



Строительные материалы и изделия Construction Materials and Products

ISSN
2618-7183

journal homepage: <https://bstu-journals.ru>

DOI: 10.58224/2618-7183-2023-6-4-15-29



Инъекционные растворы на композиционных цементях для закрепления грунтов

Панарин И.И. ¹, Федюк Р.С. ^{1,2}, Выходцев И.А. ¹,
Вавренюк С.В. ², Ключев А.В. * ³

¹ Дальневосточный федеральный университет, Россия,

² Филиал ФГБУ "ЦНИИП Минстроя России Дальневосточный научно-исследовательский,
проектно-конструкторский и технологический институт по строительству, Россия

³ Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, Россия

*Ответственный автор E-mail: Klyuyevav@yandex.ru

Аннотация: закрепление просадочных грунтов является важной практической научно-технической задачей, позволяющей осуществлять строительные и ремонтные работы на слабых (просадочных) грунтах оснований. Разработаны композиционные цементы (КЦ), включающие алюмосиликаты (АС), полученные обогащением золошлаковой смеси (до 65 мас. %), портланд-цементный клинкер и гипс. На основе разработанных КЦ создана широкая номенклатура инъекционных растворов с водовязкими отношениями от 1,0 до 2,0, включающих отсеб гранитного щебня с модулем крупности 0,7. Разработанные инъекционные растворы способны эффективно закреплять грунты оснований подземных сооружений, обеспечивая прочность грунтобетонного массива до 25,6 МПа с модулем деформации 10,1 ГПа. По данным седиментационного анализа растворов видно, что эти материалы обладают процентом водоотделения от 22,5 при В/В=1 до 36,5% при В/В=2. При этом показатели вязкости этих материалов говорят о высокой проникающей способности, так как время истечения растворов через вискозиметр Марша для растворов ИР5 и ИР6 составляет 39 и 40 секунд при В/В=1,5 и В/В=2, соответственно. Эффект повышения плотности инъекционных растворов на композиционном цементе в возрасте 28 суток, был максимальным при дозировке АС 45% по массе, далее он снижался с ростом содержания алюмосиликатной составляющей. Отмечаются высокие отношения значений прочностных свойств во вторые сутки к аналогичным показателям в марочном возрасте: для прочности при сжатии 0,24 (0,20-0,22 у бездобавочных клинкерных композиций), для прочности при изгибе 0,16 (0,15 у бездобавочных клинкерных составов; при этом при повышении содержания АС выше 45% это отношение снижается до 0,14). Высокая ранняя прочность позволяет эффективно применять инъекционные растворы для срочного закрепления грунтов в ходе ремонта подземных сооружений.

Ключевые слова: эксплуатация, грунт, надежность, сейсмостойкость, усиление, технология, инъекционный раствор

Для цитирования: Панарин И.И., Федюк Р.С., Выходцев И.А., Вавренюк С.В., Ключев А.В. Инъекционные растворы на композиционных цементах для закрепления грунтов // Строительные материалы и изделия. 2023. Том 6. № 4. С. 15 – 29. DOI: 10.58224/2618-7183-2023-6-4-15-29

Injection mortars based on composite cements for soil fixation

Panarin I.I.¹, Fediuk R.S.^{1,2}, Vykhodtsev I.A.¹,
Vavrenyuk S.V.², Klyuev A.V. *³

¹ Far Eastern Federal University, Russia,

² Branch of the Central Research and Design Institute of the Ministry of Construction
and Housing and Communal Services of the Russian Federation, Russia

³ Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, Russia

*Corresponding author: E-mail: Klyuyevav@yandex.ru

Abstract: the fixation of subsidence soils is an important practical scientific and technical task, which makes it possible to carry out construction and repair work on weak (subsidence) base soils. Composite cements (CC) have been developed, including aluminosilicates (AS), obtained by enrichment of ash and slag mixture (up to 65 wt.%), Portland cement clinker and gypsum. Based on the developed CC, a wide range of injection solutions with water-binding ratios from 1.0 to 2.0, including screening of crushed granite from 0.7 fineness modules, has been created. The developed injection mortars are capable of effectively fixing the soils of the foundations of underground structures, providing the strength of the soil-concrete mass up to 25.6 MPa with a deformation modulus of 10.1 GPa. According to the sedimentation analysis of solutions, it can be seen that these materials have a percentage of water separation from 22.5% at W/B=1 to 36.5% at W/B=2. At the same time, the viscosity indicators of these materials indicate a high penetrating ability, since the time of the expiration of mortars through a Marsh viscometer for mortars IR5 and IR6 is 39 and 40 seconds at W / B = 1.5 and W / B = 2, respectively. The effect of increasing the density of injection mortars on composite cement at the age of 28 days was maximum at an AS dosage of 45% by weight, then it decreased with an increase in the content of the aluminosilicate component. There are high ratios of the values of strength properties on the second day to similar indicators in the 28-days age: for compressive strength 0.24 (0.20-0.22 for additive-free clinker compositions), for flexural strength 0.16 (0.15 for additive-free clinker compositions; while increasing the AS content above 45%, this ratio decreases to 0.14). High early strength makes it possible to effectively use injection mortars for urgent fixing of soils during the repair of underground structures.

Keywords: operation, soil, reliability, seismic resistance, weakening, technology, injection mortar

Please cite this article as: Panarin I.I., Fediuk R.S., Vykhodtsev I.A., Vavrenyuk S.V., Klyuev A.V. Injection mortars based on composite cements for soil fixation. Construction materials and products. 2023. 6 (4.) P. 15 – 29. DOI: 10.58224/2618-7183-2023-6-4-15-29

ВВЕДЕНИЕ

В результате анализа литературных данных и собственных обследований установлено аварийное состояние многих подземных сооружений [1-5]. Налицо важность восстановления функциональной пригодности этих объектов, в том числе и для возможности эксплуатации по двойному назначению, для чего необходимо проведение комплекса ремонтных мероприятий с применением новых строительных материалов (в том числе и для закрепления грунтов). Установлено, что только усиление несущих стен при сохранении слабых грунтов оснований не является эффективным. Инъекционное закрепление грунтов цементирующими составами позво-

ляет значительно улучшить технические характеристики оснований, что будет способствовать комплексному ремонту подземных сооружений.

Усиление грунтобетонного массива, в котором расположено подземное сооружение, происходит в результате нагнетания раствора на цементном или тонкодисперсном минеральном вяжущем, что позволяет выдерживать воздействие сейсмозрывной волны. Геометрические параметры закрепляемого массива определяются из учета несущей способности конструктивных элементов подземного защитного объекта и вида применяемых цементных или тонкодисперсных минеральных растворов.

