

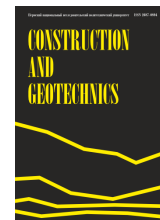


**пермский
политех**

CONSTRUCTION AND GEOTECHNICS

Т. 16, № 2, 2025

<http://vestnik.pstu.ru/arhit/about/inf/>



DOI: 10.15593/2224-9826/2025.2.01

УДК 624.159.4

ОБЗОР СПОСОБОВ УСИЛЕНИЯ ГРУНТОВОГО ОСНОВАНИЯ ВЫСОКОНАПОРНЫМ ИНЪЕЦИРОВАНИЕМ

М.Л. Нуждин¹, Л.В. Нуждин², А.В. Фельдбуш³

¹Научно-исследовательский венчурный центр «Геотехника»
Новосибирского государственного архитектурно-строительного
университета (Сибстрин), Новосибирск, Российская Федерация

²Управление научных исследований, экспертизы, планирования
и внедрения Новосибирского государственного архитектурно-
строительного университета (Сибстрин), Новосибирск, Российская Федерация

³Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин),
Новосибирск, Российская Федерация

О СТАТЬЕ

Получена: 07 июля 2024
Одобрена: 22 января 2025
Принята к публикации:
2 июня 2025

Ключевые слова:

высоконапорное инъецирование,
направленное инъецирование,
усиление грунтового основания,
усиление фундаментов.

АННОТАЦИЯ

Представлен обзор способов усиления грунтового основания высоконапорным инъецированием – нагнетанием в режиме гидроразрыва. При высоконапорном инъецировании цементно-песчаный раствор под давлением нарушает сплошность грунтового массива и заполняет образовавшиеся полости. После твердения сформированные инъециционные тела армируют основание и уплотняют окружающий грунт.

Метод высоконапорного инъецирования позволяет решать большое количество геотехнических задач. Однако его существенным недостатком является неопределенность количества, направления и размеров трещин, возникающих в результате нарушения сплошности грунтового массива при давлении нагнетания, превышающем структурную прочность грунта.

В настоящее время существует несколько подходов к решению этой проблемы: использование инъекторов специальной конструкции; выполнение технологических приемов, локализирующих распространение инъециционного раствора; метод пакетного высоконапорного инъецирования.

В результате выполненного анализа намечены перспективы дальнейших исследований по усовершенствованию метода высоконапорного инъецирования.

© **Нуждин Матвей Леонидович** – кандидат технических наук, e-mail: 89139059520@mail.ru, ORCID: 0000-0001-8001-7299.
Нуждин Леонид Викторович – кандидат технических наук, профессор, e-mail: Nuzhdin_ML@mail.ru, ORCID: 0000-0001-9727-9834.
Фельдбуш Александр Владимирович – аспирант, e-mail: igof.sibstrin@yandex.ru.

Matvey L. Nuzhdin – Ph. D. in Technical Sciences, e-mail: 89139059520@mail.ru, ORCID: 0000-0001-8001-7299.
Leonid V. Nuzhdin – Ph. D. in Technical Sciences, Professor, e-mail: Nuzhdin_ML@mail.ru, ORCID: 0000-0001-9727-9834.
Aleksandr V. Feldbush – Postgraduate Student, e-mail: igof.sibstrin@yandex.ru.



Эта статья доступна в соответствии с условиями лицензии Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)

OVERVIEW OF WAYS TO STRENGTHEN THE SOIL BASE HIGH-PRESSURE INJECTION

M.L. Nuzhdin¹, L.V. Nuzhdin², A.V. Feldbush³

¹Geotechnika Research and Development Venture Center of Novosibirsk State University
of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Novosibirsk, Russian Federation

²Directorate of Research, Expertise, Planning and Implementation of Novosibirsk State University
of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Novosibirsk, Russian Federation

³Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Novosibirsk, Russian Federation

ARTICLE INFO

Received: 07 July 2024
Approved: 22 January 2025
Accepted for publication:
02 June 2025

Keywords:

high-pressure injection, the directed
injection, strengthening soil base,
strengthening foundations struc-
tures.

ABSTRACT

The article provides an overview of ways to strengthen the soil base by high-pressure injection – injection in the hydraulic fracturing mode. During high-pressure injection, a cement-sand solution under pressure disrupts the continuity of the soil mass and fills the cavities formed. After hardening, the formed injection bodies reinforce the base and seal the surrounding soil.

The high-pressure injection method allows solving a large number of geotechnical problems. However, its significant disadvantage is the uncertainty of the number, direction and size of cracks resulting from a violation of the continuity of the soil mass at an injection pressure exceeding the structural strength of the soil.

Currently, there are several approaches to solving this problem: the use of special design injectors; the implementation of technological techniques that localize the spread of the injection solution; the method of group high-pressure injection.

As a result of the review, prospects for further research on improving the method of high-pressure injection are outlined.

