

## Усиление грунтовых оснований методом гидроразрыва при горизонтальной проходке

Иван Владимирович Сугоняев, Яков Александрович Прозин,  
Елена Петровна Брагарь

Тюменский индустриальный университет (ТИУ); г. Тюмень, Россия

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Развитие технологий усиления грунтовых оснований зданий и сооружений различных типов представляет значимое направление в геотехническом строительстве. Особую актуальность приобретают методы, позволяющие создавать в грунтовом массиве сеть армирующих элементов с помощью различных инъекционных растворов. Цель исследования — научное обоснование и экспериментальная проверка эффективности метода, объединяющего технологию горизонтально направленного бурения (ГНБ) и управляемого гидроразрыва грунтового массива для создания сети инъекционных включений в насыпных грунтах.

**Материалы и методы.** В основе методологии лежит комплексный полевой эксперимент. Разработаны и апробированы конструкция горизонтального инъектора с резиновыми манжетами и технология его установки с помощью ГНБ. Исследование включало нагнетание цементного раствора с различным водоцементным отношением под контролируемым давлением, геодезический мониторинг грунтовой поверхности и последующую откопку околоинъекторного пространства для определения морфологии и геометрии цементных включений.

**Результаты.** Установлен характер формирования инъекционных тел в насыпных несвязных грунтах по сравнению со связными, выражающийся в образовании сферических объемных тел вместо плоских линз. Зафиксировано незначительное воздействие процесса инъецирования на грунтовую поверхность, что подтверждает его практическую применимость.

**Выводы.** Проанализированы механизмы распространения раствора и формирования цементных включений в грунтовом массиве. Показано, что предлагаемый метод позволяет целенаправленно создавать в основании сеть из точечных затвердевших цементных включений. Технология доказала свою принципиальную состоятельность и практическую значимость. Основные преимущества включают возможность производства работ без какой-либо остановки производственных процессов и выселения жильцов. Метод рекомендован для применения при усилении под фундаментами преимущественно мелкого заложения как существующих зданий и сооружений, так и при новом строительстве.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** горизонтально направленное бурение (ГНБ), усиление грунтовых оснований, гидроразрыв, манжетная технология, инъектор, цементация

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Сугоняев И.В., Прозин Я.А., Брагарь Е.П. Усиление грунтовых оснований методом гидроразрыва при горизонтальной проходке // Вестник МГСУ. 2026. Т. 21. Вып. 5. С. 742–751. DOI: 10.22227/1997-0935.2026.5.742-751

Автор, ответственный за переписку: Иван Владимирович Сугоняев, vanya\_sugonyaev1999@mail.ru.

## Soil foundation reinforcement using hydraulic fracturing during horizontal drilling

Ivan V. Sugonyaev, Yakov A. Pronozin, Elena P. Bragar  
Industrial University of Tyumen (IUT); Tyumen, Russian Federation

### ABSTRACT

**Introduction.** The development of technologies for strengthening the soil foundations of buildings and structures of various types is an urgent area in geotechnical construction. Methods that make it possible to create a network of reinforcing elements in a soil mass using various injection solutions are becoming particularly relevant. The aim is to scientifically substantiate and experimentally verify the effectiveness of a method combining the technology of horizontal directional drilling (HDD) and controlled hydraulic fracturing of a soil mass to create a network of injection inclusions in bulk soils.

**Materials and methods.** The methodology is based on a comprehensive field experiment. The design of a horizontal injector with rubber cuffs and the technology of its installation using HDD were developed and tested. The study included injection of cement mortar with a different water-cement ratio under controlled pressure, geodetic monitoring of the soil surface and subsequent excavation of the near-injection space to determine the morphology and geometry of cement inclusions.

**Results.** The nature of the formation of injection bodies in loose, unconsolidated soils in comparison with cohesive soils has been established, which is expressed in the formation of spherical volumetric bodies instead of flat lenses. A minor effect of the injection process on the ground surface has been recorded, which confirms its practical applicability.

**Conclusions.** The mechanisms of the distribution of mortar and the formation of cement inclusions in the soil are analyzed. It is shown that the proposed method makes it possible to purposefully create a network of point-hardened cement inclusions at the base. The technology has proven its fundamental validity and practical importance. The main advantages include the possibility of carrying out work without any interruption of production processes and eviction of tenants. The method is recommended for use in reinforcement under foundations, mainly shallow foundations, of both existing buildings and structures, and in new construction.

**KEYWORDS:** horizontal directional drilling (HDD), reinforcement of ground foundations, hydraulic fracturing, cuff technology, injector, cementation

**FOR CITATION:** Sugonyaev I.V., Pronozin Ya.A., Bragar E.P. Soil foundation reinforcement using hydraulic fracturing during horizontal drilling. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2026; 21(5):742-751. DOI: 10.22227/1997-0935.2026.5.742-751 (rus.).

