

Обзорная статья / Review article

УДК 624.138

<https://doi.org/10.31660/2782-232X-2025-1-21-38>

EDN: MOWBVS

2.1.2 Основания и фундаменты,
подземные сооружения (технические науки)

Метод гидроразрыва для усиления грунтовых оснований под фундаментами зданий при горизонтальной проходке

Я. А. Пронозин ✉, И. В. Сугоняев, Е. П. Брагарь, М. Д. Кайгородов

Тюменский индустриальный университет, ул. Володарского, 38, Тюмень, 625000,

Российская Федерация

✉ geofond.tgasu@gmail.com

Аннотация. Проанализированы методы гидравлического разрыва пласта при горизонтально ориентированных скважинах, а также способы усиления грунтовых оснований под фундаментами существующих зданий с применением высоконапорной инъекции (в том числе выполненных по манжетной технологии). Рассмотрено поведение гидроразрыва в массиве грунта, которое, в свою очередь, также зависит от давления гидроразрыва и напряженно-деформированного состояния грунта. Представлена сводная таблица с формулами отечественных и зарубежных ученых по определению давления, при котором происходит разрыв грунта. На основании выявленных преимуществ и недостатков рассмотренных методов закрепления грунтовых оснований предложен альтернативный способ – усиление оснований методом цементации при горизонтально ориентированной проходке. Суть технологии заключается в устройстве (с применением технологий, позволяющих производить горизонтальное бурение бестраншейным способом) горизонтальных полиэтиленовых (колтюбинговых) труб под фундаментом здания либо вдоль него, через которые по манжетной технологии в грунт под давлением, равным давлению разрыва грунта, будет поступать твердеющий раствор, образуя при этом гидравлические разрывы в грунте и тем самым увеличивая его механические характеристики.

Ключевые слова: горизонтально ориентированная цементация, высоконапорная инъекция, усиление грунтового основания, гидроразрыв пласта, манжетная технология, обзор

Для цитирования: Пронозин Я. А., Сугоняев И. В., Брагарь Е. П., Кайгородов М. Д. Метод гидроразрыва для усиления грунтовых оснований под фундаментами зданий при горизонтальной проходке. *Архитектура, строительство, транспорт*. 2025;5(1):21–38. <https://doi.org/10.31660/2782-232X-2025-1-21-38> EDN: MOWBVS

Hydraulic fracturing method for strengthening soil foundations under building foundations during horizontal drilling

Yakov A. Pronozin ✉, Ivan V. Sugonyaev, Elena P. Bragar, Mikhail D. Kaigorodov

Industrial University of Tyumen, 38 Volodarskogo St., Tyumen, 625000, Russian Federation

✉ geofond.tgasu@gmail.com

Abstract. The study analyzed the methods of hydraulic fracturing in horizontally oriented wells, along with techniques for strengthening soil foundations under existing building foundations using high-pressure injection (including those performed using sleeve grouting technology). The behavior of hydraulic fracturing in the soil mass was considered, which, in turn, also depends on the hydraulic fracturing pressure and the

stress-strain state of the soil. A summary table was presented with formulas from domestic and foreign scientists for determining the pressure at which soil fracturing occurs. Based on the identified advantages and disadvantages of the considered soil foundation reinforcement methods, the authors proposed an alternative approach: strengthening the foundations using cementation during horizontally oriented excavation. The essence of the technology lies in the installation (using technologies that allow for trenchless horizontal drilling) of horizontal polyethylene (coiled tubing) pipes under or along the building foundation. Through these pipes, using sleeve grouting technology, a hardening solution will be injected into the soil under pressure equal to the soil fracturing pressure. This will create hydraulic fractures in the soil, thereby increasing its mechanical characteristics.

Keywords: horizontally oriented grouting, high-pressure injection, soil foundation reinforcement, hydraulic fracturing, sleeve grouting technology, review

For citation: Pronozin Y. A., Sugonyaev I. V., Bragar E. P., Kaigorodov M. D. Hydraulic fracturing method for strengthening soil foundations under building foundations during horizontal drilling. *Architecture, Construction, Transport*. 2025;5(1):21–38. (In Russ.) <https://doi.org/10.31660/2782-232X-2025-1-21-38>



1. Введение / Introduction

Обеспечение устойчивости зданий и сооружений является важной инженерной задачей. Необходимость усиления грунтовых оснований возникает как при строительстве новых объектов, так и при реконструкции уже существующих. Известен достаточно широкий спектр технологий укрепления слабых грунтов. В частности, хорошо себя зарекомендовал метод усиления через направленные гидроразрывы.

Целью настоящего исследования был анализ методов гидравлического разрыва пласта (ГРП) при горизонтально ориентированных скважинах, а также способов усиления грунтовых оснований под фундаментами существующих зданий с применением высоконапорной инъекции, в том числе выполненных по манжетной технологии. Было рассмотрено поведение гидроразрыва в массиве грунта, которое зависит от давления гидроразрыва и напряженно-деформированного состояния грунта.

Анализ литературных источников позволил выявить ряд ключевых особенностей существующих методов, их преимущества и недостатки. В частности, был сделан вывод, что усиление гидроразрывами производят зачастую с помощью вертикальных либо наклонных инъекторов, что требует остановки производственных процессов либо выселения жильцов, если усиление производится изнутри здания. На основании этого был предложен альтернативный метод – усиление грунтовых оснований методом цементации при горизонтально ориентированной проходке, – который позволяет укреплять грунтовое основание, не затрагивая внутреннее пространство здания.

2. Методы поиска литературы / Literature search methods

При выполнении литературного обзора основной акцент был сделан на применении гидравлических разрывов в различных областях промышленности, в том числе строительной отрасли, где гидроразрыв пласта применяется для усиления грунтовых оснований. В выборку были включены отечественные и зарубежные научные публикации, диссертационные исследования, патенты, монографии последних 10 лет.

Поиск литературы осуществлялся по ключевым словам: усиление грунтовых оснований, технология применения гидроразрывов в нефтедобывающей и строительной отрасли, технология горизонтально направленного бурения в нефтедобывающей и строительной отраслях, горизонтальные инъекторы, вертикальные и наклонные инъекторы, манжетная технология, цементация, высоконапорная инъекция, закрепление грунтов, изменение НДС грунта при гидроразрывах.

3. Обзор литературы / Literature review

Применение гидроразрывов в нефтедобывающей промышленности

Гидравлический разрыв пласта уже более 50 лет используется в нефтяной промышленности [1] для получения доступа к различным углеводородным коллекторам путем создания высокопроводящих каналов в пластах с плотными породами, также он применяется в геотехнике и в горной промышленности. В последнее время данная технология обрела большую популярность в связи с разработкой месторождений сланцевого газа и реализацией геотермальных проектов.

На рис. 1 представлено схематическое изображение нескольких гидравлических разрывов, созданных при многоступенчатой обработке пласта горизонтального ствола скважины. В настоящее время это достаточно популярный способ заканчивания скважин для плотных пород-коллекторов [2, 3].

Использование ГРП в открытых скважинах сопряжено со множеством проблем, например, когда ствол скважины, ориентированный вдоль минимального напряжения дальнего поля, способствует поперечной ориентации гидравлических трещин относительно ствола скважины, что увеличивает площадь контакта трещины с пластом. Однако это не означает, что гидравлические разломы зарождаются в поперечном направлении от ствола скважины, особенно в случае открытого ствола, из-за растягивающих обрушивающих напряжений, развивающихся вблизи ствола скважины [4, 5]. Трещина, начавшаяся в продольном направлении, при переориентации в предпочтительное поперечное направление, создает нежелательную извилистость вблизи ствола скважины.

Считается, что при выполнении гидравлического разрыва пласта вдоль ствола скважины образуются две плоскости трещин. Направление и ориентация этих плоскостей зависят от напряженно-деформированного состояния пласта (рис. 2). Зачастую эти плоскости трещин распространяются ортогонально наименьшему главному напряжению σ_h [6].

Таким образом, значительный интерес вызывают два вида трещин в стволе скважины [7]:

- продольные, которые распространяются в плоскостях, параллельных осям ствола скважины, они образуются там, где горизонтальные скважины бурятся параллельно большему из горизонтальных напряжений или параллельно предпочтительной плоскости разрыва (рис. 3а);
- поперечные, которые распространяются в плоскостях, перпендикулярных осям ствола скважины, они образуются там, где го-

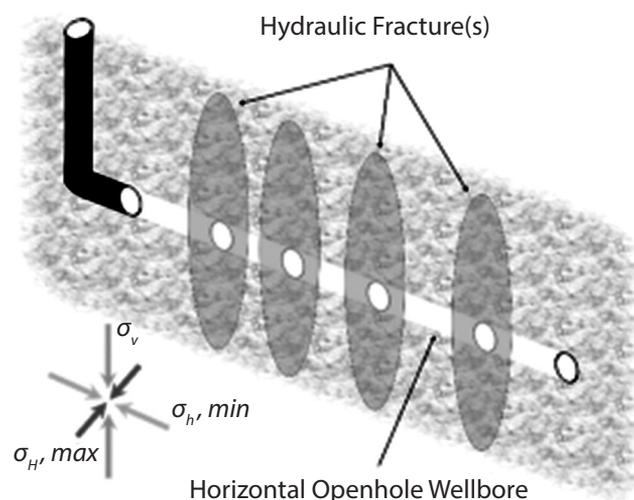


Рис. 1. Схема распространения гидроразрывов [1]
Fig. 1. Hydraulic fracture propagation pattern [1]