Введение

Метод высоконапорного инъецирования подвижного цементно-песчаного раствора успешно применяется для решения многих геотехнических задач: усиления грунтового основания и фундаментов аварийных и реконструируемых зданий [1–3]; выравнивания неравномерных деформаций и кренов зданий и сооружений [4–7]; усиления свайных фундаментов [8–10]; изменения напряженно-деформированного состояния грунтового основания зданий и сооружений в процессе строительства или реконструкции [11]; изготовления инъекционных, буроинъекционных и напорнонабивных свай [12]; стабилизации лессовых просадочных грунтов [13]; усиления и лечения земляного полотна железных и автомобильных дорог [14]; инженерной подготовки под новое строительство (создание геомассивов и геокомпозитных оснований) [15]; снижения колебаний фундаментов под машины с динамическими нагрузками [16, 17].

К достоинствам метода высоконапорного инъецирования относится:

- техническая простота, возможность использования недорогого оборудования и доступных материалов;
- низкая себестоимость при относительно высокой эффективности;
- возможность проведения работ в широком диапазоне грунтовых условий;
- использование малогабаритного оборудования, возможность проведения работ в стесненном пространстве;
- возможность ведения работ без выселения жильцов, остановки производства или движения транспорта;

- отсутствие негативных динамических воздействий при проведении работ;
- возможность оперативного изменения проектного решения и параметров производства работ;
- экологическая чистота метода.

Однако существенным недостатком высоконапорного инъецирования является неопределенность количества, направления и размеров трещин, возникающих в результате нарушения сплошности грунтового массива при давлении нагнетания, превышающем структурную прочность грунта [13, 18, 19 и др.]

К настоящему времени разработаны следующие подходы к решению этой проблемы:

- использование инъекторов (и другого оборудования) с конструктивными особенностями, способствующими направленному инъецированию;
- технологические приемы и приспособления, локализирующие распространение инъекционного раствора или не допускающие образования трещин гидроразрыва;
- пакетное высоконапорное инъецирование.

Инъекторы с конструктивными особенностями, способствующими направленному инъецированию

В строительной практике часто применяется «манжетная технология». Инъецирование ведется через металлические перфорированные трубы с отверстиями, расположенными по высоте с определенным шагом. Снаружи отверстия перекрываются резиновыми манжетами, выполняющими роль обратного клапана (рис. 1).

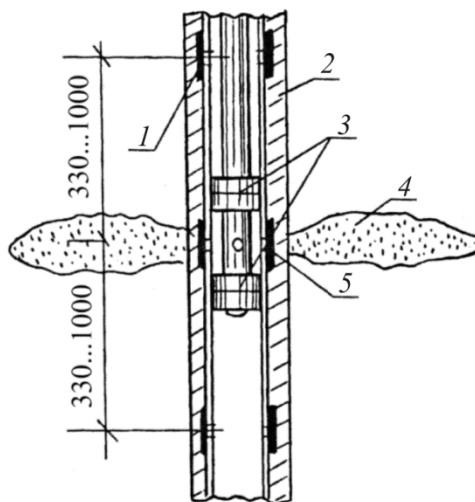


Рис. 1. Схема манжетной колонны: 1 – резиновая манжета; 2 – обойма;
3 – пакер; 4 – инъекционный раствор; 5 – выпускное отверстие

Fig. 1. The scheme of the cuff column: 1 – rubber cuff; 2 – clip;
3 – packer; 4 – injection solution; 5 – outlet

Пространство между грунтом и трубой заполняется раствором, при твердении которого образуется обойма толщиной 3...5 см, не позволяющая инъекционному раствору распространяться вдоль инъектора вверх. Инъектор с двойным тампоном (пакером) погружается до проектного горизонта – уровня соответствующих отверстий. Давление нагнетания

разрывает манжету и обойму, инъекционный раствор внедряется в грунт, при этом пакер препятствует движению раствора внутри инъектора.

Разработана технология «многократного инъецирования», предусматривающая повторное нагнетание на тех же горизонтах. Это приводит к более эффективному уплотнению грунта за счет образования новых трещин в грунтовом массиве в непосредственной близости от существующих, заполненных затвердевшим раствором [19].

А.Л. Ланис и др. предлагают конструкцию инъектора в виде двухстороннего усеченного конуса, состыкованного большими основаниями с непрерывными винтовыми лопастями, буровым наконечником и выпускными отверстиями. Лопасть в верхней части конуса имеет обратное направление навивки относительно нижней. При проходке скважины разрыхленный буровым наконечником грунт перемещается по винтовой лопасти вверх и создает в средней части грунтовую пробку, препятствующую распространению инъекционного раствора и ограничивающую зону инъецирования (рис. 2) [20].

