

УДК 624.138.41

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОСТАВА ИНЪЕКЦИОННОГО РАСТВОРА ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА ЗАКРЕПЛЕНИЯ ГРУНТОВ ПО МАНЖЕТНОЙ ТЕХНОЛОГИИ

<sup>1</sup>Самохвалов М.А., <sup>1</sup>Ашихмин О.В., <sup>2</sup>Цернант А.А.

<sup>1</sup>ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет», Тюмень,

*e-mail: samohvalovma@tyuiu.ru, ashikhminov@tyuiu.ru;*

<sup>2</sup>АО «Научно-исследовательский институт транспортного строительства»,

Москва, *e-mail: kiselev3452@gmail.com*

Актуальной проблемой на сегодняшний день является определение рационального состава инъекционного раствора для повышения качества закрепления грунтов и усиления фундаментов зданий, подлежащих реновации, без ударных, вибрационных и механических воздействий. Одним из наиболее эффективных способов химического закрепления глинистого грунтового основания с высоким уровнем подземных вод является манжетная технология. В статье описан выбор раствора для инъекции по манжетной технологии для армирования и уплотнения глинистого грунтового массива. На основе выбора реагентов (цемент, бентонит, жидкое стекло (силикат натрия)) были приготовлены 24 образца растворов для проведения лабораторных испытаний. Исходя из требуемого значения растекаемости, было выделено 8 образцов для дальнейшего определения водоотделения. Выбор состава с минимальным значением водоотделения до 3% позволит сформировать в грунтовом массиве гидроразрывы, полностью заполненные раствором (без пустот и полостей). Испытания восьми образцов цилиндрической формы на гидравлическом прессе ПГМ-500МГ4 позволили определить образцы с необходимыми значениями прочности на сжатие и растяжение. После совмещения результатов испытаний были выбраны два состава инъекционного раствора с заданным процентным соотношением основных реагентов. Установлена необходимость дальнейших полевых испытаний выбранных растворов для химического закрепления грунтов с использованием манжетной технологии.

**Ключевые слова:** усиление фундаментов, грунтовый массив, химическое закрепление глинистого грунтового основания, манжетная технология инъекции раствора, гидравлический разрыв, цемент, бентонит, растекаемость, водоотделение, прочность на сжатие, прочность на растяжение

## DETERMINATION OF GROUT MIX COMPOSITION TO INCREASE THE QUALITY OF GROUND IMPROVEMENT FOR TUBE-A-MANCHETTE GROUTING

<sup>1</sup>Samokhvalov M.A., <sup>1</sup>Ashikhmin O.V., <sup>2</sup>Tsernant A.A.

<sup>1</sup>Industrial University of Tyumen, Tyumen, *e-mail: samohvalovma@tyuiu.ru, ashikhminov@tyuiu.ru;*

<sup>2</sup>Research Institute of Transport Construction, Moscow, *e-mail: kiselev3452@gmail.com*

An urgent problem today is to determine the optimal composition of the grout mix to improve the quality of stabilization of the soil and reinforcement of the foundations of buildings subject to renovation, without shock impact, vibration and mechanical effects. One of the most effective ways of chemical stabilization of clay soil base with a high level of groundwater is tube-a-manchette technology. The paper describes the choice of a grout mix composition for tube-a-manchette grouting for the reinforcement and consolidation of a clay soil mass. Based on the choice of reagents (cement, bentonite, liquid glass (sodium silicate)), 24 samples of grout mix were prepared for laboratory tests. Based on the aimed flow test results value, 8 samples were identified for further determination of water loss value. The choice of composition with a minimum value of water loss to 3% will allow to form hydrofractures completely filled with a grout mix (without voids and cavities) in the soil mass. Tests of 8 samples of cylindrical shape on the PGM-500MG4 hydraulic press made it possible to determine the samples with the required compressive and tensile strengths. After combining the test results, two grout mix compositions were selected with a specified percentage of the main reagents. The necessity of further field testing of selected grout mix for chemical soil stabilization for tube-a-manchette technology has been established.

