

УДК 624.138.24

Искусственное воздействие на грунты с целью изменения их свойств на примере строительства Северомуйского тоннеля

С. Л. Филиппов

Общество с ограниченной ответственностью «Полиэко», Россия, 600020, Владимир, ул. Линейная, 3, пом. 8

Для цитирования: Филиппов С. Л. Искусственное воздействие на грунты с целью изменения их свойств на примере строительства Северомуйского тоннеля // Известия Петербургского университета путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2026. Т. 23. Вып. 1. С. 221–228. DOI:10.20295/1815-588X-2026-1-221-228

Аннотация

Цель: исследование механизмов инъекционного упрочнения грунтов зон разломов с точки зрения происходящих при этом физико-химических процессов в условиях, характеризующихся высокой дезинтегрированностью грунтов, их обводненностью, высокими значениями гидростатического давления. **Методы:** рассмотрены теоретические модели инъекционного упрочнения неустойчивых, раздробленных до дресвы, песка и глины грунтов методом инъекции в режиме фильтрации, а также инъекционным упрочнением грунтов при консолидированном уплотнении (метод гидроразрыва). **Результаты:** закрепление грунтов позволяет обеспечить прогнозируемое поведение массива грунта по трассе тоннеля, получить новые улучшенные характеристики грунта и использовать их в дальнейших расчетах армогрунтовых конструкций. Рассмотрен механизм инъекционного упрочнения грунтов, представляющий собой комплексное воздействие твердеющих во времени инъекционных растворов на пути своего движения под действием избыточного давления по схеме «инъекционная скважина => естественные трещины и крупные поры => искусственные трещины и каналы => мелкие поры». **Практическое применение:** указанные в статье методы являются основными разработками и получили широкое применение для эффективного искусственного воздействия на дезинтегрированные неустойчивые грунты путем обработки инъекционными растворами с целью улучшения свойств. Способы инъекционного упрочнения грунтов (в различных вариантах) применены на тоннелях БАМа более чем на 150 разломах различной мощности и протяженности.

Ключевые слова: инъекция, фильтрация, закрепление, грунты, деформации

Введение

В забайкальской части трассы БАМа, где располагаются Северомуйский тоннель и тоннели трассы обхода, развиты два основных комплекса: коренные метаморфические и изверженные породы, представленные гранитами и гранитоидами, реже гранодиоритами. Коренные породы покрывают песчано-галечниковые породы плейстоцена и голоцена, представленные галечниками, песками, супесями, реже суглинками и глинами с растительными

остатками. Образовавшиеся в результате тектогенеза многочисленные разломы заполнены этими структурами, которые обводнены и превращены геотектоническими и гидротермальными процессами физического и химического выветривания в дресвяно-песчано-глинистую массу. Цементирующим материалом является тектоническая мука, до которой были перетерты граниты в результате тектонических напряжений и смещений блоков. Песчано-дресвяный материал и присутствие глинистой фракции

в условиях обводнения способствуют образованию грунта плавунного типа. Наличие в теле разломов интервалов дресвяно-щебневой размерности с незначительным количеством глинистой фракции создает каналы, обладающие высокой водопроницаемостью. При проходке выработок в таких каналах возникали водотоки, обладающие высокими скоростями и большой разрушающей способностью с расходом до 5800 м³/ч. А при прорывах подземных вод притоки воды из забоя, например штольни, достигали значений нескольких тысяч м³/ч, объем вынесенного рыхлого материала — в 3–5 тыс. м³. Первоначальный напор подземных вод достигал значения 5 МПа. В этих условиях без применения специальных способов работ сооружение тоннеля оказалось невозможным.

В настоящей статье рассматривается инъекционное упрочнение грунтов в качестве базового метода их искусственной стабилизации для улучшения условий строительства.

