

ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫЙ ПУТЬ И ТРАНСПОРТНОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО

УДК 625.12 : 624.139

DOI 10.46973/0201-727X_2025_1_8

*Д. А. Разуваев, Р. С. Печенкин, А. Л. Ланис***ОПТИМИЗАЦИЯ СОСТАВОВ ИНЪЕКЦИОННЫХ РАСТВОРОВ
ДЛЯ СТАБИЛИЗАЦИИ СЛАБОГО ОСНОВАНИЯ
ЭКСПЛУАТИРУЕМОГО ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА В КРИОЛИТОЗОНЕ ***

Аннотация. Рассмотрены проблемы строительства и эксплуатации объектов дорожной инфраструктуры в криолитозоне, связанные с деградацией многолетнемерзлых грунтов и формированием слабых грунтов в основании сооружений. Для стабилизации слабых оснований в рассматриваемых условиях предложено использовать способ напорной инъекции грунтоцементных растворов в режиме гидроразрывов, преодолев его основные недостатки за счет оптимизации составов используемых смесей. Обосновано основное направление оптимизации – снижение количества применяемого в растворах цемента, что позволит снизить их стоимость, а также объемы сопутствующего тепловыделения, дополнительно растепляющего ММГ в основании.

Поставлены и проведены лабораторные испытания, позволившие установить зависимости основных характеристик грунтоцементных инъекционных растворов от количества цемента (в минимально возможном диапазоне значений), а также определить минимальное содержание вяжущего, обеспечивающего стабильность смеси и затвердевшего раствора.

Предложен алгоритм оптимизации составов инъекционных растворов для стабилизации слабых оснований участков эксплуатируемого земляного полотна в рассматриваемых условиях.

Ключевые слова: железная дорога, автомобильная дорога, земляное полотно, грунты основания, слабые грунты, инъектирование грунтов, инъекционные растворы.

Для цитирования: Разуваев, Д. А. Оптимизация составов инъекционных растворов для стабилизации слабого основания эксплуатируемого земляного полотна в криолитозоне / Д. А. Разуваев, Р. С. Печенкин, А. Л. Ланис // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2025. – № 1. – С. 8–16. – DOI 10.46973/0201-727X_2025_1_8.

Введение

Одной из основных задач в области дорожной инфраструктуры страны является повышение пространственной связанности и транспортной доступности территорий, что отражено в Транспортной стратегии¹. И в первую очередь речь идет о малоосвоенных перспективных минерально-сырьевых центрах в районах с суровыми природно-климатическими условиями, освоение которых обеспечивает долгосрочный экономический рост и национальную безопасность. В данном направлении активно развивается существующая транспортная сеть железных и автомобильных дорог Арктической зоны Российской Федерации (АЗРФ), а также рассматриваются перспективные проекты развития дорожной инфраструктуры.

При этом имеется ряд проблем, из-за которых строительство и эксплуатация объектов дорожной инфраструктуры в АЗРФ существенно затруднены, и основная из них – повсеместное распространение многолетнемерзлых грунтов (ММГ) в основании сооружений. В настоящее время практически вся территория АЗРФ расположена в криолитозоне [1]. Несмотря на особый подход к проектно-исследовательским работам и строительству транспортной инфраструктуры на таких территориях, зачастую в процессе эксплуатации сооружений возникают криогенные деформации [2–3]. Эти деформации, в первую очередь, объясняются деградацией многолетнемерзлых грунтов основания из-за нарушения

* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-19-20036 (<https://rscf.ru/project/24-19-20036/>) и финансовой поддержки Правительства Ямало-Ненецкого автономного округа.

¹ Транспортная стратегия Российской Федерации до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года. – URL: <https://rosavtodor.gov.ru/docs/transportnaya-strategiya-rf-na-period-do-2030-goda-s-prognozom-na-period-do-2035-goda>

водно-теплого режима, вызванного строительством, а также глобального потепления. Деградация ММГ, как правило, сопровождается не только термопросадками, но и формированием слабых грунтов в основании сооружений. И если термопросадки проявляются только в процессе деградации ММГ, а в ряде случаев затухают при выравнивании теплового баланса между основанием сооружения и атмосферой, то осадки элементов земляного полотна на слабом основании продолжают достаточно длительное время и интенсифицируются при увеличении транспортной нагрузки.