*Corresponding author:* Ivan V. Sugonyaev, vanya\_sugonyaev1999@mail.ru.

## ВВЕДЕНИЕ

Обеспечение эксплуатационной надежности зданий и сооружений является важной инженерной задачей. Необходимость усиления грунтовых оснований возникает как при строительстве новых объектов, так и при реконструкции уже существующих. Известен широкий спектр технологий усиления грунтовых, в том числе слабых, оснований [1–20]. В частности, хорошо себя зарекомендовал метод усиления цементацией через направленные гидроразрывы, его исследовали М.Н. Ибрагимов, А. Камбефор, О.А. Мозгачева, М.А. Самохвалов, О.А. Шулятьев [1–12], а также М.Л. Нуждин, Я.А. Пронозин, М.А. Степанов, которые занимались усилением оснований по манжетной технологии [18–20]. Применение цементации по манжетной технологии при горизонтальной ориентации инъекторов упоминается в трудах: Жан Луи Валет [13], К. Gafar, К. Soga, А. Bezuijen [14–16], И.В. Кугушева [17].

Анализ литературных источников позволил выявить ряд ключевых особенностей данного метода, его преимущества и недостатки. Усиление гидроразрывами производят, как правило, способом устройства вертикальных, либо наклонных инъекторов, что часто требует остановки производственных процессов или выселения жильцов, если усиление осуществляется изнутри здания. Исходя из этого предложен способ усиления грунтовых оснований методом гидроразрыва по манжетной технологии при горизонтально ориентированной проходке, который дает возможность выполнять работы, не затрагивая внутреннее пространство здания.

Можно отметить, что усиление грунтовых оснований по манжетной технологии методом гидроразрыва при горизонтально ориентированной проходке может быть эффективным в ряде случаев, когда необходимо:

- усилить грунтовое основание под плитным фундаментом;
- усилить грунтовое основание под ленточным фундаментом большой протяженности;
- усилить грунтовое основание под вертикальными стальными резервуарами;

- заполнить и уплотнить пространство, которое появилось в процессе эксплуатации здания между сваями и ростверком;

- усилить грунтовое основание под новое строительство;

- проводить работы снаружи здания без остановки производства, выселения жильцов или ограничения движения транспорта.

Установка 20 пог. м горизонтального инъектора заняла 2 ч рабочего времени, в то время как установка 20 пог. м вертикальных инъекторов занимает от 4 до 6 ч.

Цель исследования состоит в определении возможного расширения области применения метода гидравлических разрывов грунта по манжетной технологии с использованием горизонтально направленного бурения (ГНБ).

Задача исследования заключается в установлении принципиальной работоспособности манжетной технологии для закрепления различных видов грунтов на основе экспериментальных исследований с выявлением закономерностей образования закрепленной зоны грунтового массива в зависимости от особенностей производства работ.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Эксперимент выполнялся в г. Тюмени, п. Боровский. Грунтовое основание в зоне инъекции сложено насыпными грунтами, местами со строительным мусором. Грунтовые воды зафиксированы на отметке –1,6 м относительно поверхности земли. Инъектор был изготовлен из полиэтиленовой трубы 20 м. Пробуривание горизонтальной скважины и протягивание через нее инъектора осуществлялось с использованием установки ГНБ.

Эксперимент включал следующие виды работ:

1. Приготовление цементного раствора с применением миксерной станции и подача его при помощи инъекционного насоса посредством пакера в инъектор.

2. Контроль расхода цементного раствора, давления нанетания раствора, выхода раствора из грунтового основания, высотных отметок геодезических марок.



Рис. 1. Общий вид иньектора

Fig. 1. General view of the injector

3. Промывка иньектора после завершения каждого этапа нагнетания.

4. Откопка иньектора и прилегающего грунтового основания.

5. Фиксация формы и размеров иньекционных тел.

6. Обработка результатов.

В качестве иньектора применялась полиэтиленовая труба ПЭ 100 63 × 5,8 мм (рис. 1). Иньектор имел длину 20 м, на нем через каждый метр были расположены отверстия диаметром 10 мм для нагнетания раствора в грунт. На каждом таком отверстии были размещены резиновые манжеты шириной 10 см, выполняющие роль обратного клапана. Каждая манжета закреплялась хомутом из нержавеющей стали, также перед каждой манжетой предусмотрено защитное кольцо из полиэтиленовой трубы для предотвращения смещения манжеты при протягивании иньектора в грунтовом основании.

Иньектор протягивался в грунт с помощью установки ГНБ (рис. 2, а). Глубина и направление протягивания контролировались с использованием локационного оборудования (рис. 2, б).

Бурение производилось в два этапа:

1-й этап — бурение пилотной скважины;

2-й этап — протягивание иньектора через пилотную скважину.