Работа по закреплению грунтов тоннелей БАМа выполнялась под научным руководством В. Е. Меркина во Всесоюзном научно-исследовательском институте транспортного строительства (ЦНИИС), при активном участии специалистов ОАО «Ленметрогипротранс» Н. И. Кулагина, К. П. Безродного, А. И. Салана, А. Г. Мацегоры, коллективами тоннельных отрядов УС «Бамтоннельстрой» под руководством главного инженера Р. И. Касапова.

Инъекция грунтов как способ воздействия нашла широкое применение в транспортном, гидротехническом, шахтном, промышленном и гражданском строительстве и других областях народного хозяйства. Этот способ применяется для укрепления грунтов и создания противофильтрационных экранов.

Специалисты в области инъекции грунтов разделяют этот процесс в теоретическом плане на две основные разновидности:

- инъекция в режиме фильтрации (пропитка);
- инъекция в режиме гидравлических разрывов грунтового массива.

Инъекция в режиме фильтрации

Может осуществляться как в однородные проницаемые и изотропные, так и в неоднородные проницаемые грунты. При нагнетании инъекционного раствора в однородные изотропные грунты, имеющие коэффициент фильтрации k , при давлении P_H в последних возникает радиальное течение. При установившемся движении процесс может быть представлен известным уравнением [1]:

$$P_H - p = \frac{Qg\gamma}{Ck_0g_0}, \quad (1.1)$$

где p — давление грунтовых вод;

Q — скорость нагнетания инъекционного раствора;

g — вязкость раствора;

γ — удельный вес раствора;

C — коэффициент, зависящий от формы полости, через которую нагнетают в грунт раствор;

k_0 — коэффициент фильтрации грунта для воды;

g_0 — вязкость воды.

В природе однородные и изотропные грунты встречаются крайне редко и являются, скорее всего, исключением. Как правило, природные массивы состоят из различных грунтов: песков с различными размерами зерен — от пылеватых до крупнозернистых, супесей, суглинков, которые могут содержать гальку, гравий и валуны и которые сильно различаются по проницаемости.

В слоистых структурах с различной проницаемостью раствор при инъекции проникает сначала в более проницаемые слои — до того момента, когда проницаемость последних не

станет ниже проницаемости остальных слоев. После этого раствор начинает проникать в менее проницаемый слой и т. д.

В этом случае для описания течения инъекционного раствора можно использовать уравнение Дюпюи:

$$P_H - p = \frac{Q\gamma g}{2\pi k_o g_o m_i} \ln \frac{R}{r_c}, \quad (1.2)$$

где m_i — мощность i -го слоя;

R — радиус влияния;

r_c — радиус инъекционной скважины.

Из выражений (1.1), (1.2) видно, что давление инъекции должно быть тем выше, чем ниже коэффициент фильтрации инжецируемой среды и выше вязкость раствора, применяемого для инъекции, а также чем меньше мощность инжецируемого слоя грунта.

Несложные расчеты и практика инъекционных работ показывают, что инжецирование слоя грунта с высокой проницаемостью, но малой мощности может потребовать применения таких высоких давлений, при которых произойдет разрыв менее проницаемых слоев. А так как мощность слоев и давление без ущерба для качества инъекционных работ снизить нельзя, то снизить давление можно только уменьшением вязкости инъекционного раствора или снижением скорости его нагнетания.

Без снижения давления инжецирование грунтовых слоев возможно лишь в том случае, если каждый слой инжецировать отдельно, для чего необходимо грунтовые слои разобщить, что обеспечивается применением инъекционной манжетной технологии.

Как показала практика инъекционных работ, при инжецировании анизотропных трещиноватых скальных грунтов с несколькими системами трещин для обеспечения высокого качества инжецирования необходимо применение высоких давлений нагнетания, которые

расчетным путем могут быть получены из уравнения Н. В. Тябина:

$$P_H - p = \frac{3Q\eta \ln \frac{R_p}{r_c}}{4\pi h^3} + \frac{3\tau_o (R_p - r_c)}{2h}, \quad (1.3)$$

где Q — скорость нагнетания инъекционного раствора;

η — структурная вязкость инъекционного раствора;

R_p — радиус распространения инъекционного раствора;

r_c — радиус инъекционной скважины;

$2h$ — величина раскрытия трещин в скальных грунтах;

τ_o — динамическое напряжение сдвига инъекционного раствора.