Одним из эффективных способов повышения физико-механических характеристик грунтов, в том числе стабилизации слабых оснований, является способ напорной инъекции грунтоцементных растворов в режиме гидроразрывов [4–6]. Данный способ позволяет не только стабилизировать слабые основания после деградации ММГ, но и в комбинации с термостабилизирующими конструкциями [7] исключить дальнейшие термопросадки. Основными преимуществами способа напорной инъекции грунтоцементных растворов в режиме гидроразрывов являются возможность выполнения работ без перерывов в движении по деформируемому участку дороги, а также относительная простота и доступность технологии производства работ и применяемого оборудования. К недостаткам способа стоит отнести относительно высокую стоимость его применения для земляного полотна протяженных линейных объектов, а также тепловыделение инъекционных растворов за счёт экзотермии цемента [8], негативно влияющее на состояние еще сохранившихся в основании ММГ.

Основная идея работы заключается в возможности значительного снижения количества применяемого в инъекционных растворах цемента при обеспечении требуемой подвижности смеси. Снижение количества вяжущего в растворах позволит снизить их стоимость, а также объемы сопутствующего тепловыделения, дополнительно растепляющего ММГ в основании. Идея реализуема, поскольку у широко применяемых в настоящее время растворов, разработанных и подбираемых для оснований зданий, и других точечных сооружений на фундаментах, есть избыточный потенциал по прочностным и деформационным характеристикам. Для основания земляного полотна, воспринимающего в несколько раз меньшие дополнительные напряжения, за счет перераспределения транспортных и собственных нагрузок через верхнее строение пути (дорожную одежду) и тело насыпи, для стабилизации слабых грунтов возможно использовать менее прочные грунтоцементные растворы.

Для практической реализации предложенного подхода необходимо установить зависимости основных характеристик грунтоцементных инъекционных растворов от количества цемента (в минимально возможном диапазоне значений), а также определить минимальное содержание вяжущего, обеспечивающего стабильность смеси и затвердевшего раствора. Кроме того, необходимо разработать алгоритм оптимизации составов инъекционных растворов для стабилизации слабых оснований участков эксплуатируемого земляного полотна в рассматриваемых условиях.

Постановка задачи

Основной целью данной работы является установление зависимости модуля деформации (E_{stb}) и предела прочности на одноосное сжатие (R_{stb}) грунтоцементных инъекционных растворов с требуемой подвижностью смеси от количества портландцемента (в диапазоне возможных значений менее 0,3 кг/л) и используемого грунта.

В качестве требуемой подвижности смеси принят диапазон от 18 до 20 см по конусу растекаемости, что соответствует минимально допустимым значениям параметра для грунтоцементных растворов по ГОСТ Р 59538. Принятый диапазон, с одной стороны, обеспечивает лучшие физико-механические характеристики затвердевшего раствора и минимизирует его усадку при твердении, а с другой, обеспечивает беспрепятственный проход раствора по подводным магистралям растворонасоса и трубам инъекторов.

В качестве инертного материала использовались различные виды глинистых грунтов с числом пластичности в интервале от 0,05 до 0,10, которые обеспечивают соотношение глинистых и песчаных частиц, близкое к оптимальному, и наиболее часто применяются в практике инъектирования. Использование глинистых грунтов с $I_p > 0,10$ в качестве инертного материала грунтоцементного раствора сопряжено со сложностью приготовления однородной смеси, а увеличение процентного содержания глинистых частиц в составе раствора, существенно снижает его прочность [9]. В свою очередь использование песков и супесей с числом пластичности $I_p < 0,05$ повышает вероятность расслоения раствора в инъекционных магистралях, а абразивные свойства таких растворов снижают срок службы инъекционного оборудования.

В качестве вяжущего использовался широко распространенный клинкерный портландцемент ЦЕМ II 42,5Н по ГОСТ 31108. За минимально возможный диапазон содержания вяжущего в растворе принят диапазон от 300 грамм на литр смеси и менее, с шагом варьирования 50 г/л. Дополнительно испытаны составы с диапазоном 300–500 г/л, исследуемые по параметрам тепловыделения в работе [7].

Прочностные и деформационные характеристики затвердевших грунтоцементных инъекционных растворов исследовались после полного водонасыщения, что соответствует реальным условиям эксплуатации в рассматриваемых условиях.

Методика испытаний

Для приготовления грунтоцементных растворов исследуемых рецептур навески подготовленных грунтов и вяжущего смешивались в воздушно-сухом состоянии с последующим добавлением воды и перемешиванием механизированным способом. Водоцементное отношение подбиралось опытным путем до достижения требуемой подвижности смеси. Определение подвижности раствора (рис. 1, а) выполнялось при помощи конуса растекаемости по ГОСТ 34532.

На следующем этапе изготавливались испытательные образцы (кубы) размером 70,7×70,7×70,7 мм (рис. 1, б) для дальнейших исследований. Изготовление образцов выполнено по методике ГОСТ 5802. Хранение образцов выполнялось в камере нормального твердения, способной автоматически поддерживать заданный тепловлажностный режим. По истечении 28 суток образцы извлекались из камеры и помещались в емкость с водой для полного водонасыщения, которое контролировалось по изменению массы.

