

DOI: 10.15593/2224-9826/2020.4.06

УДК 624.154

## РАСТВОРЫ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ БУРОИНЪЕКЦИОННЫХ СВАЙ

**И.С. Сальный, Я.А. Пронозин, Л.А. Бартоломей, М.В. Кудоманов, Ю.В. Наумкина**

Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Россия

### О СТАТЬЕ

Получена: 07 октября 2020

Принята: 11 ноября 2020

Опубликована: 30 декабря 2020

#### Ключевые слова:

буринъекционные сваи, опрессовка, рабочий раствор, плотность, прочность, суперпластификатор.

### АННОТАЦИЯ

Приведены данные по разработке и исследованию основных свойств составов рабочей смеси на основе цемента и пескоцемента с добавлением добавки-суперпластификатора для выполнения технологической операции по опрессовке скважины при устройстве буринъекционных свай. Необходимость разработки новых составов рабочей смеси была обусловлена обнаружением ряда недопустимых дефектов в стволах опытных буринъекционных свай, сформированных при использовании рабочих растворов на основе цемента с добавлением жидкого стекла, после их откопки и визуально-инструментального обследования. Обнаруженные в стволах свай дефекты (перемешивание раствора с грунтом, подмес грунта в тело сваи и др.) указывали на недостаточную плотность используемого раствора и его низкую прочность. Разработанные составы лишены данных недостатков и имеют повышенные значения ключевых параметров смеси (плотности, прочности, усадки готовой рабочей смеси), важных при устройстве буринъекционных свай по технологии с извлекаемым и теряемым сердечником. После выполнения комплекса лабораторных испытаний по выявлению оптимального соотношения компонентов разработанных рабочих растворов и определению их основных технологических параметров проводились контрольные испытания растворов на строительной площадке в г. Тюмени для проверки возможности их дальнейшего использования на имеющемся технологическом оборудовании. Испытания разработанных рабочих растворов на основе цемента и пескоцемента с добавлением добавки-суперпластификатора в условиях непосредственного производства работ подтвердили возможность и эффективность их применения при устройстве буринъекционных свай. С использованием разработанных составов рабочих растворов в последующем были успешно выполнены буринъекционные сваи при усилении оснований и фундаментов на ряде объектов в г. Тюмени.

© ПНИПУ

© Сальный Иван Сергеевич – аспирант, e-mail: salnyy2493@mail.ru, ORCID: 0000-0002-7120-8744.

Пронозин Яков Александрович – доктор технических наук, профессор, e-mail: geofond.tgasu@gmail.com, ORCID: 0000-0002-6173-2796.

Бартоломей Леонид Адольфович – доктор технических наук, профессор, e-mail: bartolomejla@tyuiu.ru, ORCID: 0000-0001-8092-6476.

Кудоманов Максим Валерьевич – ассистент, e-mail: kudomanovmv@tyuiu.ru, ORCID: 0000-0002-7392-0284.

Наумкина Юлия Владимировна – кандидат технических наук, доцент, e-mail: naumkinajv@tyuiu.ru, ORCID: 0000-0003-2853-7531.

Ivan S. Salnyi – Postgraduate Student, e-mail: salnyy2493@mail.ru, ORCID ID: 0000-0002-7120-8744.

Yakov A. Pronozin – Doctor of Technical Sciences, Professor, e-mail: ivan@ivanov.com, ORCID ID: 0000-0002-6173-2796.

Leonid A. Bartolomei – Doctor of Technical Sciences, Professor, e-mail: bartolomejla@tyuiu.ru, ORCID ID: 0000-0001-8092-6476.

Maxim V. Kudomanov – Assistant, e-mail: kudomanovmv@tyuiu.ru, ORCID ID: 0000-0002-7392-0284.

Yuliya V. Naumkina – Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor, e-mail: naumkinajv@tyuiu.ru, ORCID ID: 0000-0003-2853-7531.

## THE MORTARS FOR DRILL-INJECTION PILES CREATION

I.S. Salnyi, Ya.A. Pronozin, L.A. Bartolomei, M.V. Kudomanov, Yu.V. Naumkina

Tyumen Industrial University, Tyumen, Russian Federation

---

### ARTICLE INFO

Received: 07 October 2020  
Accepted: 11 November 2020  
Published: 30 December 2020

#### Keywords:

drill-injection piles, crimping, mortar, density, strength, superplasticizing admixture.

