СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ЦЕМЕНТАЦИОННОГО ЗАКРЕПЛЕНИЯ ГРУНТОВ

И.Я. Харченко, В.А. Алексеев, К.А. Исрафилов, А.С.-Э. Бетербиев

*Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет
(НИУ МГСУ), 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26*

АННОТАЦИЯ. Цементация грунтов с целью их упрочнения или повышения водонепроницаемости находит широкое применение при освоении подземного пространства в условиях плотной городской застройки. Очевидным преимуществом цементационного закрепления грунтов является экологическая безопасность, технологичность, долговечность, экономическая привлекательность. Грунтовые условия городской среды характеризуются крайней неоднородностью, что обуславливает необходимость применения различных технологических решений при их цементации. В работе выполнен анализ опыта применения различных технологий инъекционной цементации грунтов, обеспечивающих заданную эффективность принятых проектных решений.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: укрепление грунтов, цементация грунтов, струйная цементация, инъекционная пропитка, вяжущее, микроцемент

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Харченко И.Я., Алексеев В.А., Исрафилов К.А., Бетербиев А.С.-Э. Современные технологии цементационного закрепления грунтов // Вестник МГСУ. Т. 12. Вып. 5 (104). С. 552–558. DOI: 10.22227/1997-0935.2017.5.552-558

MODERN TECHNOLOGIES OF CEMENT GROUTING

I.Ya. Kharchenko, V.A. Alekseev, K.A. Israfilov, A.S.-E. Beterbiev

*Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU),
26 Yaroslavl'skoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation*

ABSTRACT. For the purpose of soil strengthening or increasing water impermeability, the cement grouting is widely used in the underground construction in conditions of dense urban development. An obvious advantage of cement grouting is environmental safety, high performance, durability, economic attractiveness. The ground conditions of the urban environment are characterized by extreme heterogeneity, which necessitates the use of various technological solutions for their cement grouting. In this work the analysis of application of various technologies of inject grouting providing the given efficiency of the accepted design decisions is executed.

KEY WORDS: soils strengthening, cement grouting, jet cement grouting, inject impregnation, binder, micro cement

FOR CITATION: Kharchenko I.Ya., Alekseev V.A., Israfilov K.A., Beterbiev A.S.-E. Sovremennye tekhnologii tsementatsionnogo zakrepleniya gruntov [Modern Technologies of Cement Grouting]. Vestnik MGSU [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2017, vol. 12, issue 5 (104), pp. 552–558. DOI: 10.22227/1997-0935.2017.5.552-558

Техническая и экономическая эффективность цементационного закрепления грунтов подтверждена многолетней практикой. Востребованность различных технологий цементации грунтов при усилении оснований существующих зданий и сооружений в процессе их реконструкции, при защите зданий, попадающих в зону влияния строящихся подземных сооружений, при устройстве вертикальных и горизонтальных противофильтрационных завес в условиях плотной городской застройки, объясняется компактностью технологического оборудования, незначительными шумовыми и экологическими нагрузками на окружающую среду [1–3]. Из всего многообразия цементационных технологий закрепления грунтов при освоении подземного пространства в условиях плотной городской

застройки наибольшее распространение получили следующие технологии:

- инъекционная цементация в режиме пропитки поровой структуры грунта с использованием тонкодисперсных вяжущих (микроцементов) и манжетной технологии;
- струйная цементация грунтов по одно- и двухкомпонентной технологии (Jet-1 и Jet-2);
- компрессионно-разрывная цементация грунтового массива;
- заполнительная цементация грунтов.

Каждая из вышеназванных технологий имеет оптимальную область применения с учетом геотехнических условий и архитектурно-конструктивных особенностей зданий и сооружений. В настоящее время для цементации грунтов используют обще-

строительные цементы (портландцемент М500 и М400), специальные микроцементы (цементы на основе гидравлических вяжущих со средним размером 95%-х частиц — не более 5...18 мкм), активированные бентониты, минеральные микронаполнители, а также их комбинации [4–8].