**Keywords:** reinforcement of foundation, soil mass, chemical stabilization of clay ground base, tube-a-manchette technology, hydraulic fracture, cement, bentonite, flow test, water loss, compressive strength, tensile strength

На сегодняшний день довольно быстрыми темпами осуществляется развитие городов на всей территории Российской Федерации. Повсеместно осуществляется реновация имеющегося жилищного фонда, находящегося в аварийном или ограниченно работоспособном состоянии [1, 2]. Здания и сооружения, входящие в данный фонд, нуждаются в реконструкции, реставрации, модернизации и современной адаптации с использованием современных инъекционных технологий без

ударных, вибрационных и механических воздействий [3, 4]. Причиной резкого ухудшения технического состояния зданий главным образом являются два фактора. Первый связан с серьезными нарушениями эксплуатации зданий: нарушениями температурно-влажностного режима, перегрузками несущих конструкций здания, не согласованными изменениями объёмно-планировочных и конструктивных решений здания и т.п. Второй фактор заключается в повышении уровня

грунтовых вод, систематическими протечками инженерных коммуникаций, неисправной отстойки здания и ливневой канализации, что приводит к значительному увлажнению грунтового основания под зданием, существенному ухудшению его физико-механических характеристик, разрушению и потере устойчивости фундаментов, а также к неравномерным осадкам здания [5, 6].

В свою очередь, одним из наиболее эффективных способов усиления фундаментов и химического закрепления глинистого грунтового основания с высоким уровнем подземных вод является манжетная технология [2, 3, 6]. Отличительной особенностью технологии является управляемая по интервальной по глубине инъекция раствора в режиме образования и распространения в грунтовом массиве гидравлических разрывов «гидроразрывов». Инъекция раствора осуществляется через перфорированную трубу, отверстия которой закрываются резиновыми манжетами, выступающими в роли обратного клапана «манжетная колонна». Манжетные колонны устанавливаются в предварительно пробуренные скважины, заполняя пространство между перфорированной трубой и стенками скважины глиноцементной суспензией. После твердения глиноцементного раствора образуется грунтоцементная прослойка «обойма», связывающая трубу с грунтом и препятствующая выходу раствора во время инъекции по контуру между трубой и грунтом. Закрепление грунта осуществляется путем разрыва обоймы на заданном уровне скважины под давлением от 5 до 10 МПа [2, 6].

#### Цель исследования

Определить состав инъекционного раствора, удовлетворяющего требованиям по качественному и эффективному закреплению грунтового основания с использованием манжетной технологии инъекции раствора в режиме образования гидравлических разрывов.

**Методы исследования.** Для определения состава раствора и его основных технологических и прочностных характеристик в лаборатории кафедры геотехники на основании результатов научно-практических исследований растворов, проводимых в НИИОСП им. Н.М. Герсеванова, ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева, представленных в работах Адамовича, Алексеева, Богова, Булатова, Воронкевича, Ибрагимова, Ржаницына и др. [2, 5, 6], были выбраны основные реагенты для приготовления растворов: цемент марки М400, бентонит марки ПБМБ, жидкое стекло (силикат натрия) с изменением процентного содержания водоцементного отношения В/Ц: 0,6–1,0. Цемент марки М400 –

цемент общестроительного назначения, отличающийся грубой дисперсностью, показатель размера фракции  $d_{95} = 70\text{--}80$  микрон (диаметр частиц, меньше которого в цементе содержится 95 процентов частиц), удельная поверхность  $2500\text{ см}^2/\text{г}$ . Бентонит марки ПБМБ – вследствие тонкости и коллоидных свойств минеральных частиц увеличивает стабильность и пластичность раствора. Под стабильностью раствора понимается приведение его в устойчивое состояние – агрегирование твердой фазы за счет гидрофильности глинистых частиц, предотвращение расслоения и уменьшения водоотделения в спокойном состоянии и уменьшение водоотдачи при инъекции в грунт. Также в состав бентонита входит кальцинированная сода (углекислый натрий)  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  – позволяет связывать ионы кальция в растворах, содержащих гипс, ангидрит, цемент. Жидкое стекло (силикат натрия) – общая химическая формула имеет вид  $\text{Na}_2\text{O}x\text{nSiO}_2$ , где  $n$  – число молекул кремнезема. Водный раствор силиката натрия представляет собой вязкую жидкость светло-желтого цвета, плотность которой составляет  $1300\text{--}1800\text{ кг}/\text{м}^3$ . Добавка жидкого стекла способствует ускорению времени схватывания раствора и увеличению его прочности. Водоцементное отношение (В/Ц) – составляет 0,6–1,2 исходя из требований к подвижности растворов, что приводит к большому избытку воды (по сравнению с обычно применяемыми в строительной практике) и, как следствие, снижению прочности получаемого цементного камня. Кроме того, неизбежны явления водоотделения и расслоения раствора, а также значительного отжатия воды под давлением инъекции.