Бурение выполнялось лопаткой шириной 80 мм, длина буровой штанги 1,8 м. Максимальный угол наклона составлял около  $10 \pm 2\%$  на 1 м (угол наклона менялся в процессе бурения, так как были включения различного строительного мусора). Стадии протягивания иньектора представлены на рис. 3.

Нагнетание раствора проводилось в точках № 1–10. Так как нагнетание раствора планировалось делать в течение двух дней, то после промывки иньектора в первый день из-за того, что резиновые

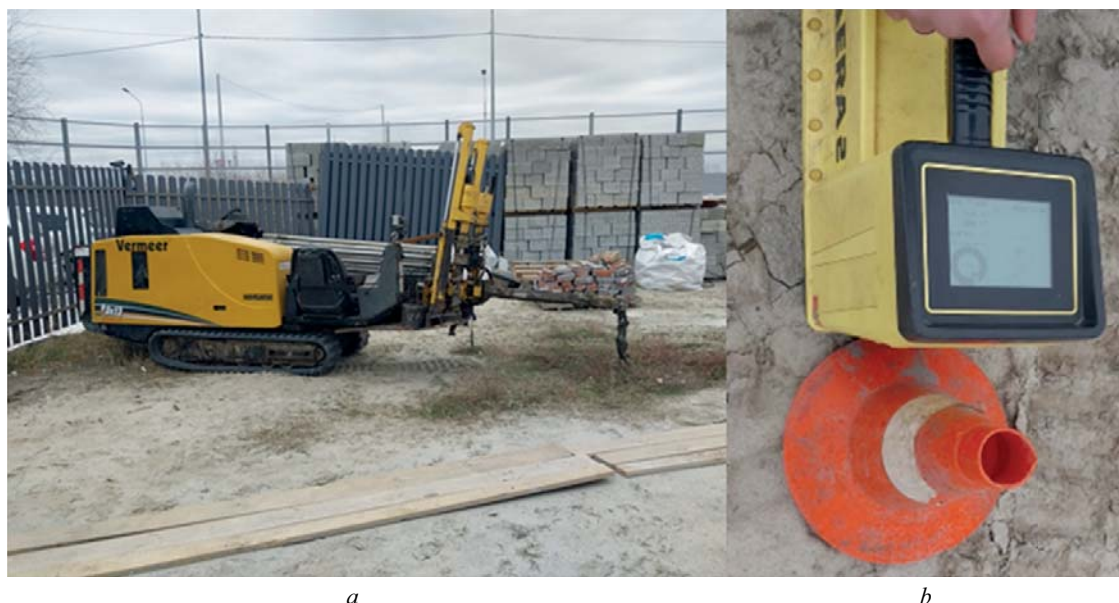


Рис. 2. Установка для выполнения горизонтально направленного бурения (Vermeer Navigator) (а); локационное оборудование (б)

Fig. 2. Installation for horizontal directional drilling (Vermeer Navigator) (a); location equipment (b)

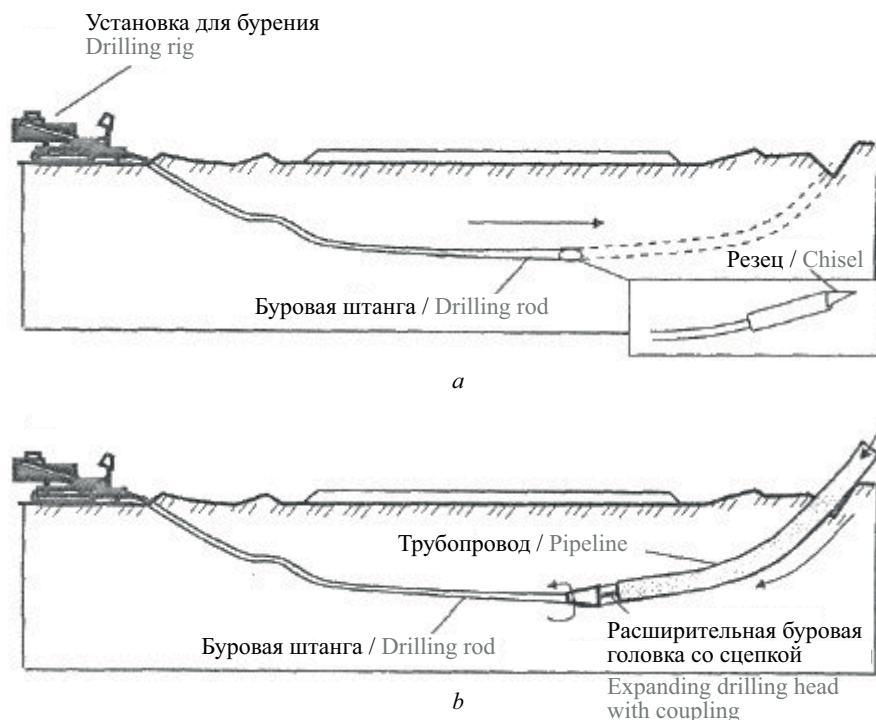


Рис. 3. Стадии установки иньектора: а — бурение пилотной скважины; б — протягивание иньектора  
 Fig. 3. Stages of the injector installation: a — drilling of the pilot well; b — stretching the injector