Способ цементации грунтов с применением микроцементов по манжетной технологии в режиме пропитки является наиболее щадящим для существующей застройки методом, обеспечивает высокую прочность грунтобетонного массива, достигающую 30 МПа и выше, значительные его габариты и однородность. Однако данная технология применима только в грунтах с коэффициентом фильтрации не менее 0,5 м/сут [9–11].

Технология однокомпонентной струйной цементации (Jet-1) приемлема для широкого спектра грунтов, имеет высокую производительность, достаточно высокую прочность грунтоцементного массива, но подразумевает незначительный диаметр грунтоцементных свай, не превышающий 0,6...0,8 м. Поэтому устройство сплошного грунтоцементного массива предполагает значительный объем буровых и цементационных работ. Применение технологии двухкомпонентной струйной цементации (Jet-2) обеспечивает формирование грунтоцементных свай диаметром до 1,8...2,0 м. При этом прочность грунтоцементного массива, как правило, не превышает 1...3 МПа, и в связи с повышенным вовлечением воздуха в структуру закрепляемого грунта он не обладает достаточной плотностью и водонепроницаемостью. Кроме того, из-за значительных габаритов технологического оборудования и необходимости удаления с терри-

тории строительства значительных объемов грунтоцементного шлама струйная цементация имеет ограниченное применение в стесненных условиях городской застройки [12–14].

Компрессионно-разрывная цементация позволяет закреплять грунтовые массивы с низкой проницаемостью в режиме, аналогичном пропиточной инъекции. Однако для получения качественного закрепления и недопущения рисков неконтролируемого развития разрывов в грунте, интенсивность цементации должна составлять не более 0,5 л/мин. Данное условие снижает производительность работ, а также возможный радиус закрепления грунта.

Заполнительная цементация имеет ограниченную область применения и используется для закрепления или уплотнения неслежавшихся техногенных и трещиноватых скальных грунтов. Эффективность заполнительной цементации зависит от возможности контролировать радиус и направление распространения цементационного состава, что предполагает строгий контроль за технологическим процессом, включая контроль объема расходуемых материалов. При этом заполнительная цементация, как правило, выполняет функцию вспомогательной технологической операции в процессе закрепления грунтов. Вместе с тем заполнительная цементация является основной технологией при устройстве противофильтрационных завес в трещиноватых скальных грунтах.

Анализ табличных данных показывает, что каждая из приведенных технологий имеет свои преимущества и недостатки при цементационном закреплении грунтов в условиях плотной городской застройки. В этой связи оптимальным решением

Рис. 1. Вид массивов закрепленного грунта с применением пропиточной (слева) и струйной (справа) цементации

может быть комбинация отдельных технологических элементов, позволяющая в максимальном объеме реализовать преимущества различных технологий цементационного закрепления грунтов [15–17].

Комбинированная цементация грунтов была реализована на практике в следующих вариантах:

- струйная цементация по двухкомпонентной технологии (Jet-2) плюс пропиточная цементация;
- пропиточная цементация плюс компрессионно-разрывная цементация;
- пропиточная цементация плюс заполнительная цементация.

Комбинация технологии двухкомпонентной струйной цементации (Jet-2) и пропиточной технологии цементации грунтов имеет целью совместить высокую интенсивность производства работ, являющейся существенным преимуществом двухкомпонентной струйной цементации, с необходимостью придать закрепляемому массиву повышенную прочность и непроницаемость, которая гарантированно достигается применением пропиточной технологии цементационного закрепления грунта.

Технологически комбинирование технологий происходит в следующей последовательности:

1. Двухкомпонентная струйная цементация массива грунта по технологии Jet-2.

2. Погружение в скважину, через которую производилось формирование грунтоцементного массива, манжетной трубы (из труб ПВХ Ø50 мм) с шагом разжимных манжет 330 мм (три горизонта на 1 м высоты колонны). Погружение манжетной трубы на проектную глубину производится вручную, в

интервале 30...90 мин после окончания струйной цементации.

3. Выстойка грунтоцементного массива до завершения процесса схватывания цемента, который определяется экспериментально.

