

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ
УДК 625.12:624.139
DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2024-22-1-1>

Стабилизация основания земляного полотна инъекционным способом при деградации многолетнемерзлых грунтов



Денис РАЗУВАЕВ



Роман ПЕЧЕНКИН

Денис Алексеевич Разуваев¹,
Роман Сергеевич Печенкин²

^{1,2} Сибирский государственный университет путей сообщения, Новосибирск, Россия.

¹ ORCID 0000-0003-0850-3414; Scopus Author ID: 57204687242; РИНЦ SPIN-код: 3250-0657; РИНЦ Author ID: 726831.

✉ ¹ razdenis@mail.ru.

АННОТАЦИЯ

Расположение инфраструктуры железных дорог на основании из многолетнемерзлых грунтов повышает риски возникновения дефектов и деформации земляного полотна. В России многолетнемерзлые грунты занимают примерно 65 % площади страны. Как следствие, дефектность земляного полотна, расположенного в таких районах Восточного полигона железных дорог России, превышает средний показатель по сети.

Целью исследования является повышение эффективности стабилизации основания земляного полотна железнодорожного пути инъекционным способом при деградации многолетнемерзлых грунтов.

Для эксплуатируемого земляного полотна железных дорог в условиях деградации многолетнемерзлых грунтов и формирования слабых грунтов основания предложен усо-

вершенствованный алгоритм проектирования напорного инъектирования цементно-грунтовых растворов, реализующий комплексный подход.

Поставлен и выполнен лабораторный эксперимент по определению объемов тепловыделения инъекционных растворов различных рецептур за счет экзотермии цемента. Установлена линейная зависимость удельного тепловыделения инъекционных растворов от содержания цемента.

Предложена новая расчетная схема с эквивалентным слоем раствора в зоне стабилизации для прогнозирования величины растепления многолетнемерзлых грунтов основания при инъектировании материалов с цементным вяжущим. Предложено аналитическое решение рассматриваемой задачи для предварительных расчетов.

Ключевые слова: железная дорога, земляное полотно, грунты основания, многолетнемерзлые грунты, деградация многолетнемерзлых грунтов, таликовая зона, слабые грунты, инъектирование грунтов, цементно-грунтовый раствор, тепловыделение растворов.

Благодарности: данная работа выполнена при финансовой поддержке гранта ОАО «РЖД» по Договору № 5106471 от 28.12.2022 года на развитие научно-педагогических школ в области железнодорожного транспорта.

Для цитирования: Разуваев Д. А., Печенкин Р. С. Стабилизация основания земляного полотна инъекционным способом при деградации многолетнемерзлых грунтов // Мир транспорта. 2024. Т. 22. № 1 (110). С. 6–16. DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2024-22-1-1>.

Полный текст статьи в переводе на английский язык публикуется во второй части данного выпуска.
English translation of the full text of the article is published in the second part of the issue.

ВВЕДЕНИЕ

Транспортная стратегия Российской Федерации до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года¹ предусматривает модернизацию железнодорожной инфраструктуры Байкало-Амурской и Транссибирской железнодорожных магистралей с развитием пропускных и провозных способностей. При этом надежность и безопасность железнодорожного пути, в том числе земляного полотна, являются основными показателями, требующими особого внимания.

Вместе с тем на сегодняшний день наибольшие риски, свойственные Восточному полигону, связаны с протяженностью дефектного и деформирующегося земляного полотна железных дорог. Это связано с расположением значительной части инфраструктуры железных дорог Восточного полигона на основаниях из многолетнемерзлых грунтов [1–3]. Изменение водно-теплого режима эксплуатируемой системы «насыпь – основание» в таких сложных природно-климатических и инженерно-геологических условиях приводит к деградации многолетнемерзлых грунтов (ММГ) с формированием в основаниях таликовых зон с низкой несущей способностью [3–5].

Аналогичные проблемы наблюдаются и в ряде других стран, таких как Китай [6; 7] и Канада², со схожими природно-климатическими условиями и распространением многолетнемерзлых грунтов в основании сооружений.

Это требует разработки и реализации новых эффективных решений по стабилизации оснований. Одним из возможных эффективных способов повышения физико-механических характеристик слабых грунтов таликовых зон является метод напорной инъекции грунтово-цементного раствора, хорошо зарекомендовавший себя при стабилизации слабых оснований [8; 10; 11].

При этом стоит отметить и недостатки метода напорной инъекции в случае его при-

менения для стабилизации оттаявших многолетнемерзлых грунтов основания. В первую очередь речь идет о нарушении теплообмена [10; 11] в основании в период инъектирования и затвердевания цемента-грунтового раствора из-за его собственной теплоты и процессов экзотермии цементного вяжущего³. Эти процессы приводят к дальнейшему растеплению многолетнемерзлых грунтов и возникновению слоя слабого оттаявшего грунта непосредственно под усиленным массивом. Во-вторых, усиление основания методом напорной инъекции практически не влияет на водно-тепловой режим системы «насыпь – основание» и условия теплообмена сооружения с атмосферой в период дальнейшей эксплуатации. В условиях, в которых положение границы ММГ не стабилизировалось, возможна их дальнейшая деградация, также приводящая к формированию слабых грунтов под усиленным массивом и просадкам.

Для исключения негативных последствий растепления многолетнемерзлых грунтов в процессе инъектирования в работе [10] предложен алгоритм проектирования итерационного инъектирования. В предложенном алгоритме инъектирование проектируется по стандартной технологии, но в несколько этапов (итераций). При каждой последующей итерации используется значительно меньшее количество раствора и существенно снижается растеplяющий эффект. Проектирование стабилизации завершается на той итерации инъектирования, при которой растеplяющий эффект не вызывает просадок основания сверх допустимых значений. Однако алгоритм проектирования, предложенный авторами в [10], применим только в условиях стабилизации положения границы ММГ в основании, что резко ограничивает область его применения.