Разработкой материалов и совершенствованием технологии укрепления грунтов занимались И.Я. Харченко [6], Н.А. Коновалова [7], С.-А.Ю. Муртазаев [8-9]. Классификация методов укрепления грунтов приведена на рис. 1.

Конструктивные методы укрепления грунтов являются достаточно сложными и трудоемкими [10]. Один из таких методов заключается в армировании грунтобетонного массива геотекстильными ленточными элементами или матами или же стальной арматурой [11]. Шпунтовое ограждение представляет собой сплошную стенку, составленную из одинаковых элементов, соединенных друг с другом [12]. Устройство насыпей (боковые пригрузки) выполняется, чаще всего, с применением плотных горных пород [13].

Механические способы закрепления грунтов подразделяются на глубинные и поверхностные [74]. Технология пробивки скважин (грунтовые сваи) наиболее характерна для глубинного уплотнения и представляет собой проделывание скважин с применением ударного снаряда, который уплотняет грунт, вытесняя его в разные стороны и создавая вокруг массива уплотненные зоны [15]. Пробивка скважин со взрывами позволяет обеспечить более высокую степень уплотнения грунтов, но, при этом, повышается трудоемкость и опасность [16]. Глубинное виброуплотнение (гидровиброуплотнение) применяют для уплотнения рыхлых песчаных грунтов естественного залегания, а также при укладке насыпных несвязных грунтов, устройстве обратных засыпок и т.п. [17] Предварительное замачивание и замачивание с глубинными взрывами осуществляется в котловане глубиной до 80 см и шириной не менее 20 м [18].

Физические методы укрепления грунтов полагают под собой использование сложного и дефицитного оборудования. Термическое закрепление грунта представляет собой преобразование структурных связей в грунте под воздействием высоких температур [19]. Другим физическим методом является электрохимическое закрепление грунтов, базирующееся на позициях принципов электроосмоса: при прохождении постоянного электрического тока через глинистый грунт, последний лишается физически связанной воды, мигрирующей в направлении катода [20]. Метод замачивания является весьма ограниченным, используя только для лессовых грунтов [21]. В этом случае происходит разрушение структуры грунта, приводя к его просадке под действием собственного веса, что, в свою очередь, способствует его уплотнению. Водопонижение обеспечивает снижение уровня грунтовых вод ниже дна будущей выемки [22].

Замораживание грунтов применяют в сильноводонасыщенных грунтах [23]. Для закрепления дисперсных грунтов с коэффициентом фильтрации $k_F = 0,01-0,1$ м/сут применяется метод электросиликатизации [24].

Наиболее эффективным из всех способов закрепления грунтов является инъекционное цементирующими составами, что позволяет значительно улучшить технические характеристики оснований. Инъекционная цементация практически не изменяет структуру грунтового массива, что выгодно отличает этот метод от сложных физических методов. В данном случае инъекционные составы формируют в грунте прочные структурные связи, что способствует его упрочнению, уменьшая сжимаемость, водопроницаемость и чувствительность к колебанию параметров окружающей среды [25].

Целью работы является разработка армированных торкрет-бетонов и исследование их для усиления подземных сооружений.

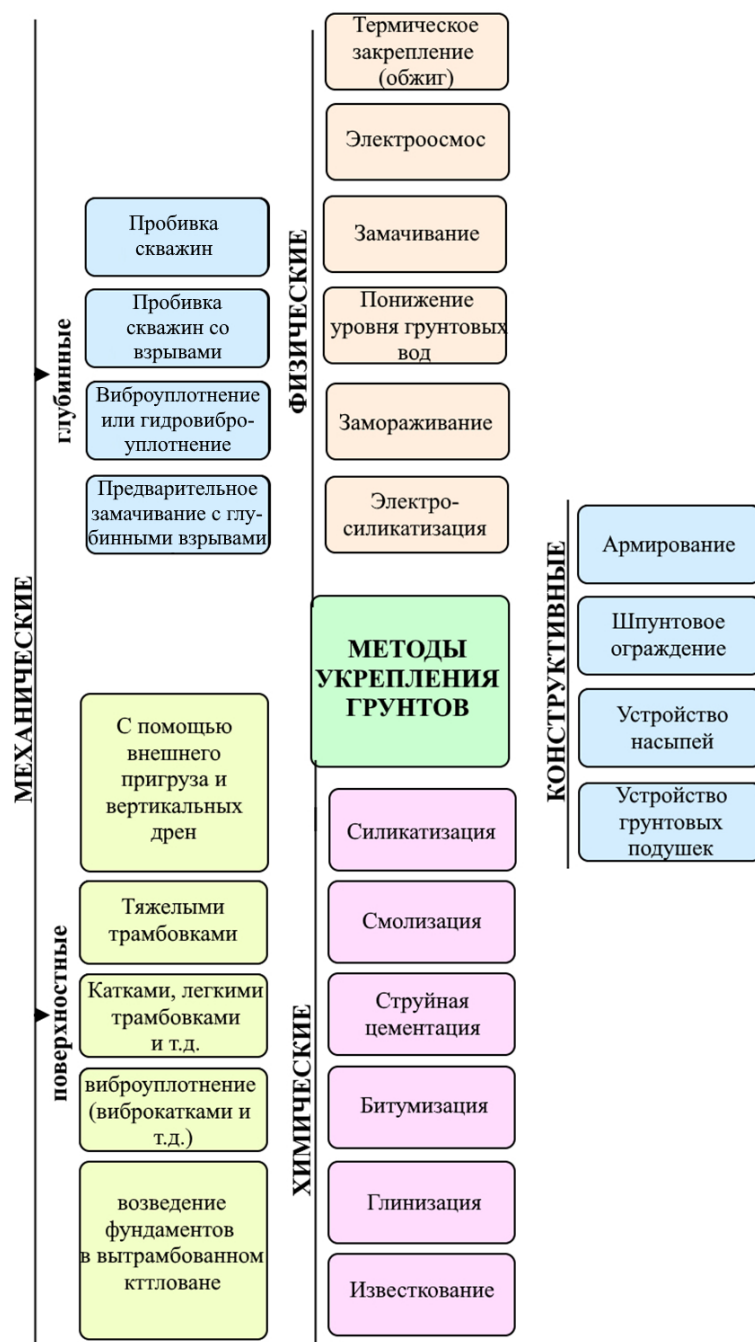


Рис. 1. Методы закрепления грунтов

Fig. 1. Soil stabilization methods

МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

В качестве основы композиционного цемента выступал портландцементный клинкер (АО «Спасскцемент») (рис. 2 а, табл. 1). Как компонент композиционного цемента применялись алюмосиликаты, полученные обогащением золошлаковых смесей (ЗШС) Приморской ГРЭС с применением флотации и магнитной сепарации (рис. 2 б). Для регулирования сроков схватывания добавлялся молотый гипсовый камень (двуводный гипс) в количестве 5% от массы клинкера (рис. 2 в).