4. Цементация грунтоцементного массива по горизонтам манжетной трубы снизу вверх (с использованием двустороннего шлангового обтюлятора) суспензией тонкодисперсного вяжущего (например, Mikrodur R-X с водовязущим отношением В/В, равным 3,0–4,0, в зависимости от требуемой прочности). Объем инъекции на 1 м³ грунтоцементного массива рассчитывается из объема порового его пространства и составляет, как правило, от 250 до 300 л. Режим пропитки регламентируется одновременно по двум параметрам: интенсивность нагнетания и давление нагнетания.

Развитие процесса пропитки капиллярно-пористой структуры грунтоцементного массива, сформированного на первом этапе по технологии Jet-2 суспензией тонкодисперсного вяжущего, можно представить следующим образом:

После завершения процесса схватывания и формирования устойчивой капиллярно-пористой структуры грунта, сформированной по технологии Jet-2, при низком давлении (до 0,5 МПа), с низкой начальной интенсивностью (до 1 л/мин), в грунтоцементном массиве заполняется открытая капиллярно-пористая структура, а также трещины, образовавшиеся в процессе нагнетания. При этом трещинообразование всегда происходит по ослабленному сечению, т.е. по замкнутым порам, ко-

Табл. 1. Некоторые технологические параметры цементационного закрепления грунтов

Параметры цементационного закрепления грунтов	Технологии цементации грунтов				
	Пропиточная инъекция	Струйная цементация Jet-1	Струйная цементация Jet-2	Компрессионно-разрывная цементация	Заполнительная цементация
Вид закрепляемых грунтов	Пески, легкие супеси	Пески, супеси, суглинки, глины	Пески, супеси, суглинки, глины	Тяжелые супеси, суглинки, глины	Техногенные грунты, скальные грунты
Максимальная прочность при сжатии грунтоцементного массива, МПа	30	15	3	10	3 (для техногенных грунтов)
Максимальный радиус закрепления, м	0,8	0,4	0,9	0,5	0,8
Максимальная интенсивность закрепления грунта, л/мин	15	100	500	1,5	50
Предварительное обустройство скважины манжетной колонной	да	нет	нет	да	да
Объем выхода шлама на 1 м ³ закрепления грунта, л	0	200	200	0	0
Расход вяжущего на 1 м ³ закрепляемого грунта, кг	75...100	450	450	100...120	100...300

которые заполняются суспензией тонкодисперсного вяжущего. Интенсивность нагнетания суспензии следует повышать, так как развитие трещин происходит в возрастающем объеме по мере распространения суспензии от центра к периферии массива. После заполнения проектного объема массива на данном горизонте нагнетание прекращается и происходит затвердевание пропиточной суспензии в порах, капиллярах и трещинах массива, обеспечивая ему прочную, плотную и практически бездефектную структуру [18–20].

Результаты полевых испытаний, а также опыт практического применения при различных геотехнических условиях и проектных решениях показали, что прочность грунтоцементного массива, сформированного по данной технологии, может достигать 15...25 МПа, а при устройстве противофильтрационных завес обеспечивается их полная водонепроницаемость. Причем усиленная таким образом противофильтрационная завеса может рассматриваться в качестве распорного элемента для вертикальных ограждающих конструкций строящихся подземных сооружений, существенно снижая их влияние на окружающую застройку [21, 22].

Комбинация пропиточной и управляемой компрессионно-разрывной технологии цементации грунтов рекомендуется к применению в случае чередующихся слоев песчаных и глинистых грунтов при инъекции с использованием манжетной технологии. При этом в слоях песчаных проницаемых грунтов с коэффициентом фильтрации более 0,5 л/мин применяется инъекция тонкодисперсного вяжущего в режиме пропиточной инъекции с интенсивностью инъекции от 0,5 до 3,0 л/мин при давлении нагнетания до 0,5 МПа. В слоях глинистых грунтов (тяжелые супеси, суглинки, глины) с коэффициентом фильтрации менее 0,5 л/мин применяется инъекция тонкодисперсного вяжущего в режиме компрессионно-разрывной инъекции с интенсивностью инъекции от 0,2 до 0,5 л/мин при давлении нагнетания до 1,2 МПа.