Всего было изготовлено 24 образца с проведением испытаний: по определению растекаемости, водоотделения, прочности на сжатие и растяжение (рис. 1).

В соответствии с требованиями нормативных документов ГОСТ [7] растекаемость определялась при помощи конуса АЗНИИ. По итогам первой серии экспериментов было выделено 8 образцов, соответствующих требованиям по показателю растекаемости – от 17 до 22 см.

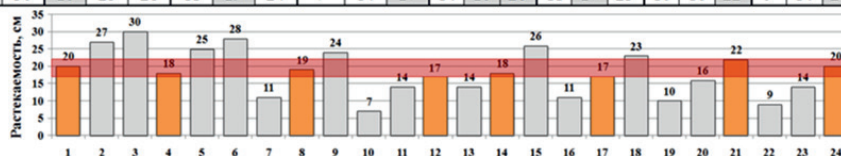
В первой серии экспериментов определялась растекаемость инъекционных растворов по конусу АЗНИИ (ГОСТ [7]), результаты которых представлены в таблице.

Далее проводились исследования по определению водоотделения в соответствии с требованиями ГОСТ [7] каждого из восьми образцов, результаты которых представлены в таблице. Данный фактор является очень важным, так как от него зависит формирование твердого остатка (седиментация) цементного камня при твердении.

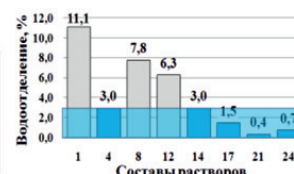
Определение характеристик растворов

№ Состав	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
В/Ц	0,6	0,8	1,0	0,6	0,8	1,0	0,6	0,8	1,0	0,6	0,8	1,0	0,6	0,8	1,0	0,6	0,8	1,0	0,6	0,8	1,0	0,6	0,8	1,0
Бентонит, %	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5	5	5	10	10	10	5	5	5	5	5	5
Силикат натрия, %	-	-	-	1	1	1	3	3	3	5	5	5	-	-	-	-	-	1	1	1	3	3	3	
Расстекаемость, см	20	27	30	18	25	28	11	19	24	7	14	17	14	18	26	11	17	23	10	16	22	9	14	20

Примечание:  
 - цемент марки М400  
 - силикат натрия ГОСТ 23078  
 - бентонита марки ПБМБ  
 ТУ 2164-00641219638-2005



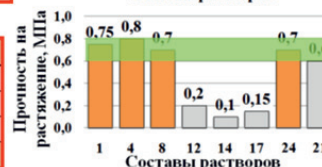
№ Состав	1	4	8	12	14	17	21	24
В/Ц	0,6	0,6	0,8	1,0	0,8	0,8	1,0	1,0
Бентонит	-	-	-	-	5	10	5	5
Силикат натрия, %	-	1	3	5	-	-	1	3
Водоотделение, %	11,1	3,0	7,8	6,3	3,0	1,5	0,4	0,7



№ Состав	1	4	8	12	14	17	21	24
В/Ц	0,6	0,6	0,8	1,0	0,8	0,8	1,0	1,0
Бентонит, %	-	-	-	-	5	10	5	5
Силикат натрия, %	-	1	3	5	-	-	1	3
Прочность, МПа	6,5	7,4	6,8	2,6	1,2	1,6	5,4	6,6



№ Состав	1	4	8	12	14	17	21	24
В/Ц	0,6	0,6	0,8	0,8	0,8	0,8	1,0	1,0
Бентонит, %	-	-	-	-	5	10	5	5
Силикат натрия, %	-	1	3	5	-	-	1	3
Прочность, МПа	0,75	0,8	0,7	0,2	0,1	0,15	0,6	0,7



При этом также следует учитывать увеличение процента водоотделения в процессе инъекции раствора под давлением [1–2]. Выбор состава с минимальным значением водоотделения до 3% позволит сформировать в грунтовом массиве гидроразрывы, полностью заполненные раствором (без пустот и полостей), которые следует рассматривать как армирующие и уплотняющие глинистый грунтовый массив.