В этой связи целью исследования является повышение эффективности стабилизации основания земляного полотна железнодорожного пути инъекционным способом при деградации многолетнемерзлых грунтов. В настоящей работе представлены предложения по совершенствованию способа проектирования напорного инъектирования цемента-грунтовых растворов для оснований с ММГ,

¹ Транспортная стратегия Российской Федерации до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года. Утверждена Распоряжением Правительства Российской Федерации от 27 ноября 2021 г. № 3363-р. [Электронный ресурс]: <http://static.government.ru/media/files/7enYF2uL5kFZIOpQhLl0nUT91RjCbeR.pdf>.

² UCalgary researcher heads up major federal permafrost study in Manitoba [Электронный ресурс]: <https://schulich.ualgary.ca/news/ucalgary-researcher-heads-major-federal-permafrost-study-manitoba>. Доступ 08.02.2024.

³ Руководство по бетонированию фундаментов и коммуникаций в вечноммерзлых грунтах с учетом твердения бетона при отрицательных температурах / Стройиздат. – НИИЖБ Госстроя СССР, 1982., 160 с.



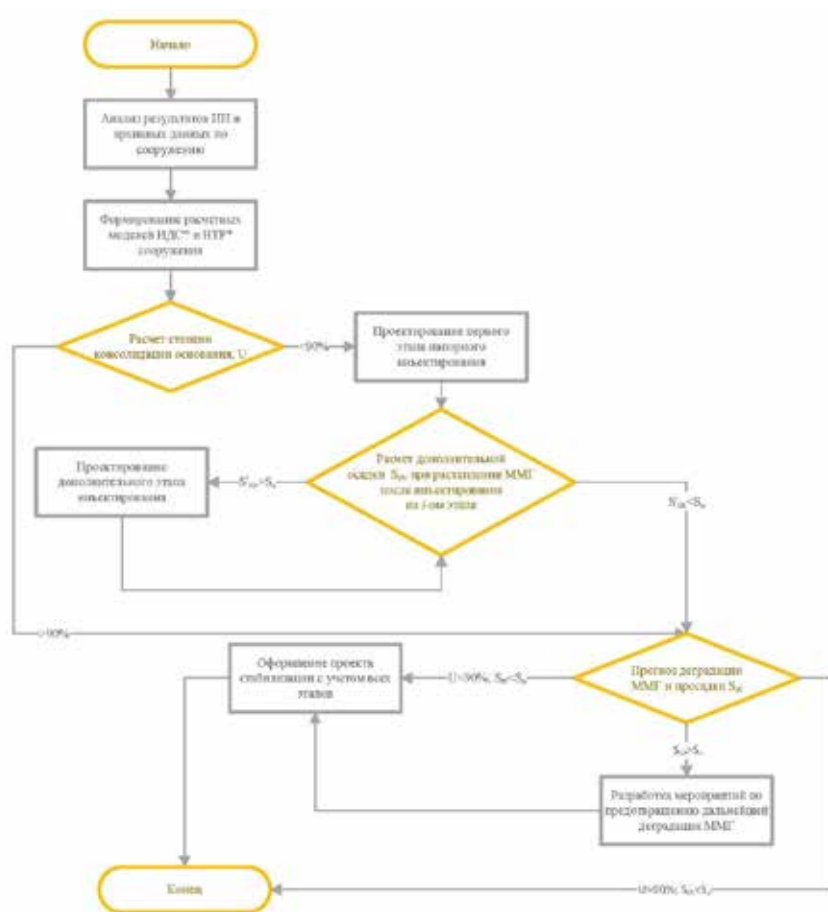


Рис. 1. Усовершенствованный алгоритм проектирования напорного инъецирования цементно-грунтовых растворов для оснований с ММГ [выполнено авторами]: ИИ – инженерные изыскания; НДС – напряженно-деформированное состояние; ВТР – водно-тепловой режим; $S_{доп}$ – допустимая осадка основания земляного полотна; S_d – осадка основания из-за изменения общего ВТР на участке сооружения.

результаты лабораторного эксперимента по определению объемов тепловыделения инъекционных растворов, а также предложены к обсуждению расчетная схема и метод прогнозирования величины растепления многолетнемерзлых грунтов основания при инъецировании.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Совершенствование способа проектирования напорного инъецирования

Для адаптации к реальным, широко распространенным условиям эксплуатации железнодорожного пути (положение границы ММГ не стабилизировалось), предлагается подходить к проектированию напорного инъецирования цементно-грунтовых растворов для оснований ММГ комплексно. Это предусматривает выполнение расчетного обоснования комплекса мер, направленных и на

повышение несущей способности грунтов таликовых зон, и на стабилизацию положения границы многолетнемерзлых грунтов основания.

Усовершенствованный алгоритм проектирования напорного инъецирования цементно-грунтовых растворов для оснований с ММГ, реализующий комплексный подход, представлен на рис. 1.

Согласно предложенному алгоритму, решение о повышении физико-механических характеристик (стабилизации) грунтов таликовых зон принимается из условия завершения фильтрационной консолидации основания, а решение о стабилизации положения границы ММГ в основании – из условия не превышения возникающих из-за деградации предельных значений просадок пути.

Исходя из этих условий, по результатам расчета возможно получение одного из следующих четырех решений:

– стабилизационные мероприятия на участке не требуются;

– требуется стабилизация слабых грунтов таликовых зон без стабилизации положения ММГ;

– требуется стабилизация положения границы ММГ без улучшения характеристик грунтов таликовых зон;

– требуется комплексное решение по стабилизации грунтов таликовых зон и положения границы ММГ.

Для стабилизации слабых грунтов назначается напорное инъецирование цементно-грунтовых растворов в несколько этапов [10], а для стабилизации положения границы ММГ – одно из эффективных мероприятий по термостабилизации [6; 12–16]. После реализации всех назначенных мероприятий предусматриваются работы по механизированной выправке пути.