### ABSTRACT

The article presents information about development of the composition of the mortars which are based on cement and sand-cement with the addition of a superplasticizing admixture for performing well crimping during drill-injection piles creation. The need to develop new compositions of the mortars was opened due to the discovery of some defects in the experimental drill-injection pile shafts which were created by using cement mortar with the addition of liquid glass, after their excavation and examination. These defects (massive soil penetration into the pile shaft near its wellhead and soil and mortar mixing along the perimeter of the piles) are takes place owing the insufficient mortar density, its high shrinkage and low strength. The developed compositions are free of these cons and have increased value of mortar key parameters (density, strength, shrinkage) which is too important during the drill-injection piles creations. After laboratory tests which were done to identify the optimal ratio of mortar components and determine their main parameters, control tests of these solutions were carried out on the investigation site to check the possibility of their use on existing technological equipment. Field tests of the developed mortars confirmed the possibility of their use for drill-injection piles creation. Using the developed compositions of mortars drill-injection piles were successfully performed for the foundation strengthening on some objects in Tyumen.

© PNRPU

---

## Введение

Начало применению буроинъекционных свай было положено в середине прошлого века в Италии [1]. Дальнейшее развитие технологий устройства буроинъекционных свай способствовало расширению области применения свайных фундаментов: так, стало возможно их использование для усиления памятников архитектуры, производства работ практически в любых грунтовых и климатических условиях, в условиях максимальной стесненности и вблизи с существующими зданиями и сооружениями без необходимости устройства защитных мероприятий по причине отсутствия динамического воздействия на грунтовый массив. На сегодняшний день буроинъекционные технологии устройства свайных фундаментов активно применяются как в промышленном, так и в гражданском строительстве.

Несмотря на большое разнообразие применяемых технологий буроинъекционных свай [2–11], процесс их устройства сводится к бурению и промывке скважины до требуемой глубины и опрессовке готовой скважины мелкозернистым цементным или пескоцементным раствором [12–16]. В процессе бурения скважины осуществляется ее одновременная промывка водоцементным составом с соотношением В/Ц, как правило, равном 1. В результате размолотый буровым долотом грунт выносится на дневную поверхность, тем самым очищая скважину. В процессе опрессовки буроинъекционных свай за счет нагнетания густого раствора под избыточным давлением в скважину происходит увеличение ее первоначального диаметра и/или локальные (довольно часто целенаправленные) уширения по длине ствола, что способствует обжатию окружающего буроинъекционную сваю грунта, возрастанию сил трения по длине сваи и, как следствие, повышению их несущей способности. Также важным аспектом в процессе опрессовки скважины является вытеснение из скважины бурового шлама, который не удалось удалить во время бурения с промывкой.

Таким образом, необходимым условием при устройстве буроинъекционных свай является правильный подбор состава смеси, который обеспечит необходимую прочность ствола сваи и удовлетворит основные технологические этапы ее создания. Подбор состава, очевидно, зависит в первую очередь от инженерно-геологических условий района производства работ и технологических параметров используемого оборудования (миксерная станция, высоконапорные шланги, буровые штанги и долота и др).

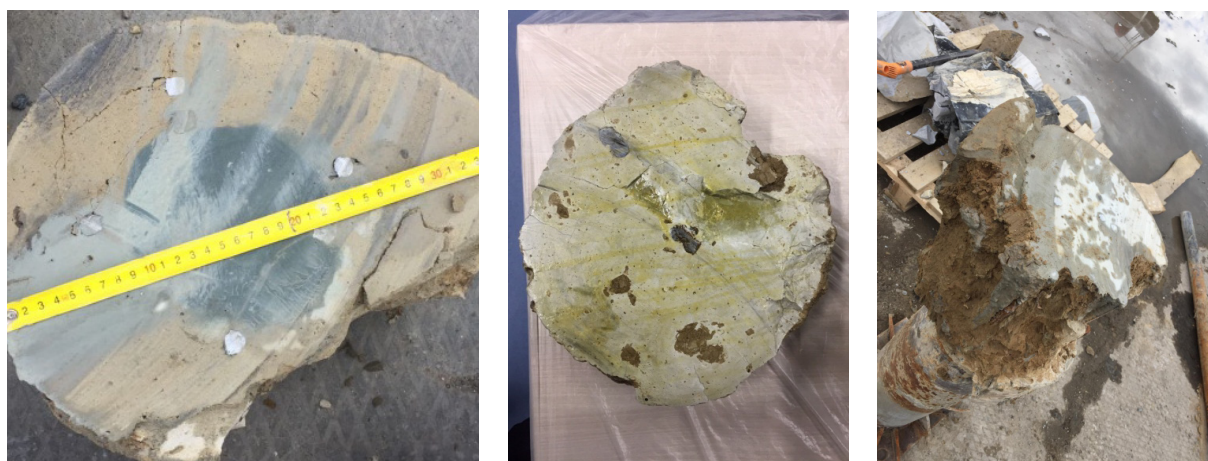
Целью работы является подбор состава рабочей смеси, который обеспечит необходимую технологичность процесса устройства буроинъекционных свай с теряемым сердечником («Атлант») и извлекаемым сердечником («Нормаль») [17] и их надежность в характерных для юга Тюменской области инженерно-геологических условиях.