Для определения прочности на сжатие и растяжение при раскалывании было изготовлено 8 образцов цилиндрической формы  $d = 70$  мм,  $h = 70$  мм. Испытания проводились на гидравлическом прессе ПГМ-500МГ4 в соответствии с требованиями ГОСТ 310.4-81. «Цементы. Методы определения предела прочности при изгибе и сжатии» (введ. 30.06.1983). Прочность на сжатие раствора должна составлять от 6 до 8 МПа, на растяжение при раскалывании 0,6–0,8 МПа [2].

Совмещая между собой гистограммы табл. 1 по требуемым значениям характеристик водоотделения, прочности на сжатие и растяжение для дальнейших экспериментальных исследований было выбрано два состава, № 4 и № 24.

Дальнейшие исследования проходили на строительной площадке в г. Тюмени. Составы растворов использовались для устрой-

ства перфорированных инъекционных свай длиной до 6 м. Инъекция осуществлялась при помощи универсального шнекового растворонасоса по манжетной технологии с использованием гидравлического пакера. При времени инъекции состава № 4 до 4 часов и давлении до 1,8 МПа произошла блокировка пакера вследствие осаждения цементных частиц (рис. 1). Причиной осаждения является отсутствие связности между частицами цемента и воды, а также влияния жидкого стекла, ускоряющего время схватывания. При использовании состава № 24 блокировка пакера не происходила даже при более длительном непрерывном времени инъекции до 6 часов и меньшем значении давления – до 1,0 МПа.

Для определения качества закрепления грунтового основания при помощи перфорированных инъекционных свай по манжетной технологии с использованием гидравлического пакера производилась экскавация грунта на всю глубину расположений свай с ручной доработкой в месте расположения гидроразрывов (рис. 2). На рис. 2, а, наглядно показано отличие цветового оттенка сформированных гидроразрывов состава № 4, имеющего светло-серый цвет, от состава № 24, имеющего светло-коричневый цвет из-за добавки бентонита.





Рис. 1. Блокировка пакера в результате осаждения цементных частиц

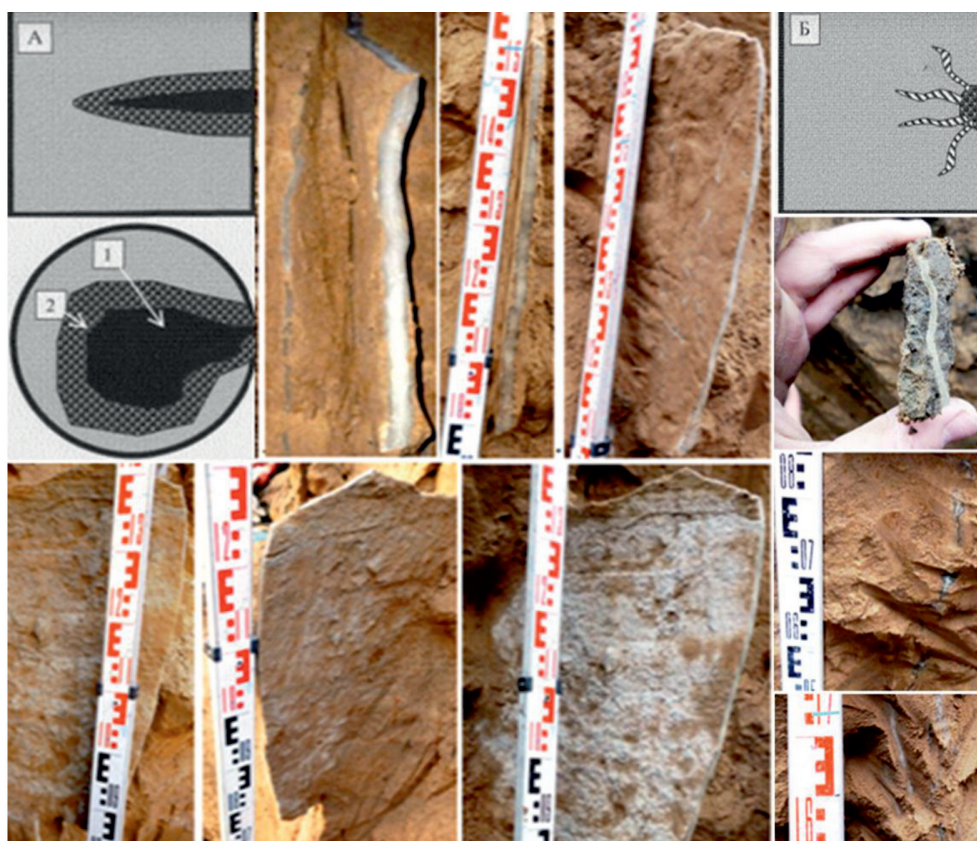
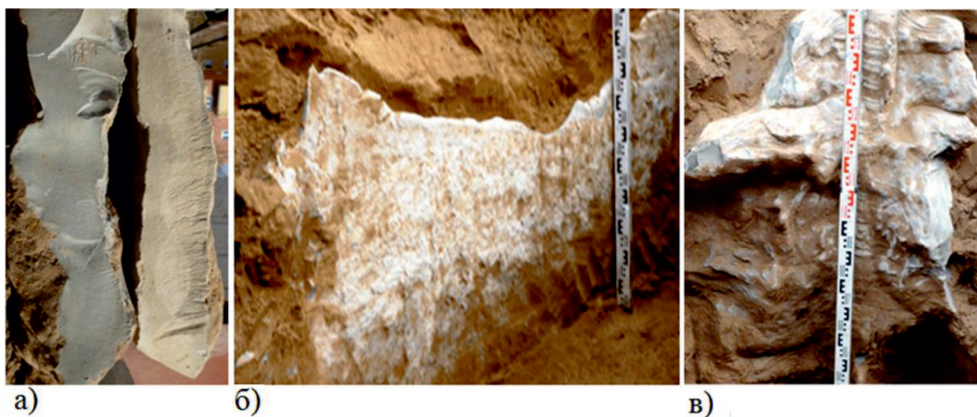


