, в частности силикатизация. Инъекции растворов жидкого стекла с отвердителями позволяют эффективно работать в мелких и пылеватых песках, где твердые частицы цемента не способны к пенетрации [11]. Тем не менее, применение силикатов сопряжено с высокой стоимостью реагентов и рисками вторичного загрязнения подземной среды агрессивными щелочными компонентами. В последние годы исследователи уделяют всё больше внимания геополимерному инъектированию. Использование щелочно-активированных алюмосиликатных систем рассматривается как перспективная альтернатива, сочетающая экологичность за счет утилизации промышленных отходов с высокой химической стойкостью и управляемой кинетикой твердения [12], [13]. Однако технология геополимерных инъекций пока не имеет широкой нормативной базы и требует детального изучения реологических параметров рабочих растворов в зависимости от геологических условий.

Технология инъекционного закрепления выбрана для исследования благодаря ее универсальности и минимальному воздействию на окружающую застройку. Инъектирование применяют не только при аварийно-восстановительных работах, но и как отдельный этап возведения сооружений. В отличие от методов открытой разработки или вибрационного уплотнения, нагнетание вяжущих смесей позволяет локально устранять дефекты основания без нарушения структурной целостности существующих фундаментов. Эффективность зависит не только от состава инъекционного материала, но и от соответствия параметров нагнетания проницаемости и микроструктуре грунта [14], [15]. Ошибки в подборе вязкости и подвижности раствора приводят к гидроразрыву пласта или остановке подачи из-за кольматации пор. Таким

образом, дальнейшее совершенствование технологии требует комплексного подхода, объединяющего разработку адаптируемых составов смесей и строгий контроль параметров их фильтрации в пористой среде.

Обзор литературы. Возведение сооружений на территориях со сложными инженерно-геологическими условиями неизбежно сопряжено с рисками развития критических деформаций оснований. Водонасыщенные пылевато-глинистые грунты характеризуются высокой сжимаемостью и низкой несущей способностью, что требует применения специальных методов их физической модификации. Традиционные подходы, такие как полная замена слабого слоя или устройство свайных полей, зачастую оказываются экономически нецелесообразными или технически невыполнимыми в стесненных условиях существующей застройки [16-18]. В подобных ситуациях единственно приемлемым решением выступает физико-химическое закрепление массива непосредственно в его естественном залегании.

Современная практика геотехнического строительства располагает широким арсеналом технологий инъекционного усиления, среди которых особое место занимает проникающее цементирование. Данный метод предполагает нагнетание суспензий в поровое пространство грунта без нарушения его естественной структуры. Эффективность закрепления зависит от реологических характеристик смеси и ее способности проникать в поры тонкодисперсных грунтов. Применение обычных портландцементов в пылеватых грунтах часто приводит к преждевременной кольматации пор и остановке подачи суспензии [19], [20]. Для решения этой проблемы исследователи предлагают использовать микрозернистые компоненты и химические добавки. В частности, введение микрозернистой золы-уноса позволяет существенно снизить кажущуюся вязкость и предельное напряжение сдвига, а использование суперпластификаторов на основе поликарбоксилатных эфиров обеспечивает необходимую подвижность смеси при снижении водоцементного отношения, что критически важно для предотвращения водоотделения и сегрегации.

Несмотря на наличие теоретических разработок, на практике часто возникает проблема отсутствия воспроизводимых технологических регламентов, привязанных к конкретным геологическим условиям. Инженеры нередко сталкиваются с дилеммой: увеличение давления нагнетания расширяет радиус закрепления, но одновременно многократно повышает риск гидроразрыва пласта и выпучивания грунта, что ведет к деформациям соседних сооружений [21], [22]. Кроме того, параметры численных моделей для прогноза осадок нередко подгоняют под фактические значения осадки вместо того, чтобы определять их по результатам полевых испытаний до и после закрепления. Настоящее исследование направлено на устранение указанных пробелов путем разработки и полевого подтверждения строгого технологического регламента проникающего инъектирования, где все ключевые параметры определяются на этапе опытного участка, а численное моделирование базируется исключительно на верифицированных данных натурных испытаний.