Для достижения обозначенной цели были проведены лабораторные исследования параметров разрабатываемых растворов и их последующая апробация в натуральных условиях с привязкой к конкретной технологии устройства буроинъекционных свай на строительных площадках г. Тюмени.

## Основная часть

Необходимость разработки новых составов для устройства свай «Атлант» и «Нормаль» была вызвана обнаружением ряда дефектов стволов опытных буроинъекционных свай при их откопке и извлечении на экспериментальной площадке в г. Тюмени. Так, в результате распила и обследования извлеченных буроинъекционных свай были отмечены следующие дефекты и повреждения их стволов (рис. 1):

- перемешивание раствора с грунтом по периметру свай;
- подмес частиц грунта в тело свай;
- обильное замещение формирующего раствора грунтовой пробкой у устья скважины (верха свай).



*a*

*б*

*в*

Рис. 1. Дефекты, возникающие при формировании буроинъекционных свай:  
*a* – перемешивание раствора с грунтом по периметру свай; *б* – подмес грунта в тело свай;  
*в* – обильное замещение формирующего раствора грунтовой пробкой у устья скважины

Fig. 1. Defects which take place during the creation of drill-injection piles:  
*a* – mixing of the mortar with soil along the perimeter of the piles; *b* – incorporation of the soil into the pile shaft; *c* – replacing of the mortar by soil near the wellhead

Появление данных дефектов вызвано использованием при опрессовке цементного раствора (цемент – вода – жидкое стекло), который обладает низкой плотностью готовой смеси (1,5–1,6 г/см<sup>3</sup>), достаточно большой усадкой (до 15 мм на 1 мп. длины свай) и невысокой прочностью (среднее значение 10,9 МПа) (рис. 2). Причем в соответствии с данными рис. 2 минимальная прочность образцов составила 4,2 МПа при максимальном значении 24,4 МПа. Данные показатели были определены по результатам формования и испытания в гидравлическом прессе трех кубических образцов рабочего раствора в соответствии с ГОСТ 5802–86 в процессе устройства каждой опытной буроинъекционной сваи.

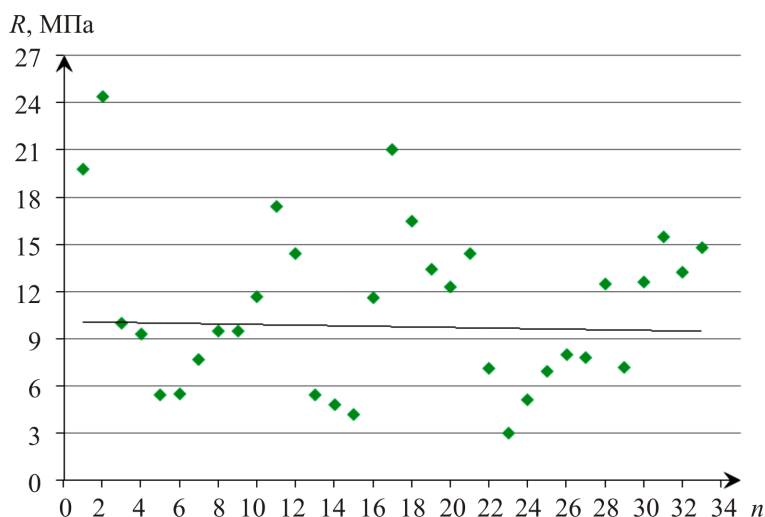


Рис. 2. Прочность при сжатии отобранных образцов раствора  
Fig. 2. Compressive strength of the selected mortar samples

Данный состав рабочей смеси (цемент – вода – жидкое стекло (3 % от массы цемента), В/Ц = 1) для устройства опытных буроинъекционных свай на экспериментальной площадке был принят в соответствии с проведенными исследованиями, содержащимися в работе М.А. Самохвалова [18]. Очевидно, что данный состав для инъекции буроинъекционных свай удовлетворяет технические требования в случае нагнетания в мембран-стакан, когда отсутствует необходимость вытеснения грунта раствором [18]. В случае же использования рабочего раствора для вытеснения грунта из пробуренной скважины его плотности и прочности недостаточно, что приводит к «закупориванию» устья скважины размолотым в процессе бурения грунтом, его налипанию к стенкам скважины и существенному сужению диаметра ствола свай, заполненного качественным рабочим раствором (рис. 1, а).

После распиловки свай были отобраны керны раствора диаметром 10 см из центральной и периферийной зон (рис. 3), которые были испытаны в соответствии с указаниями ГОСТ 5802–86 для определения прочности материала ствола свай. Испытания кернов раствора также показали, что прочность на сжатие в центральной части в целом согласуется со средними показателями прочности, представленными на рис. 2, а в периферийной зоне за счет обильного перемешивания с грунтом прочность цементного камня не превышает 4 МПа.