Такая комбинация технологий возможна при использовании инъекционных насосов плунжерного типа с автоматическим регулированием интенсивности нагнетания на основе сигналов датчиков расхода и давления, направляемых в центральный процессор управления насосами. При ручном регулировании интенсивности инъекции комбинация данных технологий не является надежной для получения качественного результата.

Ограничением для комбинирования пропиточной и компрессионно-разрывной технологии инъекции является требуемая прочность закрепляемого массива на сжатие и максимальный радиус закрепления. При этом проектная прочность на сжатие закрепленного грунта не должна превышать 10 МПа. Достижение этой прочности подтверждено как многочисленными результатами полевых ис-

пытаний, так и при реализации различных проектных решений при закреплении глинистых грунтов при компрессионно-разрывной технологии. В этом случае радиус закрепления грунта принимается по предельному радиусу компрессионно-разрывной технологии 0,5 м.

Преимуществом комбинации пропиточной и компрессионно-разрывной технологии является тот факт, что закрепление грунтов проводится с единым комплектом технологического оборудования, а комбинация технологий осуществляется в результате смены режимов инъекции.

Комбинация пропиточной (управляемой компрессионно-разрывной) и заполнительной технологии цементации грунтов применяется для закрепления техногенных грунтов смешанного состава. Присутствие в грунтах крупных пустот, а также включений техногенного характера с прослойками грунтов разной проницаемости исключает возможность применения какой-либо одной технологии, обеспечивающей формирование грунтобетонного массива с расчетными геометрическими и физико-механическими характеристиками. В этой связи целесообразным является применение цементации грунтов в два этапа.

На первом этапе производится заполнительная цементация грунтов через манжетные колонны, установленные по сетке с двумя и более рядами. Сетка скважин с манжетными колоннами формирует замкнутые ячейки со сторонами менее двух расчетных радиусов распространения заполнительной цементации. Для качественного заполнения пустот и каналов в зонах разуплотненных грунтов важно применение манжетной технологии с возможностью инъекции по горизонтам. Данный технологический прием обеспечивает заполнение максимального количества пустот в грунте независимо от их размера и сопротивления инъекции, а также не допускает ухода цементационного состава по возможным каналам за пределы проектной зоны закрепления.

Заполнительная цементация по манжетной технологии выполняется по максимальному расчетному объему на один горизонт для принятого радиуса распространения. Для обеспечения заполнительной цементации грунтов по расчетному объему на горизонт манжетной колонны требуется применять состав обладающий высокой тиксотропией.

Вязкость применяемого инъекционного состава должна обеспечить его равномерное распределение в объеме закрепляемого грунта, а после прекращения нагнетания — быстрое загустевание и затвердевание. Причем для манжетной технологии с применением двухсторонних шланговых обтюраторов из-за малых сечений проходных шлангов и отверстий, а также регулируемой интенсивности подачи суспензии она должна обладать достаточной седиментационной устойчивостью (не более 5 %) и вязкостью не более 40 с по воронке Марша. Вместе

с тем инъекционный состав должен интенсивно загустеть после снятия на него давления нагнетания.

Хорошие результаты для данной технологии показали комбинированные составы тонкодисперсного вяжущего (микроцемента) и активированного бентонита.

Второй этап закрепления смешанных техногенных грунтов — пропиточная (или компрессионно-разрывная управляемая) цементация зон слежавшегося грунта. Цементация второго этапа проводится через манжетные колонны, установленные внутри ячеек сетки скважин заполнительной цементации. Заполнительная цементация обеспечивает фиксацию пропиточного низковязкостного состава в зоне закрепления. Для второго этапа применяется суспензия тонкодисперсного вяжущего с отношением В/В от 3,0 до 4,0. Вязкость состава сопоставима с вязкостью воды (не более 30 с по воронке Марша), что позволяет ему обеспечивать пропиточную цементацию замкнутых зон грунтов по горизонтам манжетной колонны.