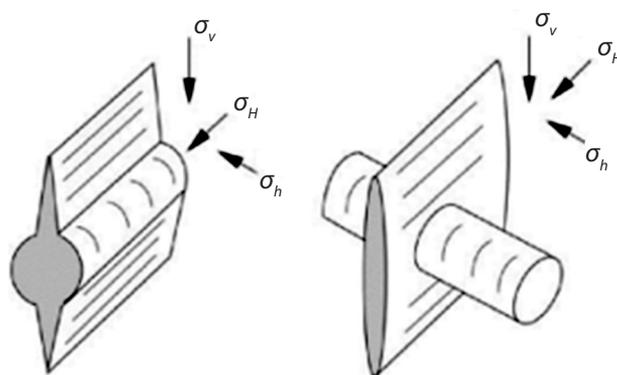


Рис. 2. Различные ориентации плоскости разрушения в зависимости от направлений главных напряжений [9]
Fig. 2. Varied orientations of the failure plane based on principal stress directions [9]

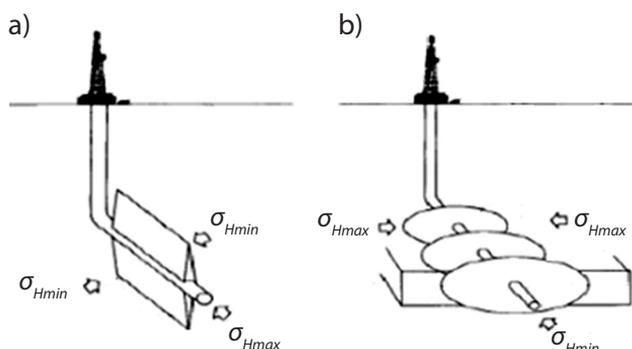


Рис. 3. Гидравлические разрывы в горизонтальных скважинах: а) продольные; б) поперечные¹
 Fig. 3. Hydraulic fractures in horizontal wells: a) longitudinal; b) transverse¹

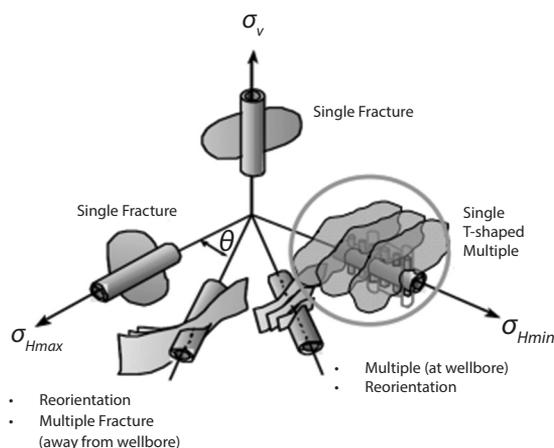


Рис. 4. Геометрия гидроразрыва, основанная на положении ствола скважины относительно главных напряжений²
 Fig. 4. Hydraulic fracture geometry based on wellbore orientation relative to principal stresses²

горизонтальные скважины бурятся перпендикулярно большому из горизонтальных напряжений или перпендикулярно предпочтительной плоскости разрыва (рис. 3б).

Анализируя [8], можно прийти к выводу, что горизонтальный ствол скважины, расположенный нормально к максимальному напряжению в пласте, создает наиболее сложную сеть гидравлических разрывов (рис. 4), поскольку способствует образованию серии поперечных трещин вдоль горизонтального ствола. Сложная сеть трещин увеличивает эффективную проницаемость пласта, тем самым повышая добычу.

При этом важным для выполнения исследований ГРП является разрушение при растяжении, из-за того что хрупкие породы зачастую разрушаются под действием напряжений σ , которые превышают предел прочности σ_T материала [9]. Если предположить, что сжимающие напряжения имеют положительный знак, то критерий разрушения удовлетворяет условию:

$$\sigma < -\sigma_T. \quad (1)$$

Однако гидроразрыв пласта проводится и в пористых средах с поровым давлением P_p , поэтому полное напряжение заменяется эффективным напряжением [9]. Тогда уравнение будет иметь следующий вид:

$$\sigma - P_p < \sigma_T. \quad (2)$$

Выражение (2) означает, что как только эффективное напряжение достигает предела прочности при растяжении, начинается разрушение породы.

Уравнения для определения давления пробы в горизонтальной скважине для различных режимов напряжений отражены в работе [10], в настоящей работе они не будут приведены. Уравнение (3) основано на предположении, что проникновение жидкости в пласт отсутствует. Очевидно, что изменение порового давления будет влиять на давление пробы. Если поровое давление начнет увеличиваться, то давление пробы станет уменьшаться.

¹ Иллюстрация из: Salamanca M. S. *Modeling of fractured producer and injection in low permeability reservoir. Master's thesis.* Norwegian University of Science and Technology, Faculty of Engineering and Applied Geophysics. 2013.

² Иллюстрация из: Lewis G. *Improving the effectiveness and managing the impact of hydraulic fracturing. International Gas Union Research Conference.* 2011;1–9.

$$p_{wf} = 3\sigma_h - \sigma_n - p_f. \quad (3)$$

Уравнение (3) характеризует верхнюю границу для оценки давления инициирования. Нижняя граница выражается моделью Хаимсона [10, 11]:

$$p_{wf} = \frac{3\sigma_h - \sigma_n + \sigma_t - a \frac{1-2\nu}{1-\nu} p_f}{2 - a \frac{1-2\nu}{1-\nu}}. \quad (4)$$

Технические инструменты и материалы для проведения инъекций

Основными техническими инструментами, используемыми в процессе воздействия и после него на породу, являются: кольцевые изоляторы (например, стрэддл-пакеры), механические изоляторы (например, сдвиговые или раздвижные муфты, шаровые герметизаторы и системы шаровых седел), заглушки, трубы, колтюбинги и перфорационные инструменты [9]. Следует отметить, что применение ГРП с использованием колтюбинга является наиболее предпочтительным. Гибкие насосно-компрессорные трубы – это трубы (или каналы) из ковкой стали небольшого диаметра (обычно от 25 до 50 мм), которые наматываются на катушку и могут использоваться для закачки жидкости (либо цемента) в ствол скважины. В [11] перфорация определена как процесс создания туннелей через цементированную стальную обсадную колонну и горную породу, чтобы пластовая жидкость имела возможность течь в скважину. Это определение справедливо для применения в нефтяной промышленности. Перфорация также может быть проведена вдоль незацементированных частей ствола скважины.

В рамках работ по проведению гидроразрыва пласта наиболее эффективными на североамериканских сланцевых месторождениях оказались три типа завершающих работ (таблица 1). Это системы Plug-and-Perf (подключи и работай), Ball-Activated (системы с шариковым приводом), Coiled Tubing-Activated (системы с колтюбинговым приводом) [12].

*Таблица 1. Типы завершения работ
 Table 1. Types of completion*

Тип завершения	Отвод жидкости	Изоляция сквозных труб	Скважинная изоляция
Plug-and-Perf	Перфорация	Композитные мостовидные заглушки	Цемент
Ball-Activated	Рукава для ГРП	Шар для гидроразрывов и шаровое седло	Пакеры для открытых скважин
Coiled Tubing-Activated	Рукава для ГРП	Пакер для колтюбинга	Цемент

Согласно технологии Plug-and-Perf, перфорация используется для отвода жидкости при гидроразрыве, композитные мостовидные заглушки для изоляции отверстий, насосно-компрессионная труба и цемент для изоляции затрубного пространства открытой скважины и обсадной колонны (рис. 5a). В системах, которые активируются шариками для гидроразрыва, используются втулки, содержащие посадочные места для шариков разного размера (рис. 5b). Когда эти шарики попадают в посадочные места, давление открывает муфту для выполнения гидроразрыва, шарик, в свою очередь, обеспечивает изоляцию трубопровода от ранее разрушенной ступени. Кольцевая изоляция выполняется с помощью пакеров для открытых скважин. В системах Coiled Tubing-Activated (рис. 5c) используются манжеты, которые открываются с помощью колтюбинга. Изоляция сквозных труб выполняется с помощью пакера для колтюбинга, кольцевая изоляция осуществляется с помощью цемента. Последние технологические достижения для этих типов заканчиваний привели к появлению множества гибридных систем. При этих гибридных заканчиваниях для изоляции кольцевого про-

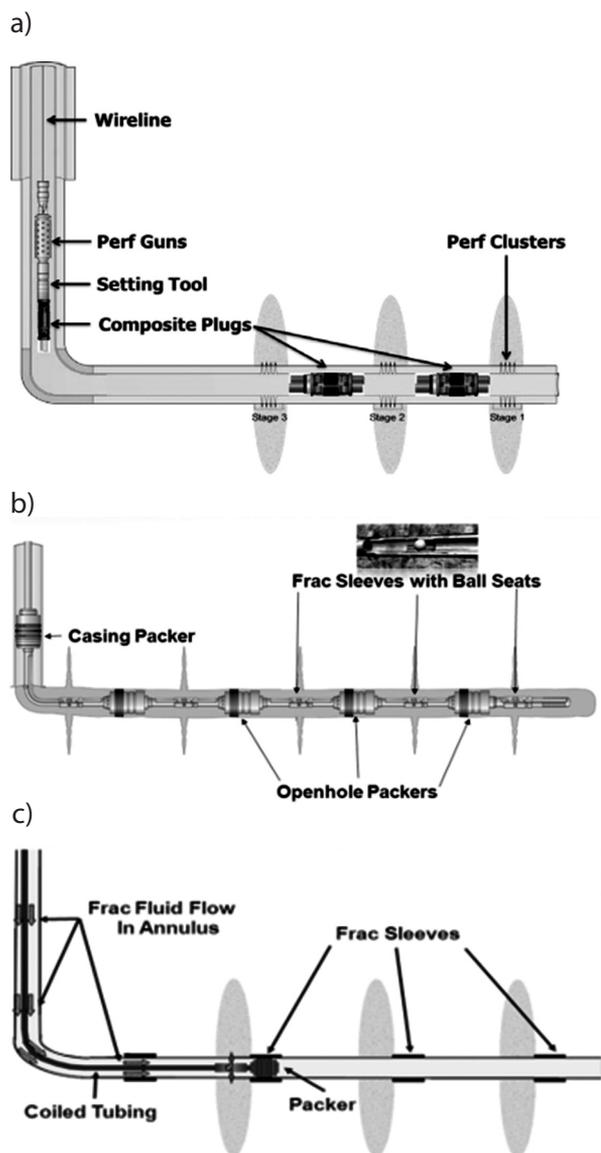


Рис. 5. Системы завершения работ:
 a) Plug-and-Perf – обсадная скважина; b) Ball-Activated – открытая скважина; c) Coiled Tubing-Activated – обсадная или открытая скважина [12]
 Fig. 5. Completion systems: a) Plug-and-Perf – cased hole; b) Ball-Activated – open hole; c) Coiled Tubing-Activated – cased or open hole [12]

будут затвердевать в грунте, изменяя его механические характеристики и создавая избыточное напряженное состояние. Для усиления оснований требуется оборудование гораздо меньшей мощности, так как работа проводится в поверхностных рыхлых слоях.