Данные по нагнетанию цементного раствора

Data on injection of cement mortar

Номер Number	Объем цемента, кг Volume of cement, kg	Объем воды, кг Volume of water, kg	Водоцементное отношение Water-cement ratio	Давление нагнетания, МПа Discharge pressure, MPa	Количество циклов нагнетания Number of pumping cycles
1	100	60	0,6	0,3	1
2	50 + 50	30 + 30	0,6	0,4	2
3	50 + 50	30 + 30	0,6	4	2
4	150	105	0,7	2	1
5	200	120	0,6	2	1
6	50	15	0,3	0,5	1
7	200	140	0,7	6	1
8	100	50	0,5	0,5	1
9	200	160	0,8	6	1
10	100	40	0,4	0,5	1

манжеты сползли из проектного положения во время протягивания иньектора, цементный раствор затек обратно и затвердел, выполнить нагнетание в точках № 11–20 не удалось. Объем и давление нагнетания представлены в таблице.

Схема точек, через которые производилась подача раствора в грунт, показана на рис. 4.

Раствор подавался в грунт с применением миксерной станции через гидравлический пакер и рукава высокого давления. На рис. 5 приведен общий вид оборудования, с помощью которого производилось нагнетание цементного раствора в грунтовое основание.

На рис. 6 представлен гидравлический пакер.

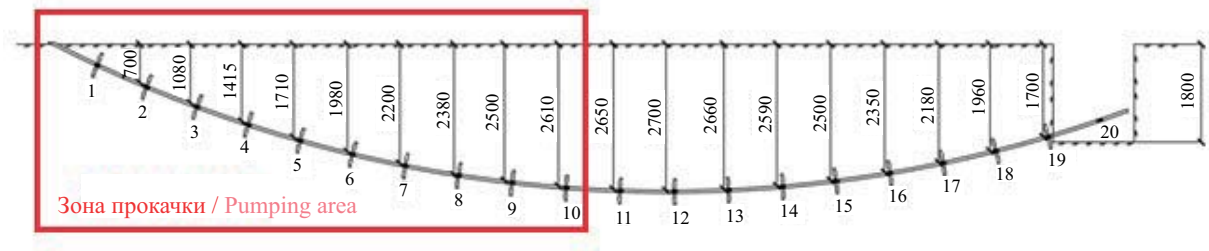


Рис. 4. Схема расположения отверстий в инжекторе

Fig. 4. Diagram of the holes in the injector



Контролируемый  
параметр — давление  
The controlled parameter  
is pressure

*a*

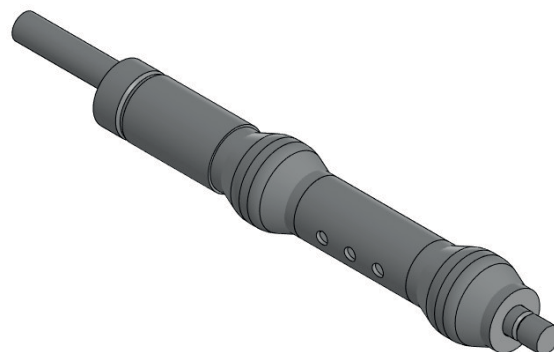
*b*

*c*

*d*

Рис. 5. Общий вид оборудования: *a* — датчик контроля давления; *b* — станция для подачи гидравлического масла; *c* — миксерная станция; *d* — гидравлический пакер

Fig. 5. General view of the equipment: *a* — pressure control sensor; *b* — hydraulic oil supply station; *c* — mixing station; *d* — hydraulic packer



*a*

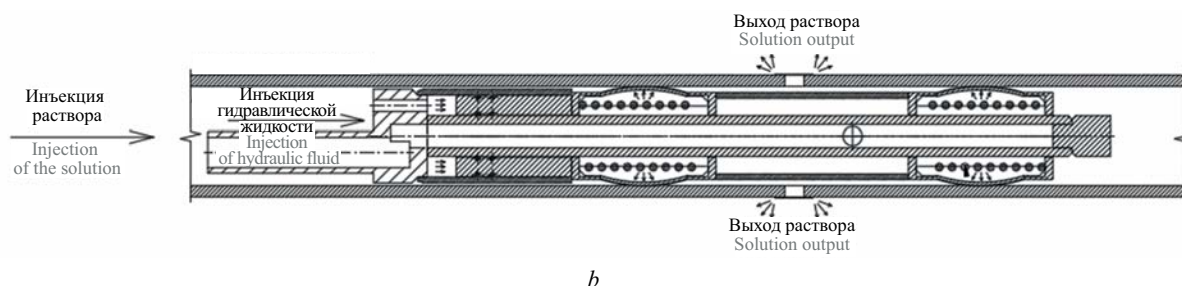


Рис. 6. Гидравлический пакер в рабочем состоянии: *a* — общий вид; *b* — разрез  
 Fig. 6. Hydraulic packer in working condition: *a* — general view; *b* — section