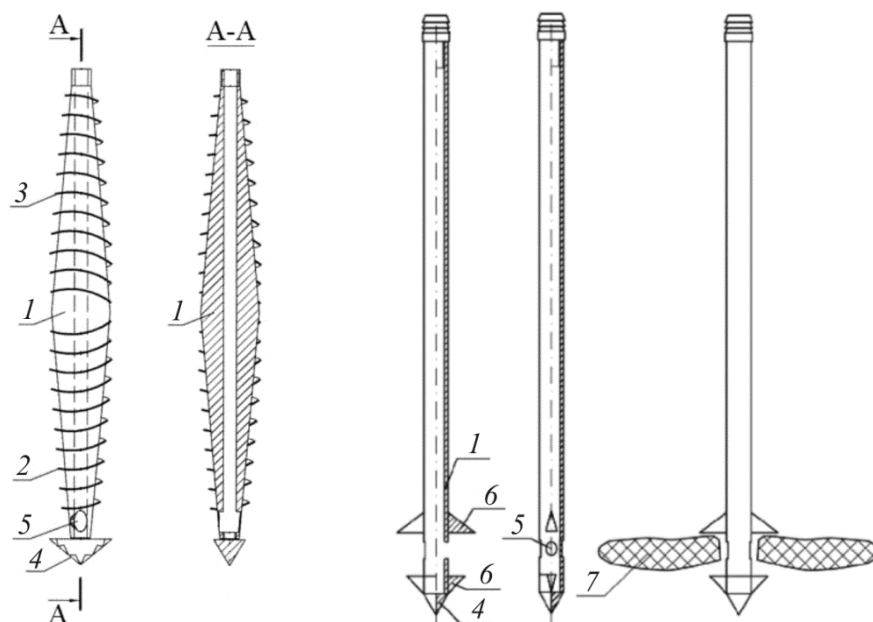


Рис. 2. Схемы инъекторов конструкции М.Я. Крицкого, А.Л. Ланиса и др.:
1 – инъектор; 2, 3 – винтовые лопасти; 4 – буровой наконечник; 5 – выпускные отверстия;
6 – основной и дополнительный резцы; 7 – инъекционный раствор

Fig. 2. Schemes of injectors designed by M.Y. Kritsky, A.L. Lanis, etc.: 1 – injector; 2, 3 – screw blades;
4 – drill bit; 5 – outlet holes; 6 – main and additional cutters; 7 – injection solution

В изобретении М.Я. Крицкого, А.Л. Ланиса и др. запатентована конструкция инъектора с резцами, создающими концентраторы напряжений путем разрушения структуры грунта при его погружении. Это снижает значение давления, необходимого для разрыва грунтового массива, и обеспечивает движение раствора, в первую очередь в этих направлениях (см. рис. 2).

В.Ф. Карякин и др. предлагает бурить скважину ниже подошвы фундамента, заполнять ее глинистым раствором и помещать в нее полый цилиндр с концентраторами напряжений в виде засечек. При нагнетании раствор по концентраторам напряжений прорывает цилиндр, как гидроклин, и образует горизонтальные трещины гидроразрыва.

Б.Н. Кузин, Б.Н. Исаев и др. рекомендуют концентратор напряжений на стенке скважины выполнять резцом, установленным на инъекторе. В соответствии с текстом другого

патента на изобретение Б.Н. Исаева и др. создание продольных пазов в стенках скважины осуществляется выдвижным вдавливающим и вращающимся диском в форме чечевицы. Сверху скважину тампонируют быстротвердеющим материалом, а инъецирование производят через перфорированный конец инъектора с теряемой манжетой.

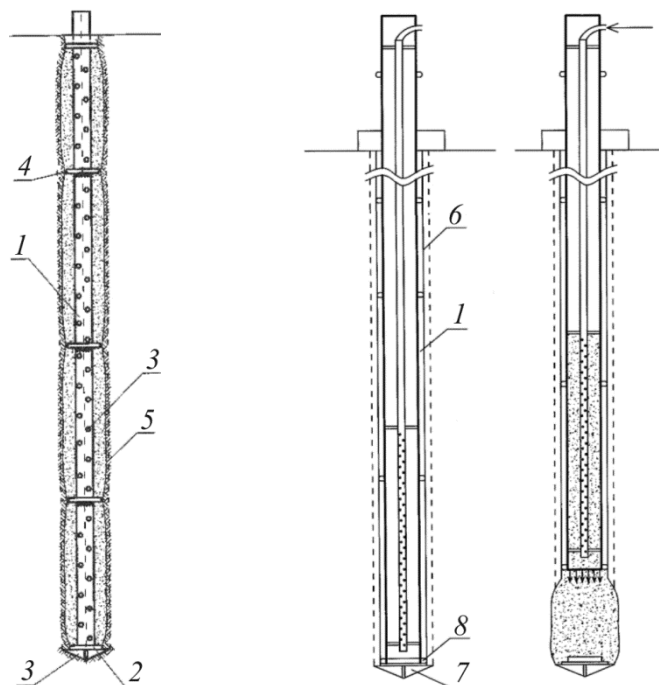


Рис. 3. Схемы свай конструкции А.И. Полищука, А.А. Петухова и др.:

1 – инъекторная труба; 2 – уширение в виде диска; 3 – режущие пластины; 4 – промежуточные уширения в виде дисков; 5 – тело выполненной сваи; 6 – обсадная труба; 7, 8 – упоры

Fig. 3. Schemes of piles of construction by A.I. Polishchuk, A.A. Petukhov, etc.:

1 – injection pipe; 2 – widening in the form of a disk; 3 – cutting plates; 4 – intermediate widening in the form of disks; 5 – the body of the completed pile; 6 – casing pipe; 7, 8 – stops

В.И. Осипов и С.Д. Филимонов для усиления предлагают использовать инъекторы с отверстиями, перекрытыми заглушками, разрушающимися под давлением инъецирования. После гидроразрыва осуществляется обжатие грунта путем расширения трещин повторной подачей цементного раствора.