Предусмотренное алгоритмом напорное инъецирование выполняется через вертикальные и наклонные инъекторы с откосов земляного полотна, а в случае наличия двух и более путей – дополнительно с межпутного пространства вне габаритов приближения строения [8; 9; 17]. Такая расстановка инъекторов позволяет выполнять работы с минимальными ограничениями движения поездов, а в некоторых случаях – без ограничений [17]. Все работы должны выполняться в межпоездной интервал в соответствии с действующими правилами технической эксплуатации пути.

В процессе инъецирования и дальнейшей эксплуатации земляного полотна с элементами термостабилизации выполняется мониторинг температурного поля системы «насыпь – основание». Мониторинг выполняется по установленным до выполнения работ термометрическим скважинам. Скважины устанавливаются в соответствии с действующими нормативными требованиями по измерительным поперечным профилям с обочин, у подошвы насыпи, в междупутье (при необходимости) и в полосе отвода (контрольные). Расстояние между измерительными поперечными профилями назначается при проектировании и зависит от протяженности инъецируемого участка основания и его инженерно-геологических особенностей. Контроль обеспечения несущей способности основания выполняется методами статического

или динамического зондирования мобильными установками [9; 17].

Предложенное в алгоритме проектирования (рис. 1) комплексное решение позволяет не только решить проблему слабых грунтов таликовых зон, но и стабилизировать положение границы ММГ. Положительным техническим эффектом применения данного решения, в отличие от классических способов термостабилизации, является существенное ускорение процесса стабилизации с получением результата в достаточно короткий срок, экономическим – существенное снижение количества и/или мощности, а, соответственно, и стоимости термостабилизирующих устройств.

Постановка, проведение и результаты лабораторного эксперимента

Для дальнейшего развития расчетно-теоретического аппарата усовершенствованного выше способа проектирования стабилизации оснований с многолетнемерзлыми грунтами поставлен и выполнен лабораторный эксперимент по определению объемов тепловыделения инъекционных растворов различных рецептур за счет экзотермии цемента.

Применение известных зависимостей³ тепловыделения портландцемента или растворов (бетонов) на его основе [18] для решаемой нами задачи не представляется возможным по ряду причин. Во-первых, инъекционные цементно-грунтовые растворы имеют существенные отличия [17] от общестроительных растворов и бетонов как в плане водоцементного отношения, так и в плане состава, поскольку в качестве основного структурного заполнителя, как правило, используются глинистые и песчаные грунты в различном соотношении. Во-вторых, существующие зависимости, как правило, получены для нормальных температурно-влажностных условий, соответствующих условиям твердения бетонов и растворов в строительных конструкциях. Условия твердения инъекционных растворов, особенно при их применении в талых грунтах основания с близким залеганием ММГ, существенно отличаются от нормальных и, очевидно, влияют на тепловыделение за счет экзотермии цемента.

Анализ существующих методик и подходов к определению тепловыделения цемента при твердении показал, что при таких иссле-



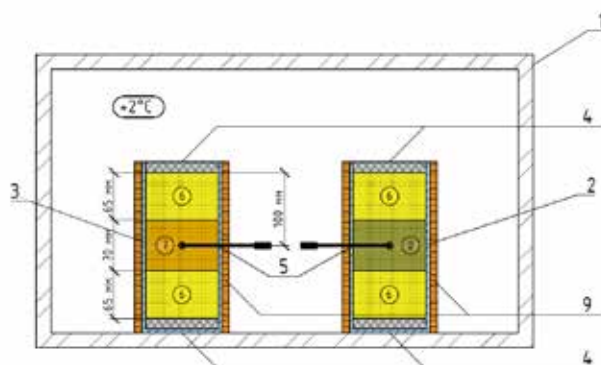


Рис. 2. Калориметр для определения объемов тепловыделения инъекционных растворов на моделях «грунт-раствор-грунт» [выполнено авторами]: 1 – корпус термостатирующей камеры; 2 – форма для испытуемой модели; 3 – форма для модели сравнения; 4 – охлаждающие плиты с термоэлектрическими модулями и датчиками температуры; 5 – датчики температуры; 6 – грунтовая часть модели; 7 – грунтовый раствор в модели сравнения; 8 – цементно-грунтовый раствор в испытуемой модели; 9 – внешняя теплоизоляция форм с моделями.

дованиях в основном используются калориметры с адиабатическим или изотермическим режимом твердения. Адиабатический режим при определении тепловыделения бетона при твердении предусмотрен как отечественными (ГОСТ 24316), так и зарубежными (EN 12390–15:2019, NEQ) нормативными документами. Изотермические калориметры, как правило, используются для определения тепловыделения при твердении цементов⁴ (ГОСТ 310.5, BS EN 196–11:2018) либо исследования модельных бетонных смесей [18].

Адиабатический режим подразумевает отсутствие обмена теплотой исследуемой системы с окружающим пространством с закономерным повышением температуры испытываемого образца. Изотермический режим подразумевает проведение испытаний в термостатированной камере, в которой тепловыделение образца рассеивается достаточно быстро, и его температура остается постоянной. Определение тепловыделения при этом выполняется по разнице между тепловыделением исследуемых образцов и образцов сравнения. Основным недостатком адиабатического режима считается непрерывное и существенное повышение температуры образцов (выше, чем в реальных условиях строительных площадок), что приводит к самоускорению процесса тепловыделения

[18]. Изотермические калориметры поддерживают заданную температуру твердения, соответствующую реальным условиям, однако есть ограничения по размерам испытуемых образцов, поэтому исследования проводят на тонкодисперсных растворах или моделях бетонных смесей [18; 19].