Рис. 2. Результаты экскавации перфорированных инъекционных свай для оценки качества закрепления пылевато-глинистого грунтового основания: а – образцы составов № 4 и № 24, б – закрепление основания составом № 2 4, в – закрепление основания составом № 4; А – гидроразрывы тип «А», Б – гидроразрывы тип «Б»

На рис. 2, б, показано распространение гидроразрывов в грунте во время инъекции состава № 24. Объем инъекции раствора на один иньектор составлял 1000 л при давлении 0,8–1,0 МПа. Хорошо прослеживается распространение инъекционного раствора в массиве грунта на расстояние до 3 м от иньектора, что говорит о высокой проникающей способности данного состава. Средняя толщина гидроразрывов составляет 2 см. Также следует отметить большое количество мелких гидроразрывов толщиной от 2 до 5 мм.

На рис. 2, в, показано распространение гидроразрывов в грунтовом массиве во время инъекции состава № 4. Максимально возможный объем инъекции раствора на один иньектор составлял 400 л при давлении 1,2–1,8 МПа. По результатам экскавации, сформированные гидроразрывы в основном локализируются возле иньектора, радиус распространения составляет не более 0,5 м. Также на рис. 2, А–Б более детально показана текстура образующихся в грунтовом массиве гидроразрывов. И.И. Сахаров выделяет три характерные текстуры гидроразрывов при инъекции раствора в грунт [8]:

- Тип «А» – сплошные растворные вертикальные прожилки-линзы толщиной раскрытия 40–130 мм были обнаружены при инъекции состава № 24.
- Тип «Б» – многочисленные тонкие трещины, слабо заполненные раствором, с толщиной менее 10 мм были обнаружены при инъекции состава № 4.
- Тип «В» – тонкие трещины, разрыхляющие грунтовый массив без присутствия раствора – не были обнаружены.

Следует отметить, что для закрепления и уплотнения пылевато-глинистого грун-

тового массива оптимальной является текстура «Тип А» поскольку её можно рассматривать как армирующий элемент, текстура типа «Б» менее благоприятна [9–10].

Также на рис. 3 показаны геометрические параметры гидроразрывов свай с повторной инъекцией раствора и различным шагом отверстий перфорации: 30, 40 и 50 см.

При шаге отверстий перфорации – 30 см наблюдалось самое эффективное закрепление грунтового массива с образованием как вертикальных, так и горизонтальных гидроразрывов, при шаге 40 см образовывались только вертикальные гидроразрывы, при шаге 50 см – происходило образование одиночных, не связанных между собой гидроразрывов.