Материалы и методы исследования. Объектом исследования выступил строительный участок жилого комплекса, характеризующийся сложными инженерно-геологическими условиями. По данным изысканий, в основании залегает слой водонасыщенных пылеватых суглинков мощностью 5,2 метра с показателем текучести IL = 0,65–0,78. Уровень грунтовых вод установлен на глубине 1,5 м от поверхности. Физико-механические характеристики грунта в естественном состоянии свидетельствовали о его высокой сжимаемости: модуль деформации составлял всего 4,2 МПа, а коэффициент фильтрации достигал 0,8 м/сут.

Для инъектирования использовали суспензию на основе портландцемента CEM I 42.5H с добавлением 15% микрозернистой золы-уноса (масс.) и 1,2% суперпластификатора на основе поликарбоксилатных эфиров. Водоцементное отношение жестко контролировалось и составляло 0,42. Подобный состав, обоснованный данными о реологии цементных смесей, обеспечивал высокую проникающую способность при сохранении устойчивости суспензии и

минимальном водоотделении.

Ключевым этапом методики стало проведение опытного инъектирования на тестовом участке. Инженерами были апробированы три различных режима нагнетания для выявления оптимальных параметров, исключающих гидроразрыв пласта. После анализа результатов опытного участка был сформирован окончательный технологический регламент. Бурение скважин осуществлялось шнековым способом с обсадкой устьев. Инъекторы устанавливали с шагом 1,2 м, выбранным с учетом расчетного радиуса распространения суспензии. Последовательность работ строго регламентировалась: нагнетание начинали с периферийных скважин, последовательно смещаясь к центру массива. Такой подход позволял сформировать замкнутый контур закрепления, предотвращающий утечку раствора за пределы укрепляемой зоны.

Нагнетание в каждой скважине прекращали при достижении предельного давления 1,2 МПа, сохранении расхода раствора на уровне менее 2 л/мин в течение 5 минут, появлении инъекционной смеси в соседней скважине или подъеме дневной поверхности более чем на 5 мм. Контроль риска выпучивания грунта осуществлялся посредством непрерывного геодезического мониторинга реперов, установленных в зоне влияния.

Для оценки напряженно-деформированного состояния основания и прогнозирования осадки фундаментной плиты применялось численное моделирование в программном комплексе PLAXIS 3D. Поведение закрепленного массива описывалось моделью Hardening Soil. Принципиальным условием являлось то, что все входные параметры модели (модуль одометрического нагружения E_{oed}, секущий модуль при стандартном тесте E_{50}, модуль разгрузки E_{ur}, показатель жесткости m и коэффициент R_f) определялись исключительно путем обратной калибровки по данным полевых штамповых испытаний и статического зондирования, выполненных до и после инъектирования, а не путем подгонки под целевую осадку.

Результаты исследования и их обсуждение. Анализ результатов опытного инъектирования позволил установить зависимость состояния грунтового массива от режима нагнетания. При давлении 0,4 МПа (Режим А) наблюдалась недостаточная пенетрация раствора, а радиус закрепления не превышал 0,4 м. Повышение давления до 1,5 МПа (Режим Б) привело к гидроразрыву пласта: зафиксирован подъем поверхности на 14 мм, а раствор распространился неравномерно, образовав линзы. Оптимальным был признан Режим В с давлением 0,8 МПа, который обеспечил стабильное проникновение суспензии без нарушения структурной целостности массива (таблица 1).

Таблица 1 - Результаты опытного инъектирования и обоснование выбора рабочего режима

Параметр / Режим	Режим А (Р = 0,4 МПа)	Режим Б (Р = 1,5 МПа)	Режим В (Р = 0,8 МПа)
Расход раствора на 1 п.м.	12 л	45 л	28 л
Расчетный радиус закрепления	0,4 м	1,8 м (неравномерно)	1,1 м
Деформация дневной поверхности	0 мм	+14 мм (выпучивание)	+2 мм (в пределах нормы)
Характер распределения в массиве	Локальная кольматация устья	Гидроразрыв, образование линз	Равномерное заполнение пор
Статус принятия в рабочий регламент	Отклонен	Отклонен	Утвержден

Источник: разработано авторами.