Метод высоконапорного инъецирования твердеющего раствора успешно реализуется для решения многих геотехнических задач:

- усиления оснований грунтового массива и фундаментов реконструируемых и аварийных зданий и сооружений [14, 15];
- усиления свайных фундаментов [16];

странства могут использоваться либо цемент, либо пакеры с открытым отверстием.

На основании вышеизложенной информации можно отметить, что процесс инициирования очень сложен и зависит от:

- жидкости для разрыва, давления жидкости и скорости закачки,
- размера и ориентации ствола скважины,
- напряженно-деформированного состояния породы,
- свойства породы,
- применяемого оборудования.

Развитие технологий бокового и горизонтального бурения дает возможность разрабатывать нетрадиционные ресурсы путем размещения небольших скважин в оптимальных для добычи местах. Гидравлический разрыв пласта остается важной и необходимой процедурой интенсификации добычи, которая проводится с высокой степенью оптимизации и в сочетании с уникальными процедурами заканчивания скважин.

Применение гидроразрывов в геотехническом строительстве

Несмотря на то, что наиболее мощное развитие метод гидроразрыва получил в нефтедобывающей промышленности, в геотехническом строительстве его начали применять раньше. Основываясь на современном опыте использования гидравлического разрыва пласта, технологии нефтяной промышленности, позволяющие бурить горизонтальные и наклонные скважины, можно адаптировать для сферы промышленного гражданского строительства для закрепления и усиления грунтовых оснований под существующими фундаментами зданий и сооружений [13]. Разница в том, что вместо жидкости для разрыва пласта будут использовать различные растворы для усиления оснований, которые со временем

- выравнивания кренов зданий и сооружений из-за неравномерных осадок [17];
- изменения НДС в грунтовом массиве зданий в процессе реконструкции и строительства [18];
- компенсационного нагнетания в условиях стесненной застройки [19];
- создания инъекционных, буроинъекционных и напорнонабивных свай [20, 21];
- стабилизации просадочных лессовых грунтов [22];
- уплотнения насыпных грунтов, а также грунтов, которые содержат органические включения [23];
- закрепления грунтового основания с целью повышения устойчивости откосов и склонов [24];
- усиления многолетнемерзлых и искусственно замороженных грунтов [25];
- выполнения мероприятий по защите существующих зданий и сооружений при разработке котлованов [26];
- усиления и лечения земляного полотна автомобильных и железных дорог [27, 28];
- выполнения геотехнических барьеров, противодиффузионных завес [29] и регулирования НДС грунтового массива [26];
- преднапряжения грунтового массива фундаментных оболочек и плитных фундаментов [30, 31];
- повышения несущей способности буронабивных свай по нижнему концу и боковой поверхности [32].

К достоинствам высоконапорной инъекции можно отнести:

- возможность проведения работ в широком диапазоне грунтовых условий;
- высокую эффективность;
- возможность применения малогабаритного оборудования и производства работ в стесненных условиях;
- возможность выполнения работ без остановки производства, выселения жильцов или ограничения движения транспорта;
- отсутствие динамических воздействий на существующую застройку при проведении работ;
- возможность оперативного изменения технического решения и параметров производства работ;
- экологичность метода;
- надежность;
- управление процессом изменения НДС с возможностью проведения геотехнического мониторинга.

Основным недостатком метода высоконапорной инъекции является невозможность определения путей распространения твердеющего раствора в грунтовом основании вокруг одиночного инъектора. Следовательно, размеры и форма создаваемых инъекционных тел не поддаются точному прогнозированию (рис. 8) [33]. Существует ряд конструкций инъекторов, а также технологических схем нагнетания, которые позволяют в той или иной степени влиять на результат инъекционных работ. Но их использование является довольно трудоемким и/или материалозатратным, при этом некоторые из них имеют недостаточную надежность.

Исследованиями в области усиления грунтов высоконапорной инъекцией в режиме гидроразрыва с применением вертикальных и наклонно-направленных скважин занимались такие ученые, как Мухаммед Аббуд, В. А. Богомолов, Л. А. Бартоломей, О. В. Герасимов, В. А. Ермолаев, М. Н. Ибрагимов, А. Камбефор, А. Л. Ланис, Р. А. Мангушев, О. А. Мозгачева, М. Л. Нуждин, Я. А. Пронозин, М. А. Самохвалов, И. И. Сахаров, О. А. Шулятьев [34–50]. Результаты этих многочисленных исследований подтвердили, что разрывы грунта, как и гидравлические разрывы пласта, возникают, в первую очередь, ортогонально наименьшему главному напряжению [45], как показано на рис. 9.

Опыты по определению эффективности циклического и одиночного нагнетания проведены М. А. Самохваловым [34]. Результаты исследований показали, что по сравнению с одиночным нагне-

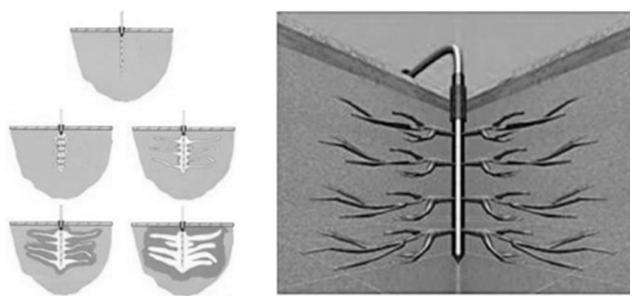
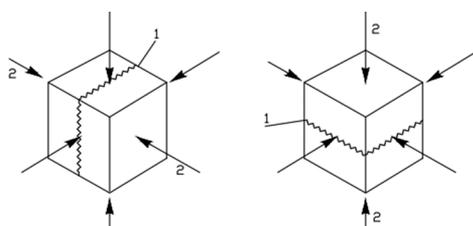


Рис. 8. Схематическое распространение твердеющего раствора в грунтовом основании при нагнетании через одиночный иньектор [33]
 Fig. 8. Schematic of hardening solution propagation in soil foundation during injection through a single injector [33]



1 – плоскость разрыва / fracture plane
 2 – наименьшее главное напряжение / minimum principal stress

Рис. 9. Направление гидравлического разрыва в грунте [38]
 Fig. 9. Hydraulic fracture direction in soil [38]

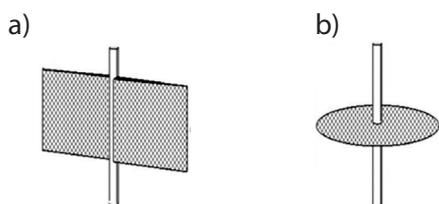


Рис. 10. Схемы формирования гидравлических разрывов в грунтовом массиве: а) в вертикальной плоскости; б) в горизонтальной плоскости [35]
 Fig. 10. Hydraulic fracture formation patterns in soil mass: a) vertical plane; b) horizontal plane [35]

тельстве³. На схеме закрепления грунтов под зданием с размерами в плане 17.0 × 16.0 м видно, что из предварительно разработанных технологических колодцев пробуривается определенное количество горизонтальных скважин, через которые проходят иньекторные перфорированные трубы 5 с последующим закреплением грунтов через перфорированные отверстия, имеющие резиновую обойму (манжету) 7 (рис. 12).

танием раствора циклическое является более эффективным, так как происходит увеличение количества сформированных гидравлических разрывов на каждом горизонте иньекции. Также при увеличении повторов иньектирования наблюдается формирование гидравлических разрывов как в вертикальной плоскости (рис. 10а), так и в плоскости горизонта иньекции (рис. 10б). Из-за переуплотнения грунтового основания ранее сформированными гидравлическими разрывами в вертикальной плоскости и перераспределения напряжений наблюдается постепенное увеличение вертикальных напряжений и уменьшение радиальных.

Согласно исследованиям М. Л. Нуждина [53], размерами и формой полученных гидроразрывов можно управлять с помощью расположения иньекторов в пространстве. Они могут располагаться по прямой линии либо по вершинам равностороннего треугольника, тем самым образуя вертикальные (рис. 10а) или горизонтальные разрывы в виде диска (рис. 10б).

Изменение площади профилей гидравлических разрывов в грунтовом массиве при иньекции твердеющего раствора зависит также от давления (рис. 11) [38].

Согласно данным [39, 40, 46, 47, 51], давление разрыва можно найти по эмпирическим формулам, которые представлены в таблице 2.