Рис. 2. Компоненты КЦ: а) портландцементный клинкер, б) алюмосиликаты, в) двуводный гипс
Fig. 2. CC components: a) Portland cement clinker, б) aluminosilicates, c) dihydrate gypsum

Таблица 2. Состав клинкера, мас. %
Table 2. Composition of the clinker, wt. %

Химический состав						Минералогический состав			
CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO _{св}	C3S	C2S	C4AF	C3A
64,5	22,6	6,4	3,8	1,8	0,9	57,5	23,6	16,8	2,1

В качестве мелкого заполнителя использовался полифракционный отсев гранитного щебня (ОГЩ) карьеров Приморского края с модулем (рис. 3).



Рис. 3. Внешний вид отсева дробления гранитного щебня
Fig. 3. Appearance of granite crushing screening

Важным в современных санкционных геополитических условиях является то, что используемое сырье – российского производства (и что особо важно, многие из них являются отходами промышленности).

На первом этапе, сырье, перечисленное на рис. 1, применялось для проектирования композиционных цементов, путем совместного измельчения в вибрационном помольном агрегате до достижения удельной поверхности 450 м²/кг (табл. 3).

Таблица 3. Составы и активность композиционных цементов
Table 3. Compositions and activity of composite cements

Маркировка	Состав			Активность, МПа 28 суток	Прирост актив- ности по отно- шению к контро- лю, %	
	Вяжущая ос- нова, мас. %		Гипс, % от массы клинкера			
	Клинкер	АС				
Ц1	100	-	5	-	45,9	-
Ц2	100	-		-	55,2	17
КЦ-15*	85	15		0,25	56,7	24
КЦ-25	75	25		0,5	59,2	29
КЦ-35	65	35		0,75	67,7	47
КЦ-45	55	45		1	61,2	33
КЦ-55	45	55		1,25	56,1	22
КЦ-65	35	65		1,5	51,6	12

Из разработанных композиционных цементов, измельчённых до удельной поверхности 450 м²/кг, разработана широкая номенклатура инъекционных растворов (табл. 4). Замещение портландцементного клинкера АС колебалось в диапазоне 45-65 мас. % при водоцементном отношении от 1 до 2 и соотношении вяжущего к заполнителю 1 к 3.

Таблица 4. Номенклатура разработанных растворов
Table 4. Nomenclature of developed mortars

Маркировка	Расход, кг на 1 куб. м					В/Ц
	Клинкер	АС	Гипс	Вода	Отсев (Мкр=0,7)	
ИР1(Ц2)	450	-	22,5	472,5	1350	1,0
ИР2(Ц2)	450	-	22,5	708,8	1350	1,5
ИР3(Ц2)	450	-	22,5	945	1350	2,0
ИР4(КЦ-45)	247,5	202,5	12,4	464,4	1350	1,0
ИР5(КЦ-45)	247,5	202,5	14,4	696,6	1350	1,5
ИР6(КЦ-45)	247,5	202,5	14,4	928,8	1350	2,0
ИР7(КЦ-55)	202,5	247,5	10,1	460,1	1350	1,0
ИР8(КЦ-55)	202,5	247,5	10,1	690,1	1350	1,5
ИР9(КЦ-55)	202,5	247,5	10,1	920,2	1350	2,0
ИР10(КЦ-65)	157,5	292,5	7,9	457,9	1350	1,0
ИР11(КЦ-65)	157,5	292,5	7,9	686,8	1350	1,5
ИР12(КЦ-65)	157,5	292,5	7,9	915,8	1350	2,0

Вискозиметр Марша применялся для исследования вязкости раствора. Технологические характеристики оценивались по значениям осадки и расплыва конуса. В результате деления массы растворных кубических образцов с ребром 10 см на их объем определялась их плотность. Прочностные свойства изучались на призмах размером 40×40×160 мм (прочность на растяжение при изгибе) и кубах с ребром 100 мм (прочность на сжатие). Механические свойства грунтобетона оценивались на образцах-цилиндрах грунтобетона (песчанистые твердые суглинки) диаметром 200 мм и высотой 400 мм с искусственной структурой. Достоверность результатов обеспечивалась применением нормативных методик проведения экспериментов, современного поверенного лабораторного оборудования и шести образцов каждой серии для каждого испытания.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ

В связи с высоким водовязующим отношением были получены литые растворы, которые являются эффективными для удобства инъекционного закрепления грунтов табл. 5.

Таблица 5. Показатели вязкости и водоотделения инъекционных растворов
Table 5. Indicators of viscosity and sedimentation of injection mortars

Состав	Вязкость, с	Водоотделение с течением времени в минутах, %							
		15	30	45	60	75	90	120	150
ИР1	37	0,4	0,5	1,5	2,5	3,5	4,5	6,5	12,5
ИР2	35	0,5	1,5	3,5	4,5	5,5	6,5	7,5	13,5
ИР3	32	1	2	3,5	4,8	5,9	6,7	7,9	14,0
ИР4	40	0,5	1	1,5	1,8	2,5	3,0	3,5	6,5
ИР5	39	1	1,5	2	2,5	3,0	3,3	3,6	7,5
ИР6	33	1,2	1,5	2,5	3,6	4,5	5	5,5	10,5
ИР7	37	0,5	1,2	1,8	2,2	2,9	3,7	3,9	6,4
ИР8	36	0,8	1,3	2,1	2,7	3,8	4,6	4,8	7,3
ИР9	35	1,5	2,5	3,5	4,5	6,5	6,5	8,5	13,5
ИР10	35	0,5	1	1,5	1,8	2,3	2,8	3,0	6,3
ИР11	34	0,7	1,4	1,7	2,0	2,4	2,9	3,1	7,6
ИР12	32	1,5	2,5	3,5	4,5	5,5	6,5	8,5	16,0

По результатам, приведенным в табл. 5, установлено, что разработанные растворы обладают процентом водоотделения от 6,3 при В/В=1 до 16,0% при В/В=2. Согласно классификации ГОСТ Р 59538-2021 разработанные инъекционные растворы относятся к стабильным (В/В=1-1,5) и условно стабильным В/В=2.