Определение модуля деформации (E_{stb}) и предела прочности на одноосное сжатие (R_{stb}) образцов из грунтоцементного раствора выполнено на прессе (рис. 2), позволяющем фиксировать силу нагружения и деформацию. Для более точного определения характеристик каждого из исследуемых составов испытания проводились партиями из трех образцов одинакового состава и возраста.

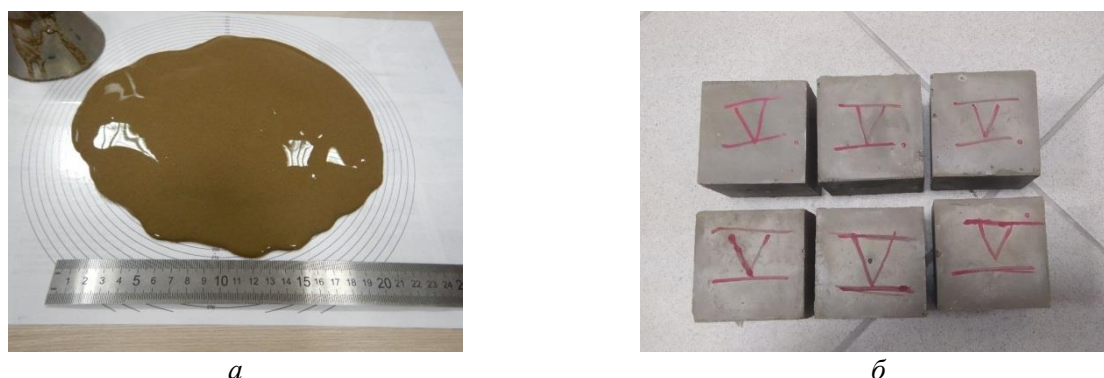


Рис. 1. Этапы подготовки к испытаниям:

а – определение подвижности смеси; б – испытательные образцы из грунтоцементного раствора

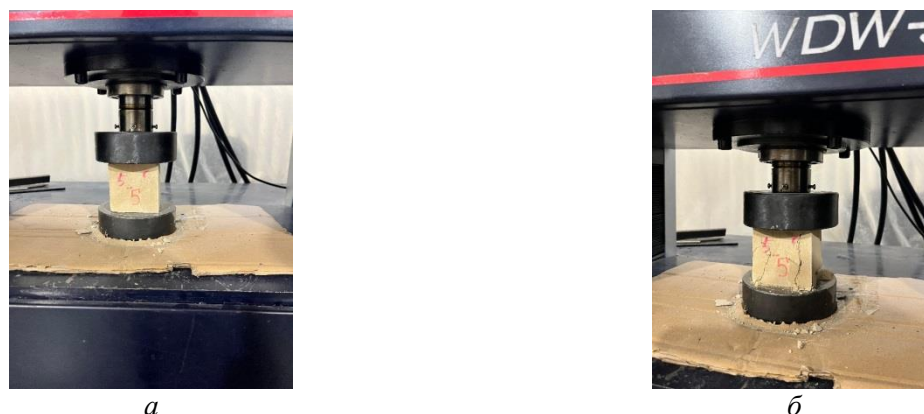


Рис. 2. Испытание грунтоцемента на прессе:

а – установленный образец до испытания; б – разрушенный образец

Очевидно, что свойства грунтоцементных растворов напрямую зависят от гранулометрического состава используемых в качестве инертного материала глинистых грунтов [10]. Поэтому в рамках проведения испытаний и для обработки их результатов предложен к использованию коэффициент $k_{s/c}$, равный отношению содержания в глинистом грунте песчаных частиц D_s (%) к сумме пылеватых и глинистых частиц D_c (%). Данный коэффициент, в отличие от числа пластичности, в большей степени характеризует используемый в качестве инертного материала для инъекционного раствора глинистый грунт по гранулометрическому составу. Результаты анализа имеющихся в распоряжении авторов данных о гранулометрическом составе глинистых грунтов основания дорожных сооружений полуострова Ямал, как типичного региона АЗРФ, показали, что в рассматриваемом диапазоне числа пластичности значения коэффициента $k_{s/c}$ варьируются от 0,17 до 3,12. Поэтому в рамках выполняемых испытаний приняты грунты (табл. 1) с коэффициентами $k_{s/c}$, обеспечивающими репрезентативность исследования.