Пример горизонтального закрепления грунтовых оснований под фундаментом существующего здания (церкви Ризоположения в Московском Кремле) методом смолизации рассмотрен в Пособии по химическому закреплению грунтов иньекцией в промышленном и гражданском стро-

³ Пособие по химическому закреплению грунтов иньекцией в промышленном и гражданском строительстве (к СНиП 3.02.01-83). Москва: Стройиздат, 1986. URL: <https://internet-law.ru/stroyka/text/11295/>.

Таблица 2. Определение давления гидроразрыва грунта
 Table 2. Determining soil hydraulic fracturing pressure

Автор	Формула	Условные обозначения
М. Н. Ибрагимов	$P_{кр} = \gamma h \xi + C$	γ – средневзвешенная плотность толщи грунтов, т/м ³ ; ξ – коэффициент бокового давления; C – удельное сцепление грунта, кПа; h – глубина инъекции от дневной поверхности, м
А. Камбефор	$P_0 = \frac{\gamma_{зр} h}{\nu - 1} + C$	$\gamma_{зр}$ – удельный вес грунта, т/м ³ ; h – глубина, м; ν – коэффициент Пуассона; C – сцепление грунта, кПа
G. W. Jaworski	$P_f = m \sigma_h + \sigma_{ta}$	m – наклон линейной функции давления разрыва пласта при горизонтальном напряжении; σ_h – давление разрыва пласта, кПа; σ_{ta} – предел прочности при растяжении, кПа
О. А. Шулятьев	$P_f = f(S_m, S_{ta})$	S_m – напряжение в массиве грунта, кПа; S_{ta} – сопротивление растяжению, кПа
М. Аббуд	$P_0 = \frac{\gamma h \nu}{1 - \nu} + C$	γ – удельный вес грунта; h – глубина, м; ν – коэффициент Пуассона; C – сцепление грунта, кПа; φ – угол внутреннего трения, кПа
	$P_0 = \frac{\gamma h \nu}{1 + \sin \varphi}$	

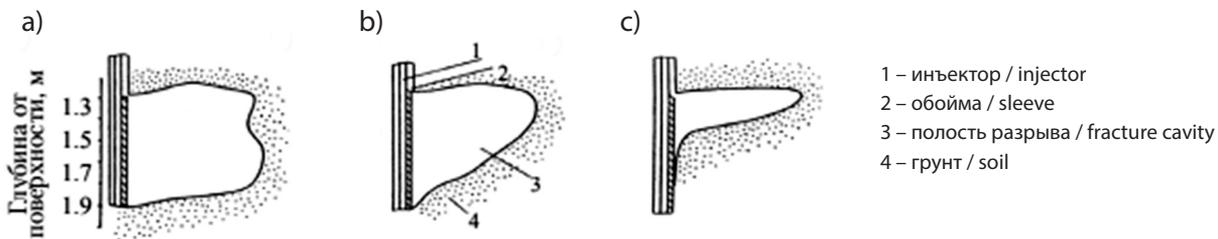


Рис. 11. Изменение площади гидравлических разрывов в грунте при инъекции твердеющего раствора в зависимости от давления: а) 1.25 МПа; б) 0.75 МПа; в) 0.5 МПа [38]

Fig. 11. Change in hydraulic fracture area in soil during hardening solution injection as a function of pressure: a) 1.25 MPa; b) 0.75 MPa; c) 0.5 MPa [38]

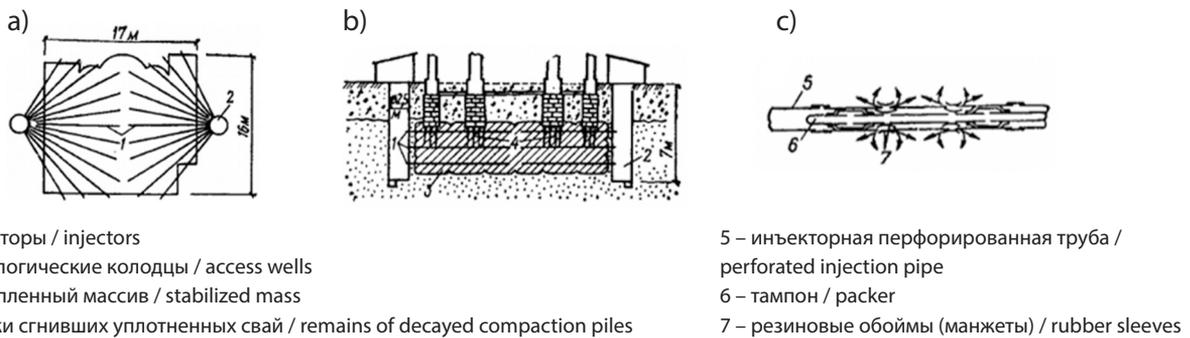


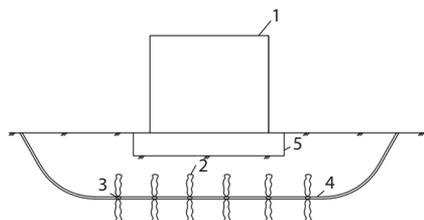
Рис. 12. Схема инъекционного химического закрепления грунтов⁴:

а) план; б) разрез; в) схема манжетно-тампонного инъектора
 Fig. 12. Schematic of chemical grouting for soil stabilization⁴:
 а) plan; б) section; в) схема манжетно-тампонного инъектора

⁴ Там же.

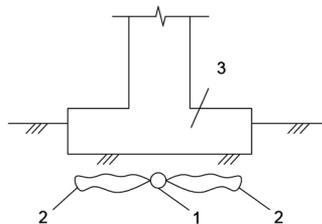
Усиление оснований методом цементации при горизонтально ориентированной проходке

Анализ особенностей методов гидравлического разрыва и способов усиления грунтовых оснований с применением высоконапорной инъекции позволил предложить альтернативный способ усиления оснований фундаментов существующих зданий методом цементации при горизонтально ориентированной проходке (рис. 13).



- 1 – существующее здание / existing building
- 2 – гидроразрыв / hydraulic fracture
- 3 – резиновая манжета / rubber sleeve
- 4 – горизонтально ориентированная скважина / horizontally oriented borehole
- 5 – существующий фундамент / existing foundation

Рис. 13. Принципиальная схема усиления грунтовых оснований методом цементации при горизонтально ориентированной проходке (рисунок авторов)
 Fig. 13. Schematic diagram of soil foundation strengthening using cementation with horizontally oriented drilling (authors' illustration)



- 1 – горизонтально ориентированная скважина / horizontally oriented borehole
- 2 – гидроразрыв / hydraulic fracture
- 3 – фундамент мелкого заложения (ленточный) / shallow foundation (strip footing)

Рис. 14. Схема усиления грунтовых оснований методом цементации при горизонтально ориентированной проходке ленточных фундаментов (рисунок авторов)
 Fig. 14. Schematic of soil foundation strengthening using cementation with horizontally oriented drilling for strip footings (authors' illustration)

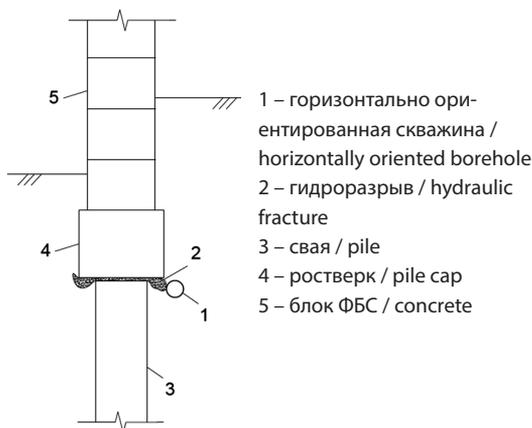


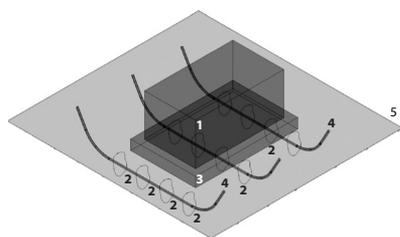
Рис. 15. Схема усиления контактной зоны основание – фундамент методом цементации при горизонтально ориентированной проходке вдоль свайных фундаментов (рисунок авторов)
 Fig. 15. Schematic of strengthening the contact zone between soil and foundation using cementation with horizontally oriented drilling along pile foundations (authors' illustration)

Схема усиления грунтовых оснований данным методом при горизонтально ориентированной проходке ленточных фундаментов большой протяженности представлена на рис. 14.

На рис. 15 показана схема усиления грунтовых оснований методом цементации при горизонтально ориентированной проходке свайных фундаментов в случае, когда во время эксплуатации здания из-за некачественно выполненного сопряжения свай с ростверком появились зазоры между ростверком и сваями. Предложенный способ позволит заполнить это пространство твердеющим раствором.

Ортогональный вид усиления грунтовых оснований данным методом изображен на рис. 16.

Отличительной особенностью данного метода является то, что основная скважина, через которую будет поступать твердеющий раствор в грунт, имеет горизонтальную ориентацию, а не вертикальную или наклонную, как рассматривалось выше.



- 1 – существующее здание / existing building
- 2 – гидроразрыв / hydraulic fracture
- 3 – существующий фундамент / existing foundation
- 4 – труба для подачи раствора / grout injection pipe
- 5 – уровень земли / ground level

Рис. 16. Аксонометрическая схема усиления грунтовых оснований методом цементации при горизонтально ориентированной проходке (рисунок авторов)
 Fig. 16. Axonometric schematic of soil foundation strengthening using cementation with horizontally oriented drilling (authors' illustration)

Сущность данного метода заключается в том, что с помощью установок горизонтально направленного бурения под зданием с поверхности пробуривается горизонтальная скважина [13, 52], после чего в эту скважину пропускается перфорированная труба ПВХ с резиновыми манжетами. В данную трубу помещается гидравлический пакер [47] для нагнетания твердеющего раствора по манжетной технологии, начинается подача раствора под давлением, превышающим критическое, с целью разрыва грунта. Для усиления каждой зоны цементация производится в челночном режиме требуемое количество раз.