При этом показатели вязкости этих материалов говорят о высокой проникающей способности, так как время истечения растворов через вискозиметр Марша для растворов ИР5 и ИР6 составляет 39 и 33 секунды при В/В=1,5 и В/В=2, соответственно. При этом, согласно ГОСТ 59538-2021, все полученные растворы характеризуются маркой по подвижности П4 (осадка конуса больше 30 см). Начало схватывания составляет не менее 75 минут, что позволяет осуществлять эффективное закрепление грунтов.

Выявлено уплотнение свежего инъекционного раствора с ростом содержания АС в КЦ (табл. 6), причиной чему является заполнение тонкими зернами композиционного цемента пустот, которые образуются в процессе гидратации.

Таблица 6. Развитие плотности инъекционных растворов
Table 6. Development of the injection mortars density

№ состава	Средняя плотность смеси, кг/м ³	Средняя плотность на 28 сутки, кг/м ³
ИР1	2048	2062
ИР2	2050(+0,1%)	2064(+0,1%)
ИР3	2052(+0,2%)	2066(+0,2%)
ИР4	2112(+3,1%)	2190(+6,2%)
ИР5	2113(+3,1%)	2192(+6,3%)
ИР6	2116(+3,2%)	2196(+6,5%)
ИР7	2128(+3,9%)	2138(+3,7%)
ИР8	2132(+4,1%)	2126(+3,1%)
ИР9	2136(+4,3%)	2132(+3,4%)
ИР10	2149(+4,9%)	2072(+0,5%)
ИР11	2154(+5,1%)	2074(+0,5%)
ИР12	2159(+5,3%)	2070(+0,4%)

Эффект повышения плотности инъекционных растворов на композиционном цементе в возрасте 28 суток, был максимальным при дозировке АС 45% по массе, далее он снижался с ростом содержания алюмосиликатной составляющей.

Эффект повышения прочности при сжатии инъекционных растворов на композиционном цементе, был максимальным при дозировке АС 45 мас. %, показывая максимальные значения в ранние сроки твердения, например, у двухсуточного образца упрочнение на осевое сжатие в сравнении с контрольным составом составляло 25%, а на растяжение при изгибе достигало 50%. Дополнительное доказательство заключается в повышенных отношениях прочности на сжатие и на растяжение при изгибе во 2-е и 28-е сутки: на осевое сжатие 0,24 (0,20-0,22 для контрольных образцов, на изгиб 0,16 (0,15 для контрольного образца; при этом при повышении содержания АС выше 45% это отношение снижается до 0,14). Повышенные значения ранней прочности открывают широкие перспективы использования инъекционных растворов для быстрой цементации оснований при усилении подземных объектов (табл. 7).

У семисуточных образцов приращение прочности в определенной мере стабилизируется, снижаясь до 6% и 8% (сжатие и изгиб, соответственно) сравнительно с контрольным образцом. Вместе с тем отношение прочностей при изгибе и сжатии (которое характеризует трещиностойкость материала) на 7 сутки (0,12) такое же, как и у бездобавочных составов, несмотря на применение 65 % по массе отходов производства. Оптимальный состав ИР5 на 2-е сутки характеризуется отношением 0,16; на 7-е - 0,12; а на двадцать восьмые - 0,13, что не только не ниже этих характеристик для традиционных портландцементных бетонов [26-30], но и для некоторых полученных материалов даже их превосходит.

Выявлено, что упрочнение цементных композитов интенсифицируется в сравнении с бездобавочными составами в результате положительного влияния химического модификатора и полиминеральных компонентов, приводя к снижению водопотребности и ускорению гидратации клинкерных минералов и с повышением кинетики тепловыделения. Повышение плотности микроструктуры является причиной уменьшения содержания капиллярных пор, и, как следствие, и газо- и водопроницаемости цементного композита. Все вместе это предопределяет рост всего комплекса эксплуатационных характеристик.

Таким образом, разработанные инъекционные растворы способны обеспечить необходимую степень усиления просадочных грунтов.

Одними из главнейших оцениваемых параметров цементационно закрепленных оснований строительных объектов служат прочности на сжатие и модуль деформации. Исследование этих характеристик осуществлялось путем инъектирования растворов в образцы грунта цилиндрической формы с искусственной структурой, моделирующей суглинки двух видов. Адекватность этих исследований заключается в том, что при инъектировании грунтобетонных массивов модификация на физическом и химическом уровнях происходит, в первую очередь, в микроагрегатной части массива. Соответственно это приводит к тому, что прочностные свойства лабораторных грунтобетонов с естественной и искусственной структурой являются близкими между собой. С точки зрения практических исследований важным является то, что лабораторные образцы, обладающие искусственной структурой достаточно несложно изготовить любых размеров и в любом количестве, и, кроме того, провести моделирование грунтовых оснований различной конфигурации, учитывая требования ГОСТ.

Инъекционное закрепление лабораторных грунтовых образцов растворами осуществляется следующим образом. В заранее приготовленные цилиндры, которые герметично посажены на основание с патрубком для введения раствора, загружают грунт, который послойно уплотняют каждые пять сантиметров толщины. После этого цилиндр накрывают крышкой с применением стяжек. На этой крышке расположен патрубок, соединенный с подводным шлангом растворной нагнетательной установки с датчиком давления. Защита лабораторного грунтового образца от разрушения в процессе инъектирования, а также равномерное распределение раствора в грунте обеспечивается применением сеток. После этого осуществляют наполнение бункера инъекционным раствором, регулируя давление в диапазоне от одной до четырех атмосфер (допустимый максимум составляет 4,3 атм.). Закончив инъектирование, лабораторные грунтобетонные цилиндры выдерживаются при +18°C на протяжении 28 суток, после чего подвергаются испытаниям (табл. 8)

Таблица 7. Механические свойства инъекционных растворов
Table 7. Mechanical properties of the injection mortars