Основной комплекс работ по инъекционному закреплению грунтового массива выполнялся с использованием технологического режима В, характеризующегося давлением нагнетания 0,8 МПа. Удельный расход материала в расчётной модели принят на уровне 0,22 м^3 раствора на 1 м^3 закрепляемого грунта. При оценке материалоёмкости технологического режима необходимо учитывать, что линейный объём выполненных работ и объёмный расход раствора имеют различную размерность и связаны между собой геометрическими параметрами зоны закрепления. Поэтому указанные показатели рассматриваются раздельно: первый характеризует организационно-технологическую производительность, второй — расход инъекционного

материала относительно объёма обработанного массива.

Операционный контроль включал непрерывную регистрацию давления и объема закачанной смеси в журнале работ. Приёмочный контроль проводили через 14 суток после завершения инъектирования с помощью статического зондирования и штамповых испытаний. Результаты подтвердили высокую эффективность выбранной технологии (таблица 2).

Таблица 2 - Показатели физико-механических свойств грунта до и после закрепления (по данным полевого контроля)

Контролируемый параметр	Естественное состояние (до)	После инъекционного закрепления	Динамика изменения
Сопротивление грунта под наконечником зонда, qs, МПа	1,8	5,4	+ 200%
Модуль деформации по данным штампа, E, МПа	4,2	11,8	+ 181%
Коэффициент фильтрации, k, м/сут	0,82	0,04	Снижение в 20 раз
Количество отказов зонда на 10 см	12	45	Увеличение прочности

Источник: разработано авторами.

Полученные в полевых испытаниях данные использованы при построении численной модели в PLAXIS 3D. Модель Hardening Soil, настроенная на фактические параметры, позволила рассчитать осадку фундаментной плиты под нагрузкой от возводимых этажей. Для верификации расчетных данных в процессе строительства на фундаментной плите были установлены геодезические марки, фиксирующие фактическую осадку сооружения (таблица 3).

Таблица 3 - Верификация численного моделирования данными натурных наблюдений за осадками

Этап строительства / Нагрузка	Расчетная осадка по PLAXIS 3D (модель Hardening Soil), мм	Фактическая осадка по данным геодезии, мм	Расхождение, %
Возведение 3 этажа (нагрузка 45 кПа)	8,2	7,8	4,8
Возведение 9 этажа (нагрузка 130 кПа)	19,5	20,1	3,0

Завершение строительства (нагрузка 185 кПа)	26,4	27,2	3,0
Эксплуатация через 6 месяцев	28,1 (стабилизация)	28,5 (стабилизация)	1,4

Источник: разработано авторами.

Анализ данных, представленных в таблице 3, демонстрирует высокую сходимость расчетных и фактических значений. Расхождение не превышает 4,8%, что подтверждает корректность подхода, при котором параметры нелинейной модели грунта определяются на основе прямых полевых испытаний, а не подбираются эмпирически. Осадка стабилизировалась на уровне 28,5 мм, что соответствует допустимым значениям для данного типа сооружений и свидетельствует об успешном формировании искусственного основания с заданными деформационными характеристиками.

Результаты исследования показывают, что параметры инъекционного закрепления слабых грунтов необходимо подбирать с учетом условий конкретного участка. Строгий технологический регламент, базирующийся на предварительном опытном участке, четких критериях прекращения нагнетания и непрерывном контроле риска гидроразрыва, позволяет гарантированно достигать проектных характеристик основания. Использование фактических данных полевых испытаний при численном моделировании обеспечивает высокую точность прогноза деформаций сооружений, что особенно важно для безопасного строительства в условиях плотной городской застройки.