Таблица 1

Гранулометрические составы используемых грунтов

Диаметр фракции, мм	Гранулометрический состав, %, для используемых грунтов с числом пластичности		
	0,05 (супесь песчаная)	0,07 (суглинок песчаный)	0,10 (суглинок пылеватый)
2–1	0,25	9,21	0,03
1–0,5	1,54	7,51	0,23
0,5–0,25	8,77	13,86	1,03
0,25–0,10	32,99	17,65	4,25
0,10–0,05	28,70	11,31	12,69
0,05–0,01	14,03	16,26	53,33
0,01–0,002	3,92	13,12	7,90
< 0,002	9,80	11,08	20,54
$k_{s/c} = \frac{D_s}{D_c}$ д.е.	2,60	1,47	0,22

Матрица выполненных испытаний для установления зависимости характеристик грунтоцементных инъекционных растворов от количества портландцемента и используемого грунта представлена в табл. 2.

Таблица 2

Матрица выполненных испытаний

Состав, г/л ¹		Количество образцов, шт., для $k_{s/c}$			Возраст, сут.	Определяемые характеристики
Цемент	Грунт	2,60	1,47	0,22		
500	1450	3	3	3	28	Предел прочности на одноосное сжатие (R_{stb}), МПа; Модуль деформации (E_{stb}), МПа.
450	1500	3	3	3		
400	1550	3	3	3		
350	1600	3	3	3		
300	1650	3	3	3		
250	1700	3	3	3		
200	1750	3	3	3		
150	1800	3	3	3		
100	1850	3	3	3 ²		
50	1900	3 ²	3 ²	3 ²		

Примечания: 1 – водоцементное отношение подбиралось опытным путем до достижения подвижности смеси от 18 до 20 см по конусу растекаемости; 2 – образцы затвердевшего раствора разрушались после этапа водонасыщения.

Результаты испытаний

По результатам испытаний получены зависимости модуля деформации E_{stb} (рис. 3, а) и предела прочности на одноосное сжатие R_{stb} (рис. 3, б) грунтоцементных инъекционных растворов от количества портландцемента Π (г/л) и гранулометрического состава исходных глинистых грунтов. Установлены предельные значения количества вяжущего, обеспечивающего стабильность смеси и затвердевшего раствора. Так, минимальное количество вяжущего Π_{\min} для обеспечения пригодности грунтоцементных растворов для инъектирования в слабые грунты основания составляет 150 г/л смеси при использовании глинистых грунтов с $k_{S/C} < 1,5$ и 100 г/л смеси при использовании глинистых грунтов с $k_{S/C} \geq 1,5$. Указанные пределы являются граничными условиями использования полученных зависимостей.

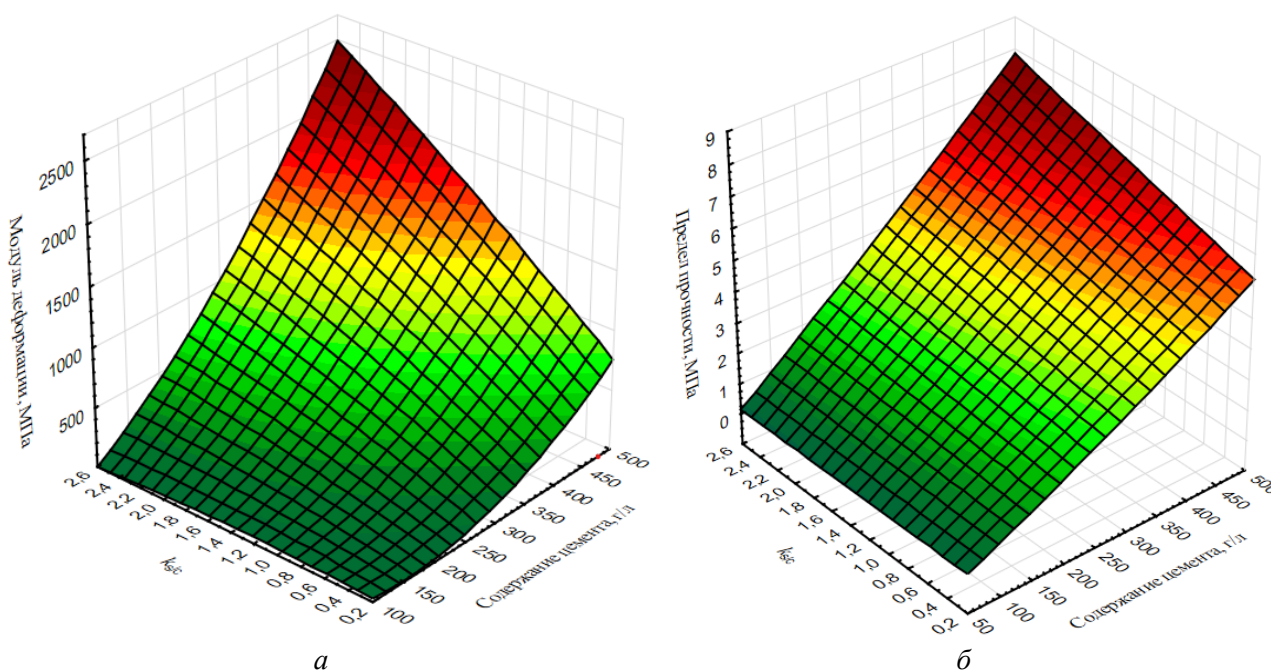


Рис. 3. Зависимости параметров исследуемых растворов от количества портландцемента и гранулометрического состава грунтов $k_{S/C}$:

а – модуля деформации; *б* – предела прочности на одноосное сжатие

В результате аппроксимации данных получено уравнение зависимости модуля деформации E_{stb} инъекционных растворов от количества портландцемента Π и коэффициента гранулометрического состава $k_{S/C}$, которое имеет вид

$$E_{stb} = 28,2439k_{S/C}^2 + 0,0062\Pi^2 + 1,8351k_{S/C}\Pi - 118,2528k_{S/C} - 2,2343\Pi + 181,2479. \quad (1)$$

Уравнение зависимости предела прочности R_{stb} инъекционных растворов от количества портландцемента Π и коэффициента гранулометрического состава $k_{S/C}$, имеет вид:

$$R_{stb} = 0,0011k_{S/C}^2 + 0,0026k_{S/C}\Pi + 2,9843 \cdot 10^{-6}\Pi^2 - 0,1806k_{S/C} + 0,0088\Pi - 0,1696. \quad (2)$$

Коэффициенты достоверности аппроксимации для полученных уравнений (1) и (2) составили 0,87 и 0,96 соответственно. Уравнения (1) и (2) рекомендуется использовать (в пределах граничных условий проведенных испытаний) для решения практических задач подбора составов грунтоцементных инъекционных растворов и их объемов под конкретный проект стабилизации слабых оснований.

На основании полученных зависимостей возможно не только назначать составы инъекционных растворов с минимальным количеством вяжущего, но и оптимизировать состав под конкретные условия по наилучшему соотношению стоимости раствора и объема закачки.

Оптимизация составов инъекционных растворов

Для решения задачи оптимизации составов инъекционных растворов в проектах стабилизации слабых оснований эксплуатируемого земляного полотна в криолитозоне предложен алгоритм, представленный на рис. 4.

Ключевой особенностью предложенного алгоритма является возможность назначения вариантов составов инъекционных растворов C_i под доступный инертный материал (глинистый грунт) с различным содержанием цемента, и определения их параметров по установленным зависимостям (1) и (2). При этом, рекомендуется назначать не менее трех вариантов состава из минимального, среднего и максимального интервалов исследованного диапазона значений содержания цемента в растворе.

Определение требуемых объемов инъектирования V_i по каждому из составов рекомендуется выполнять без учета уплотнения грунтовых массивов между включениями инъектированного раствора для водонасыщенных и не дренирующих оснований (по критериям коэффициента водонасыщения $S_r > 0,8$ и коэффициента фильтрации $k_\phi < 0,3$ м/сут соответственно). Для остальных оснований, расчет объемов инъектирования необходимо выполнять с учетом возможности уплотнения грунтовых массивов между включениями инъектированного раствора.