Следует объяснить логическое происхождение данных результатов. В начальный момент инъекции раствора в грунтовом массиве образовывались гидроразрывы, развивающиеся в вертикальной плоскости перпендикулярно иньектору: при шаге отверстий 50 см – на значительные расстояния от иньектора; 40 см – частично распространялись от иньектора и незначительно пересекались между собой; 30 см – в основном пересекались между собой и локализовались возле иньектора. При последующей (повторной) инъекции новые гидроразрывы: при шаге отверстий 50 см – свободно распространялись на значительные расстояния; 40 см – объединялись между собой и образовывали сплошную вертикальную стенку; 30 см – распространялись в горизонтальном направлении (горизонтальные гидроразрывы толщиной 5–20 мм) из-за переуплотнения грунтового массива вертикальными гидроразрывами и перераспределения напряжений в зоне инъекции.



Рис. 3. Характер распространения гидроразрывов с повторной инъекцией раствора: а – при шаге отверстий 30 см, б – при шаге 40 см, в – при шаге 50 см



### Выводы

1. В результате проведения испытаний по определению растекаемости, водоотделения, прочности на сжатие и растяжение было определено два состава инъекционного раствора с заданным процентным соотношением основных реагентов по химическому закреплению грунтов с использованием манжетной технологии:

– водоцементный состав № 4 с водоцементным соотношением по массе равным 0,6 и добавлением 1% жидкого стекла;

– глиноцементный состав № 24 с водоцементным соотношением по массе равным 1 и добавлением 5% бентонитовой глины марки ПБМБ и 3% жидкого стекла.

2. Добавка глины в составе № 24 повышает стабильность раствора, увеличивает его подвижность и проникающую способность, уменьшает расслоение, но при этом резко снижает прочность, данный недостаток компенсируется добавкой жидкого стекла.

3. В сравнении двух растворов по результатам полевых исследований следует использовать состав № 24, поскольку он позволяет выполнять инъекцию раствора по манжетной технологии с использованием гидравлического пакера в более стабильном режиме с требуемым радиусом распространения гидроразрывов (до 3 м от инъектора) для качественного закрепления пылевато-глинистого грунтового основания.

### Список литературы

1. Мацегора А.Г. Инъекционное укрепление грунтов основания фундаментов / А.Г. Мацегора, А.И. Осокин, В.А. Ермолаев // Промышленное и гражданское строительство. – 2006. – № 7. – С. 52–53.

2. Ибрагимов М.Н. Закрепление грунтов инъекцией цементных растворов: монография / М.Н. Ибрагимов, В.В. Семкин. – М.: Издательство АСВ, 2012. – 254 с.

3. Ермолаев В.А. Упрочнение основания зданий и сооружений методом гидроразрыва с использованием манжетной технологии / Е.С. Вознесенская, В.А. Ермолаев, А.И. Осокин, С.В. Татаринов // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 2014. – № 4. – С. 19–23.

4. Улицкий В.М. Геотехническое сопровождение развития городов / В.М. Улицкий, А.Г. Шашкин, К.Г. Шашкин. – СПб.: Стройиздат Северо-Запад, 2010. – 560 с.

5. Gabrielaitis L., Papinigis V., Zarzojus G. Estimation of Settlements of Bored Piles Foundation // Procedia Engineering. – 2013. – no. 57. – P. 287–293.

6. Оржеховский Ю.Р. Инъекционное закрепление просадочных грунтов (метод контурной обоймы) / Ю.Р. Оржеховский, В.В. Лушников, Р.Я. Оржеховская // Академический вестник УралНИИпроект РААСН. – 2013. – № 3. – С. 78–81.

7. ГОСТ 26798.1-96. Цементы тампонажные. Методы испытаний. – Взамен ГОСТ 26798.0-85; введ. 1998-10-01. – Москва: Межгос. научно-техническая комиссия по стандартизации, техническому нормированию и сертификации в строительстве (МНТКС). – М.: Минземстрой России: ГУП ЦПП, 1998. – 13 с.

8. Сахаров И.И. Гидроразрывной метод закрепления оснований эксплуатируемых зданий и сооружений / И.И. Сахаров, М. Аббуд // Геотехника. Наука и практика: сб. науч. тр. – СПб., 2000. – С. 72–76.

9. Пономаренко Ю.В. Укрепление оснований фундаментов эксплуатируемых зданий и сооружений / Ю.В. Пономаренко, В.С. Кузькин // Промышленное и гражданское строительство. – 2012. – № 6. – С. 52–54.

10. Ларионова Н.А. Влияние состава и свойств лессовых грунтов на эффективность их укрепления методом силикатизации / Н.А. Ларионова // Геотехника. – 2015. – № 4. – С. 26–34.