

# ГИДРАВЛИКА. ГЕОТЕХНИКА. ГИДРОТЕХНИЧЕСКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 624.138.232.1

DOI: 10.22227/1997-0935.2025.12.1947-1956

## Влияние водоцементной суспензии на свойства грунтоцемента при струйной цементации слабых грунтов

Андрей Александрович Красилов<sup>1</sup>, Александр Тевьевич Беккер<sup>1</sup>,  
Цзянь Чжан<sup>2</sup>, Сяолунь Бай<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Дальневосточный федеральный университет (ДВФУ); г. Владивосток, Россия;

<sup>2</sup> Цзянсунский университет науки и технологий; г. Чжэнъцзян, Китайская Народная Республика

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Оптимизация состава водоцементной суспензии для струйной цементации грунтов (СЦГ) в условиях гидротехнического строительства является актуальной задачей ввиду недостаточной изученности влияния состава цементного раствора на свойства грунтоцемента в условиях постоянного водонасыщения, а также ограничений применения технологии в этой области строительства из-за специфических нагрузок и агрессивного воздействия внешней среды. Цель исследования — определение оптимального состава водоцементной суспензии, обеспечивающего высокие физико-механические характеристики грунтоцемента. Основные задачи включали полевые и лабораторные испытания составов с различными добавками и водоцементным отношением (В/Ц).

**Материалы и методы.** Программа исследований включала устройство 15 грунтоцементных колонн с пятью различными составами с последующим отбором образцов грунтоцемента для лабораторного анализа их прочности, модуля деформации и плотности. Испытания проводились в сложных геологических и гидрологических условиях.

**Результаты.** Наибольшая прочность на одноосное сжатие и модуль деформации зафиксированы у состава с В/Ц, равным 0,8. Химические добавки (натриевое стекло и техническая сода) не показали значимого улучшения характеристик, прирост прочности составил всего 1–9 %, неожиданным результатом стало снижение прочности при совместном использовании добавок. Плотность грунтоцемента для всех составов оказалась близкой по значениям.

**Выводы.** Наилучшие результаты достигнуты при В/Ц, равном 0,8, именно этот состав рекомендуется для практического применения струйной цементации грунтов в гидротехническом строительстве. Полученные данные о характеристиках грунтоцемента подтверждают эффективность СЦГ в сложных условиях, но и свидетельствуют о необходимости проведения предварительных опытных испытаний для выбора оптимального состава.

**Ключевые слова:** струйная цементация грунтов, состав водоцементной суспензии, грунтоцемент, прочность на сжатие, модуль деформации, слабые грунты, сложные геолого-гидрологические условия, химические добавки

**Благодарности.** Авторы благодарят компанию ООО «Дальнинжстрой» за содействие в проведении экспериментальных исследований, а также рецензентов за проделанную работу, направленную на улучшение качества статьи.

**Для цитирования:** Красилов А.А., Беккер А.Т., Чжан Ц., Бай С. Влияние водоцементной суспензии на свойства грунтоцемента при струйной цементации слабых грунтов // Вестник МГСУ. 2025. Т. 20. Вып. 12. С. 1947–1956. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.12.1947-1956

Автор, ответственный за переписку: Андрей Александрович Красилов, krasilov.aa@dvfu.ru.

## The influence of water-cement suspension on the properties of soil cement during jet cementation of weak soils

Andrey A. Krasilov<sup>1</sup>, Aleksandr T. Bekker<sup>1</sup>, Jian Zhang<sup>2</sup>, Xiaolong Bai<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Far Eastern Federal University (FEFU); Vladivostok, Russian Federation;

<sup>2</sup> Jiangsu University of Science and Technology; Zhenjiang, Republic of China

### ABSTRACT

**Introduction.** Optimization of water-cement suspension composition for jet grouting in hydraulic engineering construction is an urgent task due to insufficient knowledge of how cement slurry composition affects soil-cement properties under constant water saturation, as well as limitations in applying this technology in this construction sector due to specific loads and aggressive environmental impacts. The study aims to determine the optimal water-cement suspension composition ensuring high physical and mechanical characteristics of soil-cement. The main tasks included field and laboratory testing of compositions with various additives and water-cement ratios.

**Materials and methods.** The research programme involved constructing 15 soil-cement columns with 5 different compositions, followed by sampling of soil-cement specimens for laboratory analysis of their strength, deformation modulus, and density. The tests were conducted under complex geological and hydrological conditions.