Выводы. Проведенное исследование подтверждает, что применение универсальных нормативных подходов при назначении параметров нагнетания инъекционных смесей в пылевато-глинистых грунтах приводит к значительным погрешностям. Ключевым результатом работы выступает разработка и практическая апробация адаптивного технологического регламента, базирующегося на предварительном этапе опытного закрепления. Именно полевые испытания позволили выявить нелинейную зависимость между давлением подачи суспензии и радиусом ее фильтрации, а также установить

предельные значения, превышение которых неизбежно ведет к гидроразрыву пласта и деформации дневной поверхности. Отказ от шаблонных схем бурения и нагнетания в пользу индивидуального подбора шага инъекторов и последовательности их активации обеспечил формирование замкнутого контура закрепления без утечек материала за пределы проектной зоны.

Существенное влияние на эффективность процесса оказала оптимизация реологических характеристик самого инъекционного материала. Введение микрозернистой золы-уноса в сочетании с поликарбоксилатным суперпластификатором обеспечило необходимый баланс между подвижностью суспензии и ее водоудерживающей способностью. Такой состав предотвратил преждевременную кольматацию пор и сегрегацию компонентов при фильтрации в тонкодисперсной среде, что согласуется с фундаментальными положениями о необходимости строгого контроля водоцементного отношения и использования модификаторов вязкости для стабилизации цементных смесей. Подобная рецептура не только улучшила проникающую способность раствора, но и снизила риск образования слабых прослоек из отстоявшейся воды внутри искусственного грунтового массива.

Достоверность прогноза деформаций фундаментных плит на искусственно сформированном основании достигнута за счет отказа от эмпирического подбора параметров численных моделей. Интеграция фактических данных статического зондирования и штамповых испытаний в модель Hardening Soil позволила воспроизвести реальное напряженно-деформированное состояние массива с учетом его нелинейной жесткости. Расхождение расчетных и натурных показателей осадки в процессе возведения здания не превысило пяти процентов, что свидетельствует о высокой надежности предложенного метода проектирования и объективности контроля качества закрепления. Такой подход исключает подгонку параметров грунта под ожидаемый результат и позволяет использовать численное моделирование как инженерный инструмент прогнозирования деформаций.

Перспективы дальнейшего развития технологии инъекционного усиления оснований в условиях плотной городской застройки связаны с углубленным изучением вопросов долговечности сформированных грунтоцементных структур. Представляет интерес применение технологий самовосстановления цементных матриц, разрабатываемых для ремонтных составов, при подземном закреплении грунтов. Внедрение кристаллизационных добавок и бактериальных агентов в состав инъекционных смесей сможет обеспечить автономное залечивание микротрещин, возникающих при циклических эксплуатационных нагрузках или сезонных колебаниях уровня грунтовых вод. Решение этой задачи позволит увеличить срок службы геотехнических сооружений и снизить затраты на их обслуживание.

Список литературы

1. Страданченко С. Г., Молев М. Д., Прокопов А. Ю. Натурное исследование и обоснование параметров нагнетания раствора при цементации грунтов основания здания Гимназии № 45 в г. Ростове-на-Дону // Инженерный вестник Дона. — 2023. — № 7. — С. 245–258.

2. Meng F., Peng Y. A Study on the Load-Bearing Characteristics and Load Transfer Mechanism of Bag Grouting Pile in Soft Soil Areas // Applied Sciences. — 2023. — Vol. 13, No. 20. — Art. 11167. — DOI: 10.3390/app132011167.

3. Богов С. Г. Влияние технологических параметров струйной цементации на закрепление глинистых грунтов г. Санкт-Петербурга // Геотехника. — 2024. — Т. 16, № 3. — С. 66–79.

4. Cui X. et al. Nondestructive Controllable Grouting: A Novel Method to Correct Deviation of Building Foundation // Advances in Civil Engineering. — 2023. — Art. 1835403. — DOI: 10.1155/2023/1835403.