Как уже отмечалось ранее, условия твердения инъекционных растворов при их применении в талых грунтах основания с близким залеганием ММГ существенно отличаются от условий в строительных конструкциях, поэтому применение вышеописанных режимов исследования процессов тепловыделения не представляется возможным. В рассматриваемых условиях цементно-грунтовые инъекционные растворы будут твердеть в грунтовом массиве с достаточно низкими температурами. Кроме того, температура инъекционного раствора в процессе твердения в таких условиях будет снижаться. Это связано с его теплообменом в основании с большим объемом охлажденных ($0...+4^{\circ}\text{C}$), водонасыщенных глинистых грунтов с достаточно высокой теплоемкостью. Такие условия не моделируются ни в адиабатическом, ни в изотермическом калориметре.

Поэтому для выполнения эксперимента на моделях «грунт-раствор-грунт» в условиях, приближенных к описанным выше, сконструирован калориметр на основе аппаратной и программной части прибора ГТ 1.1.12 НПП Геотек.

Эксперимент (рис. 2) заключался в охлаждении термостатированных моделей «грунт-раствор-грунт» и модели сравнения фиксированным тепловым потоком постоянной мощ-

⁴ Напр.: An experimental comparison between isothermal calorimetry, semi-adiabatic calorimetry and solution calorimetry for the study of cement hydration (NT TR 522) [Электронный ресурс]: <https://www.nordtest.info/wp/2003/03/28/an-experimental-comparison-between-isothermal-calorimetry-semi-adiabatic-calorimetry-and-solution-calorimetry-for-the-study-of-cement-hydration-nt-tr-522>. Доступ 08.02.2024.

Таблица 1

Составы испытываемых инъекционных растворов

№ состава	Расход материалов для приготовления 1 литра раствора, г		
	Цемент (ЦЕМ I 42,5Н)	Грунт*: Супесь песчанистая с $I_p=5$	Вода
1	300	1650	180
2	350	1600	220
3	400	1550	260
4	450	1500	270
5	500	1450	360

* грунт, применяемый в практике инъектирования, обеспечивающий соотношение глинистых и песчаных частиц, близкое к оптимальному [17].

ности. В модели сравнения применялся раствор (7, рис. 2) без добавления цемента. Элементы калориметра и грунтовая часть (6, рис. 2) в моделях термостатировались до температуры +2°C (показательная температура оттаявших грунтов основания земляного полотна), растворы (7, 8, рис. 2) термостатировались до температуры +24°C (температура приготовления инъекционных растворов на площадке производства работ в теплый период года). По отношению времени охлаждения испытываемых моделей и модели сравнения до температуры +2°C в дальнейшем вычислялось удельное тепловыделение инъекционных растворов различных рецептов за счет экзотермии процесса гидратации цемента. Для охлаждения моделей по их торцам устанавливались термостатированные охлаждающие (+2°C) плиты (4, рис. 2) с термоэлектрическими модулями и датчиками температуры.

Время проведения эксперимента ограничивалось временем охлаждения моделей до +2°C по данным с датчиков температуры (5, рис. 2), но не менее трех суток. Температура регистрировалась с интервалами не более пяти минут. При дальнейшем твердении раствора в реальных условиях (более 3–7 суток) тепловыделение продолжается, но в значительно меньшем количестве, которым в инженерных расчетах возможно пренебречь.

Испытуемые модели и модели сравнения приводились к равной модельной теплоемкости C_{mod} . Это достигалось изменением массы грунтового раствора ($m_s + m_{ws}$) в моделях сравнения до выполнения следующего условия:

$$c_s m_{sc} + c_w m_{wc} + c_c m_c = c_s m_s + c_w m_{ws}, \quad (1)$$

где c_s – удельная теплоемкость сухого грунта в растворах, Дж/(кг·К);

c_w – удельная теплоемкость воды в растворах, принимаемая 4190 Дж/(кг·К);

c_c – удельная теплоемкость цемента в цементно-грунтовом растворе, принимаемая 800 Дж/(кг·К);

m_{sc} – масса грунта в цементно-грунтовом растворе испытываемой модели, кг;

m_{wc} – масса воды в цементно-грунтовом растворе испытываемой модели, кг;

m_c – масса цемента в цементно-грунтовом растворе испытываемой модели, кг;

m_s – масса грунта в грунтовом растворе модели сравнения, кг;

m_{ws} – масса воды в грунтовом растворе модели сравнения, кг.

При изменении массы грунтового раствора в модели сравнения по (1) в обязательном порядке сохранялась пропорция $\frac{m_s}{m_{ws}} = \frac{m_{sc}}{m_{wc}}$.

Проведение эксперимента начиналось с подготовки цементно-грунтового раствора (8, рис. 2) для испытываемой модели и грунтового раствора (7, рис. 2) для модели сравнения. Все материалы для растворов предварительно термостатировались до +24°C, грунт высушивался. Составы испытываемых цементно-грунтовых растворов приведены в таблице 1, составы грунтовых растворов для моделей сравнения подбирались по методике, описанной выше.

Непосредственно после приготовления раствора в заранее термостатированных до +2°C формах (2, рис. 2) и (3, рис. 2) изготавливались испытываемая и модель сравнения (рис. 3). В качестве грунтовой части модели (6, рис. 2) применялась термостатированная до +2°C супесь песчанистая, водонасыщенная, пластичной консистенции.

В процессе проведения (рис. 4) лабораторного эксперимента (охлаждения термостатированных моделей «грунт-раствор-грунт») выполнялось построение графиков изменения температуры в середине экспериментальных моделей. Опыт завершался при устойчивом термостатировании системы и моделей до +2°C, с поддержанием такого состояния не менее суток (общее время проведения эксперимента составляло не менее трех суток).