**Results.** The highest unconfined compressive strength and deformation modulus were recorded for the composition with a water-cement ratio of 0.8. Chemical additives (sodium silicate and technical soda) did not show significant improvement in characteristics, with strength increase amounting to only 1–9 %. An unexpected result was the strength reduction observed when using both additives simultaneously. The soil-cement density remained similar for all compositions.

**Conclusions.** The best results were achieved with a water-cement ratio of 0.8, and this particular composition is recommended for practical application of jet grouting in hydraulic engineering construction. The obtained data on soil-cement characteristics confirm the effectiveness of jet grouting technology (JGT) in challenging conditions, while also demonstrating the need for preliminary experimental work to select the optimal composition.

**KEYWORDS:** jet grouting, water-cement suspension composition, soil-cement, unconfined compressive strength, deformation modulus, weak soils, challenging geohydrological conditions, chemical additives

**Acknowledgements.** The authors express their gratitude to “Dalinzhstroy” LLC for their support in conducting experimental research, as well as to the reviewers for their valuable efforts aimed at improving the quality of this article.

**FOR CITATION:** Krasilov A.A., Bekker A.T., Zhang J., Bai X. The influence of water-cement suspension on the properties of soil cement during jet cementation of weak soils. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2025; 20(12):1947-1956. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.12.1947-1956 (rus.).

**Corresponding author:** Andrey A. Krasilov, krasilov.aa@dvfu.ru.

## ВВЕДЕНИЕ

Струйная цементация грунтов (СЦГ) в последние годы активно развивается и находит широкое применение в гражданском, промышленном и транспортном строительстве благодаря эффективности при усилении слабых оснований, создании противофильтрационных завес и восстановлении поврежденных конструкций. Однако, несмотря на свою значимость [1–7], в гидротехническом строительстве эта технология пока не получила столь широкого распространения [8–11]. Основные причины: специфические гидрологические условия (водонасыщенные грунты), устройство обратных засыпок из качественных грунтов, большие горизонтальные нагрузки (волновые, ледовые и другие), эксплуатация в условиях действия агрессивной водной среды и др. Ограничивает использование СЦГ в данной отрасли и недостаточная изученность влияния состава цементного раствора на характеристики закрепленного грунта в условиях постоянного водонасыщения.

В связи с этим актуальной задачей является исследование оптимального состава цементного рас-

твора, обеспечивающего необходимые физико-механические свойства грунтоцемента при использовании технологии СЦГ в гидротехническом строительстве.

Приведены результаты полевых и лабораторных исследований влияния компонентов цементирующего раствора (добавок, соотношения вода/цемент) на прочность и модуль деформации грунтоцемента.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

### Инженерно-геологические и гидрологические условия площадки исследований

Площадка проведения полевых исследований характеризуется сложным геологическим строением, представленным лагунно-морскими и морскими отложениями, а также делювиально-элювиальными образованиями.

Геолого-литологический разрез скважины, расположенной непосредственно в районе строительства грунтоцементных колонн (ГЦК), представлен в табл. 1.

На разрезе выделяются следующие грунты:

1) глинистые:

- текущие и текучепластичные илы и глины с коэффициентом пористости  $e > 1,00$ ;

**Табл. 1.** Геолого-литологический разрез скважины

Table 1. Geological-lithological well log

Номер слоя Number layer	Геологический индекс Geological index	Глубина залегания слоя Layer occurrence depth		Мощность, м Thickness, m	Литологический разрез Lithological section	Наименование грунта Soil type designation	Уровень воды Water level
		от / from	до / until				
1	ImQIV	0,00	0,60	0,60		Суглинок темно-коричневый, с примесью органического вещества Dark brown loam with organic matter admixture	1,07
2	ImQIV	0,60	2,20	1,60		Супесь грабелистая, светло-коричневая, твердая, водонасыщенная Gravelly sandy loam, light brown, hard, water-saturated	
3	mQIV	2,20	4,00	1,80		Песок мелкий, зеленовато-серый, средней плотности, водонасыщенный Fine sand, greenish-gray, medium dense, water-saturated	