Практика применения данной комбинации цементационных технологий показывает высокую эффективность закрепления техногенных грунтов. Так прочность на сжатие цементного камня в пустотах достигает 3,0 МПа, закрепленного грунта в зо-

нах глинистых грунтов — 10 МПа и закрепленного грунта в зонах песчаных грунтов — 20 МПа. Совокупное качество закрепления несслежавшихся техногенных грунтов определяется повышением среднего модуля деформации с показателя 3...7 МПа до значений 25...35 МПа [14, 16, 18].

Анализ теории и практики позволяет сделать следующие выводы:

1. При выборе технологии цементации грунтов в условиях плотной городской застройки во многих практических случаях следует рассматривать различные комбинации отдельных технологических приемов, обеспечивающих гарантированное достижение проектных параметров закрепляемого грунта.

2. Совмещение двухкомпонентной струйной цементации грунта с пропиточной инъекцией микроцементов позволяет обеспечить формирование грунтобетонных массивов с повышенной прочностью и водонепроницаемостью.

3. С целью упрочнения и уплотнения техногенных несслежавшихся грунтов эффективным является совмещение заполнительной инъекции пустот и полостей составами на основе бентонита с последующим упрочнением консолидированного массива низковязкими суспензиями на основе микроцементов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Самарин Е.Н. Современные инъекционные материалы и их использование для улучшения свойств грунтов // Геотехника. 2012. № 4. С. 4–12.
2. Вязов А.Ю. Цементация грунтов в Воронежской области // Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Студент и наука. 2015. № 8. С. 260–265.
3. Осокин А.И., Денисова О.О., Шахтарина Т.Н. Технологическое обеспечение подземного строительства в условиях городской застройки // Жилищное строительство. 2014. № 3. С. 16–24.
4. Шакиров И.Ф., Гарифуллин Д.Р. Исследование несущей способности и деформаций песчаных грунтов, укрепленных напорной цементацией // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. 2015. № 4. С. 200–205.
5. Балатханова Э.М., Ерофеев В.Т., Баженов Ю.М. и др. Оптимизация состава цементных композитов с применением наполнителей месторождений Чеченской республики // Вестник МГСУ. 2014. № 12. С. 121–130.
6. Баженова О.Ю., Баженова С.И., Баженов М.И. Исследования некоторых свойств цементов с тонкодисперсной добавкой // Молодой ученый. 2013. № 10. С. 96–97.
7. Пишеничный Г.Н., Галкин Ю.Ю. О механизме действия высокодисперсных минеральных добавок // Технологии бетонов. 2014. № 11 (100). С. 41–45.
8. Баженов Ю.М. Пути развития строительного материаловедения: новые бетоны // Технологии бетонов. 2012. № 3–4 (68–69). С. 39–42.
9. Носков И.В., Ананьев С.А., Ковалева М.А. Основы эффективности приготовления цементного раствора для

инъекционного метода закрепления грунтов // Ползуновский альманах. 2016. № 1. С. 155–159.

10. Харченко И.Я., Муртазаев С.А.Ю., Сайдулов М.С. и др. Составы ОТДВ для инъекционного закрепления грунтов с комплексным наполнителем различного генезиса // Экология и промышленность России. 2015. № 3. С. 48–52.

11. Ашихмин П.С. Армирование рыхлых пород инъектированием через сваи // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2011. № 3. С. 286–392.

12. Афонский И.В., Головин К.А., Ковалев Р.А. и др. Струйная цементация грунтов в городском строительстве // Транспортное строительство. 2014. № 11. С. 15–19.

13. Ильичев В.А., Никифорова Н.С., Харченко И.Я. и др. Научно-техническое сопровождение реконструкции объекта «Мавзолей В.И. Ленина на Красной площади» в части усиления грунтов основания // Основания, фундаменты и механика грунтов. 2015. № 1. С. 2–7.

14. Саинов М.П. Оценка деформируемости и прочности грунтов, укрепленных путем цементации // Строительство: наука и образование. 2014. № 3. Ст. 1. Режим доступа: http://www.nso-journal.ru/public/journals/1/issues/2014/03/1_Sainov.pdf.