Для исключения возможности повторного образования выявленных дефектов были разработаны и апробированы два новых состава рабочих растворов на основе цемента и пескоцемента с добавкой суперпластификатора для формирования стволов буроинъекционных свай. В табл. 1, 2 представлена спецификация подобранных составов.



Рис. 3. Места отбора кернов раствора из тела опытных буринъекционных свай  
 Fig. 3. Places where mortar samples were taken from the shaft of experimental drill-injection piles

Таблица 1

Состав рабочего раствора на основе цемента

Table 1

Composition of the mortar based on cement

Наименование компонента	Количество, % от массы цемента
Портландцемент со шлаком ЦЕМ I В42,5Н по ГОСТ 31108–2016	–
Вода*	30–40
Суперпластификатор*	0,25–0,5

\* Регулируя водоцементное соотношение и количество добавляемого суперпластификатора, возможно обеспечивать прочность получаемого цементного камня на сжатие в пределах В20–В30.

Таблица 2

Состав рабочего раствора на основе пескоцемента

Table 2

Composition of the mortar based on soil-cement

Наименование компонента	Количество, % от массы цемента
Пескоцемент	–
Вода	20
Суперпластификатор	0,15

В табл. 3 и на рис. 4, 5 представлены основные характеристики получаемых рабочих растворов, необходимых для обеспечения технологичности процесса устройства буринъекционных свай и их последующей надежной работы.

Из табл. 3 и рис. 4 видно, что замена добавки в виде жидкого стекла на суперпластификатор позволила на 25 % повысить плотность готовой смеси на основе цемента и существенно сократить количество используемой добавки – с 3 % до 0,25–0,5 % от массы цемента. В случае использования растворов на основе пескоцемента плотность готовой смеси увеличивается до 2,20 г/см<sup>3</sup>, что на 37,5 % выше плотности растворов с добавлением жидкого стекла, также значительно сокращается расход суперпластификатора и составляет всего 0,15 % от массы пескоцемента. Таким образом, плотность разработанных рабочих

растворов на основе цемента и пескоцемента с добавлением суперпластификатора существенно увеличивается, что позволяет качественно очищать скважину от размолотого грунта и выносить его из устья в процессе опрессовки, так как средняя плотность грунта ( $\approx 1,8 \text{ г/см}^3$ ) ниже плотности раствора. Дополнительно авторами было предложено во время приготовления первого замеса рабочего раствора использовать пигменты, отвечающие требованиям ГОСТ Р 56585–2015, для придания раствору цветового эффекта для однозначной идентификации полного заполнения скважины рабочим раствором в процессе опрессовки и исключения возможности формирования тела сваи буровым шлам-раствором.

Таблица 3

Сравнение основных характеристик рабочих растворов для опрессовки буроинъекционных свай

Table 3

Comparison of the main characteristics of mortars for drill-injection piles crimping

Наименование показателя	Раствор с добавлением жидкого стекла	Подобранный раствор на основе цемента	Подобранный раствор на основе пескоцемента
В/Ц	1,0	0,3–0,4	0,2
Процент содержания добавки (от массы цемента)	3,0	0,25–0,5	0,15
Плотность раствора, $\text{г/см}^3$	1,50–1,60	1,90–2,00	2,00–2,20
Усадка готовой смеси, мм на м.п.	до 15	2–4	1–3
Подвижность раствора, марка (см) *	П-4 (14)	П-4 (14)	П-4 (14)
Жизнеспособность, мин (не менее)	120	120	90
Прочность на сжатие, МПа (марка)	$\approx 10,9$ (–)	26,2–39,3** (B20–30)	44,2 (B35)
Морозостойкость, марка	–	F50	F200

\* Подвижность смеси отражена в соответствии с ГОСТ 28013 по максимально допустимой марке, фактический результат готовой смеси превышает показатель в 14 см по осадке стандартного конуса, смесь литая.

\*\* Прочность цементного камня на сжатие зависит от водоцементного соотношения и количества добавляемого суперпластификатора (см. примечание для табл. 1).