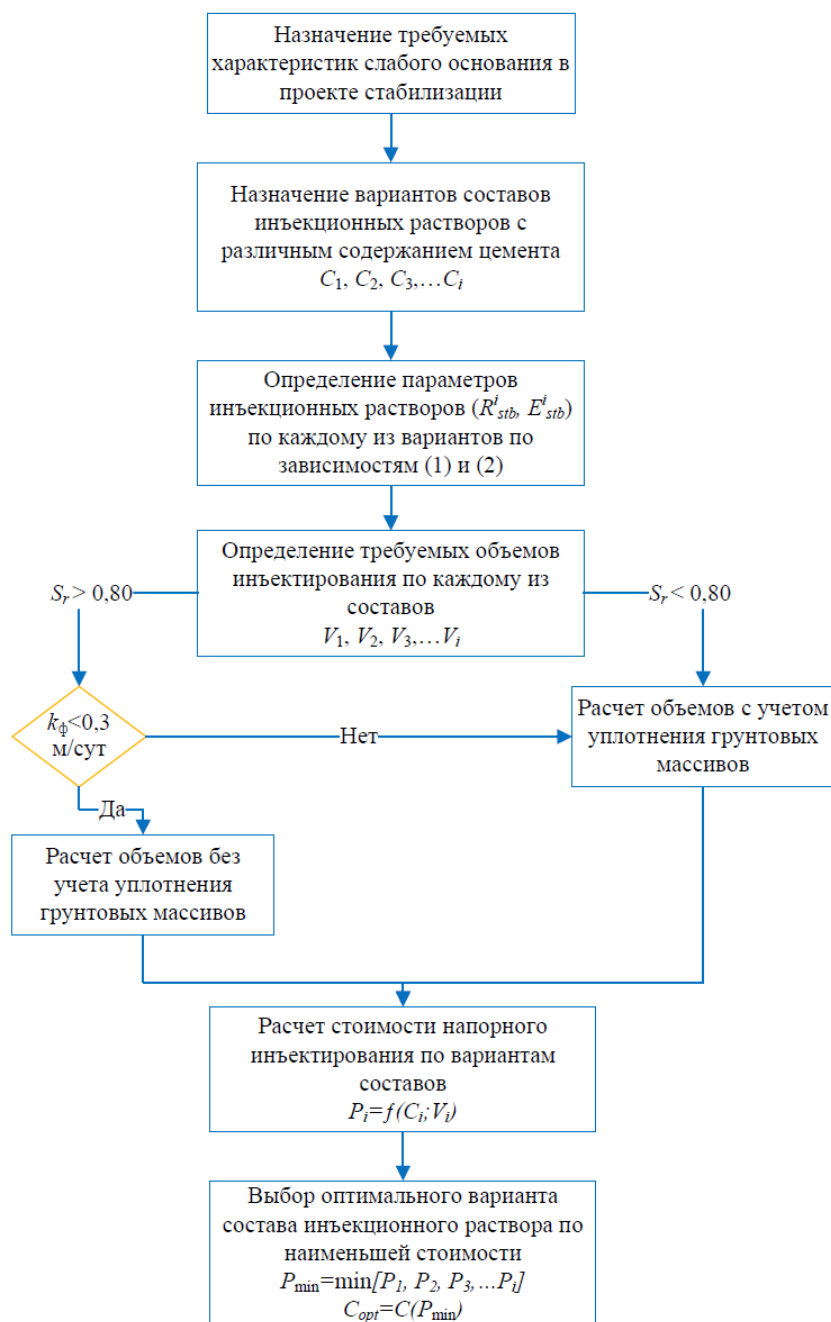


Рис. 4. Алгоритм оптимизации составов инъекционных растворов в проектах стабилизации слабых оснований в криолитозоне

Для расчета объемов инъектирования без учета уплотнения грунтового массива возможно использовать методику СП 22.13330, которая основана на применении коэффициента, характеризующего объемную долю армирующих элементов из раствора в массиве грунта. Расчеты, учитывающие возможность уплотнения грунтовых массивов между включениями инъектированного раствора, рекомендуется выполнять по методике, описанной в [11]. Данная методика учитывает увеличение плотности грунта, достигаемое за счет снижения его коэффициента пористости, а также учитывает армирующий эффект, получаемый за счет твердения закаченного в массив раствора.

Зная состав и требуемый для достижения проектных характеристик основания после стабилизации объем инъектирования, возможно рассчитать стоимость работ P_i по различным вариантам состава. Очевидно, что снижение количества, вяжущего в растворе, будет снижать удельную стоимость материала, но увеличивать его объем и объем инъектирования, и наоборот.

Выбор оптимального варианта состава инъекционного раствора C_{opt} следует выполнять по наименьшей стоимости работ, но с учетом возможных дополнительных затрат, связанных с растеплением ММГ при высоких значениях содержания цемента в материале [7]. При относительно равной стоимости работ, следует отдавать предпочтение вариантам составов с наименьшим количеством вяжущего.

Заключение

По результатам выполненных исследований показана возможность оптимизации составов грунтоцементных инъекционных растворов для стабилизации слабых оснований эксплуатируемого земляного полотна в криолитозоне. В определенных условиях возможно снижение количества вяжущего в растворах, что позволит снизить их стоимость, а также объемы сопутствующего тепловыделения, дополнительно растепляющего ММГ в основании.

Для решения практических задач подбора составов грунтоцементных инъекционных растворов и их объемов под конкретный проект стабилизации слабых оснований установлены зависимости модуля деформации E_{stb} и предела прочности R_{stb} инъекционных растворов от количества портландцемента и введенного коэффициента гранулометрического состава $k_{s/c}$, которые описываются уравнениями (1) и (2). Определены предельные (минимальные) значения количества цемента, обеспечивающего стабильность смеси и затвердевшего раствора при инъектировании в слабые грунты основания в исследованных граничных условиях.

На основе полученных результатов предложен алгоритм оптимизации составов инъекционных растворов, позволяющий под доступный инертный материал (глинистый грунт) назначать варианты составов с различным содержанием цемента, а также с применением критериального подхода к расчету объемов инъектирования выбирать наиболее оптимальный из них по наилучшему соотношению стоимости материала и объема работ.