Окончание табл. I / End of the Table I

Номер слоя Number layer	Геологический индекс Geological index	Глубина залегания слоя Layer occurrence depth		Мощность, м Thickness, m	Литологический разрез Lithological section	Наименование грунта Soil type designation	Уровень воды Water level
		от / from	до / until				
4	ImQIV	4,00	5,00	1,00		Суглинок зеленовато-серый, текучий Greenish-gray flowable loam	1,07
5	ImQIV	5,00	11,00	6,00		Ил глинистый, темно-серый, скрытотекущий Clayey silt, dark gray, hidden-flow	
6	ImQIV	11,00	12,00	1,00		Суглинок буровато-серый, текучий Brownish-gray flowable loam	
7	deQIV	12,00	13,00	1,00		Супесь желто-коричневая, с единичными включениями щебня, твердая Yellow-brown sony loam with occasional gravel inclusions hard	
8	deQIV	13,00	16,00	1,00		Щебенистый грунт с супесчаным заполнителем до 25 % малой степени водонасыщения Gravelly sol with sandy loam filler up to 25 %, slightly water-saturated	

• мягкопластичные суглинки и глины с примесью органического вещества;

- текучие и текучепластичные суглинки с  $e < 1,00$ ;
- твердые гравелистые суглинки и супеси;

2) песчаные:

• пылеватые и мелкие пески средней плотности, насыщенные водой;

3) щебенистые и дресвяные:

• твердые супеси и суглинки с включением дресвы и щебня (до 25 %);

• щебенистые грунты с супесчаным заполнителем.

Грунтовые воды вскрыты в интервале глубин 0,20–5,00 м в лагунно-морских и морских отложениях. Уровень грунтовых вод (УГВ) зафиксирован на глубине от 0,0 до 2,4 м, что оказывает значительное влияние на физико-механические свойства грунтов, особенно в зоне проведения струйной цементации.

Наибольшую сложность для цементации представляют:

- текучие и текучепластичные глинистые грунты (высокая влажность, низкая несущая способность);
- водонасыщенные пески;
- наличие органики (может замедлять твердение цементного раствора).

### Программа исследований

Цель экспериментальных исследований: определение оптимального состава цементного раствора для струйной цементации и оценка влияния химических добавок на характеристики закрепленного грунта.

Ключевые задачи экспериментальных исследований:

- 1) выбор площадки для устройства ГЦК;

2) определение видов технологии и составов цементного раствора;

3) установление количества ГЦК для исследований;

4) устройство ГЦК и их выдержка;

5) контроль качества ГЦК;

6) отбор образцов грунтоцемента из ГЦК;

7) лабораторные испытания образцов грунтоцемента;

8) анализ результатов.

В связи с выявленными сложными геологогидрологическими условиями участка, а также на основе анализа требований СП 291.1325800.2017 и рекомендаций [12–19] было разработано 5 составов цементного раствора:

• в качестве референсного варианта принят базовый состав цементного раствора с водоцементным отношением (В/Ц), равным 1, без введения каких-либо модифицирующих добавок (МД). Этот состав служит «контрольным образцом» для объективной оценки эффективности следующих составов;

• состав с предварительным размывом скважины раствором технической содой, который выполняется для нейтрализации органических веществ, содержащихся в грунтах и нарушающих нормальный процесс набора прочности грунтоцементной колонны;

• состав с добавлением натриевого стекла, которое ускоряет схватывание и предотвращает возможный размыв грунтоцементной колонны (во время набора прочности) фильтрационным потоком;

• состав с единовременным применением предварительного размыва технической содой и натриевого стекла;

• состав с В/Ц, равным 0,8, без добавок.

**Табл. 2.** Программа экспериментальных исследований

Table 2. Experimental research programme

Номер грунтоцементной колонны Number soil-cement column	Номер состава цементного раствора Number cement slurry composition	Состав цементного раствора Cement slurry composition		
		В/Ц* W/C*	Расход цемента, кг/м Cement consumption, kg/m	Примечание Note
1, 2, 6	1	1	500	Без добавок Without additives
3, 4, 7	2	1	500	С предварительным размывом скважины раствором технической соды With preliminary well flushing by technical soda solution
8, 11, 12	3	1	500	С добавлением натриевого стекла With sodium silicate addition
5, 9, 10	4	1	500	С добавлением натриевого стекла и предварительным размывом скважины раствором технической соды With sodium silicate addition and preliminary well flushing by technical soda solution
13, 14, 15	5	0,8	500	Без добавок Without additives

Программа экспериментальных исследований (табл. 2) разработана с целью сравнительной оценки эффективности различных составов. В соответствии с методикой предусмотрено устройство 15 грунтоцементных колонн (по 3 ГЦК на каждый состав).

### Проведение исследований

#### Контроль качества ГЦК

Контроль качества ГЦК выполнялся в два этапа после набора прочности грунтоцементом [20]:

- визуальный и инструментальный контроль верхней части грунтоцементных колонн;

- контроль качества тела ГЦК с помощью отбора образцов грунтоцемента.