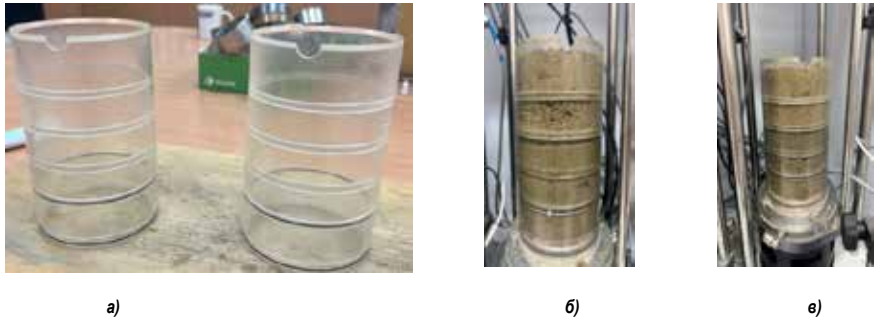


Рис. 3. Изготовление экспериментальных моделей [выполнено авторами]:
а) формы калориметра; б) модель сравнения с грунтовым раствором;
в) испытуемая модель с цементно-грунтовым раствором.

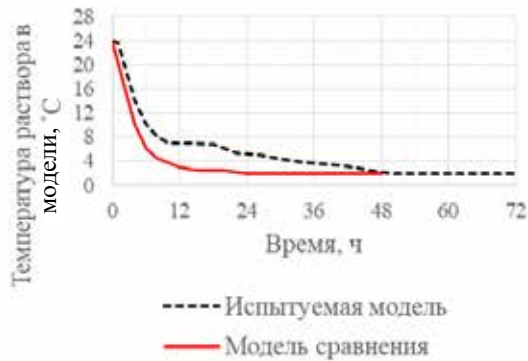


Рис. 4. Проведение лабораторного эксперимента [выполнено авторами]:
а) общий вид установки; б) пример графика температуры в середине испытуемой модели для состава № 3 и модели сравнения во времени.

С получаемых графиков снималось время охлаждения испытуемых модели и модели сравнения t_1 и t_2 соответственно.

Известно, что мощность теплового потока определяется по формуле:

$$N = Q/t, \quad (2)$$

где Q – количество теплоты, переданное системе, Дж; t – время, с.

Учитывая, что плиты с термоэлектрическими модулями (4, рис. 2) охлаждали испытуемую модель (с цементом) и модель сравнения (без цемента) с одинаковой мощностью, но разное время, t_1 и t_2 соответственно, и допуская, что из-за наличия теплоизоляции, плиты охлаждали только модели без расхода мощности на остальные элементы системы, справедливо выражение:

$$\frac{Q_{mod}}{t_2} = \frac{Q_{mod} + Q_c}{t_1}, \quad (3)$$

где Q_{mod} – количество теплоты, переданное от плит (4, рис. 2), для охлаждения (термостатирования до $+2^\circ\text{C}$) моделей равной теплоемкости, Дж;

Q_c – количество теплоты, переданное от плит (4, рис. 2), для компенсации тепловыделения цемента при твердении в испытуемой модели, Дж.

$$\text{Тогда, } Q_c = Q_{mod} \cdot \left(\frac{t_1}{t_2} - 1 \right). \quad (4)$$

Принимая во внимание, что итоговое значение температуры заранее термостатированной грунтовой части модели не изменилось, а все количество теплоты Q_{mod} компенсировало охлаждение грунтового раствора в моделях, тогда, с учетом равенства (1):

$$Q_c = (c_s \cdot m_s + c_w \cdot m_{ws}) \cdot \Delta T \cdot \left(\frac{t_1}{t_2} - 1 \right), \quad (5)$$

где ΔT – изменение температуры грунтового раствора в модели, K .

Удельное тепловыделение инъекционных растворов за счет гидратации цемента при твердении в кДж на один литр материала вычисляется как:

$$q_c = 0,001 \cdot \frac{Q_c}{V_{is}}, \quad (6)$$

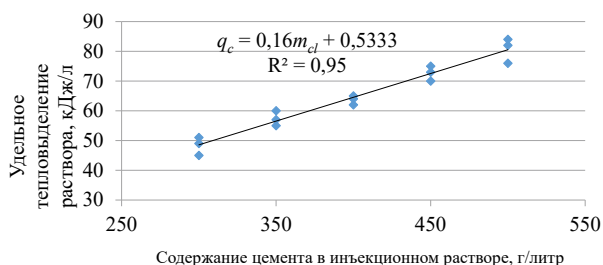


Рис. 5. Зависимость удельного тепловыделения инъекционных растворов от содержания цемента при инъектировании слабых грунтов таликовых зон [выполнено авторами].

где V_{is} – объем раствора в моделях, принимаемый 0,5495 л.

По каждому из исследуемых составов (таблица 1) выполнена серия из трех лабораторных экспериментов, по результатам которых выявлена зависимость удельного тепловыделения инъекционных растворов q_c от содержания цемента m_{cl} (в интервале от 300 до 500 г/л), представленная на рис. 5.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Выявленную зависимость (рис. 5) возможно аппроксимировать линейной функцией:

$$q_c = 0,16m_{cl} + 0,5333, \quad (7)$$

которую в дальнейшем предлагается использовать для прогнозирования объемов тепловыделения инъекционных растворов различных рецептур за счет экзотермии цемента при проектировании напорного инъектирования цемента-грунтовых растворов в таликовые зоны оснований с ММГ. Данная зависимость учитывает как условия твердения инъекционных растворов в рассматриваемых условиях, так и особенности их состава. Для иных условий инъектирования, существенно отличающихся от рассматриваемых в работе, рекомендуется выполнять непосредственное определение удельного тепловыделения инъекционного раствора по описанной выше методике.

Для прогнозирования величины растепления h_{thi} многолетнемерзлых грунтов основания при инъектировании цементных растворов предлагается к обсуждению расчетная схема с эквивалентным слоем (рис. 6). Очертание железнодорожной насыпи (1, рис. 6) на расчетной схеме, а также границы между консолидированными (2, рис. 6), неконсолидированными (3, рис. 6) и многолетнемерзлыми (4, рис. 6) грунтами основания, и, как следствие, форма таликовой зоны принима-

ются по результатам инженерных изысканий на конкретном объекте.