На конструкцию гидравлического пакера для нагнетания твердеющего раствора в иньектор подана заявка в Роспатент.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

В результате откопки иньектора и околоиньекторного пространства в районе точек № 1–5 зафиксированы иньекционные тела, характерные геометрические размеры которых от 12 до 64 см и массой от 5 до 150 кг (рис. 7). По периметру точек № 6–10 откопка не производилась, так как препятствовали грунтовые воды.

Можно сделать выводы о том, что в насыпном грунте характер иньекционных тел отличается от формы тел, представленных в статьях [1–3, 5]. Обычно иньекционные тела имеют плоскую геометрическую форму, которая расположена либо в вертикальной плоскости, либо в горизонтальной, хотя в работах зарубежных авторов К. Gafar, К. Soga, А. Bezuijen при проведении лотковых экспериментов с нагнетанием различных растворов в песчаный грунт иньекционные тела приближены к объемной форме [14–16]. В нашем случае в насыпном грунте иньекционные тела приближены также к объемной форме. На основе приве-



Рис. 7. Общий вид откопанного участка  
 Fig. 7. General view of the excavated area



Рис. 8. Проведение геодезической съемки

Fig. 8. Conducting geodetic survey

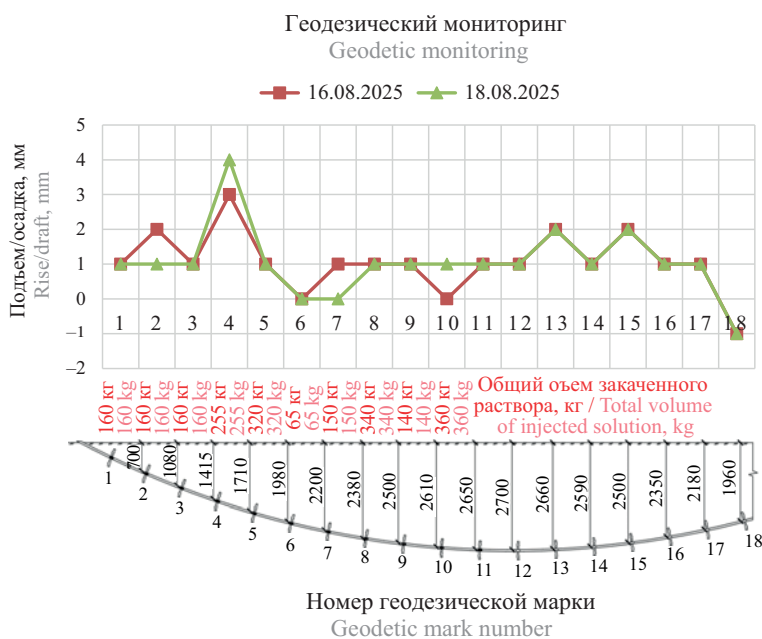


Рис. 9. Результаты геодезической съемки

Fig. 9. Results of geodetic survey

денных сведений видно, что при давлении нагнетания более 2 МПа геометрические размеры инъекционных тел больше размеров тел, полученных при давлении нагнетания 0,3–0,4 МПа.

В исследованиях О.А. Шулятьева и А. Камбефора [9, 12] говорится, что линза затвердевшего раствора, образующегося при гидроразрыве, имеет толщину от 20 до 30 мм в насыпных грунтах, от 5 до 20 мм — в песках и от 3 до 10 мм — в глинах. В нашем случае в насыпном грунте толщина цементного включения находится в пределах от 19 до 43 см, что в разы отличается от указанных выше опытных данных. Длина

распространения полостей может составлять несколько метров и зависит от объема инъецируемого раствора (в нашем случае зафиксирована длина распространения до 0,5 м).

Общая масса обнаруженных цементных тел в районе точек № 1–5 составила приблизительно 350 кг, а изначальная масса цемента в сухом состоянии — 650 кг, общая масса раствора — 1055 кг, необнаруженные остатки цементных включений могут свидетельствовать о том, что раствор распространялся в насыпном грунте на несколько метров в стороны. Это может означать и то, что раствор уходил по стенкам затруб-

ного пространства вдоль инъектора, а также часть цемента ушла на пропитку грунта при малом давлении нагнетания (0,3–0,4 МПа) в точках № 1 и 2.