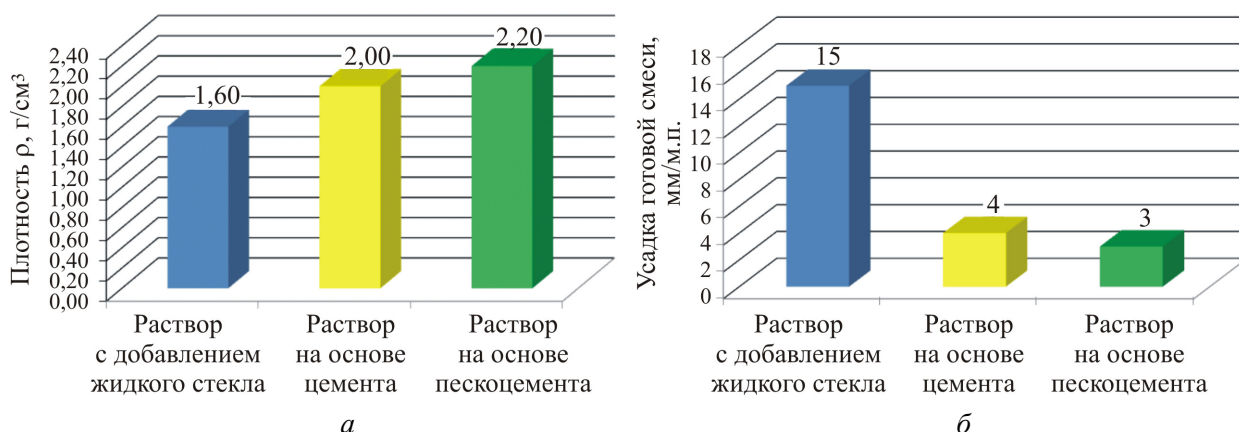


Рис. 4. Сравнение характеристик рабочих растворов:  
 а – плотность готовой смеси; б – усадка готовой смеси

Fig. 4. Comparison of the characteristics of mortars for drill-injection piles crimping:  
 a – mortar density; b – mortar shrinkage

Также использование добавки-суперпластификатора для разработанных растворов уменьшает усадку готовой смеси на 1 м.п. до 5 раз, что позволяет снизить вероятность образования усадочных трещин по стволу буронагнеточных свай и повысить их надежность. Подвижность и жизнеспособность разработанных растворов сопоставима с показателями составов с добавлением жидкого стекла.

На рис. 5 представлена информация по набору прочности цементного камня в течение первых 28 сут после формирования кубических образцов. Из графика видно, что уже на 2-е сутки прочность разработанных растворов на основе цемента и пескоцемента с добавлением суперпластификатора превышает прочность раствора с добавлением жидкого стекла, достигнутую по прошествии 7 сут, на 39 % и 72 % соответственно. На 7-е сутки прочность разработанного раствора на основе пескоцемента превышает прочность раствора с добавлением жидкого стекла в 3,4 раза, а для раствора на основе цемента – в 2,4 раза. Постепенно разница в прочности образцов увеличивается, и на 28-й день твердения прочность разработанных растворов на основе пескоцемента превышает прочность раствора с добавлением жидкого стекла в 3,8 раз, а на основе цемента – в 2,4 раза. На 4-е сутки прочность обоих разработанных составов раствора превосходит 50%-ное значение от максимальной прочности, что является важным преимуществом в случае устройства буронагнеточных свай в качестве усиления, так как в этом случае сваи быстро включаются в работу. Также из представленных графиков видно, что прочность разработанного раствора на основе пескоцемента в среднем превосходит прочность раствора на основе цемента в 1,5 раза на каждом этапе набора прочности. Следует отметить, что для приготовления растворов на основе цемента использовалось В/Ц = 0,35 и добавка суперпластификатора в количестве 0,35 % от массы цемента, что соответствует марке по прочности на сжатие В25.

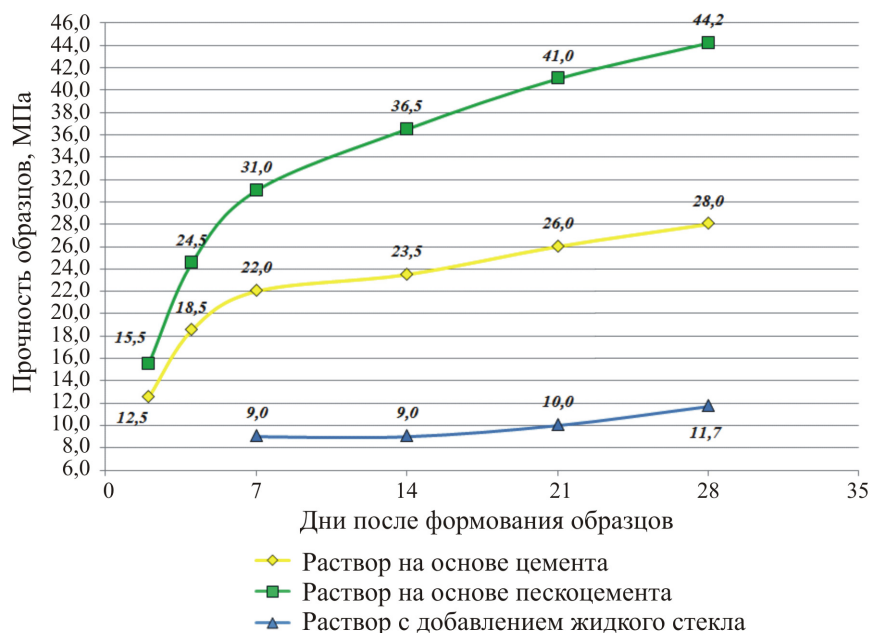


Рис. 5. Прочность рабочего раствора на сжатие в процессе твердения раствора  
Fig. 5. Compressive strength of the mortar during the time

Из табл. 3 видно, что использование пескоцемента для приготовления рабочих растворов значительно увеличивает их морозостойкость, что важно в случае расположения ствола буронагнеточной сваи в сезонно-деятельном слое. Морозостойкость образцов раствора определялась в соответствии с требованиями ГОСТ 5802–86. На рис. 6 представлены образцы растворов после завершения испытания.