Конструкция напорнонабивной сваи А.И. Полищука, А.А. Петухова и др. состоит из инъекторной трубы с конусным наконечником – круглым диском, превышающим диаметр трубы и режущих пластин, выступающих за основания диска (рис. 3).

При погружении между трубой и стенкой скважины образуется зазор, препятствующий засорению отверстий инъектора, одновременно пластинами нарезаются продольные пазы, ослабляющие грунт пристенной области. Образованную скважину сверху тампонируют и через инъектор нагнетают цементно-песчаную смесь. При этом разрыхление пристенной области грунта способствует проникновению раствора и созданию уплотненной зоны.

Конструкция другой сваи А.И. Полищука и А.А. Петухова представлена обсадной трубой с теряемым конусным наконечником и инъекторной трубой внутри нее, оборудованной дополнительными упорами в виде дисков с диаметрами, равными внутреннему диаметру обсадной трубы. Инъектор между упорами имеет перфорацию. После погруже-

ния инъектора на проектную отметку его фиксируют и нагнетают цементно-песчаный раствор, распространяющийся между упорами. Трубу приподнимают и продолжают процесс инъектирования (см. рис. 3) [21].

Технологические приемы и приспособления, локализирующие распространение инъекционного раствора или не допускающие образование трещин гидроразрыва

В решении В.С. Миронова и А.В. Лубягина [22] усиление грунтового основания фундаментов высоконапорным инъектированием предлагается производить в два этапа. На первом этапе выполняется инъектирование грунта по контуру усиливаемой зоны с целью создания непроницаемого экрана, препятствующего распространению раствора за его пределы. На втором нагнетание производится внутрь ранее оконтуренной зоны (рис. 4).

М.Я. Крицкий и А.Л. Ланис предлагают ограничивать усиливаемую зону путем инъектирования цементно-песчаного раствора в вертикальную щелевую полость, образованную стальной струной, натянутой между оконтуривающими инъекторами при их погружении. Образованная с помощью натянутой стальной струны вертикальная полость обеспечивает создание сплошной стенки, ограничивающей распространение раствора (см. рис. 4). О.И. Лобов и др. рекомендуют создавать контур нагнетанием через двухщелевые инъекторы. А.М. Голованов и др. предполагают выполнять оконтуривающий экран из буронабивных свай (см. рис. 4).

В.И. Осипов и С.Д. Филимонов, напротив, для уплотнения водонасыщенных грунтов в основании плитных фундаментов производят подачу цементного раствора через инъекторы, установленные рядами в радиальном направлении от центра к периферии с целью отжатия и отвода воды.

И.К. Попсуенко и О.А. Шулятьев выполняют инъектирование под фундаменты существующих зданий в следующей последовательности: бурение технологической скважины с установкой в нее кондуктора; заполнение ее цементным раствором с последующим разбуhrиванием затвердевшего цементного камня и бурением ее до проектной глубины; образование под фундаментом горизонтальной полости высокоскоростной струей цементного раствора; установка манжетного инъектора и заполнение полости цементно-песчаным раствором под давлением.

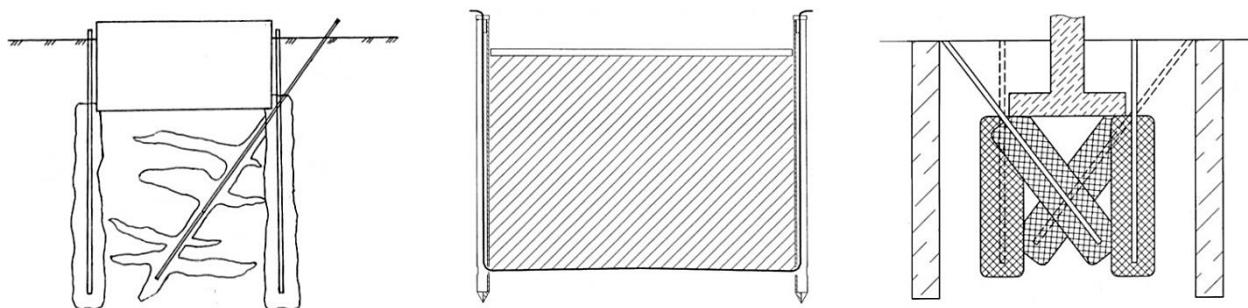


Рис. 4. Иллюстрации к изобретениям В.С. Миронова
и А.В. Лубягина, М.Я. Крицкого и А.Л. Ланиса, А.М. Голованова и др.

Fig. 4. Schemes of the inventions by V.S. Mironov and A.V. Lubyagin,
M.Ya. Kritsky and A.L. Lanis, A.M. Golovanov and others

Для создания уширенной пяты буроинъекционных свай определенной формы А.Б. Пономарев и К.В. Голубев предлагают надевать на нижний перфорированный конец иньектора эластичную резиновую камеру, растягивающуюся в процессе иньектирования и образующую в грунте шаровидное тело.