Свойства	ИР1	ИР2	ИР3	ИР4	ИР5	ИР6	ИР7	ИР8	ИР9	ИР10	ИР11	ИР12
Предел прочности при сжатии, МПа	17,9	17,3	17,0	21,5	22,4	19,3	22,1	21,5	21,2	21,9	20,8	19,7
на 2 сутки		(-3%)	(-5%)	(+20%)	(+25%)	(+8%)	(+23%)	(+20%)	(+18%)	(+22%)	(+16%)	(+10%)
на 7 сутки	31,7	30,8	30,6	32,4	33,7	31,5	33,5	32,8	32,1	32,3	1,6	31,2
		(-3%)	(-3%)	(+2%)	(+6%)	(-1 %)	(+6%)	(+3%)	(+1%)	(+2%)	(-1%)	(-2%)
на 28 суток	54,1	53,8	55,0	61,2	68,1	63,3	67,0	67,4	69,1	61,3	67,3	65,2
		(-1%)	(-2%)	(+13%)	(+26%)	(+17%)	(+24%)	(+25%)	(+28%)	(+13%)	(+25%)	(+20%)
$R_{сж}^2 / R_{сж}^{28}$	0,33	0,32	0,31	0,35	0,33	0,30	0,33	0,32	0,31	0,36	0,31	0,30
Предел прочности при изгибе, МПа	1,8	1,7	1,6	2,6	2,7	1,9	2,2	2,2	2,2	2,2	2,1	1,9
на 2 сутки		(-6%)	(-12%)	(+44%)	(+50%)	(+6%)	(+22%)	(+22%)	(+22%)	(+22%)	(+17%)	(+6%)
на 7 сутки	3,8	3,7	3,7	3,9	4,1	3,8	4,0	3,9	3,9	3,9	,8	3,7
		(-1 %)	(-1 %)	(+1%)	(+8%)		(+5%)	(+1%)	(+1%)	(+1%)		(-1 %)
на 28 суток	7,0	7,0	7,1	8,0	8,6	7,6	8,0	8,1	8,3	8,0	7,8	7,3
			(+1%)	(+14%)	(+23%)	(+9%)	(+14%)	(+16%)	(+19%)	(+14%)	(+11%)	(+4%)
$R_{из}/R_{сж}, 2 \text{ сут.}$	0,10	0,10	0,09	0,12	0,12	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10
$R_{из}^2 / R_{сж}^{28}$	0,26	0,24	0,23	0,27	0,32	0,25	0,28	0,27	0,26	0,28	0,27	0,26
$R_{из}/R_{сж}, 7 \text{ сут.}$	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12
$R_{из}/R_{сж}, 28 \text{ сут.}$	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12

Таблица 8. Прочностные и деформационные свойства грунтобетонов
Table 8. Strength and deformation properties of soil concrete

Состав	Прочность при сжатии, МПа	Модуль деформации, МПа
ИР1	10,1	2250
ИР2	11,3	3350
ИР3	12,4	3850
ИР4	22,3	9450
ИР5	25,6	10250
ИР6	24,3	9850
ИР7	19,1	7750
ИР8	20,6	8250
ИР9	18,7	7250
ИР10	14,2	5950
ИР11	15,3	6350
ИР12	13,1	4350

Рис. 4 наглядно демонстрирует корреляцию модуля деформации от прочности при сжатии лабораторных грунтобетонных образцов (суглинки двух видов): прослеживается закономерный рост модуля деформации при повышении прочности при сжатии. Установлено, что на прочностные и деформативные свойства грунтобетона в значительной степени оказывает влияние процентное содержание АС и водоцементное отношение инъекционных растворов.

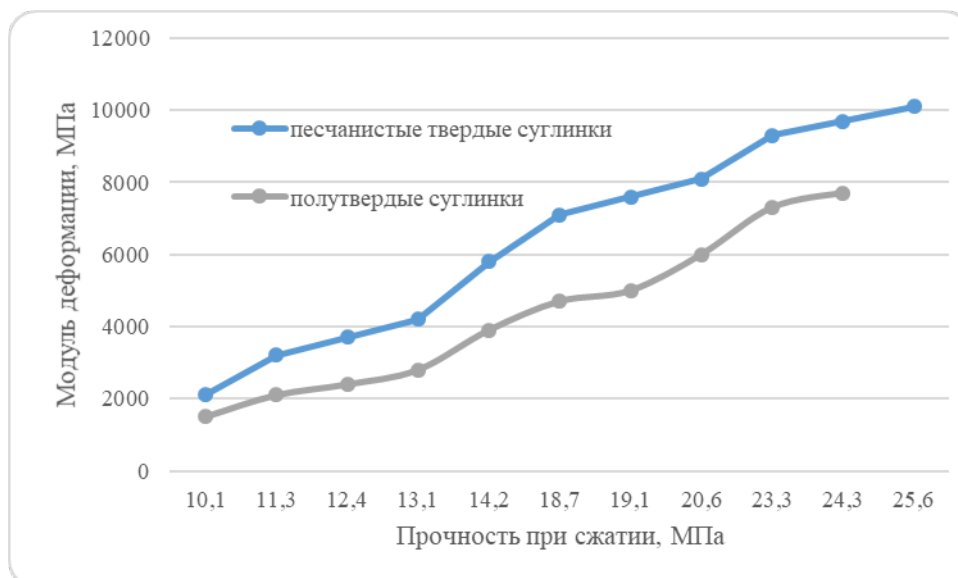


Рис. 4. Влияние прочности при сжатии грунтобетонов на модуль деформации

Fig. 4. Dependence of the deformation modulus on the strength of soil concrete

Исследован механизм структурообразования закрепленных грунтов, заключающийся в ликвидации слабых контактов, которые могут быть разрушены при увлажнении, с одновременным образованием цементационных контактов, повышая при этом структурную прочность.

Таким образом, разработанные инъекционные растворы способны эффективно закреплять грунты оснований подземных сооружений, обеспечивая прочность грунтобетонного массива до 25,6 МПа с модулем деформации 10,1 ГПа.

ВЫВОДЫ

Закрепление просадочных грунтов является важной практической научно-технической задачей, позволяющей осуществлять строительные и ремонтные работы на слабых (просадочных) грунтах оснований. Разработаны инъекционные растворы и изучен их потенциал в позиции укрепления подземных объектов:

1. растворы обладают процентом водоотделения от 6,3 при $V/B=1$ до 16,0% при $V/B=2$. Согласно классификации ГОСТ Р 59538-2021 разработанные инъекционные растворы относятся к стабильным ($V/B=1-1,5$) и условно стабильным $V/B=2$. При этом показатели вязкости этих материалов говорят о высокой проникающей способности, так как время истечения растворов через вискозиметр Марша для растворов ИР5 и ИР6 составляет 39 и 33 секунды при $V/B=1,5$ и $V/B=2$, соответственно.

2. Эффект повышения плотности инъекционных растворов на композиционном цементе в возрасте 28 суток, был максимальным при дозировке АС 45% по массе, далее он снижался с ростом содержания алюмосиликатной составляющей.