Зона инъекционной стабилизации основания (5, рис. 6) назначается по результатам оценки НДС с учетом фактической структуры и состава слагающих его грунтов. По результатам расчетов несущей способности и осадки основания назначается ширина и мощность h_{st} зоны стабилизации. Для обеспечения требуемых физико-механических характеристик усиленного основания подбирается средневзвешенный коэффициент армирования зоны стабилизации раствором k_a с учетом количества инженерно-геологических элементов в этой зоне и их относительного объема. На практике [17], раствор в зоне стабилизации распространяется хаотично, в виде массивов, столбов и прослоев, что усложняет проведение теплотехнических расчетов. Поэтому для определения величины растепления ММГ в основании h_{thi} при инъектировании предлагается использовать расчетную схему (рис. 6) с эквивалентным слоем раствора (5э, рис. 6) мощностью h_{el} в нижней части зоны стабилизации (у кровли ММГ).

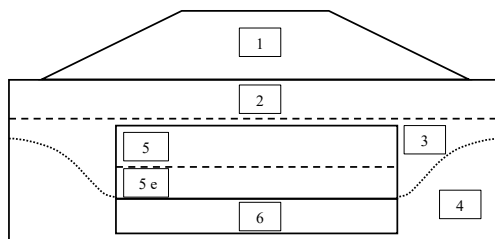


Рис. 6. Расчетная схема для прогнозирования величины растепления ММГ в основании при инъектировании цемента-грунтовых растворов [выполнено авторами]: 1 – железнодорожная насыпь; 2 – консолидированные глинистые грунты основания; 3 – неконсолидированные глинистые грунты основания; 4 – многолетнемерзлые грунты основания; 5 – зона стабилизации грунтов основания инъектированием цемента-грунтовых растворов; 5э – эквивалентный слой раствора в зоне стабилизации; 6 – зона растепления (деградации) ММГ за счет тепловыделения инъекционного раствора.



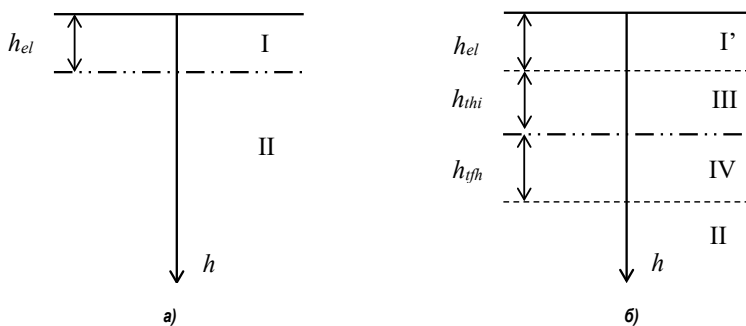


Рис. 7. Характерные зоны при тепловом взаимодействии цемента-грунтовых растворов и ММГ при инъецировании [выполнено авторами]: а) до проведения инъецирования; б) после проведения инъецирования.

Такой подход не только не вносит существенных ошибок в теплотехнические расчеты, но и соответствует реальным условиям напорного инъецирования, когда раствор распространяется в зоны наименее консолидированных грунтов основания. При этом:

$$h_{el} = k_a \cdot h_{sf} \quad (8)$$

Мощность зоны растепления h_{thi} многолетнемерзлых грунтов основания (6, рис. 6) рекомендуется определять с помощью специализированных программных комплексов с заданием внутреннего источника теплоты в виде эквивалентного слоя в соответствии с предложенной расчетной схемой. Объем общего тепловыделения следует определять в зависимости от начальной температуры и состава инъекционных растворов, а также удельного тепловыделения q_c , определенного по результатам испытаний или зависимости (7) при инъецировании схожими материалами и в условиях, схожих с рассмотренными в работе. По результатам расчета мощности зоны растепления, в соответствии с алгоритмом проектирования напорного инъецирования (рис. 1), возможно оценить дополнительную осадку основания S_{thi} при растеплении ММГ, а также оценить

необходимость и количество дополнительных этапов (итераций) инъецирования.

Для инженерных расчетов предлагается упрощенный метод прогнозирования величины h_{thi} . Подобные упрощенные расчеты применяются, например, в Руководстве³, при этом для решаемой задачи их использование не обосновано, поскольку в них применяются расчетные схемы, материалы и некоторые теплофизические параметры, которые не соответствуют рассматриваемым нами условиям.

Эту задачу предлагается решать в одномерной постановке по оси насыпи и рассматривать на первом этапе тепловое взаимодействие зоны I мощностью h_{el} со слабыми грунтами основания в талом состоянии и средней температурой T_l и зоны II, представленной многолетнемерзлыми грунтами основания (рис. 7 а). Теплотехнические параметры грунтов в указанных зонах определяются по результатам изысканий. Поскольку, в общем, в работе рассматриваются условия деградации ММГ, температура на границе талых и мерзлых грунтов принимается как T_{th} – температура окончания оттаивания грунтов.

После инъецирования (рис. 7 б) слабые грунты зоны I рассматриваются как эквивалентный слой раствора (5э, рис. 6) мощностью h_{el} . Эта зона (I') является расчетной зоной тепловыделения инъекционного раствора с начальной температурой T_{sc} и мощностью h_{el} за счет собственной теплоты и теплоты экзотермии цемента. Количество теплоты, выделенное в данной зоне, составит:

$$Q_{I'} = \left[(c_s \cdot m'_s + c_w \cdot m'_{wc} + c_c \cdot m'_c) \cdot (T_{sc} - T_{I'}) + q_c \cdot 10^6 \right] \cdot h_{el} \cdot a, \quad (9)$$

где m'_s, m'_{wc}, m'_c – соответственно расход грунта, воды и цемента в проектом цемента-

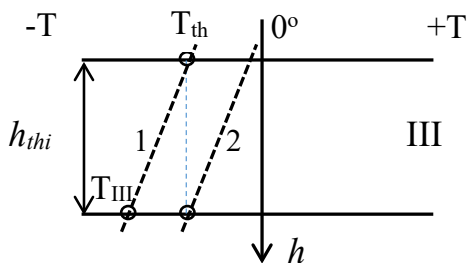


Рис. 8. Схема изменения температуры в зоне III после инъецирования и стабилизации температурного фона [выполнена авторами]: 1, 2 – температурное поле до и после оттаивания ММГ соответственно.