15. Харченко И.Я., Алексеев С.В. Комбинированная цементация грунтов при освоении подземного пространства в условиях плотной городской застройки // Метро и тоннели. 2013. № 5. С. 18–20.

16. Султыгова М.А., Ульбиева И.С. Анализ новейших технологий инъекционного закрепления грунтов // Вузовское образование и наука : мат. рег. науч.-практ. конф. Вып. 10. Магас : ИнГТУ, 2012. С. 138–140.

17. Долев А.А., Харченко И.Я. О применении микроцементов в геотехническом строительстве // Метро и тоннели. 2014. № 3. С. 30–32.
18. Ибрагимов М.Н., Семкин В.В., Шапошников А.В. Некоторые проблемы закрепления грунтов растворами из микроцементов // Academia. Архитектура и строительство. 2016. № 4. С. 114–120.
19. Муртазаев С.-А.Ю., Нахаев М.Р., Харченко И.Я. Инъекционное закрепление лессовых грунтов г. Грозный особо тонкодисперсными веществами типа «Микродур» // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2014. Т. 35. № 4. С. 123–129.

20. Кривчун С.А., Кривчун Е.А., Баженов М.И. и др. Структура и свойства грунтобетонных массивов на основе наномодифицированных микроцементов // Жилищное строительство. 2016. № 9. С. 55–58.
21. Харченко И.Я., Баженов М.И. Инъекционное закрепление проницаемых грунтов, бетонных и каменных конструкций с использованием особо тонкого дисперсного вяжущего // Вестник МГСУ. 2012. № 11. С. 172–176.
22. Швецов В.А., Меркин В.Е., Пискунов А.А. и др. Нештатные ситуации при строительстве объектов метрополитена. Причины и ликвидация последствий // Наукоедение. 2014. № 5 (24). Ст. 59. Режим доступа: <http://naukovedenie.ru/PDF/32KO514.pdf>.

Поступила в редакцию в марте 2017 г.

Принята в доработанном виде в апреле 2017 г.

Одобрена для публикации в мае 2017 г.

Об авторах: Харченко Игорь Яковлевич — Doktoringenieur, профессор кафедры технологии вяжущих веществ и бетонов, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ), 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26, iharcenko@mail.ru;

Алексеев Вячеслав Александрович — заведующий лабораторией кафедры технологии вяжущих веществ и бетонов, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ), 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26, 634586@mail.ru;

Исрафилов Камал Аликович — магистрант кафедры технологии вяжущих веществ и бетонов, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ), 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26, Israfilov.kamal05@mail.ru;

Бетербиев Адам Саид-Эминович — магистрант кафедры механики грунтов и геотехники, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ), 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26, adam_b95@mail.ru.