3. Отмечаются повышенные отношения значений прочностных свойств на 2-е сутки к аналогичным показателям на 28-е сутки: на осевое сжатие 0,24 (0,20-0,22 для контрольных образцов, на изгиб 0,16 (0,15 для контрольного образца; при этом при повышении содержания АС выше 45% это отношение снижается до 0,14). Повышенные значения ранней прочности открывают широкие перспективы использования инъекционных растворов для быстрой цементации оснований при усилении подземных сооружений.

4. Разработанные инъекционные растворы способны эффективно закреплять грунты оснований подземных сооружений, обеспечивая прочность грунтобетонного массива до 25,6 МПа с модулем деформации 10,1 ГПа

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Fan H., Li T., Gao Y., Deng K., Wu H. Characteristics inversion of underground goaf based on InSAR techniques and PIM // International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. 2021. № 103. P. 102526. DOI: 10.1016/j.jag.2021.102526
- [2] Guo D., Chen Y., Yang J., Tan Y.H., Zhang C., Chen Z. Planning and application of underground logistics systems in new cities and districts in China // Tunnelling and Underground Space Technology. 2021. № 113. P. 103947. DOI: 10.1016/j.tust.2021.103947
- [3] Hebbal D., Marif Y., Hamdani M., Belhaj M.M., Bouguettaia H., Bechki D. The geothermal potential of underground buildings in hot climates: Case of Southern Algeria // Case Studies in Thermal Engineering. 2021. № 28. P. 101422. DOI: 10.1016/j.csite.2021.101422
- [4] Dudin M.O., Vatin N.I., Barabanshchikov Y.G. Modeling a set of concrete strength in the program ELCUT at warming of monolithic structures by wire // Magazine of Civil Engineering. 2015. 54 (2). P. 33 – 45.
- [5] Lazarevska M., Cvetkovska M., Knezevic M., Trombeva Gavriloska A., Milanovic M., Murgul V., Vatin N. Neural network prognostic model for predicting the fire resistance of eccentrically loaded RC columns // Applied Mechanics and Materials. 2014. 627. P. 276 – 282.
- [6] Li W., Wu Y., Choguill C.L., Lai S.-K., Luo J. Underground Hangzhou: The challenge of safety vs. commerciality in a major Chinese city // Cities. 2021. № 119. P. 103414. DOI: 10.1016/j.cities.2021.103414
- [7] Харченко И.Я., Панченко А.И., Пискунов А.А., Харченко А.И., Мирзоян М.М. Минеральные инъекционные смеси для строительства и эксплуатации подземных сооружений в условиях плотной городской застройки // Жилищное строительство. 2020. № 10. С. 53 – 60.
- [8] Коновалова Н.А. Научное и практическое обоснование получения экологически безопасных строительных материалов на основе крупнотоннажных отходов производства: дис. ... докт. техн. наук. 1.5.15 Экология (технические науки). Иркутск, 2022. 373 с.
- [9] Муртазаев С.-А.Ю., Абуханов А.З., Исламов А.А. Метод улучшения оснований зданий и сооружений // Вестник Атырауского института нефти и газа. 2010. № 4. С. 267 – 270.
- [10] Абуханов А.З., Муртазаев С.-А.Ю. и др. Пат. 2472898 РФ, МПК Е 02 D 27/00. Фундамент с комбинированной подготовкой / №2011131323/03, заявл. 26.07.2011; опубл. 20.01.2013, Бюл. № 2. 5 с.
- [11] Huang J., Kogbara R.B., Little D.N. A state-of-the-art review of polymers used in soil stabilization // Construction and Building Materials. 2021. Vol. 305. Article 124685.
- [12] Ломов П.О., Гребенников И.О. Усиление грунтов основания фундаментов транспортных сооружений армированием грунтоцементным раствором в условиях распространения многолетнемерзлых грунтов // Фундаментальные и прикладные вопросы транспорта. 2022. № 4 (7). С. 103 – 110.
- [13] Wu T., Zhang Y., Cai Y. Dynamic response of sheet-pile groin under tidal bore considering pile-pile mutual interaction and hydrodynamic pressure // Soil Dynamics and Earthquake Engineering. 2022. Vol. 164. Article 107568.
- [14] Столяров В.Г. Уплотнение грунтов: технологические напряжения и их учёт // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки. 2005. № 2 (130). С. 105 – 107.
- [15] Айгунов М.М., Асланбеков А.И. Технологии усиления оснований фундаментов аварийных и реконструируемых зданий // Ресурсоэнергоэффективные технологии в строительном комплексе региона. 2019. № 11. С. 328 – 332.
- [16] Галай Б.Ф., Сербин В.В., Галай О.Б. Опыт уплотнения просадочных грунтов на Северном Кавказе // Геотехника. 2018. Т. 10. № 5-6. С. 42 – 50.
- [17] Wei W.-L., Chen Y.-Q., Gao Z. Research on damage effect of the concrete target under the penetration and explosion integration // Structures. 2022. Vol. 47. P. 1511 – 1523.