Список литературы

- 1 Елисеев, Д. О. Транспортная инфраструктура арктических регионов России в условиях деградации вечной мерзлоты / Д. О. Елисеев, Ю. В. Наумова // Экономика и бизнес : теория и практика. – 2019. – № 10–1 (56). – С. 113–118. – DOI 10.24411/2411-0450-2019-11226.
- 2 Российская Арктика : современная парадигма развития / А. И. Татаркин, Н. Я. Петраков, В. А. Цветков [и др.]. – Санкт-Петербург : Нестор-История, 2014. – 844 с. – ISBN 978-5-4469-0372-6.
- 3 Ensuring the operational suitability of buildings, railways and bridges in of the Arctic zone in conditions of global warming / I. Sakharov, S. Kudryavtsev, V. Paramonov [et al.] // X International Scientific Siberian Transport Forum – TransSiberia 2022, Novosibirsk, March 02–05, 2022. – Novosibirsk : B. V. Elsevier, 2022. – P. 2506–2514. – DOI 10.1016/j.trpro.2022.06.288.
- 4 Ланис, А. Л. Применение метода напорной инъекции для усиления насыпей / А. Л. Ланис //

References

- 1 Eliseev, D. O. Transport infrastructure of the Arctic regions of Russia in the context of permafrost degradation / D. O. Eliseev, Yu. V. Naumova // Economy and business : theory and practice. – 2019. – No. 10–1 (56). – P. 113–118. – DOI 10.24411/2411-0450-2019-11226.
- 2 Russian Arctic : modern development paradigm / A. I. Tatarkin, N. Ya. Petrakov, V. A. Tsvetkov [et al.]. – Saint Petersburg : Nestor-History, 2014. – 844 p. – ISBN 978-5-4469-0372-6.
- 3 Ensuring the operational suitability of buildings, railways and bridges in of the Arctic zone in conditions of global warming / I. Sakharov, S. Kudryavtsev, V. Paramonov [et al.] // X International Scientific Siberian Transport Forum – TransSiberia 2022, Novosibirsk, March 02–05, 2022. – Novosibirsk : B. V. Elsevier, 2022. – P. 2506–2514. – DOI 10.1016/j.trpro.2022.06.288.
- 4 Lanis, A. L. Application of pressure injection method for embankment reinforcement /

Путь и путевое хозяйство. – 2009. – № 6. – С. 33–35. – ISSN 0131-5765.

5 СП 22.13330.2016. Основания зданий и сооружений. Актуализированная редакция СНиП 2.02.01-83* : свод правил : издание официальное : утвержден приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 16 декабря 2016 г. N 970/пр и введен в действие с 17 июня 2017 г. – Москва : Стандартинформ, 2016. – 228 с.

6 Stabilizing subgrades of transport structures by injecting solidifying solutions in cold regions. Sciences in Cold and Arid Regions / P. O. Lomov, A. L. Lanis, D. A. Razuvaev, M. G. Kavardakov. – 2021. – Vol. 13. – Iss. 5. – P. 357–365. – DOI 10.3724/SP.J.1226.2021.21040.

7 **Разуваев, Д. А.** Стабилизация основания земляного полотна инъекционным способом при деградации многолетнемерзлых грунтов / Д. А. Разуваев, Р. С. Печенкин // Мир транспорта. – 2024. – Т. 22, № 1 (110). – С. 6–16. – DOI 10.30932/1992-3252-2024-22-1-1.

8 **Сахаров, И. И.** Опыт высоконапорной инъекции в пластично-мерзлые грунты / И. И. Сахаров, А. Е. Захаров // Реконструкция городов и геотехническое строительство. – 2004. – № 8. – URL: <http://georeconstruction.net/journals/08/files/pdf/0508021.pdf> (дата обращения: 16.01.2025).

9 **Ибрагимов, М. Н.** Закрепление грунтов инъекцией цементных растворов : монография / М. Н. Ибрагимов, В. В. Семкин. – Москва : АСВ, 2012. – 256 с. – ISBN 978-5-93093-863-0.

10 Geotechnical engineering handbook / ed. by Braja M. Das. – Fort Lauderdale, FL : J. Ross Publishing, 2012. – 800 p. – ISBN 978-1-932159-83-7.

11 **Ланис, А. Л.** Метод напорной инъекции для усиления насыпей / А. Л. Ланис // Путь и путевое хозяйство. – 2009. – № 2. – С. 32–34. – ISSN 0131-5765.

A. L. Lanis // Track and track facilities. – 2009. – No. 6. – P. 33–35. – ISSN 0131-5765.

5 SP 22.13330.2016. Foundations of buildings and structures. Updated edition of SNiP 2.02.01-83* : set of rules : official edition : approved by the order of the Ministry of Construction and Housing and Communal Services of the Russian Federation dated December 16, 2016. N 970/pr and put into effect from June 17, 2017. – Moscow : Standartinform, 2016. – 228 p.