При инъектировании производилась геодезическая съемка (рис. 8) по определению подъемов грунтового основания. Роль геодезических марок выполняли арматурные стержни, забитые на полметра в грунтовое основание через каждый метр над зоной нагнетания раствора.

Результаты геодезической съемки представлены на графике (рис. 9).

По результатам геодезического мониторинга обнаружен относительно небольшой подъем геодезических марок в районе точки № 4 до 4 мм.

Также видно, что в точке № 18 конечная осадка составила 1 мм, это связано с тем, что в эту точку производилась промывка инъектора, в связи с чем вода попадала в грунт и он проседал. Зафиксирован и подъем точек № 13 и 15, это связано с тем, что раствор из точки № 10 уходил в область точек № 13–15.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Итоги полевого эксперимента по возможности расширения области применения метода гидроразрыва по манжетной технологии в насыпном грунте с включениями строительного мусора позволяют сделать следующие выводы:

1. Доказана принципиальная работоспособность манжетной технологии для закрепления различных видов грунтов цементацией на основе го-

ризонтального бурения и установки горизонтально ориентированных инъекторов.

2. Форма затвердевших цементных включений в насыпных основаниях приближена больше к объемной с размерами от 12 до 46 см, нежели к линзообразной, относящейся более, по оценкам других авторов, к иным грунтовым условиям.

3. Общая масса обнаруженных цементных тел в районе точек № 1–5 составила приблизительно 330 кг, при массе раствора 1055 кг, что позволяет утверждать о возможном значительном удалении сформированных цементных тел от инъектора, частичной пропитке насыпного грунта и потерях раствора в затрубном пространстве.

4. Подъемы геодезических марок до 4 мм указывают на качественную картину положительного влияния инъекции на напряженно-деформированное состояние основания при усилении и принципиальную возможность регулирования пространственного положения объектов.

5. Следует отметить важные особенности инъекторов преимущественно горизонтальной направленности:

- их существенная криволинейность на начальном и конечном участках и связанные с этим ограничения по кривизне с учетом длины и конструкции пакера для его свободного перемещения;
- возможность скопления раствора внутри инъектора в его нижней точке, что может создать сложности при многократной инъекции зон, при значительных временных интервалах инъектирования.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. 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. С. 294–297. EDN LWCTHU.

2. Самохвалов М.А., Матюков А.А., Гейдт А.В., Паронко А.А. Результаты экспериментальных исследований манжетной технологии закрепления грунтов // Инновации и инвестиции. 2018. № 10. С. 249–252. EDN IEOHFZ.

3. 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. С. 139–144. EDN XPPQKD.

4. Самохвалов М.А. Взаимодействие буроинъекционных свай, имеющих контролируемое уширение, с пылевато-глинистым грунтовым основанием : автореф. дис. ... канд. техн. наук. Тюмень, 2016. 22 с. EDN ZPYSLB.

5. Ибрагимов М.Н. Усиление слабых грунтов инъекцией растворов // Вестник НИЦ «Строительство». 2019. № 4 (23). С. 69–80. EDN UAAIXI.

6. Ибрагимов М.Н. Вопросы проектирования и производства уплотнения грунтов инъекцией растворов по гидроразрывной технологии // Основания, фундаменты и механика грунтов. 2015. № 2. С. 22–27. EDN TWONEH.

7. Ермолаев В.А. Закрепление оснований зданий и сооружений методом гидроразрыва при неоднократном инъектировании : автореф. дис. ... канд. техн. наук. СПб., 2013. 25 с. EDN ZPCSOZ.

8. Ибрагимов М.Н., Семкин В.В. Закрепление грунтов инъекцией цементных растворов. М. : Издательство АСВ, 2012. 254 с. EDN QNPWLR.

9. Камбефор А. Инъекция грунтов. Принципы и методы. М. : Энергия, 1971. 333 с.

10. Шулятьев О.А., Мозгачева О.А. Снижение осадки фундамента за счет изменения напряженно-деформированного состояния основания путем инъекции твердеющего раствора // Вестник НИЦ «Строительство». 2020. № 3 (26). С. 121–148. DOI: 10.37538/2224-9494-2020-3(26)-121-148. EDN LRQJXH.

11. 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 Пермского национального исследовательского политехнического университета. Строительство и архитектура. 2018. Т. 9. № 3. С. 42–53. DOI: 10.15593/2224-9826/2018.3.05. EDN YKKDJR.

12. Шулятьев О.А. Применение гидроразрывной технологии в практике строительства // Применение гидроразрывной технологии в практике строительства : мат. конф. 2022. С. 7–22. DOI: 10.37538/2713-1149-2022-7-22. EDN RYZZMP.