Применение высоких давлений при инжецировании скальных трещиноватых грунтов по многочисленным наблюдениям автора приводят к следующему интересному явлению: под воздействием высоких давлений стенки инжецируемой трещины раздвигаются, раскрытие и протяженность ее увеличиваются — происходит так называемое гидрорасчленение скальных грунтов, при этом из-за упругости горного массива трещины, в которые не попал инъекционный раствор, закрываются.

По окончании инжецирования в результате действия упругих сил грунтов трещины, в которые не проник инъекционный раствор, открываются снова. Для их заполнения нужно повторное инжецирование раствора, обладающего более высокой проникающей способностью (вторая стадия), что производителями работ, как правило, не делалось. В процессе вскрытия инжецированных зон это приводило к получению остаточных водопритоков, величины которых значительно превышали нормы действующих СП. Это вызывало необходимость выполнения дополнительных объемов

инъекционных работ, что неблагоприятно влияло на весь ход строительства объектов: необоснованно увеличивалась стоимость работ, замедлялись темпы строительства.

При строительстве сооружений в сложных инженерно-геологических условиях, например при проходке горных тоннелей Байкало-Амурской железнодорожной магистрали по тектонически нарушенным зонам, в качестве основного базового способа улучшения свойств грунтов был принят двухстадийный способ инъекционного их упрочнения, заключающийся в том, что на первой стадии упрочнения грунтов выполняют инъекции растворов на основе цемента, а на второй стадии — растворов на основе силикатов и смол.

Отличительной особенностью геологического строения зон тектонических разломов является наличие в них одновременно скальных, полускальных трещиноватых грунтов, раздробленных тектоническими напряжениями до дресвяного состояния скалы, песка всех фракций, а также перетертых до тектонической муки включений и глины. Все составляющие грунтового массива в зонах тектонических нарушений хаотично расположены, обводнены и находятся под влиянием высоких значений горного давления и высоких (до 5 МПа) напоров подземных вод.

В таких сложных условиях упрощенное представление механизма инъекционного упрочнения грунтов приводило к серьезным ошибкам в расчетах и неудачам при производстве этих работ на многочисленных промышленных объектах, в том числе и на начальном этапе сооружения тоннелей БАМа.

Следует обратить внимание, что механизм инъекционного воздействия на грунты сложного геологического строения представляет собой комбинацию следующих процессов:

а) армирование грунта заполняющим инъекционные скважины цементным раствором;

б) пропитка части упрочняемого грунтового массива со сравнительно высокой проницаемостью инъекционными растворами;

в) консолидационное уплотнение менее проницаемой части грунтового массива путем образования в нем трещин гидроразрыва, заполнения их инъекционными растворами и обжатия высокими давлениями дезинтегрированного малопроницаемого грунта;

г) диффузионный массоперенос укреплющего раствора в грунте под действием градиента концентраций, имеющий место на всех этапах инъекционного воздействия на уплотняемый грунт.

Теоретические аспекты инъекционного упрочнения грунтов при консолидированном уплотнении

Основную неприятность при проходке представляют водонасыщенные грунты, которые при вскрытии выработкой почти мгновенно приходят в неустойчивое состояние, сопровождаемое вывалами и выбросами обводненной массы. Вследствие ничтожно малой фильтрационной способности эти зоны практически невозможно пропитать инъекционным способом. Поэтому устойчивость таких грунтов повышают за счет их консолидационного уплотнения и создания армирующего грунт-каркаса из со временем затвердевающего инъекционного раствора. Конструкция создается гидроразрывами закрепляемого грунта раствором с внедрением его в толщу массива под большим давлением.