После завершения набора прочности производились вскрытие и очистка ГЦК (рис. 1).

Визуальный осмотр голов ГЦК показал, что их форма и конфигурация имеют ожидаемые параметры (некоторые «головы» разрушены экскаватором при вскрытии).

Средний фактический диаметр колонн определялся методом периметрических измерений: замерялся фактический периметр поперечного сече-



Рис. 1. Верхняя часть грунтоцементных колонн (фотография сделана во время заката, темная часть — это тень)

Fig. 1. The upper section of soil-cement columns (photo taken at sunset, so the dark area is a shadow)

**Табл. 3.** Расчетные диаметры грунтоцементных колонн

Table 3. Design diameters of soil-cement columns

Номер ГЦК Number SCC	$C_{ок}$ , см $C_c$ , см	$D$ , см $D$ , cm	Номер ГЦК Number SCC	$C_{ок}$ , см $C_c$ , см	$D$ , см $D$ , cm	Номер ГЦК Number SCC	$C_{ок}$ , см $C_c$ , см	$D$ , см $D$ , cm
1	330	105	6	317	101	11	330	105
2	327	104	7	314	100	12	336	107
3	314	100	8	346	110	13	314	100
4	320	102	9	324	103	14	317	101
5	336	107	10	320	102	15	342	109

ния, после чего расчетный диаметр рассчитывался по формуле:

$$D = \frac{C_{ок}}{\pi},$$

где  $D$  — средний фактический диаметр колонн;  $C_{ок}$  — фактический периметр поперечного сечения ГЦК;  $\pi$  — 3,14.

Расчетные значения среднего диаметра грунтоцементных колонн приведены в табл. 3.

#### Отбор кернов грунтоцемента из зон цементации

Отбор кернов грунтоцемента выполнялся колонковым бурением перед вскрытием верхней части грунтоцементных колонн.

Для сохранения целостности кернов применялись:

- укороченные рейсы (не более 1,5 м);
- продувка воздухом вместо промывки буро-вым раствором;
- буровая колонна с внутренним диаметром 92 мм.

По результатам контрольного бурения установлено, что для всех вариантов технологии устройства грунтоцементных колонн наблюдается:

- высокая степень закрепления грунтов;
- отсутствие зон разуплотнения грунтов и провалов бурового инструмента.

Керны грунтоцемента, отобранные из тела ГЦК (рис. 2), в большинстве случаев имели ненарушенную структуру с отсутствием визуально наблюдаемых дефектов. Небольшое количество образцов имели разрушения технологического характера (полученные в результате бурения).

#### Испытания образцов грунтоцемента

В соответствии с программой исследований из кернов были изготовлены образцы грунтоцемента для изучения их физических (плотность) и механических (прочность на сжатие и модуль деформации) свойств. Всего изготовлено 138 образцов диаметром 90 мм.

Установление плотности образцов грунтоцемента выполнялось путем деления массы образца (правильной формы) на его объем.



Рис. 2. Отобранные образцы грунтоцемента

Fig. 2. Selected soil-cement specimens

Табл. 4. Результаты испытаний образцов грунтоцемента

Table 4. Test results of soil-cement specimens

Номер состава Number composition	Номер ГЦК Number SCC	Средняя прочность на одноосное сжатие, МПа Average uniaxial compressive strength, MPa	Средний модуль деформации, МПа Average deformation modulus, MPa	Средняя плотность, г/см <sup>3</sup> Average density, g/cm <sup>3</sup>
1	1, 2, 6	3,65	4553	1,72
2	3, 4, 7	3,69	4699	1,69
3	8, 11, 12	3,96	4980	1,74
4	5, 9, 10	3,54	3758	1,68
5	13, 14, 15	5,60	6310	1,73

Испытания на прочность образцов грунтоцемента осуществлялись согласно ГОСТ 21153.2–84.

Определение модуля деформации грунтоцемента проводилось в соответствии с ГОСТ 28985–91.

Испытания на прочность на одноосное сжатие и модуль деформации производились на гидравлическом прессе SHIMADZU AG-Xplus с контролем основных параметров испытаний: скорости нагружения, записи зависимости «сила – деформация» и прочего.

сти грунтоцементных колонн в рассматриваемых грунтовых условиях.

Состав № 2 (с предварительным размывом скважины технической содой) продемонстрировал статистически незначимый прирост прочности 1 % относительно базового состава, на основании чего можно сделать вывод о том, что выполнение подобных подготовительных работ в этих геологических и гидрологических условиях нецелесообразно.