Я.А. Пронозин и М.А. Самохвалов рекомендуют использовать мембрану-стакан. Конструкция сваи фирмы «Soilex» предусматривает крепление к нижнему концу арматурного каркаса сложенной специальным образом оболочки из пачки металлических листов, раскладывающейся при подаче бетонной смеси.

Для устранения возможности неконтролируемого распространения раствора в грунте при иньектировании через одиночный иньектор В.В. Лушников и В.А. Богомоллов нагнетают раствор с кратковременными паузами для «самозалечивания» возникающих трещин и разрывов в грунтовом массиве (рис. 5). После в пределах образуемой полости выполняется предварительное ослабление пристенного слоя с целью формирования оболочки из слабого грунта, препятствующей образованию трещин, и производится нагнетание раствора под давлением, не превышающим величины давления гидроразрыва с опрессовкой грунта высоким давлением после завершения процесса иньектирования [13].

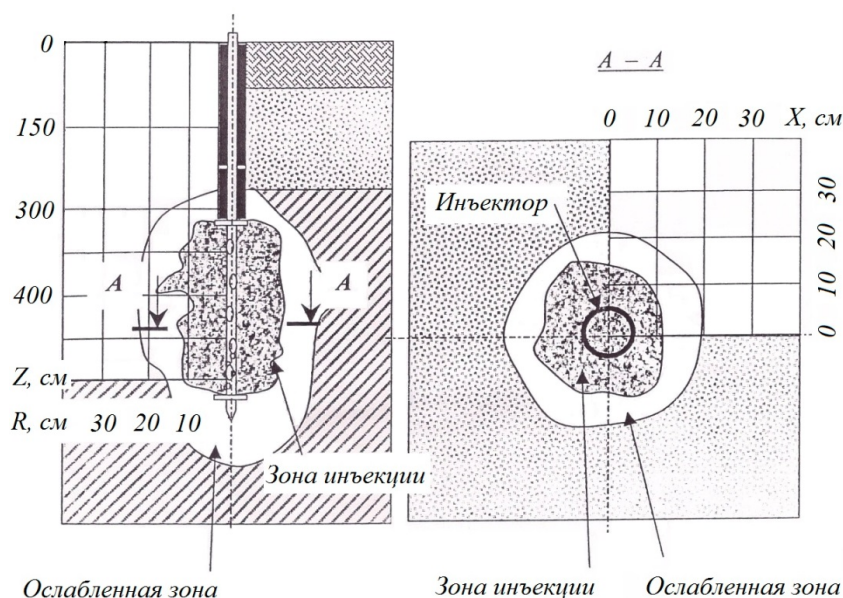


Рис. 5. Принципиальная схема иньектирования с предварительным ослаблением пристенного слоя [13]

Fig. 5. Schemes of injection with preliminary weakening of the wall layer [13]

Пакетное высоконапорное иньектирование

Сущность метода заключается в одновременном нагнетании цементно-песчаного раствора через группу иньекторов (рис. 6).

При расположении иньекторов вдоль прямой линии с образованием в грунте под их нижними концами линейных полостей глубиной $10d \dots 20d$ (где d – диаметр иньектора) в основании формируется плоское вертикальное тело. Одновременная подача раствора через иньекторы, расположенные в вершинах равностороннего треугольника, с образованием точечных полостей глубиной $1d \dots 3d$ приводит к созданию горизонтального тела дисковидной формы. В обоих случаях расстояния между иньекторами не должны превышать $20d$.