- [18] Иванов Е.С., Ясинецкий В.Г. Глубинное гидровиброуплотнение лесовых грунтов // Гидротехника и мелиорация. 1972. № 2. С. 41 – 46.
- [19] Li W., Yi Y., Puppallab A.J. Effects of curing environment and period on performance of lime-GGBS-treated gypseous soil // Transportation Geotechnics. 2022. Vol. 37. Article 100848.
- [20] Ибрагимов А.М., Красавина О.Н., Гнедина Л.Ю., Заботина Л.Ю. Термический способ закрепления грунтов и усиления оснований // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. 2008. № 7 (114). С. 19 – 20.
- [21] Ebailila M., Kinuthia J., Al-Waked Q. Sulfate soil stabilisation with binary blends of lime–silica fume and lime–ground granulated blast furnace slag // Transportation Geotechnics. 2022. Vol. 37. Article 100888.
- [22] Носков И.В. Аварийное состояние зданий при локальном замачивании лессовых просадочных грунтов // Ползуновский вестник. 2007. № 1-2. С. 60 – 62.
- [23] Мавлянова Н.Г., Исмаилов В.А., Ларионова Н.А. Сравнительная оценка влияния методов замачивания и силикатизации лессовых грунтов на повышение их сейсмических свойств в региональных условиях Узбекистана // Инженерная геология. 2017. № 4. С. 72 – 81.
- [24] Cheng Y., Wang Z., Liu K. Analysis of macro and micro freezing characteristics of gravelly soil // Environmental Research. 2022. Vol. 216. Part 2. Article 114600.
- [25] Бредихина Н.В., Бабынина К.Ю., Антонова А.С. Усиление грунтов основания при строительстве зданий и сооружений в Курской области // БСТ: Бюллетень строительной техники. 2022. № 8 (1056). С. 56 – 58.
- [26] Klyuyev S.V., Kashapov N.F., Radaykin O.V., Sabitov L.S., Klyuyev A.V., Shchekina N.A. Reliability coefficient for fibreconcrete material // Construction Materials and Products. 2022. 5 (2). P. 51 – 58. <https://doi.org/10.58224/2618-7183-2022-5-2-51-58>
- [27] Kashapov R.N., Kashapov N.F., Kashapov L.N., Klyuev S.V., Chebakova V.Yu. Study of the plasma-electrolyte process for producing titanium oxide nanoparticles // Construction Materials and Products. 2022. 5 (5). P. 70 – 79. <https://doi.org/10.58224/2618-7183-2022-5-5-70-79>
- [28] Kashapov R.N., Kashapov N.F., Kashapov L.N., Klyuev S.V. Plasma electrolyte production of titanium oxide powder // Construction Materials and Products. 2022. 5 (6). P. 75 – 84. <https://doi.org/10.58224/2618-7183-2022-5-6-75-84>
- [29] Kashapov N.F., Yamaleev M.M., Lukashkin L.N., Grebenshikov E.A., Gilev I.Yu., Kashapov R.N., Kashapov L.N. Structure and analysis of amorphous silicon dioxide nanoparticles // Construction Materials and Products. 2022. 5 (6). P. 85 – 94. <https://doi.org/10.58224/2618-7183-2022-5-6-85-94>
- [30] Нахаев М.Р. Композиционные составы с тонкодисперсным наполнителем различного генезиса для инъекционного закрепления просадочных грунтов: дис. ...канд. техн. наук. Грозный, 2015. 200 с. Bai Yun. Underground Engineering. Planning, Design, Construction and Operation of the Underground Space. Shanghai, 2019. 234 p.

REFERENCES

- [1] Fan H., Li T., Gao Y., Deng K., Wu H. Characteristics inversion of underground goaf based on InSAR techniques and PIM. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. 2021. 103. P. 102526. DOI: 10.1016/j.jag.2021.102526
- [2] Guo D., Chen Y., Yang J., Tan Y.H., Zhang C., Chen Z. Planning and application of underground logistics systems in new cities and districts in China. Tunnelling and Underground Space Technology. 2021. 113. P. 103947. DOI: 10.1016/j.tust.2021.103947
- [3] Hebbal D., Marif Y., Hamdani M., Belhaj M.M., Bouguettaia H., Bechki D. The geothermal potential of underground buildings in hot climates: Case of Southern Algeria. Case Studies in Thermal Engineering. 2021. 28. P. 101422. DOI: 10.1016/j.csite.2021.101422

- [4] Dudin M.O., Vatin N.I., Barabanshchikov Y.G. Modeling a set of concrete strength in the program ELCUT at warming of monolithic structures by wire. Magazine of Civil Engineering. 2015. 54 (2). P. 33 – 45.
- [5] Lazarevska M., Cvetkovska M., Knezevic M., Trombeva Gavriloska A., Milanovic M., Murgul V., Vatin N. Neural network prognostic model for predicting the fire resistance of eccentrically loaded RC columns. Applied Mechanics and Materials. 2014. 627. P. 276 – 282.
- [6] Li W., Wu Y., Choguill C.L., Lai S.-K., Luo J. Underground Hangzhou: The challenge of safety vs. commerciality in a major Chinese city. Cities. 2021. 19. P. 103414. DOI: 10.1016/j.cities.2021.103414
- [7] Kharchenko I.Ya., Panchenko A.I., Piskunov A.A., Kharchenko A.I., Mirzoyan M.M. Mineral injection mixtures for the construction and operation of underground structures in conditions of dense urban development. Housing construction. 2020. 10. P. 53 – 60. (rus.)
- [8] Konovalova N.A. Scientific and practical justification for obtaining environmentally friendly building materials based on large-tonnage production waste: dis. ... doct. of Engineering Sciences. 1.5.15 Ecology (technical sciences). Irkutsk, 2022. 373 p. (rus.)
- [9] Murtazaev S.-A.Yu., Abukhanov A.Z., Islamov A.A. Method of improving the foundations of buildings and structures. Bulletin of the Atyrau Institute of Oil and Gas. 2010. 4. P. 267 – 270. (rus.)
- [10] Abukhanov A.Z., Murtazaev S.-A.Yu. et al. Pat. 2472898 RF, IPC E 02 D 27/00. Foundation with combined preparation. №2011131323/03, заявл. 26.07.2011; publ. 20.01.2013, Bul. № 2. 5 p. (rus.)
- [11] Huang J., Kogbara R.B., Little D.N. A state-of-the-art review of polymers used in soil stabilization. Construction and Building Materials. 2021. 305. Article 124685.
- [12] Lomov P.O., Grebennikov I.O. Strengthening of the soils of the foundations of transport structures by reinforcing with a soil-cement mortar in conditions of the spread of permafrost soils. Fundamental and applied issues of transport. 2022. 4 (7). P. 103 – 110. (rus.)
- [13] Wu T., Zhang Y., Cai Y. Dynamic response of sheet-pile groin under tidal bore considering pile-pile mutual interaction and hydrodynamic pressure. Soil Dynamics and Earthquake Engineering. 2022. 164. Article 107568.
- [14] Stolyarov V.G. Soil compaction: technological stresses and their accounting. News of higher educational institutions. The North Caucasus region. Technical sciences. 2005. 2 (130). P. 105 – 107. (rus.)
- [15] Aygumov M.M., Aslanbegov A.I. Technologies for strengthening the foundations of emergency and reconstructed buildings. Resource- and energy-efficient technologies in the construction complex of the region. 2019. 11. P. 328 – 332. (rus.)
- [16] Galay B.F., Serbin V.V., Galay O.B. Experience of compaction of subsidence soils in the North Caucasus. Geotechnics. 2018. 10 (5-6). P. 42 – 50. (rus.)
- [17] Wei W.-L., Chen Y.-Q., Gao Z. Research on damage effect of the concrete target under the penetration and explosion integration. Structures. 2022. 47. P. 1511 – 1523.
- [18] Ivanov E.S., Yasinetsky V.G. Deep hydrovibro-compaction of loess soils. Hydraulic engineering and melioration. 1972. 2. P. 41 – 46. (rus.)
- [19] Li W., Yi Y., Puppallab A.J. Effects of curing environment and period on performance of lime-GGBS-treated gypseous soil. Transportation Geotechnics. 2022. 37. Article 100848.
- [20] Ibragimov A.M., Krasavina O.N., Gnedina L.Yu., Zabolina L.Yu. Thermal method of fixing soils and strengthening bases. Construction materials, equipment, technologies of the XXI century. 2008. 7 (114). P. 19 – 20. (rus.)
- [21] Ebailila M., Kinuthia J., Al-Waked Q. Sulfate soil stabilisation with binary blends of lime-silica fume and lime-ground granulated blast furnace slag. Transportation Geotechnics. 2022. 37. Article 100888.
- [22] Noskov I.V. Emergency condition of buildings during local soaking of loess subsidence soils. Polzunovsky bulletin. 2007. 1-2. P. 60 – 62. (rus.)