грунтовым растворе (для приготовления 1 м³), кг/м³;

$T_{I'}$ – температура зоны I' после полного затвердевания раствора и стабилизации температуры по окружающему грунту, принимаем $T_{I'} \approx T_I$, К;

a – коэффициент, равный 1 м².

В зоне III с мощностью h_{th} происходит деградация ММГ за счет тепловыделения инъекционного раствора. Количество теплоты, поглощенное данной зоной, складывается из теплоты, необходимой для фазового перехода «лед–вода», а также теплоты, необходимой для повышения температуры сначала мерзлых, а затем (после фазового перехода) талых грунтов:

$$Q_{III} = \left[\lambda_i \cdot \rho_d^g \cdot (W_{tot} - W_w) + \left(\frac{c_g + c_{th}}{2} \right) \cdot (T_{th} - T_{III}) \right] \cdot h_{th} \cdot a, \quad (10)$$

где λ_i – удельная теплота плавления льда, Дж/кг;

ρ_d^g – плотность скелета многолетнемерзлых грунтов, кг/м³;

W_{tot} – суммарная влажность многолетнемерзлых грунтов, д. е.;

W_w – влажность многолетнемерзлых грунтов за счет не замёрзшей воды, д. е.;

c_g – удельная теплоемкость многолетнемерзлых грунтов, Дж/(м³·К);

c_{th} – удельная теплоемкость оттаявшего грунта, Дж/(м³·К);

T_{III} – максимальная отрицательная температура ММГ в зоне III до выполнения инъектирования по данным изысканий, К.

Выражение (10) справедливо при изменении температуры в зоне III по схеме, представленной на рисунке 8.

В зоне IV с мощностью h_{th} происходит повышение температуры ММГ за счет тепловыделения инъекционного раствора. Количество теплоты, поглощенное данной зоной, составит:

$$Q_{IV} = c_g \cdot \left(\frac{T_{th} - T_{III}}{2} \right) \cdot h_{th} \cdot a. \quad (11)$$

При неоднородности структуры и состава грунтов в зонах III и IV физические характеристики грунтов, в том числе их теплоемкости, используемые в (10) и (11), рекоменду-

ется принимать по среднему значению в пределах рассматриваемых зон.

Допуская, что основная часть тепловыделения от инъекционного раствора в итоге будет направлена на растепление многолетнемерзлых грунтов основания, без существенного рассеивания тепла через значительную толщу вышележащих грунтов в атмосферу, справедливо выражение:

$$Q_{I'} = Q_{III} + Q_{IV}. \quad (12)$$

Тогда h_{th} можно определить через приведенное внизу страницы аналитическое решение (13), которое позволяет решать задачу прогноза величины растепления ММГ при инъектировании на основании данных, получаемых по результатам инженерных изысканий на объекте, а также решений и предложений, полученных в настоящей работе.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для повышения эффективности стабилизации основания земляного полотна железнодорожного пути при деградации ММГ усовершенствован способ проектирования напорного инъектирования цемента-грунтовых растворов. Способ адаптирован к реальным, широко распространенным условиям эксплуатации железнодорожного пути на слабом основании при оттаивании ММГ.

Описаны постановка и проведение, а также даны результаты лабораторного эксперимента по определению объемов (рис. 5) тепловыделения инъекционных растворов различных рецептов за счет экзотермии цемента.

Предложена расчетная схема для прогнозирования величины растепления ММГ в основании при инъектировании цемента-грунтовых растворов для теплотехнических расчетов в специализированных программных комплексах. Кроме того, предложено аналитическое решение для инженерных расчетов (13). В дальнейшем возможно совершенствование полученного аналитического решения на основе определения некоторых эмпирических коэффициентов.

Полученные результаты позволяют выполнять прогноз величины растепления h_{th} мно-

$$h_{th} = \frac{\left[(c_s \cdot m_{sc} + c_w \cdot m_{wc} + c_c \cdot m_c) \cdot (T_{sc} - T_{I'}) + q_c \cdot 10^6 \right] \cdot h_{cl} - c_g \cdot \left(\frac{T_{th} - T_{III}}{2} \right) \cdot h_{th}}{\lambda_i \cdot \rho_d^g \cdot (W_{tot} - W_w) + \left(\frac{c_g + c_{th}}{2} \right) \cdot (T_{th} - T_{III})}. \quad (13)$$