При выполнении работ по закреплению грунтовых массивов с использованием специальных методов выполнения работ на Северомуйском тоннеле технологические приемы были отработаны и не вызывали вопросов, в то время как расчетное обоснование их использования в качестве армогрунтовых конструкций

отсутствовало. Это, в свою очередь, не позволяло создать расчетный механизм определения технологических параметров инъекционных работ для получения армогрунтовой оболочки с заданной несущей способностью. Первым этапом исследований в этом направлении явился выбор модели грунта.

Так, при работе на Северомуйском тоннеле было установлено, что разрывы грунта происходят в основном в субвертикальном направлении.

В работе [2] авторами был применен приближенный способ расчета, разработанный для резинокордовых конструкций А. А. Лапиным [3], а для стеклопластиков — В. В. Болотиным [4].

Грунт, армированный твердеющим раствором (рис. 1, а), моделируется в виде пластинки, составленной из чередующихся слоев раствора и грунта (рис. 1, б). Объемное содержание раствора в пластине представляется коэффициентом ξ .

Рассмотрим плоское напряженное состояние такой модели (рис. 1, в). Здесь $\sigma_1, \sigma_2, \tau_{12}$ — средние напряжения, то есть отношения соответствующих усилий к площади поперечного сечения.

Условия равновесия и совместности деформаций слоев грунта и раствора приводят к следующим уравнениям:

$$\begin{aligned} \sigma_1 &= \xi \sigma_1' + (1 - \xi) \sigma_1''; \quad \sigma_2 = \sigma_2' = \sigma_2''; \\ \tau_{12} &= \tau_{12}' = \tau_{12}''; \end{aligned} \quad (2.1)$$

$$\begin{aligned} \varepsilon_1 &= \varepsilon_1' = \varepsilon_1''; \quad \varepsilon_2 = \xi \varepsilon_2' + (1 - \xi) \varepsilon_2''; \\ \gamma_{12} &= \xi \gamma_{12}' + (1 - \xi) \gamma_{12}'' \end{aligned} \quad (2.2)$$

Величины с одним штрихом относятся к раствору, с двумя — к грунту; $\sigma_1, \sigma_2, \tau_{12}$ — средние деформации модели.

Полагая, что каждый из материалов (грунт и раствор) является изотропным и подчиняется закону Гука, а связь между усредненными

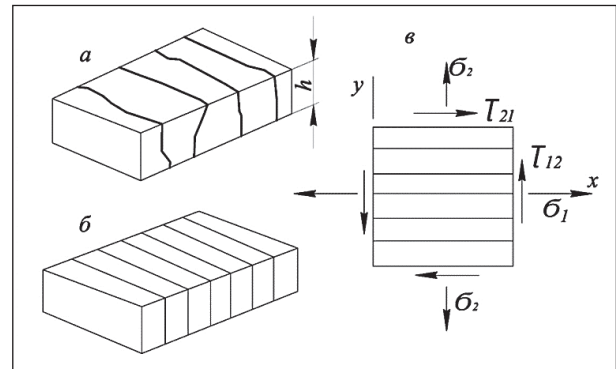


Рис. 1. Модель приближенного способа расчета конструкции А. Лапина и В. Болотина

напряжениями и деформациями имеет вид, характерный для ортотропного тела, получаем:

$$\varepsilon_1 = \frac{\sigma_1}{E_1} - \mathcal{G}_{12} \frac{\sigma_2}{E_2}; \quad \varepsilon_2 = \frac{\sigma_2}{E_2} - \mathcal{G}_{21} \frac{\sigma_1}{E_1}; \quad \gamma_{12} = \frac{\tau_{12}}{G_{12}}, \quad (2.4)$$

$$\text{где } \left. \begin{aligned} E_1 &= \xi E' + (1 - \xi) E'' \\ E_2 &= \left[\frac{\xi(1 - \mathcal{G}^2)}{E'} + \frac{(1 - \xi)(1 - \mathcal{G}^2)}{E''} + \frac{\mathcal{G}_{21}^2}{E_1} \right]^{-1} \end{aligned} \right\} \quad (2.5)$$