- [23] Mavlyanova N.G., Ismailov V.A., Larionova N.A. Comparative assessment of the influence of methods of soaking and silicatization of loess soils on increasing their seismic properties in the regional conditions of Uzbekistan. *Engineering geology*. 2017. 4. P. 72 – 81. (rus.)
- [24] Cheng Y., Wang Z., Liu K. Analysis of macro and micro freezing characteristics of gravelly soil. *Environmental Research*. 2022. 216 (2). Article 114600.
- [25] Bredikhina N.V., Babynina K.Yu., Antonova A.S. Strengthening of foundation soils in the construction of buildings and structures in the Kursk region. *BST: Bulletin of construction equipment*. 2022. 8 (1056). P. 56 – 58. (rus.)
- [26] Klyuyev S.V., Kashapov N.F., Radaykin O.V., Sabitov L.S., Klyuyev A.V., Shchekina N.A. Reliability coefficient for fibreconcrete material. *Construction Materials and Products*. 2022. 5 (2). P. 51 – 58. <https://doi.org/10.58224/2618-7183-2022-5-2-51-58>
- [27] Kashapov R.N., Kashapov N.F., Kashapov L.N., Klyuev S.V., Chebakova V.Yu. Study of the plasma-electrolyte process for producing titanium oxide nanoparticles. *Construction Materials and Products*. 2022. 5 (5). P. 70 – 79. <https://doi.org/10.58224/2618-7183-2022-5-5-70-79>
- [28] Kashapov R.N., Kashapov N.F., Kashapov L.N., Klyuev S.V. Plasma electrolyte production of titanium oxide powder. *Construction Materials and Products*. 2022. 5 (6). P. 75 – 84. <https://doi.org/10.58224/2618-7183-2022-5-6-75-84>
- [29] Kashapov N.F., Yamaleev M.M., Lukashkin L.N., Grebenshikov E.A., Gilev I.Yu., Kashapov R.N., Kashapov L.N. Structure and analysis of amorphous silicon dioxide nanoparticles. *Construction Materials and Products*. 2022. 5 (6). P. 85 – 94. <https://doi.org/10.58224/2618-7183-2022-5-6-85-94>
- [30] Nakhaev M.R. Composite compositions with fine-dispersed filler of various genesis for injection fixing of subsidence soils: dis. ...candidate of Engineering Sciences. Grozny, 2015. 200 p. Bai Yun. *Underground Engineering. Planning, Design, Construction and Operation of the Underground Space*. Shanghai, 2019. 234 p. (rus.)

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ / INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Панарин И.И., e-mail: panarin.ii@dvfu.ru, тел. +7(914) 697-08-56, ORCID ID: 0000-0002-4471-0229, SCOPUS: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=56436871300>, Дальневосточный федеральный университет, кафедра управления начальника инженерных войск, начальник кафедры

Panarin I.I., e-mail: panarin.ii@dvfu.ru, tel. +7(914) 697-08-56, ORCID ID: 0000-0002-4471-0229, SCOPUS: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=56436871300>, Far Eastern Federal University, Department of Management of the Chief of Engineering Troops, Head of Department

Федюк Р.С., e-mail: roman44@yandex.ru, тел. +7(950) 281-79-45, ORCID ID: 0000-0002-2279-1240, SCOPUS: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57199850188>, Дальневосточный федеральный университет, кафедра управления начальника инженерных войск, доктор технических наук, доцент

Fedyuk R.S., roman44@yandex.ru, tel. +7(950) 281-79-45, ORCID ID: 0000-0002-2279-1240, SCOPUS: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57199850188>, Far Eastern Federal University, Department of Management of the Chief of Engineering Troops, Doctor of Engineering Sciences (Advanced Doctor), Associate Professor

Выходцев И.А., e-mail: vykhodtcev.ia@students.dvfu.ru, тел. +7(999) 089-61-48, ORCID ID: 0000-0003-4370-0077, SCOPUS: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57205438646>, Дальневосточный федеральный университет, кафедра управления, начальник инженерных войск

Vykhodtsev I.A., e-mail: vykhodtcev.ia@students.dvfu.ru, tel. +7(999) 089-61-48, ORCID ID: 0000-0003-4370-0077, SCOPUS: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57205438646>, Far Eastern Federal University, Department of Management of the Chief of Engineering Troops

Вавренюк С.В., e-mail: svvn59@mail.ru, тел. +7(914) 697-48-25, ORCID ID: 0000-0002-2549-2051, SCOPUS: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57205438646>, Филиал ФГБУ "ЦНИИП Минстроя России" Дальневосточный научно - исследовательский, проектно-конструкторский и технологический институт по строительству, заместитель директора

Vavrenyuk S.V., e-mail: svvn59@mail.ru, tel. +7(914) 697-48-25, ORCID ID: 0000-0002-2549-2051, SCOPUS: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57205438646> "Far Eastern Research, Design and Technological Institute for Construction, Deputy Director

Клюев А.В., e-mail: Klyuyevav@yandex.ru, тел. +7(929)003-58-18, ORCID ID: 0000-0003-0845-8414
SCOPUS ID:
<https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=56567996100>, Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, кафедра теоретической механики и сопротивления материалов, кандидат технических наук, доцент

Klyuev A.V., e-mail: Klyuyevav@yandex.ru, tel.: +7(929)003-58-18, ORCID ID: 0000-0003-0845-8414
SCOPUS ID:
<https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=56567996100>, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, Department of Theoretical Mechanics and Resistance of Materials, Candidate of Engineering Sciences (Ph.D.), Associate Professor

Поступила в редакцию 14 апреля 2023 г.
Принята в доработанном виде 19 мая 2023 г.
Одобрена для публикации 10 августа 2023 г.

Received: April 14, 2023.
Revised: May 19, 2023.
Accepted: August 10, 2023