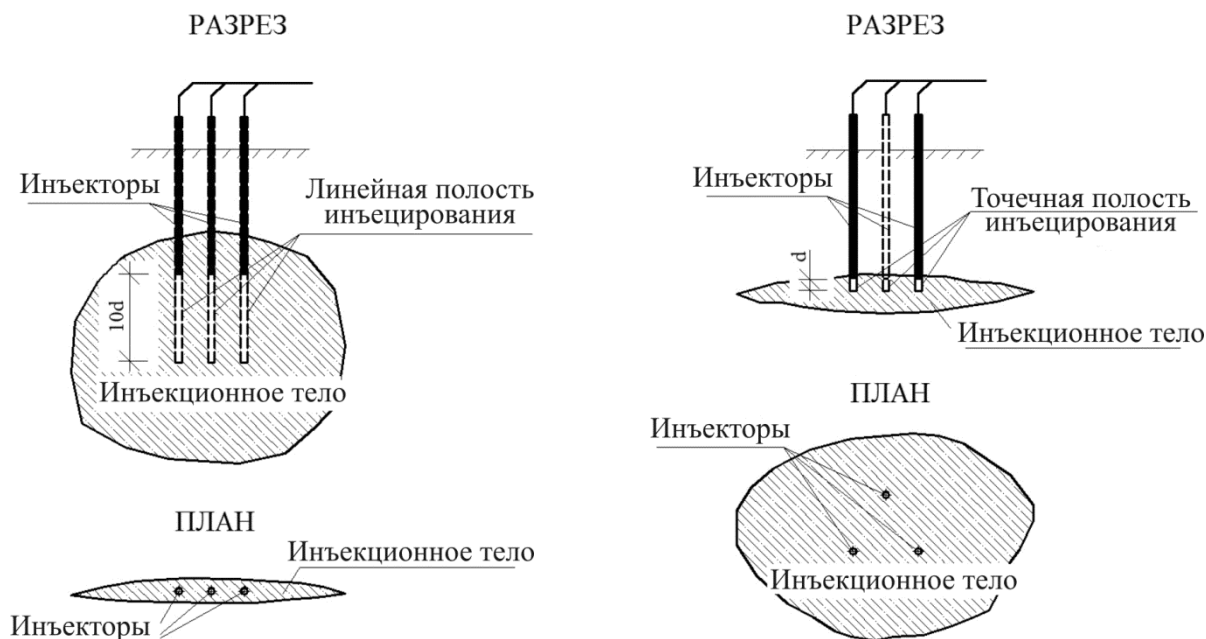


Рис. 6. Схема формирования вертикального и горизонтального инъекционного тела пакетным высоконапорным инъецированием

Fig. 6. A scheme for the formation of a vertical and horizontal injection body by group high-pressure injection

В натуральных условиях в глинистых грунтах при размещении иньекторов вдоль прямой линии на расстоянии 600 мм ($\sim 10d$) друг от друга и линейных полостях инъецирования высотой 750 мм ($\sim 13d$) формируются плоские вертикальные тела толщиной 250...350 мм и более, длиной 1,8...2,1 м и высотой 1,6...1,8 м [18].

Заключение

Обзор способов усиления грунтового основания высоконапорным инъецированием позволяет сделать следующие выводы.

1. Высоконапорное инъецирование подвижного цементно-песчаного раствора – эффективный метод усиления грунтового основания. Формирование инъекционных тел может привести к существенному уплотнению окружающего грунта и повышению его деформационных характеристик; кроме этого, строительные свойства грунтового основания могут быть значительно улучшены за счет армирования твердыми инъекционными телами.

2. Существенным недостатком высоконапорного инъецирования является неопределенность количества, направления и размеров трещин, возникающих в результате нарушения сплошности грунтового массива при давлении нагнетания, превышающем структурную прочность грунта.

Разработанный к настоящему времени ряд технологических приемов нагнетания и конструкций иньекторов позволяет в той или иной степени влиять на результат инъекционных работ. Однако большинство из них трудоемки и (или) материалозатратны, а некоторые, вполне очевидно, и недостаточно надежны.

3. Усовершенствование технологии высоконапорного инъецирования подвижных цементно-песчаных растворов является актуальной задачей, еще требующей проведения специальных уточняющих исследований.

Перспективными направлениями дальнейших исследований являются:

- исследование физико-механических свойств грунта после усиления основания пакетным высоконапорным инъецированием;
- учет уплотнения грунтового массива вокруг инъекционных тел при расчетах усиления основания фундаментов.

Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Вклад авторов. Все авторы сделали равный вклад в подготовку публикации.

Библиографический список

1. Простов, С.М. Основные тенденции и направления развития технических решений для закрепления неустойчивых грунтовых оснований сооружений / С.М. Простов // Проблемы строительного производства и управления недвижимостью: материалы VI Междунар. науч.-практ. конф. – Кемерово, 2020. – С. 274–286.
2. Croce, P. Jet Grouting. Technology, design and control / P. Croce, A. Flora, G. Modoni. – London, 2014. – 284 p.
3. A field experimental study on the diffusion behavior of expanding polymer grouting material in soil / Ch. Guo [et al.] // Soil Mechanics and Foundation Engineering. – 2019. – № 56. – P. 171–177. DOI: 10.1007/s11204-019-09586-7
4. Способ корректировки вертикального положения зданий и сооружений на плитном фундаменте: пат. 2352723 E02D Рос. Федерация / Нуждин Л.В., Нуждин М.Л. – 20.04.2009.
5. Нуждин, М.Л. Расчетное обоснование усиления грунтового основания многоэтажного жилого дома в г. Новосибирске пакетным высоконапорным инъецированием / М.Л. Нуждин, А.Б. Пономарев // Проблемы строительного производства и управления недвижимостью: материалы VI Междунар. науч.-практ. конф. – Кемерово, 2020. – С. 261–266.
6. Шапошников, А.В. Выравнивание фундаментов зданий методом инъекции раствора на основе цемента / А.В. Шапошников, В.В. Семкин, М.Н. Ибрагимов // Применение гидроразрывной технологии в практике строительства: тр. VI Петрухинских чтений. – М., 2022. – С. 75–86. DOI: 10.37538/2713-1149-2022-75-86
7. Попсуенко, И.К. Подъем фундаментов нагнетанием в их основания цементных растворов и расширяющихся геополимеров / И.К. Попсуенко, А.С. Борисов, П.П. Дегтярев // Применение гидроразрывной технологии в практике строительства: тр. VI Петрухинских чтений. – М., 2022. – С. 87–112. DOI: 10.37538/2713-1149-2022-87-112
8. Kumar, P. Bearing capacity of strip footing on clay soil reinforced with metal strips and with anchors / P. Kumar // Ground Improvement Techniques and Geosynthetics. IGS 2016. – Singapore, 2019. – Vol. 2. – P. 77–84.
9. Nuzhdin, M.L. Experimental studies on model pile foundations reinforced by hard inclusions / M.L. Nuzhdin, L.V. Nuzhdin, A.B. Ponomaryov // Geotechnics for Sustainable Infrastructure Development: Lecture Notes in Civil Engineering. – Singapore, 2019. – Vol. 62. – P. 193–197. DOI: 10.1007/978-981-15-2184-3_24.
10. Ramya, M. Behavioural study on geopolymer column soil / M. Ramya, S. Jeyapriya // Ground Improvement Techniques and Geosynthetics. – IGS 2016. – Singapore, 2019. – Vol. 2. – P. 1–9.