6 Stabilizing subgrades of transport structures by injecting solidifying solutions in cold regions. Sciences in Cold and Arid Regions / P. O. Lomov, A. L. Lanis, D. A. Razuvaev, M. G. Kavardakov. – 2021. – Vol. 13. – Iss. 5. – P. 357–365. – DOI 10.3724/SP.J.1226.2021.21040.

7 **Razuvaev, D. A.** Stabilization of the roadbed base by the injection method during degradation of permafrost soils / D. A. Razuvaev, R. S. Pechenkin // World of Transport. – 2024. – Vol. 22, No. 1 (110). – P. 6–16. – DOI 10.30932/1992-3252-2024-22-1-1.

8 **Sakharov, I. I.** Experience of high-pressure injection into plastic-frozen soils / I. I. Sakharov, A. E. Zakharov // Reconstruction of cities and geotechnical construction. – 2004. – No. 8. – URL: <http://georeconstruction.net/journals/08/files/pdf/0508021.pdf> (date of access: 01/16/2025).

9 **Ibragimov, M. N.** Soil stabilization by injection of cement mortars : monograph / M. N. Ibragimov, V. V. Semkin. – Moscow : ASV, 2012. – 256 p. – ISBN 978-5-93093-863-0.

10 Geotechnical engineering handbook / ed. by Braja M. Das. – Fort Lauderdale, FL : J. Ross Publishing, 2012. – 800 p. – ISBN 978-1-932159-83-7.

11 **Lanis, A. L.** Method of pressure injection for strengthening embankments / A. L. Lanis // Track and track facilities. – 2009. – No. 2. – P. 32–34. – ISSN 0131-5765.

D. A. Razuvaev, R. S. Pechenkin, A. L. Lanis

OPTIMIZATION OF INJECTION MORTARS FOR STABILIZATION OF SOFT BASE OF OPERATING SUBGRADE IN PERMAFROST REGION

Abstract. The article considers the problems of construction and maintenance of road facilities in the permafrost region related to the degradation of permafrost soils and the formation of soft soils at the base of structures. For stabilization of soft soils in the considered conditions it is proposed to use the method of pressure injection of soil-cement mortars in the mode of hydraulic fractures, overcoming its main disadvantages by optimizing the compositions of the mixtures used. The main direction of optimization is substantiated – reduction of the amount of cement used in mortars, which will reduce their cost, as well as the amount of associated heat generation, additionally thawing permafrost soils in the base.

Laboratory tests were supplied and carried out, which allowed to determine the dependence of the main characteristics of soil-cement injection mortars on the amount of cement (in the

minimum possible range of values), as well as to determine the minimum binder concentration that provides the stability of the mixture and hardened mortar.

An algorithm for optimizing the compositions of injection mortars for stabilizing soft bases of the operating subgrade sections under the considered conditions is proposed.

Keywords: railway, highway, subgrade, foundation soils, soft soils, soil injection, injection mortars.

For citation: Razuvaev, D. A. Optimization of injection mortars for stabilization of soft base of operating subgrade in permafrost region / D. A. Razuvaev, R. S. Pechenkin, A. L. Lanis // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2025. – No. 1. – P. 8–16. – DOI 10.46973/0201–727X_2025_1_8.

Сведения об авторах

Разуваев Денис Алексеевич

Сибирский государственный университет путей сообщения (СГУПС),
кафедра «Изыскания, проектирование и постройка железных и автомобильных дорог»,
кандидат технических наук, доцент,
e-mail: razdenis@mail.ru

Печенкин Роман Сергеевич

Сибирский государственный университет путей сообщения (СГУПС),
кафедра «Путь и путевое хозяйство»,
аспирант,
e-mail: pechenkinrs@gmail.com

Ланис Алексей Леонидович

Сибирский государственный университет путей сообщения (СГУПС),
кафедра «Путь и путевое хозяйство»,
доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой,
e-mail: alangeo@bk.ru

Information about the authors

Razuvaev Denis Alekseevich

Siberian State Transport University (STU),
Chair “Research, Design and Construction of Railways and Highways”,
Candidate of Engineering Sciences,
Associate Professor,
e-mail: razdenis@mail.ru

Pechenkin Roman Sergeevich

Siberian State Transport University (STU),
Chair “Railway and Railroad Facilities”,
Postgraduate Student,
e-mail: pechenkinrs@gmail.com

Lanis Alexey Leonidovich

Siberian State Transport University (STU),
Chair “Railway and Railroad Facilities”,
Doctor of Engineering Sciences, Professor,
Head of Chair,
e-mail: alangeo@bk.ru