Данный метод усиления грунтовых оснований позволит проводить работы снаружи здания (габариты здания в плане не имеют значения). Благодаря этому не нужно будет останавливать другие производственные процессы, выселять жильцов или ограничивать движение транспорта по прилегающей территории. По сравнению с методом химического закрепления (рис. 12) данный способ является экологически чистым.

Результаты сравнительного анализа методов горизонтально и вертикально направленного бурения, а также метода открытой траншеи сведены в таблицу 3.

Как видно из таблицы, метод горизонтально направленного бурения имеет ряд преимуществ.

Таблица 3. Сравнение методов горизонтально и вертикально направленного бурения и метода открытой траншеи
 Table 3. Comparison of horizontal and vertical directional drilling methods and open trench method

Метод горизонтально направленного бурения	Метод открытой траншеи	Метод вертикально направленного бурения
Быстрое развертывание: <ul style="list-style-type: none"> • простая установка и минимум техники; • открытая траншея только на старте и на финише 	Медленное развертывание: <ul style="list-style-type: none"> • привлечение большого количества техники для выемки и перемещения рунтов; • открытая выемка грунта на всем пути 	Быстрое развертывание: <ul style="list-style-type: none"> • простая установка и минимум техники
Гибкая установка: <ul style="list-style-type: none"> • бурение с поверхности; • возможность повторного выравнивания; • вертикально/горизонтально, чтобы избежать коммуникаций/препятствий 	Жесткая установка: <ul style="list-style-type: none"> • открытый котлован на всем пути; • сложно изменить направление при встрече с коммуникациями и препятствиями; • сложно изменить направление траншеи 	Жесткая установка: <ul style="list-style-type: none"> • бурение с поверхности; • невозможно изменить направление бурения; • ограниченная глубина бурения
Экологически чистый процесс: <ul style="list-style-type: none"> • минимальное количество работ по откопке траншеи; • меньше шума, пыли, мусора и отходов; • бетонит химически не вреден и может быть переработан 	Экологически чистый процесс: <ul style="list-style-type: none"> • открытая выемка грунта; • большой отвал вынутых материалов; • перемещение грунта на месте, высокий уровень шума, много пыли; • огромное количество отходов, необходимость в тяжелой технике для перемещения грунта 	Экологически чистый процесс: <ul style="list-style-type: none"> • меньше мусора и отходов
Работы на автомобильных дорогах: <ul style="list-style-type: none"> • не требуется перекрытие дорог; • малое количество строительной техники 	Работы на автомобильных дорогах: <ul style="list-style-type: none"> • ограничение движения транспорта; • большое количество строительной техники 	Работы на автомобильных дорогах: <ul style="list-style-type: none"> • отсутствие перекрытия дорог; • малое количество строительной техники

4. Заключение / Conclusions

Изучение существующих методов гидравлических разрывов в нефтедобывающей отрасли (Plug-and-Perf, Ball-Activated, Coiled Tubing-Activated), а также в строительстве (метод гидроразрыва с применением вертикальных иньекторов и метод химического закрепления с применением горизонтальных иньекторов) позволило сделать ряд выводов:

1. Напряженно-деформированное состояние грунта влияет на распространение гидравлических разрывов, которые будут происходить в зонах наименьших напряжений, что дает возможность контролировать разрыв. Размерами и формой полученных гидроразрывов можно управлять с помощью расположения иньекторов в пространстве.
2. Существенным недостатком известных методов гидроразрыва, используемых в строительстве, является необходимость приостанавливать производственные процессы, переселять жильцов из зданий, подлежащих реконструкции, менять движение транспортных маршрутов.

На основании анализа особенностей, преимуществ и недостатков рассмотренных методов был предложен альтернативный способ усиления суглинистых и песчаных грунтовых оснований под плитными, свайными и ленточными фундаментами зданий и сооружений с помощью цементации при горизонтальной проходке. Так как основным плюсом данного метода является возможность выполнения работ без остановки производственных процессов и переселения жильцов, его применение могло бы оптимизировать процесс усиления фундамента. Тем не менее, предлагаемый метод требует дополнительного изучения и внедрения в геотехническую практику. К задачам дальнейших исследований можно отнести:

1. Обоснование рациональных параметров бурения и иньектирования грунтового основания по манжетной технологии для уплотнения грунтов основания, улучшения их механических характеристик и создания предварительного напряженного состояния в грунтовом массиве.
2. Выявление на основе экспериментальных, аналитических и численных исследований закономерностей изменения напряженно-деформированного состояния основания при различных схемах усиления грунтовых оснований твердеющими иньекционными составами.



Вклад авторов. Авторы внесли равный вклад в подготовку публикации.

Author contributions. All authors made an equal contribution to the preparation of the publication.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest. The authors declare no relevant conflict of interest.

Список литературы

1. Edelman E., Aidagulov G., Brady D. Acoustic analysis as means for detecting early-stage hydraulic fracture initiation in open and notched wellbores. In: *GEO-2016, 12th Middle East Geosciences Conference & Exhibition*. 2016;AAPG:90254. URL: https://www.researchgate.net/publication/309293165_Acoustic_Analysis_as_Means_for_Detecting_Early-Stage_Hydraulic_Fracture_Initiation_in_Open_and_Notched_Wellbores.
2. Al-Naimi K. M., Lee B. O., Bartko K. M., Kelkar S. K., Shaheen M., Al-Jalal Z., Johnston B. Application of a novel open hole horizontal well completion in Saudi Arabia. In: *SPE Indian Oil and Gas Technical Conference and Exhibition, Mumbai, India, 4–6 March*. 2008;SPE-113553-MS. <http://dx.doi.org/10.2118/113553-MS>
3. Rahim Z., Al-Kanaan A., Johnston B., Wilson S., Al-Anazi H., Kalinin D. Success criteria for multistage fracturing of tight gas in Saudi Arabia. In: *SPE/DGS Saudi Arabia Section Technical Symposium and Exhibition, Al-Khobar, Saudi Arabia, 15–18 May*. 2011;SPE-149064-MS. <http://dx.doi.org/10.2118/149064-MS>
4. Daneshy A. Horizontal-Well Fracturing: Why Is it So Different? *Journal of Petroleum Technology*. 2009;61(9):SPE-0909-0028-JPT. <http://dx.doi.org/10.2118/0909-0028-JPT>
5. Lecampion B., Abbas S., Prioul R. Competition between transverse and axial hydraulic fractures in a horizontal wells. In: *SPE Hydraulic Fracturing Technology Conference, 4–6 February, Woodlands, TX, USA*. 2013;SPE-163848-MS. <http://dx.doi.org/10.2118/163848-MS>