*a*



*б*

Рис. 6. Образцы растворов на последнем цикле замораживания-оттаивания:

*a* – на основе цемента; *б* – на основе пескоцемента

Fig. 6. Mortar samples at the last freeze-thaw cycle: *a* – based on cement; *b* – based on soil-cement

После выполнения комплекса лабораторных испытаний по выявлению оптимального соотношения компонентов растворов и определению их основных параметров на строительной площадке проводились контрольные испытания растворов для проверки возможности их использования на имеющемся технологическом оборудовании. На рис. 7 представлен процесс перемешивания разработанных растворов в миксерной станции на строительной площадке.



*a*



*б*

Рис. 7. Процесс перемешивания рабочих растворов при помощи инъекционного комплекса «МИНИ» [19]: *a* – на основе цемента; *б* – на основе пескоцемента

Fig. 7. The process of mortar mixing by using the injection complex «MINI» [19]:

*a* – based on cement; *b* – based on soil-cement

Испытания разработанных растворов на строительной площадке подтвердили возможность их использования при устройстве буроинъекционных свай «Атлант» и «Нормаль». С применением данных растворов были успешно выполнены буроинъекционные сваи при усилении фундаментов ряда объектов в г. Тюмени [20].

## Заключение

В результате исследования были разработаны и успешно апробированы на строительной площадке два состава растворов на основе цемента и пескоцемента с добавлением суперпластификатора для выполнения опрессовки при устройстве буроинъекционных свай по технологии с извлекаемым и теряемым сердечником. Разработанные растворы имеют



ряд преимуществ по сравнению с инъекционными растворами на основе цемента с добавлением жидкого стекла:

1. Полученные растворы имеют высокую плотность готовой смеси, которая составляет 1,90–2,0 г/см<sup>3</sup> для растворов на основе цемента и 2,0–2,20 г/см<sup>3</sup> для растворов на основе пескоцемента, что позволяет лучше очищать скважину от размолотого в процессе бурения грунта и выносить его из устья при выполнении опрессовки. Использование данных растворов исключает возможность «закупоривания» устья скважины выносимым грунтом и его налипания к стенкам, что часто приводит к сужению рабочего диаметра ствола сваи, заполненного качественным рабочим раствором.

2. Сокращается количество используемых добавок: так, количество добавляемого в раствор жидкого стекла составляет 3 % от массы цемента, а в разработанных составах требуемое количество суперпластификатора составляет всего 0,25–0,5 % для растворов на основе цемента и 0,15 % для растворов на основе пескоцемента.

3. Существенно уменьшается усадка готовой смеси (до 4 мм на 1 м.п.) в случае использования растворов с добавлением суперпластификатора по отношению к растворам с добавлением жидкого стекла, для которых данный показатель составляет 15 мм на 1 м.п., что позволяет снизить вероятность образования усадочных трещин по стволу буроинъекционных свай и повысить их надежность в процессе эксплуатации.

4. Использование добавки-суперпластификатора для растворов на основе цемента и пескоцемента значительно повышает прочность цементного камня на сжатие. Так, регулируя водоцементное соотношение и количество суперпластификатора для растворов на основе цемента, можно получить марку по прочности на сжатие в пределах В20–В30, а в случае использования растворов на основе пескоцемента марка по прочности на сжатие соответствует В35. Причем в обоих вариантах растворов на 4-е сутки прочность цементного камня превосходит 50%-ное значение от максимальной прочности.

5. Использование пескоцемента для приготовления рабочих растворов существенно увеличивает их морозостойкость, что важно в случае расположения ствола буроинъекционной сваи в сезонно-деятельном слое.