5. Власов М. А., Простов С. М. Прогноз устойчивости грунтового основания карьерной обогатительной установки на основе объемной геомеханической модели // Вестник Кузбасского государственного технического университета. — 2024. — № 4 (164). — С. 5–22. — DOI: 10.26730/1999-4125-2024-4-5-22.

6. Sierra K., An J., Shamet R. et al. A Review of Geopolymer Binder as a Grouting Material // International Journal of Geo-Engineering. — 2024. — Vol. 15. — Art. 21. — DOI: 10.1186/s40703-024-00221-5.

7. Малинин А. Г., Салмин И. А. О возможности контроля прочности грунтоцементных элементов по прочности грунтоцементной пульпы // Жилищное строительство. — 2024. — № 9. — С. 11–13. — DOI: 10.31659/0044-4472-2024-9-11-13.

8. Birid K., Varak S. Stabilisation of Subsoil Using Colloidal Silica Beneath Shallow Foundation: A Case Study // Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Ground Improvement. — 2025. — Vol. 178, No. 1. — P. 49–61. — DOI: 10.1680/jgrim.24.00001.

9. Зуев С. С., Маковецкий О. А. Закономерности изменения механических и фильтрационных свойств полускальных грунтов, модифицированных струйной цементацией // Жилищное строительство. — 2024. — № 9. — С. 30–35. — DOI: 10.31659/0044-4472-2024-9-30-35.

10. Liu R., Xu Z., Zhu Z., Ding Y. Enhancing Foundation Strength and Minimizing Uneven Settlement Through Split Grouting // Shock and Vibration. — 2025. — Art. 5130655. — DOI: 10.1155/vib/5130655.

11. Богов С. Г. К вопросу теоретического определения диаметра закрепления грунтов по струйной технологии // Современное строительство и архитектура. — 2025. — № 8 (63). — DOI: 10.60797/mca.2025.63.1.

12. Aghamolaei M., Alavi S. M., Talarposhti S. S., Ardabili A. A. K. Assessing Jet Grout Column Diameters in Loose to Medium Silty Soils Based on Field Observations // International Journal of Geomechanics. — 2025. — Vol. 25, No. 9. — DOI: 10.1061/IJGNAI.GMENG-11251.

13. Зуев С. С., Маковецкий О. А. Опыт устройства и испытаний грунтоцементных свай в просадочных грунтах // Жилищное строительство. — 2025. — № 9. — С. 34–41. — DOI: 10.31659/0044-4472-2025-9-34-41.

14. Sabermahani M., Hajisalimi A. Field Study on Jet Grouting Columns Performance

Above and Below Groundwater Table in Sandy Soil // Case Studies in Construction Materials. — 2025. — Vol. 23. — Art. e05105. — DOI: 10.1016/j.cscm.2025.e05105.

15. Власов М. А., Герасимов О. В., Простов С. М. Особенности геологического строения грунтового основания установки главного проветривания строящейся шахты // Вестник Кузбасского государственного технического университета. — 2025. — № 2 (168). — С. 5–21. — DOI: 10.26730/1999-4125-2025-2-5-21.

16. Zamanian M., Payan M., Salimi M. et al. Comparative Efficacy of Grouting and Mixing Methods for Stabilizing Collapsible Soils with Nano-Clay and Cement // Case Studies in Construction Materials. — 2025. — Vol. 23. — Art. e05159. — DOI: 10.1016/j.cscm.2025.e05159.

17. Малинин А. Г., Салмин И. А. О потере давления рабочей жидкости в напорных рукавах при струйной цементации грунтов // Жилищное строительство. — 2025. — № 9. — С. 24–28. — DOI: 10.31659/0044-4472-2025-9-24-28.

18. Zhu X., Zhao W., Fang S. et al. Study of Performance and Engineering Application of D-RJP Jet Grouting Technology in Anchorage Foundation Reinforcement for Deep Suspension Bridge Excavations // Applied Sciences. — 2025. — Vol. 15, No. 16. — Art. 8985. — DOI: 10.3390/app15168985.