Состав № 3 (с добавлением натриевого стекла) показал среднюю прочность 3,96 МПа, т.е. увеличение на 9 % к базовому составу, поэтому, учитывая результат, зафиксированный для состава 5, применение данного состава так же, как и состава № 2, нецелесообразно.

Минимальная прочность (3,54 МПа) отмечена у состава № 4 (с добавлением натриевого стекла и предварительным размывом содой), что является неожиданным результатом, учитывая, что отдельно друг от друга эти добавки показали прирост прочности относительно состава № 1.

#### Деформационные характеристики

Наибольшее значение модуля деформации зафиксировано у ГЦК состава № 5, что коррелирует с максимальной прочностью этого состава.

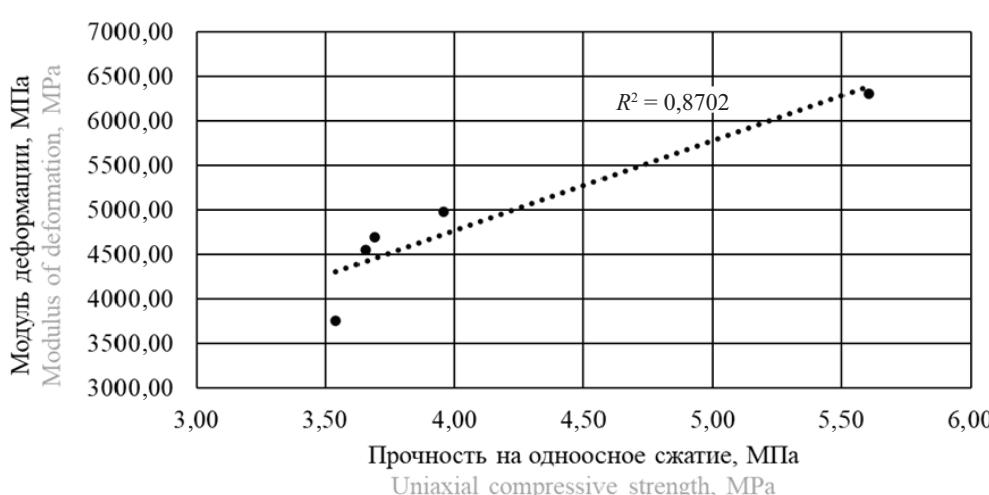


Рис. 3. График зависимости модуля деформации и прочности на одноосное сжатие

Fig. 3. Graph of the dependence of the modulus of deformation and uniaxial compressive strength

Линейная зависимость между прочностью и модулем деформации ( $R^2 = 0,87$ ) подтверждает однородность структуры грунтоцемента (рис. 3).

### Плотность грунтоцемента

Значения плотности всех составов близки и лежат в диапазоне 1,68–1,74 г/см<sup>3</sup>, что указывает на:

- отсутствие значительных пустот в грунтоцементе;
- минимальное влияние добавок и водоцементного отношения на уплотнение (разница ≤ 3,5 %).

Стоит отметить, что плотность полученного грунтоцемента меньше средней плотности исходных грунтов (равной 1,9 г/см<sup>3</sup>) на 11 %.

### Выводы

Таким образом, для данных геологических и гидрологических условий можно сделать следующие выводы:

- понижение водоцементного отношения цементного раствора показало наилучший результат и может быть рекомендовано для применения;
- использование таких добавок, как натриевое стекло и раствор технической соды, нецелесообразно;
- единовременное применение натриевого стекла и раствора технической соды приводит к сниже-

нию механических характеристик грунтоцемента по сравнению с базовым составом;

- использование МД не оказывает значимого эффекта на плотность грунтоцемента и диаметр грунтоцементных колонн.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Понижение водоцементного отношения стало наилучшим вариантом производства работ и показало повышение прочностных и деформационных характеристик грунтоцемента на 50 %. При этом изменение механических свойств укрепленного грунта не повлияло на плотность грунтоцемента и диаметр грунтоцементных колонн, которые для всех вариантов цементного раствора показали близкие значения.

Результаты исследований подтверждают эффективность применения технологии струйной цементации грунтов в сложных геологических и гидрологических условиях и имеют практическое значение для будущего производства работ.

Использование химических добавок дало неоднозначные результаты, которые еще раз подтвердили необходимость проведения опытных работ перед массовым применением.

### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Беккер А.Т., Красилов А.А., Зверев А.А., Чигров Е.В. Экспериментальные исследования физических и механических свойств грунтоцемента на основе однородных песков одной фракции // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. 2024. № 2 (59). С. 96–108. DOI: 10.24866/2227-6858/2024-2/96-108. EDN NCBKSC.
2. Inazumi S., Shakya S. A Comprehensive Review of Sustainable Assessment and Innovation in Jet Grouting Technologies // Sustainability. 2024. Vol. 16. Issue 10. P. 4113. DOI: 10.3390/su16104113
3. Wang Z., Shen S., Ho C., Kim Y. Jet Grouting Practice: an Overview // ICE Proceedings Geotechnical Engineering. 2013. Vol. 44. Issue 4. Pp. 88–96.
4. Yamazaki J., Chao K.C., Wong R., Wang M. Development of the Jet Grouting Method: Evolutionary History, Mechanism Insights, Innovative Approaches, and Future Prospects // Geotechnical Engineering. 2024. Vol. 55. Issue 1. Pp. 11–23. DOI: 10.14456/seagi.2024.2
5. Разводовский Д.Е., Зехниев Ф.Ф., Внуков Д.А. Применение Jet-Grouting для усиления фундаментов и грунта основания. Ретроспектива // Усиление оснований и фундаментов : сб. докл. тр. VIII Петрухинских чтений. 2024. С. 124–144. DOI: 10.37538/2713-1149-2024-124-144. EDN DIJZBW.
6. Njock P.G.A., Chen J., Modoni G., Arulrajah A., Kim Y.H. A review of jet grouting practice and development // Arabian Journal of Geosciences. 2018. Vol. 11. Issue 16. DOI: 10.1007/s12517-018-3809-7
7. Hasan M., Qazi A., Sharma A., Raj A., Dogra S. A critical review on jet grouting used in ground improvement techniques // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2023. Vol. 1110. Issue 1. P. 012094. DOI: 10.1088/1755-1315/1110/1/012094
8. Маковецкий О.А., Зуев С.С., Корчагин И.С. Использование специальных геотехнических технологий в портовом строительстве // Гидротехника. 2024. № 4 (77). С. 82–86. EDN OWEOCG.
9. Моргунов К.П. Оценка результатов работ по укреплению грунтов основания шлюза № 5 Волго-Донского судоходного канала и предложения по стабилизации положения его камеры // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова. 2023. Т. 15. № 5. С. 806–819. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-5-806-819. EDN KIKPIV.
10. Горгуца Р.Ю., Лисовский С.В. Применение современных методов реконструкции причальных сооружений типа бульверк без вывода из эксплуатации // Гидротехника XXI век. 2020. № 3 (43). С. 49–51.
11. Николаевский М.Ю., Горгуца Р.Ю., Соколов А.В. Реконструкция причалов типа «бульверк» путем изменения характера работы сооружения

- с спорного на гравитационное // Гидротехника XXI век. 2014. № 1 (17). С. 48–53.
12. Малинин А.Г. Струйная цементация грунтов. М. : Стройиздат, 2010. 165 с.
13. Богов С.Г. Закрепление грунта по струйной технологии для реконструкции зданий // Жилищное строительство. 2014. № 9. С. 51–55. EDN SMVCPV.
14. Croce P., Flora A., Modoni G. Jet Grouting: Technology, Design and Control. London : CRC Press, 2014. DOI: 10.1201/b16411
15. Phantachang T., Kererat C., Homwouettiwong S. Enhancing Soil Stabilization: The Influence of Cement and Polymer Additives on the Strength and Performance of Soil-Cement Composites for Unpaved Roads // Revue des composites et des matériaux avancés. 2024. Vol. 34. Issue 6. Pp. 719–727. DOI: 10.18280/rvma.340606
16. Dang V.Q., Chau V.N., Ganja C.S., Ho L.S. Mechanical properties and microstructures of cement-treated soils : a review // Journal of Science and Transport Technology. 2023. Pp. 53–70. DOI: 10.58845/jstt.utt.2023.en.3.4.53-70
17. Spagnoli G., Oreste P. Statistical Interpretation of Jet Grouting Field Data Regarding Its Strength and Stiffness // Geotechnical and Geological Engineering. 2025. Vol. 43. Issue 1. DOI: 10.1007/s10706-024-03008-8
18. Qian X., Zhang P., Wang S., Guo S., Hou X. Grouting Additives and Information-Based Construction of Jet Grouting in the Water-Rich Sand Stratum // Applied Sciences. 2022. Vol. 12. Issue 24. P. 12586. DOI: 10.3390/app122412586
19. Глебова Ю.М., Носырев В.В. Прочностные характеристики илов дельты р. Северной Двины, стабилизованных цементным раствором // Проблемы недропользования. 2023. № 2 (37). С. 57–65. DOI: 10.25635/2313-1586.2023.02.057. EDN RLLCRX.
20. Малинин А.Г., Жемчугов А.А., Гладков И.Л. Определение физико-механических свойств грунтоцемента в ходе натурных исследований // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. 2011. № 1. С. 325–330. EDN OITGXJ.