голетнемерзлых грунтов основания при инъектировании цементных растворов и в дальнейшем оценивать дополнительную осадку основания $S_{ин}$, а также необходимость и количество дополнительных итераций инъектирования.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Сазонов В. Н., Ашпиз Е. С. Актуальные проблемы обеспечения надежности земляного полотна на Восточном полигоне // Железнодорожный транспорт. – 2015. – № 9. – С. 28–31. EDN: UJYKON.
2. Ланис А. Л., Разуваев Д. А. Инженерное обследование основания земляного полотна на подходах к мостам в зоне многолетнемерзлых грунтов (на примере участка Лопча–Хорогочи Дальневосточной железной дороги) // Политранспортные системы: материалы IX Международной научно-техн. конференции, Новосибирск, 17–18 ноября 2016 года / Сибирский государственный университет путей сообщения. – Новосибирск: СГУПС, 2017. – С. 113–117. EDN: ZWVQLJ.
3. Кудрявцев С. А., Кажарский А. В., Вальцева Т. Ю. [и др.]. Конструкции усиления насыпей железных дорог на вечноммерзлых грунтах при строительстве вторых путей Восточного Полигона // Проектирование развития региональной сети железных дорог. – 2016. – № 4. – С. 243–250. EDN: XEEQXJ.
4. Lanis, A. L., Razuvaev, D. A. Systematization of features and requirements for geological survey of railroad subgrades functioning in cold regions. Sciences in Cold and Arid Regions, 2017, Vol. 9, Iss. 3, pp. 205–212. DOI: 10.3724/SPJ.1226.2017.00205. EDN: XOEQKD.
5. Ашпиз Е. С., Вавринюк Т. С. Расчет деформаций насыпей в районах мерзлоты // Мир транспорта. – 2012. – Т. 10. – № 3 (41). – С. 102–107. EDN: PCDSHT.
6. Harris, S. A. The Tibetan Railroad: Innovative Construction on Warm Permafrost in a Low-Latitude, High-Altitude Region. In: Engineering Earth: The impacts of megaengineering projects. Springer Science and Business Media, 2011, Chapter 43, pp. 747–765. DOI: 10.1007/978-90-481-9920-4_43.
7. Liu, H., Huang, S., Xie, C., Tian, B., Chen, M., Chang, Z. Monitoring Roadbed Stability in Permafrost Area of Qinghai-Tibet Railway by MT-InSAR Technology. Land, 2023, Vol. 12, Iss. 2, 474. DOI: <https://doi.org/10.3390/land12020474>.
8. Ашпиз Е. С., Вавринюк Т. С. Усиление деформирующихся длительно эксплуатируемых насыпей на многолетнемерзлом основании // Политранспортные системы: материалы IX Международной научно-техн. конференции, Новосибирск, 17–18 ноября 2016 года / Сибирский государственный университет путей сообщения. – Новосибирск: СГУПС, 2017. – С. 86–90. EDN: ZWVQLJ.
9. Ланис А. Л. Применение метода напорной инъекции для усиления насыпей // Путь и путевое хозяйство. – 2009. – № 6. – С. 33–35. EDN: PXHCMF.
10. Lomov, P. O., Lanis, A. L., Razuvaev, D. A., Kavardakov, M. G. Stabilizing subgrades of transport structures by injecting solidifying solutions in cold regions. Sciences in Cold and Arid Regions, 2021, Vol. 13, Iss. 5, pp. 357–365. DOI: 10.3724/SPJ.1226.2021.21040. EDN: DKSADH.
11. Sakharov, I., Kudryavtsev, S., Paramonov, V. [et al.] Ensuring the operational suitability of buildings, railways and bridges in of the Arctic zone in conditions of global warming // X International Scientific Siberian Transport Forum – TransSiberia 2022, Novosibirsk, 02–05 марта 2022 года. Novosibirsk, Elsevier B.V., 2022, pp. 2506–2514. DOI: 10.1016/j.trpro.2022.06.288. EDN: GXCWVQ.
12. Ашпиз Е. С. Опыт сооружения земляного полотна на железных дорогах, расположенных на многолетнемерзлых грунтах: проблемы и пути их решения // Бюллетень Объединенного ученого совета ОАО РЖД. – 2019. – № 1. – С. 21–27. EDN: TQJHVX.
13. Кондратьев В. Г., Валиев Н. А. Технология и результаты дополнительного охлаждения откосов земляного полотна на центральном участке БАМ // Кулагинские чтения: техника и технологии производственных процессов: XV Международная научно-практ. конференция: сб. ст. в 3 ч., Чита, 30 ноября – 02 декабря 2015 года. Часть 3. – Чита: Забайкальский государственный университет, 2015. – С. 156–161. EDN: VHJKST.
14. Пасек В. В., Краев А. Н., Пасков М. В., Андреев В. С. Стабилизация температурного режима грунтов оснований сооружений в сложных мерзлотно-грунтовых условиях заполярной и приполярной тундры // Вестник Тюменского государственного архитектурно-строительного университета. – 2015. – № 4. – С. 89–93. EDN: VHLWLR.
15. Пасек В. В., Воробьев С. С., Поз Г. М., Пасек В. В. Система поверхностного охлаждения насыпи в зоне вечной мерзлоты // Путь и путевое хозяйство. – 2024. – № 1. – С. 2–6. EDN: NLTQVZ.
16. Кудрявцев С. А., Вальцева Т. Ю., Котенко Ж. И., Гаврилов И. И. Прогнозирование процессов промерзания и деградации многолетнемерзлых оснований насыпей // Путь и путевое хозяйство. – 2022. – № 4. – С. 34–35. EDN: DQWLLR.
17. Ланис А. Л. Армирование эксплуатируемых высоких насыпей с инъектированием твердеющих растворов / Дисс... докт. техн. наук. – М.: РГТ, 2019. – 409 с. EDN: YYKKOJ.
18. Баранник Н. В., Котов С. В., Потапова Е. С., Малахин С. С. Определение тепловыделения бетона при его твердении в изотермических условиях // Вестник НИЦ Строительство. – 2022. – № 2 (33). – С. 44–62. DOI: 10.37538/2224-9494-2022-2(33)-44-62. EDN: HMGMM.
19. Wadsö, L. Operational issues in isothermal calorimetry. Cement and Concrete Research, 2010, Vol. 40, Iss. 7, pp. 1129–1137. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2010.03.017>.

Информация об авторах:

Разуваев Денис Алексеевич – кандидат технических наук, доцент, заведующий научно-исследовательской лабораторией «Контроль качества дорожных одежд и земляного полотна» Сибирского государственного университета путей сообщения, Новосибирск, Россия, razdenis@mail.ru.

Печенкин Роман Сергеевич – аспирант, инженер Сибирского государственного университета путей сообщения, Новосибирск, Россия, rom.pechenkin@yandex.ru.

Статья поступила в редакцию 07.02.2024, одобрена после рецензирования 14.03.2024, принята к публикации 27.03.2024.