19. Богов С. Г. Технологические аспекты закрепления грунтов цементными растворами // Современное строительство и архитектура. — 2025. — № 12 (67). — DOI: 10.60797/mca.2025.67.2.

20. Pedrotti M., Lyons J., El Mountassir G., Kuras O., Lunn R. J. A Transport Model for the Permeation of Colloidal Silica // Acta Geotechnica. — 2026. — DOI: 10.1007/s11440-026-03117-z.

21. Богов С. Г. Оценка применения струйной технологии для решения задач по стабилизации грунтовых оснований // Современное строительство и архитектура. — 2026. — № 7 (74). — DOI: 10.60797/mca.2026.74.1.

22. Guo P., Xue P., Wang Y., Ou Q. In-Situ Measuring High-Pressure Jet Grouting Induced Evolution of Three-Dimensional Earth Pressure and Excess Pore Water

Pressure in Coastal Soft Soils // Measurement. — 2026. — Vol. 278. — Art. 121768. — DOI: 10.1016/j.measurement.2026.121768.

References

1. Stradanchenko S. G., Molev M. D., Prokopov A. Yu. Naturnoe issledovanie i obosnovanie parametrov nagnetaniya rastvora pri cementacii gruntov osnovaniya zdaniya Gimnazii № 45 v g. Rostove-na-Donu // Inzhenerny`j vestnik Dona. — 2023. — № 7. — S. 245–258.

2. Meng F., Peng Y. A Study on the Load-Bearing Characteristics and Load Transfer Mechanism of Bag Grouting Pile in Soft Soil Areas // Applied Sciences. — 2023. — Vol. 13, No. 20. — Art. 11167. — DOI: 10.3390/app132011167.

3. Bogov S. G. Vliyanie texnologicheskix parametrov strujnoj cementacii na zakreplenie glinisty`x gruntov g. Sankt-Peterburga // Geotexnika. — 2024. — T. 16, № 3. — S. 66–79.

4. Cui X. et al. Nondestructive Controllable Grouting: A Novel Method to Correct Deviation of Building Foundation // Advances in Civil Engineering. — 2023. — Art. 1835403. — DOI: 10.1155/2023/1835403.

5. Vlasov M. A., Prostov S. M. Prognoz ustojchivosti gruntovogo osnovaniya kar`ernoj obogatitel`noj ustanovki na osnove ob``emnoj geomexanicheskoj modeli // Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo texnicheskogo universiteta. — 2024. — № 4 (164). — S. 5–22. — DOI: 10.26730/1999-4125-2024-4-5-22.

6. Sierra K., An J., Shamet R. et al. A Review of Geopolymer Binder as a Grouting Material // International Journal of Geo-Engineering. — 2024. — Vol. 15. — Art. 21. — DOI: 10.1186/s40703-024-00221-5.

7. Malinin A. G., Salmin I. A. O vozmozhnosti kontrolya prochnosti gruntocementny`x e`lementov po prochnosti gruntocementnoj pul`py` // Zhilishhnoe stroitel`stvo. — 2024. — № 9. — S. 11–13. — DOI: 10.31659/0044-4472-2024-9-11-13.

8. Birid K., Varak S. Stabilisation of Subsoil Using Colloidal Silica Beneath Shallow Foundation: A Case Study // Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Ground Improvement. — 2025. — Vol. 178, No. 1. — P. 49–61. — DOI:

10.1680/jgrim.24.00001.

9. Zuev S. S., Makoveczkij O. A. Zakonomernosti izmeneniya mexanicheskix i fil`tracionny`x svojstv poluskal`ny`x gruntov, modificirovanny`x strujnoj cementaciej // Zhilishhnoe stroitel`stvo. — 2024. — № 9. — S. 30–35. — DOI: 10.31659/0044-4472-2024-9-30-35.

10. Liu R., Xu Z., Zhu Z., Ding Y. Enhancing Foundation Strength and Minimizing Uneven Settlement Through Split Grouting // Shock and Vibration. — 2025. — Art. 5130655. — DOI: 10.1155/vib/5130655.