REFERENCES

1. Samarin E.N. Sovremennye in'ektsionnye materialy i ikh ispol'zovanie dlya uluchsheniya svoystv gruntov [Modern Injectable Materials and Their Use to Improve Soil Properties]. *Geotekhnika* [Geotechnics]. 2012, no. 4, pp. 4–12. (In Russian)
2. Vyazov A.Yu. Tsementatsiya gruntov v Voronezhskoy oblasti [Soils Cementation in the Voronezh Region]. *Nauchnyy vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Student i nauka* [Scientific Herald of the Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering. Construction and Architecture]. 2015, no. 8, pp. 260–265. (In Russian)
3. Osokin A.I., Denisova O.O., Shakhtarina T.N. Tekhnologicheskoe obespechenie podzemnogo stroitel'stva v usloviyakh gorodskoy zastroyki [Technological Support of Underground Construction under the Conditions of Urban Development]. *Zhilishchnoe stroitel'stvo* [Housing Construction]. 2014, no. 3, pp. 16–24. (In Russian)
4. Shakirov I.F., Garifullin D.R. Issledovanie nesushchey sposobnosti i deformatsiy peschanykh gruntov, ukreplennykh naporno tsementatsiey [Investigation of the Bearing Capacity and Deformations of Sandy Soils Reinforced with Pressure Cementation]. *Izvestiya Kazanskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta* [Kazan State University of Architecture and Engineering News]. 2015, no. 4, pp. 200–205. (In Russian)
5. Balatkhanova E.M., Erofeev V.T., Bazhenov Yu.M. et al. Optimizatsiya sostava tsementnykh kompozitov s primeneniem napolniteley mestorozhdeniy Chechenskoy respubliki [Optimizing the Cement Composites Composition with the Use of Fillers of the Chechen Republic Deposits]. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2014, no. 12, pp. 121–130. (In Russian)
6. Bazhenova O.Yu., Bazhenova S.I., Bazhenov M.I. Issledovaniya nekotorykh svoystv tsementov s tonkodispersnoy dobavkoy [Investigations of Some Properties of Cements with Finely Dispersed Additive]. *Molodoy uchenyy* [Young Scientist]. 2013, no. 10, pp. 96–97. (In Russian)
7. Pshenichnyy G.N., Galkin Yu.Yu. O mekhanizme deystviya vysokodispersnykh mineral'nykh dobavok [On the Mechanism of Action of Finely Dispersed Mineral Additives]. *Tekhnologii betonov* [Concrete Technologies]. 2014, no. 11 (100), pp. 41–45. (In Russian)
8. Bazhenov Yu.M. Puti razvitiya stroitel'nogo materialovedeniya: novyye betony. [Ways of the Building Materials Science Development: New Concrete]. *Tekhnologii betonov* [Concrete Technologies]. 2012, no. 3–4 (68–69), pp. 39–42. (In Russian)
9. Noskov I.V., Anan'ev S.A., Kovaleva M.A. Osnovy effektivnosti prigotovleniya tsementnogo rastvora dlya in'ektsionnogo metoda zakrepleniya gruntov [Bases of Efficiency of Cement Gauging for an Injection Method of Ground Stabilization]. *Polzunovskiy al'manakh* [Polzunov Almanac]. 2016, no. 1, pp. 155–159. (In Russian)
10. Kharchenko I.Ya., Murtazayev S.A.Yu., Saydumov M.S. et al. Sostavy OTDV dlya in'ektsionnogo zakrepleniya gruntov s kompleksnym napolnitelem razlichnogo genezisa [The OTDV Compositions for Injecting Soil Consolidation

with Complex Filler of Different Origin]. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii* [Ecology and Industry of Russia]. 2015, no. 3, pp. 48–52. (In Russian)

11. Ashikhmin P.S. Armirovanie rykhlykh porod in'ektsirovaniem cherez svai [Reinforcement of Loose Rocks by Injection through Piles]. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'* [Mining Information-Analytical Bulletin]. 2011, no. 3, pp. 286–392. (In Russian)

12. Afonskiy I.V., Golovin K.A., Kovalev R.A. et al. Struynaya tsementatsiya gruntov v gorodskom stroitel'stve [Sprinkling Cementation of Soils in The Urban Construction]. *Transportnoe stroitel'stvo* [Transport Construction]. 2014, no. 11, pp. 15–19. (In Russian)

13. Il'ichev V.A., Nikiforova N.S., Kharchenko I.Ya. et al. Nauchno-tekhnicheskoye soprovozhdenie rekonstruktsii ob'ekta «Mavzoley V.I. Lenina na Krasnoy ploshchadi» v chasti usileniya gruntov osnovaniya [Scientific and Technical Support for the Reconstruction of the “Red Square Lenin Mausoleum” Object in Terms of Reinforcing the Base Grounds]. *Osnovaniya, fundamenty i mekhanika gruntov* [Bases, Foundations and Mechanics of Soils]. 2015, no. 1, pp. 2–7. (In Russian)

14. Sainov M.P. Otsenka deformiruемости i prochnosti gruntov, zakreplennykh putem tsementatsii [Evaluation of the Deformability and Strength of Soils Cemented by Cementation]. *Stroitel'stvo: nauka i obrazovaniye* [Construction: Science and Education]. 2014, no 3, paper 1. Available at: http://www.nso-journal.ru/public/journals/1/issues/2014/03/1_Sainov.pdf (In Russian)