11. Шулятьев, О.А. Применение гидроразрывной технологии в практике строительства / О.А. Шулятьев // Применение гидроразрывной технологии в практике строительства: тр. VI Петрухинских чтений. – М., 2022. – С. 7–22. DOI: 10.37538/2713-1149-2022-7-22
12. Самохвалов, М.А. Обзор существующих конструкций буроинъекционных анкерных свай / М.А. Самохвалов, А.В. Гейдт, А.А. Паронко // Вестник МГСУ. – 2019. – Т.14, № 12. – С. 1530–1554. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.12.1530-1554
13. Лушников, В.В. Высоконапорная инъекция грунтов как способ создания геотехнических систем в строительстве / В.В. Лушников, В.А. Богомолов // Инженерно-геологические проблемы урбанизированных территорий: материалы междунар. симп. – Екатеринбург, 2001. – Т. 2. – С. 732–740.
14. Ланис, А.Л. Армирование основной площадки высокой насыпи с инъектированием твердеющих растворов / А.Л. Ланис // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. – 2019. – № 3 (50). – С. 38–46.
15. Мозгачева, О.А. Опыт проектирования и строительства защитных мероприятий в виде геотехнического барьера по методу компенсационного нагнетания / О.А. Мозгачева // Применение гидроразрывной технологии в практике строительства: тр. VI Петрухинских чтений. – М., 2022. – С. 113–138. DOI: 10.37538/2713-1149-2022-113-138
16. Нуждин, М.Л. Снижение колебаний свайных фундаментов под машины с динамическими нагрузками методом высоконапорного группового инъектирования / М.Л. Нуждин, Л.В. Нуждин // Construction and Geotechnics. – 2020. – Т. 11, № 1. – С. 41–52. DOI: 10.15593/2224-9826/2020.1.04
17. Xu, C. Dynamic response of a scaled model of geosynthetic reinforced soil integrated bridge system by shaking table test / C. Xu, M. Luo, J. Han // Proceedings of the 17th African Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. – Pretoria, 2019. – P. 261–266.
18. Нуждин, М.Л. Экспериментальное подтверждение возможности создания в грунтовом массиве инъекционных тел установленной формы / М.Л. Нуждин, Л.В. Нуждин // Известия вузов. Строительство. – 2019. – № 10. – С. 101–112. DOI: 10.32683/0536-1052-2019-730-10-101-112
19. Ибрагимов, М.Н. Вопросы проектирования и производства уплотнения грунтов инъекцией растворов по гидроразрывной технологии / М.Н. Ибрагимов // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 2015. – № 2. – С. 22–27.
20. Инъектор для закрепления грунтов: пат. 165656 E02D Рос. Федерация / Ланис А.Л., Беяков Л.О., Овчинников С.А. – 27.10.2016.
21. Способ возведения инъекционной сваи (варианты): пат. 2263745 E02D Рос. Федерация / Полищук А.И., Петухов А.А., Нуйкин С.С. – 10.11.2005.
22. Способ уплотнения грунта: пат. 2119009 6E02D Рос. Федерация / Лубягин А.В., Миронов В.С. – 20.09.1998.

References

1. Prostov S.M. The main trends and directions of development of technical solutions for fixing unstable ground foundations of structures. Problems of construction production and real estate management. *Problemy stroitel'nogo proizvodstva i upravleniya nedvizhimost'yu: Materialy VI mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferenci*, Kemerovo, 2020, pp. 274-286.
2. Croce P., Flora A., Modoni G. Jet Grouting. Technology, design and control. London, 2014, 284 p.