13. Жан-Луи Валет. Компенсационное нагнетание: технология в реальном времени // Метро и тоннели. 2002. № 4. С. 16–19.

14. Sanders M., Gafar K., van Tol A., Soga K., Bezuijen A. Fracturing of sand in compensation grouting // Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground. 2008. Pp. 297–302. DOI: 10.1201/97802-3879986-40

15. Van Tol A., Bezuijen A., Kleinlugtenbelt R. Laboratory tests, compaction or compensation grouting // Physical Modelling in Geotechnics. 2006. DOI: 10.1201/noc0415415866.ch183

16. Bezuijen A. Compensation grouting in sand experiments, field experiences and mechanisms. 2010.

17. Кузусева И.В. Обоснование метода и технологии укрепления оснований исторических сооружений (на примере сооружений Свято-Троицкой Сергиевой Лавры) : дис. ... канд. техн. наук. М., 2016. 168 с. EDN VNVEWH.

18. Степанов М.А., Рачков Д.В., Пронозин Я.А. Исследование изменения напряженного состояния грунта при цементации в процессе проведения противоаварийных работ на объекте культурного наследия // Теория и практика фундаментостроения : сб. тез. докл. XV Междунар. симпозиума по реологии грунтов, посвящ. 95-летию КГАСУ и 60-летию кафедры «Основания, фундаменты, динамика сооружений и инженерная геология». 2025. С. 91. EDN DATIGQ.

19. Pronozin Ya.A., Naumkina Yu.V., Epifantseva L.R., Gress Yu.D. Cementation of soils by wristband-pipe injection technology in conditions of thawing perpetually frozen soils // Construction and Geotechnics. 2023. Vol. 14. Issue 3. Pp. 107–120. DOI: 10.15593/2224-9826/2023.3.10. EDN DJMVDE.

20. Нуждин М.Л., Нуждин Л.В., Фельдбуш А.В. Обзор способов усиления грунтового основания высоконапорным инъецированием // Construction and Geotechnics. 2025. Т. 16. № 2. С. 5–16. DOI: 10.15593/2224-9826/2025.2.01. EDN QVCNOK.

Поступила в редакцию 15 декабря 2025 г.

Принята в доработанном виде 31 декабря 2025 г.

Одобрена для публикации 29 января 2026 г.

ОБ АВТОРАХ: **Иван Владимирович Сугоняев** — аспирант, лаборант кафедры строительного производства и геотехники; **Тюменский индустриальный университет (ТИУ)**; 625000, г. Тюмень, ул. Володарского, д. 38; РИНЦ ID: 1278640; vanya\_sugonyayev1999@mail.ru;

**Яков Александрович Пронозин** — доктор технических наук, профессор, профессор кафедры строительного производства и геотехники; **Тюменский индустриальный университет (ТИУ)**; 625000, г. Тюмень, ул. Володарского, д. 38; РИНЦ ID: 415568, Scopus: 55390829400, ORCID: 0000-0002-6173-2796; geofond.tgasu@gmail.com;

**Елена Петровна Брагарь** — доктор технических наук, доцент кафедры строительного производства и геотехники; **Тюменский индустриальный университет (ТИУ)**; 625000, г. Тюмень, ул. Володарского, д. 38; РИНЦ ID: 1012875, Scopus: 57210176942, ORCID: 0000-0003-1212-6324; bragarep@tyuiu.ru.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

## REFERENCES

1. Samokhvalov M.A., Ashikhmin O.V., Tokarev A.E., Paronko A.A. Results of experimental investigations of the formation of hydraulic fractures in dusty-clay soils. *Innovation & Investment*. 2020; 3:294-297. EDN LWCTHU. (rus.).

2. Samokhvalov M.A., Matyukov A.A., Geydt A.V., Paronko A.A. Results of experimental studies of cuff technology of soil fixation. *Innovation & Investment*. 2018; 10:249-252. EDN IEOHFZ. (rus.).

3. Samokhvalov M.A., Ashikhmin O.V., Tsernant A.A. Determination of grout mix composition to

increase the quality of ground improvement for tube-anchette grouting. *Modern high technologies*. 2018; 5:139-144. EDN XPPQKD. (rus.).

4. Samokhvalov M.A. *Interaction of borehole injection piles with controlled broadening with a dusty-clay soil base : abstract of the dissertation ... candidate of technical sciences*. Tyumen, 2016; 22. EDN ZPYSLB. (rus.).

5. Ibragimov M. Strengthening of soft soils by grouting. *Bulletin of the Scientific Research Center of Construction*. 2019; 4(23):69-80. EDN UAAIXI. (rus.).