15. Kharchenko I.Ya., Alekseev S.V. Kombinirovannaya tsementatsiya gruntov pri osvoenii podzemnogo prostranstva v usloviyakh plotnoy gorodskoy zastroyki [Combined Soils Cementation During the Development of underground Space under the Conditions of Dense Urban Development]. *Metro i tonneli* [Metro and Tunnels]. 2013, no. 5, pp. 18–20. (In Russian)

16. Sulyugova M.A., Ul'bieva I.S. Analiz noveyshikh tekhnologiy in'ektsionnogo zakrepleniya gruntov [Analysis of the Newest Technologies of Injection Fixing of Soils]. *Vuzovskoe obrazovanie i nauka : materialy regional'noy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Higher Education and

Science : Regional Scientific and Practical Conference]. *Magas, IngGU Publ.*, 2012, pp. 138–140. (In Russian)

17. Dolev A.A., Kharchenko I.Ya. O primenenii mikrotsementov v geotekhnicheskoy stroitel'stve [On the Use of Micro Cement in Geotechnical Construction]. *Metro i tonneli* [Metro and Tunnels]. 2014, no. 3, pp. 30–32. (In Russian)

18. Ibragimov M.N., Semkin V.V., Shaposhnikov A.V. Nekotorye problemy zakrepleniya gruntov rastvorami iz mikrotsementov [Some Problems of Fixing Soils with Microcements Solutions]. *Academia. Arkhitektura i stroitel'stvo* [Academia. Architecture and Construction]. 2016, no. 4, pp. 114–120. (In Russian)

19. Murtazaev S.-A.Yu., Nakhaev M.R., Kharchenko I.Ya. In'ektsionnoe zakreplenie lessovykh gruntov g. Groznyy osobo tonkodispersnymi veshchestvami tipa «Mikrodur» [Injection Fixation of Loess Soils in Grozny, Especially with Finely Dispersed Substances Such as “Microdur”]. *Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskie nauki* [Herald of Dagestan State Technical University. Technical Sciences]. 2014, no. 4, pp. 123–129. (In Russian)

20. Krivchun S.A., Krivchun E.A., Bazhenov M.I. et al. Struktura i svoystva gruntobetonnykh massivov na osnove nanomodifitsirovannykh mikrotsementov [Structure and Properties of Soil-Concrete Massifs on the basis of Nanomodified Micro Cements]. *Zhilishchnoye stroitel'stvo* [Housing construction]. 2016, no. 9, pp. 55–58. (In Russian)

21. Kharchenko I.Ya., Bazhenov M.I. In'ektsionnoe zakreplenie pronitsaemykh gruntov, betonnykh i kamennykh konstruksiy s ispol'zovaniem osobo tonkogo dispersnogo vyazhushchego [Injection Fixation of Permeable Soils, Concrete and Stone Structures with the Use of a Particularly Finely Dispersed Astrigent]. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2012, no. 11, pp. 172–176. (In Russian)

22. Shvetsov V.A., Merkin V.E., Piskunov A.A. et al. Neshtatnye situatsii pri stroitel'stve ob'ektov metropolitena. Prichiny i likvidatsiya posledstviy [Abnormal Situations during the Construction of Metro Facilities. Causes and Rectification of the Consequences]. *Naukovedenie* [World of Science. Pedagogy and Psychology]. 2014, no. 5 (24), pp. 59. (In Russian)

Received in March 2017.

Adopted in revised form in April 2017.

Approved for publication in May 2017.

About the authors: **Kharchenko Igor Yakovlevich** — Doktoringenieur, professor of the Department of Technology of Binding Substances and Concretes, **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**, 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; 634586@mail.ru;

Alekseev Vyacheslav Alexandrovich — Head of the Laboratory, Department of Technology of Knitting Substances and Concretes, **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**, 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; 634586@mail.ru;

Israfilov Kamal Alikovich — Graduate Student of the Department of Technology and Organization of Construction Production, **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**, 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; Israfilov.kamal05@mail.ru;

Beterbiev Adam Said-Emievich — Master of the Department of Soil and Geotechnical Mechanics, **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**, 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; adam_b95@mail.ru.