3. Guo Ch., Sun B., Wang F., Shi M., Li X. A field experimental study on the diffusion behavior of expanding polymer grouting material in soil. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 2019, no. 56. pp. 171-177. DOI: 10.1007/s11204-019-09586-7.
4. Nuzhdin L.V., Nuzhdin M.L. Sposob korrekcirovki vertikal'nogo polozheniya zdaniy i sooruzhenij na plitnom fundamente [Method of correcting the vertical position of buildings and structures on a slab foundation]. Patent Rossiiskaia Federatsiia no. 2352723 E02D (2009).
5. Nuzhdin M.L., Ponomarev A.B. Computational justification for strengthening the soil foundation of a multi-storey residential building in Novosibirsk by batch high-pressure injection. *Problemy stroitel'nogo proizvodstva i upravleniya nedvizhimost'yu: Materialy VI mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii*, Kemerovo, 2020, pp. 261-266.
6. Shaposhnikov A.V., Semkin V.V., Ibragimov M.N. Levelling of building foundations by injection of cement-based mortar. Application of hydraulic fracturing technology in construction practice. *Primenenie gidrorazryvnoj tekhnologii v praktike stroitel'stva: Trudy VI Petruhinskih chtenii*, Moscow, 2022, pp. 75-86. DOI: 10.37538/2713-1149-2022-75-86.
7. Popsuenko I.K., Borisov A.S., Degtyarev P.P. Lifting foundations by injection of cement mortars and expanding geopolymers into their bases. Application of hydraulic fracturing technology in construction practice. *Primenenie gidrorazryvnoj tekhnologii v praktike stroitel'stva: Trudy VI Petruhinskih chtenii*, Moscow, 2022, pp. 87-112. DOI: 10.37538/2713-1149-2022-87-112.
8. Kumar P. Bearing Capacity of Strip Footing on Clay Soil Reinforced with Metal Strips and with Anchors. *Ground Improvement Techniques and Geosynthetics*, IGS 2016, Singapore, 2019, vol. 2, pp. 77-84.
9. Nuzhdin M.L., Nuzhdin L.V., Ponomaryov A.B. Experimental studies on model pile foundations reinforced by hard inclusions. *Geotechnics for Sustainable Infrastructure Development: Lecture Notes in Civil Engineering*, Singapore, 2019, vol. 62, pp. 193-197. DOI: 10.1007/978-981-15-2184-3_24.
10. Ramya M., Jeyapriya S. Behavioural Study on Geopolymer Column Soil. *Ground Improvement Techniques and Geosynthetics*, IGS 2016, Singapore, 2019, vol. 2, pp. 1-9.
11. Shulyatyev O.A. Application of hydraulic fracturing technology in construction practice. Application of hydraulic fracturing technology in construction practice. *Primenenie gidrorazryvnoj tekhnologii v praktike stroitel'stva: Trudy VI Petruhinskih chtenij*, Moscow, 2022, pp. 7-22. DOI: 10.37538/2713-1149-2022-7-22.
12. Samokhvalov M.A., Geydt A.V., Paronko A.A. Review of existing structures of boron-injection anchor piles. *Vestnik MGSU*, 2019, vol. 14, no. 12, pp. 1530-1554. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.12.1530-1554.
13. Lushnikov V.V., Bogomolov V.A. High-pressure injection of soils as a way to create geotechnogenic systems in construction. *Inzhenerno-geologicheskie problemy urbanizirovannyh territorij: materialy mezhdunarodnogo simpoziuma*, Yekaterinburg, 2001, vol. 2, pp. 732-740.
14. Lanis A.L. Reinforcement of the main site of a high embankment with injection of hardening solutions. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo universiteta putej soobshheniya*, 2019, vol. 3(50), pp. 38-46.
15. Mozhacheva O.A. Experience in the design and construction of protective measures in the form of a geotechnical barrier using the method of compensatory injection. Application of hydraulic fracturing technology in construction practice. *Primenenie gidrorazryvnoj tekhnologii v praktike stroitel'stva: Trudy VI Petruhinskih chtenij*. Moscow, 2022, pp. 113-138. DOI: 10.37538/2713-1149-2022-113-138.

16. Nuzhdin M.L., Nuzhdin L.V. Reduction of vibrations of pile foundations for machines with dynamic loads by high-pressure group injection. *Construction and Geotechnics*, 2020, vol. 11, iss. 1, pp. 41-52. DOI: 10.15593/2224-9826/2020.1.04.
17. Xu C., Luo M., Han J. Dynamic response of a scaled model of geosynthetic reinforced soil integrated bridge system by shaking table test. *Proceedings of the 17th African Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Pretoria, 2019, pp. 261-266.
18. Nuzhdin M.L., Nuzhdin L.V. Experimental confirmation of the possibility of creating injection bodies of an established shape in a soil massif. *Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo*, 2019, vol. 10, pp. 101-112. DOI: 10.32683/0536-1052-2019-730-10-101-112.
19. Ibragimov M.N. Issues of design and production of soil compaction by injection of solutions using hydraulic fracturing technology. *Osnovaniya, fundamenty i mexanika gruntov*, 2015, vol. 2, pp. 22-27.
20. Lanis A.L., Belyakov L.O., Ovchinnikov S.A. In'ektor dlya zakrepleniya gruntov [An injector for fixing soils]. Patent Rossiiskaia Federatsiia no. 165656 E02D (2016).
21. Polishchuk A.I., Petukhov A.A., Nuikin S.S. Sposob vozvedeniya in'ekcionnoj svai (varianty) [Method of construction of an injection pile (variants)]. Patent Rossiiskaia Federatsiia no. 2263745 E02D (2005).
22. Lubyagin A.V., Mironov V.S. Sposob uplotneniya grunta [Method of soil compaction]. Patent Rossiiskaia Federatsiia no. 2119009 6E02D (1998).