Поступила в редакцию 16 июля 2025 г.

Принята в доработанном виде 29 июля 2025 г.

Одобрена для публикации 29 октября 2025 г.

**О Б А Т О Р АХ:** Андрей Александрович Красилов — аспирант департамента морских арктических технологий; Дальневосточный федеральный университет (ДВФУ); 690922, г. Владивосток, о. Русский, п. Аякс, 10; SPIN-код: 7440-5303, РИНЦ ID: 1286062; krasilov.aa@dvgfu.ru;

Александр Тевьевич Беккер — доктор технических наук, профессор департамента морских арктических технологий; Дальневосточный федеральный университет (ДВФУ); 690922, г. Владивосток, о. Русский, п. Аякс, 10; SPIN-код: 3956-2515, РИНЦ ID: 119808, Scopus: 35610298200, ResearcherID: AAB-8482-2020, ORCID: 0000-0002-2899-7995; abekker@mail.ru;

Цзянь Чжан — кандидат технических наук, директор института судостроения и океанотехники; Цзянсунский университет науки и технологий; г. Чжэнъцзян, Китайская Народная Республика; justzj@just.edu.cn;

Сяолунь Бай — кандидат технических наук, доцент, заведующий лаборатории; Цзянсунский университет науки и технологий; г. Чжэнъцзян, Китайская Народная Республика; baixiaolong2000@163.com.

Вклад авторов:

Красилов А.А. — концепция исследования, разработка и реализация программы исследований, написание исходного текста, итоговые выводы.

Беккер А.Т. — научное руководство, доработка текста, итоговые выводы.

Цзянь Чжан — научное сопровождение.

Сяолунь Бай — научное сопровождение.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

## REFERENCES

1. Bekker A.T., Krasilov A.A., Zverev A.A., Chigrov E.V. Experimental studies of the physical and mechanical properties of soil-cement based on homogeneous sands of one fraction. *FEFU: School of Engineering Bulletin*. 2024; 2(59):96-108. DOI: 10.24866/2227-6858/2024-2/96-108. EDN NCBKSC. (rus.).
2. Inazumi S., Shakya S. A Comprehensive Review of Sustainable Assessment and Innovation in Jet Grouting Technologies. *Sustainability*. 2024; 16(10):4113. DOI: 10.3390/su16104113
3. Wang Z., Shen S., Ho C., Kim Y. Jet Grouting Practice: an Overview. *ICE Proceedings Geotechnical Engineering*. 2013; 44(4)88-96.
4. Yamazaki J., Chao K.C., Wong R., Wang M. Development of the Jet Grouting Method: Evolutionary History, Mechanism Insights, Innovative Approaches,