## Библиографический список

1. Самохвалов М.А., Гейдт А.В., Паронко А.А. Обзор существующих конструкций буроинъекционных анкерных свай // Вестник МГСУ. – 2019. – Т. 14, № 12. – С. 1530–1554. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.12.1530-1554
2. Micropile Design and Construction Guidelines Implementation Manual / P.E. Armour, P.E. Gronck, P.E. Keeley, P.E. Sunil Sharma. – 2000. – 376 p.
3. Windle J., Suckling T. CFA piling: A cheap solution or a problem waiting to happen // Proceedings of the Congress of Forensic Engineering. – 2009. – P. 335–342. DOI: 10.1680/fefft.36130.0034
4. Müller W. Slope securing with TITAN injection piles in the railroad area as used in the project «Renovation of the supporting wall near Nittendorf» // Felsbau Magazin. – 2010. – № 3. – P. 194–199.
5. Malinin A.G., Malinin D.A. Procedure for installation of «Atlant» anchor piles // Soil Mechanics and Foundation Engineering. – 2010. – № 47 (1). – P. 20–25. DOI: 10.1007/s11204-010-9082-8
6. Пат. 2522358 РФ, E02D 5/46, Способ изготовления буроинъекционной сваи с контролируемым уширением / Пронозин Я.А., Зазуля Ю.В., Самохвалов М.А.; заявитель и па-

тентообладатель ФГБОУ ВПО «Тюменский государственный архитектурно-строительный университет». – № 2012155563/03; заявл. 19.12.12. опублик. 27.06.14.

7. Herrmann H., Bucksch H. Titan pile // Dictionary Geotechnical Engineering/Wörterbuch GeoTechnik. – 2014. – P. 1406–1406. DOI: 10.1007/978-3-642-41714-6

8. Jakub S. The design of drilled displacement system piles using the cavity expansion theory // Acta Geotechnica Slovenica. – 2018. – № 15 (2). – P. 81–91. DOI: 10.18690/actageotechslov.15.2.81-91.2018

9. Liu X.J. Comparison analysis of GFRP anchor pile performance in expansive soil foundation // Proceedings of the 2nd International Conference on Civil Engineering and Material Engineering. CEME, Wuhan, China, 2013. – P. 243–247. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.859.243

10. Никитенко М.И. Буроинъекционные анкеры и сваи при строительстве и реконструкции зданий и сооружений: монография. – Минск: БНТУ, 2007. – 580 с.

11. Nikitenko M.I., Sobolevskii D.Y. Effect of grout injection in holes on the properties of surrounding sandy soil // Soil Mechanics and Foundation Engineering. – 1986. – Vol. 23 (3). – P. 97–102. DOI: 10.1007/BF01717840

12. Мангушев Р.А., Ершов А.В., Осокин А.И. Современные свайные технологии: учеб. пособие. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Изд-во АСВ, 2010. – 240 с.

13. Zotsenko N., Vynnykov Yu., Zotsenko V. Soil-cement piles by drilling-mixing method // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Строительство и архитектура. – 2015. – № 4. – С. 70–81. DOI: 10.15593/2224-9826/2015.4.10

14. Ибрагимов М.Н., Семкин В.В., Шапошников А.В. Цементация грунтов инъекцией растворов в строительстве: монография. – М.: Изд-во АСВ, 2017. – 266 с.

15. Mechanisms of property changes of soft clays around deep mixing column / S. Shen, Y. Jiang, F. Cai, Y. Xu // Yanshilixue Yu Gongcheng Xuebao/Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering. – 2005. – Vol. 24 (23). – P. 4320–4327.

16. Modeling of permeation and fracturing grouting in sand: Laboratory investigations / W. Cheng, J.C. Ni, J.S. Shen, Z. Wang // Journal of Testing and Evaluation. – 2018. – Vol. 46 (5). – P. 2067–2082. DOI: 10.1520/JTE20170170

17. Pronozin Y.A., Salnyi I.S., Volosyuk D.V. «Normal» bored injection pile with increased bearing capacity // Proceedings of the International Conference on Geotechnics Fundamentals and Applications in Construction: New Materials, Structures, Technologies and Calculations. GFAC. S.-Petersburg, 2019. – P. 296–300. DOI: 10.1201/9780429058882-58

18. Самохвалов М.А. Взаимодействие буроинъекционных свай, имеющих контролируемое уширение, с пылевато-глинистым грунтовым основанием: дис. ... канд. техн. наук. – Тюмень, 2016. – 189 с.

19. Малинин А.Г. Миксерная станция для струйной цементации грунтов // Транспортное строительство. – 2008. – № 9. – С. 27–30.