6. Fjaer E., Holt R. M., Horsrud P., Raaen A. M., Risnes R. (eds.) *Petroleum related rock mechanics*. 2nd edition. Netherland: Elsevier; 2008. URL: <https://litbit.ru/edition/e-fjaer-rm-holt-p-horsrud-am-raaen-and-r-risnes-eds/petroleum-related-rock-mechanics-2nd-edition>.
7. Valko P., Economides M. J. *Hydraulic Fracture Mechanics*. Chichester: John Wiley & Sons; 1995. URL: <https://golnk.ru/qJagz>.
8. Aidagulov G., Alekseenko O., Chang F. F., Bartko K., Cherny S., Esipov D., Kuranakov D., Lapin V. Model of hydraulic fracture initiation from the notched open hole. In: *SPE Saudi Arabia Section Annual Technical Symposium and Exhibition, Al-Khobar, Saudi Arabia, 21-23 April*. 2015;SPE-178027-MS. <http://dx.doi.org/10.2118/178027-MS>
9. Yildizdag K., Weber F., Konietzky H. *Hydraulic fracturing*. Freiberg: TU Berg-akademie Freiberg, Geotechnical Institute; 2022. URL: https://tu-freiberg.de/sites/default/files/2023-11/15_Hydraulic_fracturing_3.pdf.
10. Hossain M. M., Rahman M. K., Rahman S. S. Hydraulic fracture initiation and propagation: roles of wellbore trajectory, perforation and stress regimes. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2000;27(3–4):129–149. [https://doi.org/10.1016/s0920-4105\(00\)00056-5](https://doi.org/10.1016/s0920-4105(00)00056-5)
11. Keshavarzi R. Laser perforation for hydraulic fracturing in oil and gas wells. In: *45th US Rock Mechanics / Geomechanics Symposium*. San Francisco, USA: American Rock Mechanics Association; 2011. URL: <https://onepetro.org/ARMAUSRMS/proceedings-abstract/ARMA11/ARMA11/ARMA-11-115/119550?redirectedFrom=PDF>.
12. Kennedy R. L., Gupta R., Kotov S. V., Burton W. A., Knecht W. N., Ahmed U. Optimized shale resource development: proper placement of wells and hydraulic fracture stages. In: *Abu Dhabi International Petroleum Conference and Exhibition, Abu Dhabi, UAE, 11 November*. 2012;SPE-162534-MS. <https://doi.org/10.2118/162534-MS>
13. Воробей Д. А., Майснер А. А., Семкин Д. С. Обзор установок горизонтально-направленного бурения и анализ эффективности способов управления траекторией бурения. *Техника и технологии строительства*. 2023;(2):26–33. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=54092743>.
14. Ермолаев В. А., Мангушев Р. А. Научно-практическое обоснование применения метода высоконапорной инъекции (манжетной технологии) на объектах Санкт-Петербурга. В сб.: *Современные геотехнологии в строительстве и их научно-техническое сопровождение*. Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет; 2014. Ч. 2. С. 9–19. URL: <https://studfile.net/preview/2630314/>.
15. Исаев Б. Н., Бадеев С. Ю., Цапкова Н. Н., Лунев А. Г., Кузнецов М. В., Бадеев В. С., Логутин В. В. Способ создания в грунтовом массиве пространственных структур из твердеющего материала. *Геотехника*. 2012;(5):4–12. URL: https://www.geomark.ru/journals_list/zhurnal-geotekhnika-52012/.
16. Крицкий М. Я., Сухорукова А. Ф., Лубягин А. В. Пути решения проблемы усиления грунтовых оснований объектов с учетом инженерно-геологических условий города Новосибирска. В сб.: *Инженерно-геологические проблемы урбанизированных территорий*. Екатеринбург: Аква-Пресс; 2001. Т. 2. С. 727–731.
17. Пронозин Я. А., Кайгородов М. Д. Регулирование геометрического положения зданий, в условиях сильносжимаемых грунтовых оснований. В сб.: *Механика грунтов в геотехнике и фундаментостроении*. Новочеркасск: ЮРГПУ (НПИ); 2018. С. 462–466. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=35602798>.
18. Нуждин М. Л. Предупреждение неравномерных осадок фундаментной плиты с помощью высоконапорного инъецирования. В сб.: *Опыт строительства и реконструкции зданий и сооружений на слабых грунтах*. Архангельск: АрхГТУ; 2003. С. 119–122.
19. Ермолаев В. А., Мацегора А. Г., Осокин А. И., Трифонова И. И., Шахтарина Т. Н. Усиление оснований и фундаментов зданий вблизи расположенной застройки при строительстве глубоких котлованов в условиях городской застройки. В сб.: *Проектирование и строительство подземной части нового здания (второй сцены) Государственного академического Мариинского театра*. Санкт-Петербург: СПбГАСУ; 2011. С. 146–157.
20. Полищук А. И., Петухов А. А., Назин Д. С. *Способ устройства инъекционной сваи*. Российская Федерация. Патент № 2637002 С. 2016 г. 9 с. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=38273645>.
21. Полищук А. И., Ющубе С. В., Петухов А. А., Нуйкин С. С. Опыт усиления фундаментов здания с использованием напорнонабивных свай. В сб.: *Актуальные проблемы проектирования и строительства в условиях городской застройки*. Пермь: ПГТУ; 2005. Т. 1. С. 149–155.
22. Ясько С. И., Семенов И. В., Чухряев Н. П. *Способ улучшения массива лессового просадочного грунта в основании зданий и сооружений*. Российская Федерация. Патент № 2331736. 2006 г. URL: https://yandex.ru/patents/doc/RU2331736C1_20080820.
23. Абелев М. Ю., Аверин И. В., Кораблева У. А. Экспериментальные исследования эффективности метода цементации грунтов «геокомпозит» в основании зданий на насыпных песках. *Основания, фундаменты и механика грунтов*. 2015;(2):13–15. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=23605455>.
24. Осипов В. И., Филимонов С. Д. Уплотнение и армирование слабых грунтов методом «Геокомпозит». *Основания, фундаменты и механика грунтов*. 2002;(5):15–21.
25. Сахаров И. И., Захаров А. Е. Опыт высоконапорной инъекции в пластично-мерзлые грунты. *Реконструкция городов и геотехническое строительство*. 2004;(8):168–171. URL: <https://707.su/cilY>.

26. Шулятьев О. А., Мозгачева О. А., Поспехов В. С. *Освоение подземного пространства городов*. Москва: АСВ, 2017. 510 с.
27. Ланис А. Л. *Использование метода напорной инъекции при усилении земляного полотна железных дорог: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук*. Москва: Московский государственный университет путей сообщения (МИИТ); 2009. 24 с. URL: https://new-disser.ru/_avtoreferats/01004372604.pdf.
28. Крицкий М. Я., Пусков В. И., Скоркин В. Ф., Ланис А. Л. Лечение болезней земляного полотна с использованием современных технологий. В сб.: *Труды международной научно-практической конференции по проблемам механики грунтов, фундаментостроению и транспортному строительству*. Пермь: ПГТУ; 2004. Т. 2. С. 47–53.
29. Фатеев Н. Т., Сергеев С. В., Карякин В. Ф., Гапон С. В., Щетинин О. В. Технология направленного гидроразрыва для создания в массиве пород ограждающих конструкций. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2008;(1):260–264. URL: <https://elibrary.ru/jupvrv>.
30. Степанов М. А. *Взаимодействие комбинированных ленточных свайных фундаментов с предварительно опрессованным грунтовым основанием: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук*. Тюмень: Тюменская государственная архитектурно-строительная академия; 2015. 25 с. URL: <https://golnk.ru/eD2Xa>.
31. Наумкина Ю. В. *Усиление ленточных фундаментов с переустройством в сплошную плиту переменной жесткости с предварительным напряжением грунтового основания: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук*. Тюмень: Тюменский государственный архитектурно-строительный университет; 2013. 25 с. URL: <https://viewer.rsl.ru/rsl01005058567?page=1&rotate=0&theme=white>.
32. Stoker M. F. The influence of post grouting on the load bearing capacity of bored piles. In: *Proceedings 8th European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*. Helsinki; 1983. P. 167–170. URL: <https://eurekamag.com/research/020/372/020372770.php>.
33. Нуждин М. Л. *Усиление грунтового основания зданий методом пакетного высоконапорного инъекционирования: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук*. Пермь: Пермский национальный исследовательский политехнический университет; 2021. 24 с. URL: <https://search.rsl.ru/ru/record/01010769542>.
34. Самохвалов М. А., Ашихмин О. В., Токарев А. Е., Паронко А. А. Результаты экспериментальных исследований формирования гидроразрывов в пылевато-глинистых грунтах. *Инновации и инвестиции*. 2020;(3):294–297. URL: <https://innovazia.ru/upload/iblock/f55/N%3-2020.pdf>.
35. Самохвалов М. А., Матюков А. А., Гейдт А. В., Паронко А. А. Результаты экспериментальных исследований манжетной технологии закрепления грунтов. *Инновации и инвестиции*. 2018;(10):249–252. URL: <https://innovazia.ru/upload/iblock/95b/N%10%202018%20new.pdf>.
36. Самохвалов М. А., Ашихмин О. В., Цернант А. А. Определение состава инъекционного раствора для повышения качества закрепления грунтов по манжетной технологии. *Современные наукоемкие технологии*. 2018;(5):139–144. URL: <https://top-technologies.ru/article/view?id=37005>.
37. Самохвалов М. А. *Взаимодействие буроинъекционных свай, имеющих контролируемое уширение, с пылевато-глинистым грунтовым основанием: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук*. Тюмень: Тюменский государственный архитектурно-строительный университет; 2016. 28 с. URL: <https://viewer.rsl.ru/ru/rsl01006646888?page=2&rotate=0&theme=white>.
38. Ибрагимов М. Н. Усиление слабых грунтов инъекцией растворов. *Вестник НИЦ «Строительство»*. 2019;23(4):69–80. URL: <https://vestnik.cstroy.ru/jour/article/download/51/51>.
39. Ибрагимов М. Н. Вопросы проектирования и производства уплотнения грунтов инъекцией растворов по гидроразрывной технологии. *Основания, фундаменты и механика грунтов*. 2015;(2):22–27. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=23605458>.
40. Аббуд М. *Геотехническое обоснование стабилизации осадок фундаментов с помощью инъекционного закрепления грунтов: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук*. Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет; 2000. 22 с. URL: <https://search.rsl.ru/ru/record/01003208547>.
41. Богомоллов В. А. *Метод высоконапорной инъекции связных грунтов при устройстве и усилении оснований и фундаментов: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук*. Пермь: Пермский государственный технический университет; 2002. 18 с. URL: <https://search.rsl.ru/ru/record/01003228006?ysclid=m704d17gf4667484184>.
42. Ермолаев В. А. *Закрепление оснований зданий и сооружений методом гидроразрыва при неоднократном инъектировании: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук*. Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет; 2013. 25 с. URL: <https://search.rsl.ru/ru/record/01005543569?ysclid=m704eow4a560690510>.