11. Bogov S. G. K voprosu teoreticheskogo opredeleniya diametra zakrepleniya gruntov po strujnoj texnologii // Sovremennoe stroitel`stvo i arxitektura. — 2025. — № 8 (63). — DOI: 10.60797/mca.2025.63.1.

12. Aghamolaei M., Alavi S. M., Talarposhti S. S., Ardabili A. A. K. Assessing Jet Grout Column Diameters in Loose to Medium Silty Soils Based on Field Observations // International Journal of Geomechanics. — 2025. — Vol. 25, No. 9. — DOI: 10.1061/IJGNAI.GMENG-11251.

13. Zuev S. S., Makoveczkij O. A. Opy`t ustrojstva i ispy`tanij gruntocementny`x svaj v prosadochny`x gruntax // Zhilishhnoe stroitel`stvo. — 2025. — № 9. — S. 34–41. — DOI: 10.31659/0044-4472-2025-9-34-41.

14. Sabermahani M., Hajisalimi A. Field Study on Jet Grouting Columns Performance Above and Below Groundwater Table in Sandy Soil // Case Studies in Construction Materials. — 2025. — Vol. 23. — Art. e05105. — DOI: 10.1016/j.cscm.2025.e05105.

15. Vlasov M. A., Gerasimov O. V., Prostov S. M. Osobennosti geologicheskogo stroeniya gruntovogo osnovaniya ustanovki glavnogo provetrivaniya stroyashhejsya shaxty` // Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo texnicheskogo universiteta. — 2025. — № 2 (168). — S. 5–21. — DOI: 10.26730/1999-4125-2025-2-5-21.

16. Zamanian M., Payan M., Salimi M. et al. Comparative Efficacy of Grouting and Mixing Methods for Stabilizing Collapsible Soils with Nano-Clay and Cement // Case Studies in Construction Materials. — 2025. — Vol. 23. — Art. e05159. — DOI: 10.1016/j.cscm.2025.e05159.

17. Malinin A. G., Salmin I. A. O potere davleniya rabochej zhidkosti v naporny`x rukavax pri strujnoj cementacii gruntov // Zhilishhnoe stroitel`stvo. — 2025. — № 9. — S. 24–28. — DOI: 10.31659/0044-4472-2025-9-24-28.

18. Zhu X., Zhao W., Fang S. et al. Study of Performance and Engineering Application of D-RJP Jet Grouting Technology in Anchorage Foundation Reinforcement for Deep Suspension Bridge Excavations // Applied Sciences. — 2025. — Vol. 15, No. 16. — Art. 8985. — DOI: 10.3390/app15168985.

19. Bogov S. G. Texnologicheskie aspekty` zakrepleniya gruntov cementny`mi rastvorami // Sovremennoe stroitel`stvo i arxitektura. — 2025. — № 12 (67). — DOI: 10.60797/mca.2025.67.2.

20. Pedrotti M., Lyons J., El Mountassir G., Kuras O., Lunn R. J. A Transport Model for the Permeation of Colloidal Silica // Acta Geotechnica. — 2026. — DOI: 10.1007/s11440-026-03117-z.

21. Bogov S. G. Ocenka primeneniya strujnoj texnologii dlya resheniya zadach po stabilizacii gruntovy`x osnovanij // Sovremennoe stroitel`stvo i arxitektura. — 2026. — № 7 (74). — DOI: 10.60797/mca.2026.74.1.

22. Guo P., Xue P., Wang Y., Ou Q. In-Situ Measuring High-Pressure Jet Grouting Induced Evolution of Three-Dimensional Earth Pressure and Excess Pore Water Pressure in Coastal Soft Soils // Measurement. — 2026. — Vol. 278. — Art. 121768. — DOI: 10.1016/j.measurement.2026.121768.

Статья поступила в редакцию 25.06.2026; одобрена после рецензирования 04.08.2026; принята к публикации 08.10.2026.

The article was submitted 25.06.2026; approved after peer review 04.08.2026; accepted for publication 08.10.2026.