20. Geotechnical support for building construction with changed design considerations of the superstructure / N. Kiselev, R. Melnikov, M. Stepanov, K. Korolev, A. Karaulov, A. Tsernant // Proceedings of the E3S Web of Conferences (TPACEE-2019). – 2020. – Vol. 164. – P. 1–6. DOI: 10.1051/e3sconf/202016408001

## References

1. Samokhvalov M.A., Geydt A.V., Paronko A.A. Review of existing designs of drill-and-injection anchor piles. *Vestnik MGSU*, 2019, no. 12, pp. 1530–1554. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.12.1530-1554.
2. Armour P.E., Groneck P.E., Keeley P.E., Sunil Sharma, P.E. Micropile design and construction guidelines implementation manual, 2000, 376 p.
3. Windle J., Suckling T. CFA piling: A cheap solution or a problem waiting to happen. *Proceedings of the Congress of Forensic Engineering*, 2009, pp. 335–342. DOI: 10.1680/fefft.36130.0034.
4. Müller, W. Slope securing with TITAN injection piles in the railroad area as used in the project «Renovation of the supporting wall near Nittendorf». *Felsbau Magazin*, 2010, no. 3, pp. 194–199.
5. Malinin, A.G., Malinin, D.A. Procedure for installation of «Atlant» anchor piles. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 2010, vol. 47 (1), pp. 20–25. DOI: 10.1007/s11204-010-9082-8.
6. Pronozin Ya.A., Zazulya Yu.V., Samokhvalov M.A. Sposob izgotovleniya buroinyektsionnoy svai s kontroliruyemym ushireniyem [Creation method of drill-injection pile with controlled broadening]. Patent Rossiiskaia Federatsiia no. 2522358 (2014).
7. Herrmann H., Bucksch H. Titan pile. *Dictionary Geotechnical Engineering/Wörterbuch GeoTechnik*, 2014, pp. 1406–1406. DOI: 10.1007/978-3-642-41714-6.
8. Jakub S. The design of drilled displacement system piles using the cavity expansion theory. *Acta Geotechnica Slovenica*, 2018, vol. 15 (2), pp. 81–91. DOI: 10.18690/actageotechslov.15.2.81-91.2018.
9. Liu, X.J. Comparison analysis of GFRP anchor pile performance in expansive soil foundation. *Proceedings of the 2nd International Conference on Civil Engineering and Material Engineering*. CEME, Wuhan, China, 2013, pp. 243–247. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.859.243.
10. Nikitenko M.I. Buroinyektsionnyye ankery i svai pri stroitelstve i rekonstruktsii zdaniy i sooruzheniy [Drill-injection anchors and piles in the construction and reconstruction of buildings and structures]. Minsk, BNTU, 2007, 580 p.
11. Nikitenko M.I., Sobolevskii, D.Y. Effect of grout injection in holes on the properties of surrounding sandy soil. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 1986, vol. 23 (3), pp. 97–102. DOI: 10.1007/BF01717840.
12. Mangushev R.A., Yershov A.V., Osokin A.I. *Sovremennyye svaynyye tekhnologii* [Modern pile technologies]. 2nd ed. Moscow, ASV, 2010, 240 p.
13. Zotsenko N., Vynnykov Yu., Zotsenko V. Soil-cement piles by drilling-mixing method. *Vestnik Permskogo natsional'no issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Stroitel'stvo i arkhitektura*, 2015, no. 4, pp. 70–81. DOI: 10.15593/2224-9826/2015.4.10.
14. Ibragimov M.N., Semkin V.V., Shaposhnikov A.V. *Tsementatsiya gruntov in"yektsiyey rastvorov v stroitel'stve*. Moscow, ASV, 2017, 266 p.
15. Shen, S., Jiang, Y., Cai, F., Xu, Y. Mechanisms of property changes of soft clays around deep mixing column. *Yanshilixue Yu Gongcheng Xuebao/Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, vol. 24 (23), pp. 4320–4327.
16. Cheng, W., Ni, J. C., Shen, J. S., Wang, Z. Modeling of permeation and fracturing grouting in sand: Laboratory investigations. *Journal of Testing and Evaluation*, 2018, vol. 46 (5), pp. 2067–2082. doi: 10.1520/JTE20170170.

17. Pronozin, Y.A., Salnyi, I.S., Volosyuk, D.V. «Normal» bored injection pile with increased bearing capacity. *Proceedings of the International Conference on Geotechnics Fundamentals and Applications in Construction: New Materials, Structures, Technologies and Calculations*. GFAC, Saint Petersburg, 2019, pp. 296–300. DOI: 10.1201/9780429058882-58.

18. Samokhvalov M.A. Vzaimodeystviye buroinyektsionnykh svay, imeyushchikh kontroliruyemoye ushireniye, s pylevato-glinistym gruntovym osnovaniyem [Interaction of drill-injection piles with controlled broadening with a dusty-clay soil base]. Ph. D. thesis. Tyumen, 2016, 189 p.

19. Malinin A.G. Miksernaya stantsiya dlya struynoy tsementatsii gruntov [Mixing station for soil cementation]. *Transportnoye stroitel'stvo*, 2008, no. 9, pp. 27–30.

20. Kiselev N., Melnikov R., Stepanov M., Korolev K., Karaulov A., Tsernant A. Geotechnical support for building construction with changed design considerations of the superstructure. *Proceedings of the E3S Web of Conferences (TPACEE-2019)*, 2020, vol. 164, pp. 1–6. doi: 10.1051/e3sconf/202016408001.