43. Ломов П. О., Ланис А. Л., Гребенников И. О. Оценка деформационных характеристик грунтовых массивов, армированных вертикальными элементами. *Известия высших учебных заведений. Строительство*. 2023;(3):22–37. <https://doi.org/10.32683/0536-1052-2023-771-3-22-37>
44. Кононенко Д. В., Личман А. Р., Нуждин М. Л. Лабораторные исследования формы инъекционных тел, полученных нагнетанием расширяющегося геополимера. В сб.: *Актуальные проблемы современного фундаментостроения с учетом энергосберегающих технологий: сборник материалов XV Всероссийской научно-практической конференции, Пенза, 21 мая 2024 года*. Пенза: Пензенский государственный университет архитектуры и строительства; 2024. С. 19–22.
45. Ибрагимов М. Н., Семкин В. В. *Закрепление грунтов инъекцией цементных растворов*. Москва: АСВ; 2012.
46. Камбефор А. *Инъекция грунтов. Принципы и методы*. Москва: Энергия; 1971. 333 с.
47. Шулятьев О. А., Мозгачева О. А. Снижение осадки фундамента за счет изменения напряженнодеформированного состояния основания путем инъекции твердеющего раствора. *Вестник НИЦ «Строительство»*. 2020;(3):121–148. [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2020-3\(26\)-121-148](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2020-3(26)-121-148)
48. Пронозин Я. А., Степанов М. А., Шуваев А. Н., Давлатов Д. Н. Взаимодействие системы усиления свайных фундаментов с предварительно опрессованным грунтовым основанием эксплуатируемого сооружения. *Вестник ПНИПУ. Строительство и архитектура*. 2018;9(3):42–52. <https://doi.org/10.15593/2224-9826/2018.3.05>
49. Мангушев Р. А., Гарнык Л. В., Трифонова И. И. Влияние защитных геотехнических мероприятий на стабилизацию осадок аварийного здания. *Вестник гражданских инженеров*. 2016;(4):85–93. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=26673483>.
50. Сахаров И. И. К вопросу об адаптации манжетной технологии для целей укрепительной инъекции оснований зданий. *Реконструкция городов и геотехническое строительство*. 2000;(2). URL: <http://georeconstruction.net/journals/02/6/6.htm>.
51. Jaworski G. W., Seed H. B., Duncan J. M. Laboratory study of hydraulic fracturing. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*. 1981;107(6):713–732. [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(81\)90537-4](https://doi.org/10.1016/0148-9062(81)90537-4)
52. Mohd Norizam M. S., Nuzul Azam H., Helmi Zulhaidi S., Abdul Aziz A., Nadzrol Fadzil A. Literature review of the benefits and obstacle of horizontal directional drilling. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2017;271:012094. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/271/1/012094>
53. Нуждин М. Л., Нуждин Л. В. Экспериментальное подтверждение возможности создания в грунтовом массиве инъекционных тел установленной формы. *Известия вузов. Строительство*. 2019;(10):101–112. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=41831500>.

References

1. Edelman E., Aidagulov G., Brady D. Acoustic analysis as means for detecting early-stage hydraulic fracture initiation in open and notched wellbores. In: *GEO-2016, 12th Middle East Geosciences Conference & Exhibition*. 2016;AAPG:90254. URL: https://www.researchgate.net/publication/309293165_Acoustic_Analysis_as_Means_for_Detecting_Early-Stage_Hydraulic_Fracture_Initiation_in_Open_and_Notched_Wellbores.
2. Al-Naimi K. M., Lee B. O., Bartko K. M., Kelkar S. K., Shaheen M., Al-Jalal Z., Johnston B. Application of a novel open hole horizontal well completion in Saudi Arabia. In: *SPE Indian Oil and Gas Technical Conference and Exhibition, Mumbai, India, 4–6 March*. 2008;SPE-113553-MS. <http://dx.doi.org/10.2118/113553-MS>
3. Rahim Z., Al-Kanaan A., Johnston B., Wilson S., Al-Anazi H., Kalinin D. Success criteria for multistage fracturing of tight gas in Saudi Arabia. In: *SPE/DGS Saudi Arabia Section Technical Symposium and Exhibition, Al-Khobar, Saudi Arabia, 15–18 May*. 2011;SPE-149064-MS. <http://dx.doi.org/10.2118/149064-MS>
4. Daneshy A. Horizontal-Well Fracturing: Why Is it So Different? *Journal of Petroleum Technology*. 2009;61(9):SPE-0909-0028-JPT. <http://dx.doi.org/10.2118/0909-0028-JPT>
5. Lecampion B., Abbas S., Prioul R. Competition between transverse and axial hydraulic fractures in a horizontal wells. In: *SPE Hydraulic Fracturing Technology Conference, 4–6 February, Woodlands, TX, USA*. 2013;SPE-163848-MS. <http://dx.doi.org/10.2118/163848-MS>
6. Fjaer E., Holt R. M., Horsrud P., Raaen A. M., Risnes R. (eds.) *Petroleum related rock mechanics*. 2nd edition. Netherland: Elsevier; 2008. URL: <https://litbit.ru/edition/e-fjaer-rm-holt-p-horsrud-am-raaen-and-r-risnes-eds/petroleum-related-rock-mechanics-2nd-edition>.
7. Valko P., Economides M. J. *Hydraulic Fracture Mechanics*. Chichester: John Wiley & Sons; 1995. URL: <https://golnk.ru/qJagz>.
8. Aidagulov G., Alekseenko O., Chang F. F., Bartko K., Cherny S., Esipov D., Kuranakov D., Lapin V. Model of hydraulic fracture initiation from the notched open hole. In: *SPE Saudi Arabia Section Annual Technical Symposium and Exhibition, Al-Khobar, Saudi Arabia, 21-23 April*. 2015;SPE-178027-MS. <http://dx.doi.org/10.2118/178027-MS>
9. Yildizdag K., Weber F., Konietzky H. *Hydraulic fracturing*. Freiberg: TU Berg-akademie Freiberg, Geotechnical Institute; 2022. URL: https://tu-freiberg.de/sites/default/files/2023-11/15_Hydraulic_fracturing_3.pdf.

10. Hossain M. M., Rahman M. K., Rahman S. S. Hydraulic fracture initiation and propagation: roles of wellbore trajectory, perforation and stress regimes. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2000;27(3–4):129–149. [https://doi.org/10.1016/S0920-4105\(00\)00056-5](https://doi.org/10.1016/S0920-4105(00)00056-5)
11. Keshavarzi R. Laser perforation for hydraulic fracturing in oil and gas wells. In: *45th US Rock Mechanics / Geomechanics Symposium*. San Francisco, USA: American Rock Mechanics Association; 2011. URL: <https://onepetro.org/ARMAUSRMS/proceedings-abstract/ARMA11/ARMA11/ARMA-11-115/119550?redirectedFrom=PDF>.
12. Kennedy R. L., Gupta R., Kotov S. V., Burton W. A., Knecht W. N., Ahmed U. Optimized shale resource development: proper placement of wells and hydraulic fracture stages. In: *Abu Dhabi International Petroleum Conference and Exhibition, Abu Dhabi, UAE, 11 November*. 2012;SPE-162534-MS. <https://doi.org/10.2118/162534-MS>
13. Vorobei D. A., Meissner A. A., Semkin D. S Review of horizontal directional drilling rigs and analysis of efficiency control methods for drilling trajectory. *Tekhnika i tekhnologii stroitel'stva*. 2023;(2):26–33. (In Russ.) URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=54092743>.
14. Ermolaev V. A., Mangushev R. A. Scientific and practical substantiation of application of the method of high-pressure injection (collar technology) on the objects of St. Petersburg. In: *Sovremennye geotekhnologii v stroitel'stve i ih nauchno-tekhnicheskoe soprovozhdenie*. Saint Petersburg: Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering; 2014. Part. 2. P. 9–19. (In Russ.) URL: <https://studfile.net/preview/2630314/>.
15. Isayev B. N., Badeyev S. Yu., Tsapkova N. N., Lunev A. G., Kuznetsov M. V., Badeyev V. S., Logutin V. V. A way to create spatial structures of hardening material in a soil massif. *Geotechnics*. 2012;(5):4–12. (In Russ.) URL: https://www.geomark.ru/journals_list/zhurnal-geotekhnika-52012/.
16. Krickij M. Ya., Suhorukova A. F., Lubyagin A. V. Ways of solving the problem of reinforcing soil foundations of objects taking into account engineering-geological conditions of Novosibirsk city. In: *Inzhenerno-geologicheskie problemy urbanizirovannykh territorij*. Yekaterinburg: Akva-Press; 2001. Vol. 2. P. 727–731. (In Russ.)
17. Pronozin Ya. A., Kajgorodov M. D. Regulation of the geometric location of buildings, In terms of salesgeneric ground bases. In: *Mekhanika gruntov v geotekhnike i fundamentostroyenii*. Novocheerkassk: SURGPU (NPI); 2018. P. 462–466. (In Russ.) URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=35602798>.
18. Nuzhdin M. L. Prevention of uneven settlement of the foundation slab by means of high-pressure injection. In: *Opyt stroitel'stva i rekonstruktsii zdaniy i sooruzheniy na slabyykh gruntakh*. Arkhangelsk: ASTU; 2003. P. 119–122. (In Russ.)
19. Ermolaev V. A., Matsegora A. G., Osokin A. I., Trifonova I. I., Shakhtarina T. N. Reinforcement of bases and foundations of buildings in the vicinity of the development during construction of deep excavations in urban areas. In: *Proektirovanie i stroitel'stvo podzemnoi chasti novogo zdaniya (vtoroj stseny) Gosudarstvennogo akademicheskogo Mariinskogo teatra*. St. Petersburg: SPSUACE; 2011. (In Russ.) P. 146–157.
20. Polishchuk A. I., Petukhov A. A., Nazin D. S. *Method of arranging injection pile*. Russian Federation. Patent No. 2637002 C. 2016. 9 p. (In Russ.) URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=38273645>.
21. Polishchuk A. I., Yushchube S. V., Petukhov A. A., Nuykin S. S. Experience in reinforcing building foundations with using pressure piles. In: *Aktual'nyye problemy proyektirovaniya i stroitel'stva v usloviyakh gorodskoy zastroyki*. Perm': PSTU; 2005. V. 1. P. 149–155.
22. Jas'ko S. I., Semenov I. V., Chukhrjaev N. P. *Method for improving massive of loessial collapsible soil in base of buildings and structures*. Russian Federation. Patent No. 2331736. 2006. (In Russ.) URL: https://yandex.ru/patents/doc/RU2331736C1_20080820.
23. Abelev M. Y., Averin I. V., Korableva U. A. Experimental investigations of the effectiveness of the "Geocomposite" method of soil grouting in the beds of buildings on backfill sands. *Soil mechanics and foundation engineering*. 2015;52:84–87. <https://doi.org/10.1007/s11204-015-9310-3>
24. Osipov V. I., Filimonov S. D. Compaction and reinforcement of weak soils by "Geocomposite" method. *Soil mechanics and foundation engineering*. 2002;(5):15–21. (In Russ.)
25. Sakharov I. I., Zakharov A. Ye. Experience of high-pressure injection into plastic-frozen soils. *Rekonstruktsiya gorodov i geotekhnicheskoye stroitel'stvo*. 2004;(8):168–171. (In Russ.) URL: <https://707.su/cilY>.
26. Shulyat'yev O. A., Mozgacheva O. A., Pospekhov V. S. *Development of underground space of cities*. Moscow: ASV, 2017. (In Russ.)
27. Lanis A. L. *Use of the method of pressure injection at reinforcement of railroad subgrade: Abstract of the dissertation for the degree of candidate of technical sciences*. Moscow: Moscow State University of Railway Transport (MIIT); 2009. (In Russ.) URL: https://new-dissert.ru/_avtoreferats/01004372604.pdf. (In Russ.)
28. Kritskiy M. Ya., Puskov V. I., Skorkin V. F., Lanis A. L. Treatment of earth bed diseases using modern technologies. In: *Trudy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii po problemam mekhaniki gruntov, fundamentostroyeniyu i transportnomu stroitel'stvu*. Perm: PSTU; 2004. Vol. 2. P. 47–53. (In Russ.)
29. Fateyev N. T., Sergeev S. V., Karyakin V. F., Gapon S. V., Shchetinin O. V. Technology of directional hydraulic fracturing for creation of enclosing structures in rock massifs. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2008;(1):260–264. (In Russ.) <https://elibrary.ru/jupvnnv>.