- and Future Prospects. *Geotechnical Engineering*. 2024; 55(1):11-23. DOI: 10.14456/seagj.2024.2
5. Razvodovsky D.E., Zekhniev F.F., Vnukov D.A. The usage of jet-grouting technology for strengthen foundations and base soil. Retrospective. Strengthening of Foundations and Base Soils : Collection of Reports. *Proceedings of the VIII Petrukhin Readings*. 2024; 124-144. DOI: 10.37538/2713-1149-2024-124-144. EDN DIJZBW. (rus.).
6. Njock P.G.A., Chen J., Modoni G., Arulrajah A., Kim Y.H. A review of jet grouting practice and development. *Arabian Journal of Geosciences*. 2018; 11(16). DOI: 10.1007/s12517-018-3809-7
7. Hasan M., Qazi A., Sharma A., Raj A., Dogra S. A critical review on jet grouting used in ground improvement techniques. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2023; 1110(1):012094. DOI: 10.1088/1755-1315/1110/1/012094
8. Makovetskiy O.A., Zuev S.S., Korchagin I.S. Special geotechnical technologies application in port construction. *The Hydrotechnika*. 2024; 4(77):82-86. EDN OWEOCG. (rus.).
9. Morgunov K.P. Assessing the results of work on strengthening the soils of the foundation of lock No. 5 of the Volga-Don shipping canal and proposals for stabilizing the chamber position. *Vestnik Gosudarstvennogo Universiteta Morskogo i Rechnogo Flota Imeni Admirala S.O. Makarova*. 2023; 15(5):806-819. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-5-806-819. EDN KIKPIV. (rus.).
10. Gortsuga R.Yu., Lisovsky S.V. Application of modern methods of reconstruction of berthing structures of the bolverk type without withdrawal from operation. *Hydraulic Engineering XXI Century*. 2020; 3(43):48-51. (rus.).
11. Nikolaevskiy M.Yu., Gorgutsa R.Yu., Sokolov A.V. Reconstruction of “Dolphin” Type Wharves by Changing the Structural Behavior from Arch-Type to Gravity-Type. *Hydraulic Engineering XXI Century*. 2014; 1(17):48-53. (rus.).
12. Malinin A.G. *Jet Grouting*. Moscow, Stroyizdat, 2010; 165. (rus.).
13. Bogov S.G. Fixing of soil on jet technology for reconstruction of buildings. *Housing Construction*. 2014; 9:51-55. EDN SMVCPV. (rus.).
14. Croce P., Flora A., Modoni G. *Jet Grouting: Technology, Design and Control*. London, CRC Press, 2014. DOI: 10.1201/b16411
15. Phantachang T., Kererat C., Homwouttiwong S. Enhancing Soil Stabilization: The Influence of Cement and Polymer Additives on the Strength and Performance of Soil-Cement Composites for Unpaved Roads. *Revue des composites et des matériaux avancés*. 2024; 34(6):719-727. DOI: 10.18280/rcma.340606
16. Dang V.Q., Chau V.N., Ganja C.S., Ho L.S. Mechanical properties and microstructures of cement-treated soils : a review. *Journal of Science and Transport Technology*. 2023; 53-70. DOI: 10.58845/jstt.utt.2023.en.3.4.53-70
17. Spagnoli G., Oreste P. Statistical Interpretation of Jet Grouting Field Data Regarding Its Strength and Stiffness. *Geotechnical and Geological Engineering*. 2025; 43(1). DOI: 10.1007/s10706-024-03008-8
18. Qian X., Zhang P., Wang S., Guo S., Hou X. Grouting Additives and Information-Based Construction of Jet Grouting in the Water-Rich Sand Stratum. *Applied Sciences*. 2022; 12(24):12586. DOI: 10.3390/app122412586
19. Glebova Ju.M., Nosyrev V.V. Shear strength characteristics of the cement-stabilized soft clayey soils of the Northern Dvina delta. *Problems of Subsoil Use*. 2023; 2(37):57-65. DOI: 10.25635/2313-1586.2023.02.057. EDN RLLCRX. (rus.).
20. Malinin A.G., Gladkov I.L., Zhemchugov A.A. Defining of physical and mechanical characteristics of soil-concrete in the course of in-situ testing. *Izvestiya Tula State University*. 2011; 1:325-330. EDN OITGXJ. (rus.).

Received July 16, 2025.

Adopted in revised form on July 29, 2025.

Approved for publication on October 29, 2025.

**BIONOTES:** Andrey A. Krasilov — postgraduate student of the Department of Marine Arctic Technologies; **Far Eastern Federal University (FEFU)**; 10 Ajax Settlement, Russky Island, Vladivostok, 690922, Russian Federation; SPIN-code: 7440-5303, ID RSCI: 1286062; krasilov.aa@dvgfu.ru;

Aleksandr T. Bekker — Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Marine Arctic Technologies; **Far Eastern University (FEFU)**; 10 Ajax Settlement, Russky Island, Vladivostok, 690922, Russian Federation; SPIN-code: 3956-2515, ID RSCI: 119808, Scopus: 35610298200, ResearcherID: AAB-8482-2020, ORCID: 0000-0002-2899-7995; abekker@mail.ru;

Jian Zhang — Candidate of Technical Sciences, Director of the Institute of Shipbuilding and Ocean Engineering; **Jiangsu University of Science and Technology**; Zhenjiang, Republic of China; justzj@just.edu.cn;

Xiaolong Bai — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the laboratory; **Jiangsu University of Science and Technology**; Zhenjiang, Republic of China; baixiaolong2000@163.com.

*Contribution of the authors:*

*Andrey A. Krasilov — research concept, development and implementation of a research program, writing of the source text, final conclusions.*

*Aleksandr T. Bekker — scientific guidance, revision of the text, final conclusions.*

*Jian Zhang — scientific support.*

*Xiaolong Bai — scientific support.*

*The authors declare that there is no conflict of interest.*