6. Ibragimov M.N. Design and implementation of soil stabilization by grout injection using hydrofracturing technology. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 2015; 2:22-27. EDN TWONEH. (rus.).
7. Ermolaev V.A. *Fixing the foundations of buildings and structures by hydraulic fracturing with repeated injection : abstract of the dissertation ... candidate of technical sciences*. St. Petersburg, 2013; 25. EDN ZPCSOZ. (rus.).
8. Ibragimov M.N., Semkin V.V. *Soil fixation by injection of cement mortars*. Moscow, ASV, 2012; 254. EDN QNPWLR. (rus.).
9. Kambefor A. Injection of soils. *Principles and methods*. Moscow, Energiya, 1971; 333. (rus.).
10. Shulyatyev O., Mozgacheva O. Reduction of foundation settlement by changing the stress-strain state of the soil bedding with injected hardening solution. *Bulletin of the Scientific Research Center of Construction*. 2020; 3(26):121-148. DOI: 10.37538/2224-9494-2020-3(26)-121-148. EDN LRQJXH. (rus.).
11. 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 Perm State Technical University. Construction and Architecture*. 2018; 9(3):42-53. DOI: 10.15593/2224-9826/2018.3.05. EDN YKKDJR. (rus.).
12. Shulyatyev O.A. Application of hydraulic fracturing technology in construction practice. *Application of hydraulic fracturing technology in construction practice : conference proceedings*. 2022; 7-22. DOI: 10.37538/2713-1149-2022-7-22. EDN RYZZMP. (rus.).
13. Jean-Louis Valet. Compensation injection: real-time technology. *Metro and Tunnels*. 2002; 4:16-19. (rus.).
14. Sanders M., Gafar K., van Tol A., Soga K., Bezuijen A. Fracturing of sand in compensation grouting. *Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground*. 2008; 297-302. DOI: 10.1201/978020387-9986-40
15. Van Tol A., Bezuijen A., Kleinlugtenbelt R. Laboratory tests, compaction or compensation grouting. *Physical Modelling in Geotechnics*. 2006. DOI: 10.1201/noe04-15415866.ch183
16. Bezuijen A. *Compensation grouting in sand experiments, field experiences and mechanisms*. 2010.
17. Kugusheva I.V. *Substantiation of the method and technology of strengthening the foundations of historical structures (on the example of the structures of the Holy Trinity Sergius Lavra) : dissertation ... candidate of technical sciences*. Moscow, 2016; 168. EDN VNVEWH. (rus.).
18. Stepanov M.A., Rachkov D.V., Pronozin Ya.A. Study of changes in the stressed state of soil during cementation in the process of emergency response work at a cultural heritage site. *Theory and practice of foundation engineering : collection of abstracts of the XV International Symposium on Soil Rheology, dedicated to the 95th anniversary of KGASU and the 60th anniversary of the Department "Foundations, foundations, dynamics of structures and Engineering Geology"*. 2025; 91. EDN DATIGQ.
19. Pronozin Ya.A., Naumkina Yu.V., Epifantseva L.R., Gress Yu.D. Cementation of soils by wristband-pipe injection technology in conditions of thawing perpetually frozen soils. *Construction and Geotechnics*. 2023; 14(3):107-120. DOI: 10.15593/2224-9826/2023.3.10. EDN DJMVDE.
20. Nuzhdin M.L., Nuzhdin L.V., Feldbush A.V. Overview of ways to strengthen the soil base high-pressure injection. *Construction and Geotechnics*. 2025; 16(2):5-16. DOI: 10.15593/2224-9826/2025.2.01. EDN QVCNOK. (rus.).

Received December 15, 2025.

Adopted in revised form on December 31, 2025.

Approved for publication on January 29, 2026.

**B I O N O T E S :** **Ivan V. Sugonyaev** — postgraduate student, laboratory assistant of the Department of Construction Production and Geotechnics; **Industrial University of Tyumen (IUT)**; 38 Volodarsky st., Tyumen, 625000, Russian Federation; ID RSCI: 1278640; vanya\_sugonyaev1999@mail.ru;

**Yakov A. Pronozin** — Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Construction Production and Geotechnics; **Industrial University of Tyumen (IUT)**; 38 Volodarsky st., Tyumen, 625000, Russian Federation; ID RSCI: 415568, Scopus: 55390829400, ORCID 0000-0002-6173-2796; geofond.tgasu@gmail.com;

**Elena P. Bragar** — Doctor of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Construction Production and Geotechnics; **Industrial University of Tyumen (IUT)**; 38 Volodarsky st., Tyumen, 625000, Russian Federation; ID RSCI: 1012875, Scopus: 57210176942, ORCID: 0000-0003-1212-6324; bragarep@tyuiu.ru.

*Contribution of the authors: all the authors have made an equivalent contribution to the preparation of the publication. The authors declare that there is no conflict of interest.*