30. Stepanov M. *Interaction of combined strip pile foundations with pre-pressurized soil foundation soil foundation: thesis abstract for the degree of Candidate of Technical Sciences*. Tyumen: Tyumen State Academy of Architecture and Civil Engineering; 2015. (In Russ.) URL: <https://golnk.ru/eD2Xa>.
31. Naumkina Yu. V. *Reinforcement of strip foundations with conversion into a continuous slab of variable stiffness with prestressing of the ground base: abstract of the dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences*. Tyumen: Tyumen State University of Architecture and Civil Engineering; 2013. URL: <https://viewer.rsl.ru/ru/rsl01005058567?page=1&rotate=0&theme=white>.
32. Stoker M. F. The influence of post grouting on the load bearing capacity of bored piles. In: *Proceedings 8th European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*. Helsinki; 1983. P. 167–170. URL: <https://eurekamag.com/research/020/372/020372770.php>.
33. Nuzhdin M. L. *Strengthening of the soil base of buildings by the method of packet high-pressure injection: abstract of the dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences*. Perm: Perm National Research Polytechnic University; 2021. (In Russ.) URL: <https://search.rsl.ru/ru/record/01010769542>.
34. Samokhvalov M. A., Ashikhmin O. V., Tokarev A. E., Paronko A. A. Results of experimental investigations of the formation of hydraulic fractures in dust-clay soils. *Innovatsii i investitsii*. 2020;(3):294–297. (In Russ.) URL: <https://innovazia.ru/upload/iblock/f55/N%3-2020.pdf>.
35. Samokhvalov M. A., Matykov A. A., Geydt A. V., Paronko A. A. The results of experimental researches of the lip technology of soil solidification. *Innovatsii i investitsii*. 2018;(10):249–252. (In Russ.) URL: <https://innovazia.ru/upload/iblock/95b/N%10%202018%20new.pdf>.
36. Samokhvalov M. A., Ashikhmin O. V., Tsernant A. A. Determination of grout mix composition to increase the quality of ground improvement for tube-a-manchette grouting. *Modern High Technologies*. 2018;(5):139–144. (In Russ.) URL: <https://top-technologies.ru/article/view?id=37005>.
37. Samokhvalov M. A. *Interaction of drill-injection piles with controlled widening with dusty-clay soil base: abstract of the dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences*. Tyumen: Tyumen State University of Architecture and Civil Engineering; 2016. URL: <https://viewer.rsl.ru/ru/rsl01006646888?page=2&rotate=0&theme=white>.
38. Ibragimov M. Strengthening of soft soils by grouting. *Bulletin of Science and Research Center of Construction*. 2019;23(4):69–80. (In Russ.)
39. Ibragimov M. N. Design and implementation of soil stabilization by grout injection using hydrofracking technology. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 2015;52:100–108. <https://doi.org/10.1007/s11204-015-9313-0>
40. Abbud M. *Geotechnical substantiation of stabilization of foundation settlements by means of injected soil consolidation: abstract of the dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences*. St. Petersburg: St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering; 2000. (In Russ.)
41. Bogomolov V. A. *The method of high-pressure injection of cohesive soils in the arrangement and reinforcement of bases and foundations: abstract of the dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences*. Perm: Perm State Technical University; 2002. (In Russ.) URL: <https://search.rsl.ru/ru/record/01003228006?ysclid=m704d17gf4667484184>
42. Ermolayev V. A. *Fixing of bases of buildings and structures by the method of hydraulic fracturing at repeated injection: abstract of the dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences*. St. Petersburg: St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering; 2013. (In Russ.) URL: <https://search.rsl.ru/ru/record/01005543569?ysclid=m704eow4a560690510>.
43. Lomov P. O., Lanis A. L., Grebennikov I. O. Assessment of the deformation characteristics of soil massif reinforced with vertical elements. *News of Higher Educational Institutions. Construction*. 2023;(3):22–37. (In Russ.) <https://doi.org/10.32683/0536-1052-2023-771-3-22-37>
44. Kononenko D. V., Lichman A. R., Nuzhdin M. L. Laboratory studies of the shape of injection bodies obtained by injection of expanding geopolymer. In: *Aktual'nyye problemy sovremennogo fundamentostroyeniya s uchetom energosberegayushchikh tekhnologiy: sbornik materialov XV Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, Penza, 21 May 2024*. Penza: Penza State University of Architecture and Construction; 2024. P. 19–22. (In Russ.)
45. Ibragimov M. N., Semkin V. V. *Soil consolidation by injection of cement mortars*. Moscow: ASV; 2012. (In Russ.)
46. Kambefor A. *Soil injection. Principles and methods*. Moscow: Energiya; 1971. (In Russ.)
47. Shulyatyev O. A., Mozgacheva O. A. Reduction of foundation settlement by changing the stress-strain state of the soil bedding with injected hardening solution. *Bulletin of Science and Research Center of Construction*. 2020;26(3):121–148. (In Russ.) [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2020-3\(26\)-121-148](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2020-3(26)-121-148)
48. Pronozin Ya. A., Stepanov M. A., Shuvaev A. N., Davlatov D. N. Interaction of the system of strengthening pile foundations with preliminarily prime rated ground basis of operating facilities. *Bulletin of PNRPU. Construction and Architecture*. 2018;9(3):42–53. (In Russ.) <https://doi.org/10.15593/2224-9826/2018.3.05>
49. Mangushev R. A., Garnyk L. V., Trifonova I. I. The influence of protection geotechnical measures on stabilization of settlement of the building in a dangerous condition. *Bulletin of Civil Engineers*. 2016;(4):85–93. (In Russ.) URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=26673483>.

50. Sakharov I. I. Adaptation of collar technology for reinforcement injection of building foundations. *Rekonstruktsiya gorodov i geotekhnicheskoye stroitel'stvo*. 2000;(2). (In Russ.) URL: <http://georeconstruction.net/journals/02/6/6.htm>.
51. Jaworski G. W., Seed H. B., Duncan J. M. Laboratory study of hydraulic fracturing. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*. 1981;107(6):713–732. [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(81\)90537-4](https://doi.org/10.1016/0148-9062(81)90537-4)
52. Mohd Norizam M. S., Nuzul Azam H., Helmi Zulhaidi S., Abdul Aziz A., Nadzrol Fadzil A. Literature review of the benefits and obstacle of horizontal directional drilling. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2017;271:012094. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/271/1/012094>
53. Nuzhdin M. L., Nuzhdin L. V. Experimental confirmation of possibility of creating installed form injection bodies in ground base. *News of Higher Educational Institutions. Construction*. 2019;(10):101–112. (In Russ.) URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=41831500>.



Информация об авторах

Прозин Яков Александрович, д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры строительного производства и геотехники, Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Российская Федерация, geofond.tgasu@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-6173-2796>

Сугоняев Иван Владимирович, аспирант, лаборант кафедры строительного производства и геотехники, Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Российская Федерация, vanya_sugonyaev1999@mail.ru

Брагарь Елена Петровна, PhD, ассистент кафедры строительного производства и геотехники, Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Российская Федерация, bragarep@tyuiu.ru

Кайгородов Михаил Дмитриевич, канд. техн. наук, доцент кафедры строительного производства и геотехники, Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Российская Федерация, heklerkox@gmail.com

Information about the authors

Yakov A. Pronozin, Dr. Sci. (Engineering), Professor, Professor in the Department of Construction Production and Geotechnics, Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russian Federation, geofond.tgasu@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-6173-2796>

Ivan V. Sugonyaev, Postgraduate, Laboratory Assistant in the Department of Construction Production and Geotechnics, Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russian Federation, vanya_sugonyaev1999@mail.ru

Elena P. Bragar, PhD, Assistant in the Department of Construction Production and Geotechnics, Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russian Federation, bragarep@tyuiu.ru

Mikhail D. Kaigorodov, Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor in the Department of Construction Production and Geotechnics, Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russian Federation, heklerkox@gmail.com

Получена 25 ноября 2024 г., одобрена 10 февраля 2025 г., принята к публикации 20 февраля 2025 г.
Received 25 November 2024, Approved 10 February 2025, Accepted for publication 20 February 2025