Напряжения в прожилках раствора и грунте связаны со средними напряжениями формулами:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_1' &= \sigma_1 \frac{E'}{E_1} - \sigma_2 \frac{(1 - \xi)(E' \mathcal{G}'' - E'' \mathcal{G}')}{E_1} \\ \sigma_1'' &= \sigma_1 \frac{E''}{E_1} - \sigma_2 \frac{\xi(E' \mathcal{G}'' - E'' \mathcal{G}')}{E_1} \end{aligned} \right\} \quad (2.6)$$

С использованием выражения (2.5) и (2.6) нами был проведен анализ работы грунта, армированного твердеющим раствором, и определены пути возможной оптимизации инъекционного закрепления.

Увеличения несущей способности такой армогрунтовой конструкции можно достигнуть в основном по двум направлениям. Первое — это консолидационное уплотнение и упрочнение грунта, второе — увеличение процента армирования (коэффициента ξ) и повышение прочности арматуры (раствора).

Исследование изменения модуля деформации армогрунта вдоль арматуры E_1 показывает значительно больший эффект снижения деформативности конструкции и, соответственно, проявления горного давления от повышения модуля деформации грунта E'' , чем от увеличения модуля деформации армирующего раствора E' . Тангенс угла наклона графиков, характеризующий рост E_1 , не зависит от изменения E'' и равен 0,5 (рис. 2).

Отмечено, что при зависимости E_1 от E' тангенс угла наклона меняется от 0,088 при $\xi = 0,005$ до 0,35 при $\xi = 0,02$, то есть эффективность роста E_1 при увеличении E' меньше.

Модуль деформации армогрунта перпендикулярно расположению армирующего инъекционного элемента E_2 практически не зависит и от изменения модуля деформации армирующего инъекционного элемента E' и прямо пропорционально увеличивается с ростом модуля деформации грунта E'' .

Следовательно, причина снижения проявления горного давления — в увеличении модуля деформации грунта путем его консолидационного уплотнения.

Напряжения в армогрунте в сечениях, перпендикулярных армирующему инъекционному элементу, при плоском напряженном состоянии практически не зависят от модуля деформации грунта E'' , раствора E' и коэффициента армирования ξ , принимаемого в пределах, наблюдаемых на практике при ведении инъекционных работ на Северомуйском тоннеле.

На напряженно-деформированное состояние в растворе в значительной степени влияют модуль деформации грунта E'' и степень армирования ξ (рис. 3). Чем ниже E'' , тем больше напряжения.

На рис. 3 видно, что чем ниже степень армирования, тем больше напряжение в растворе. Так как степень армирования ограничива-

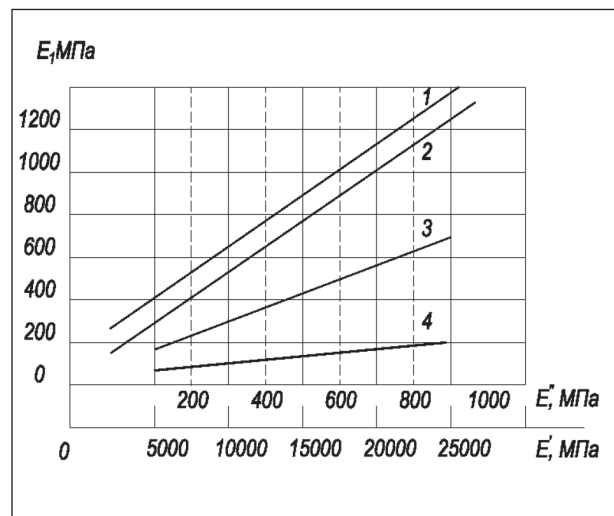


Рис. 2. График зависимости E от E'' и E' , где 1 и 2 — E'' — модуль деформации грунта; 3 и 4 — E' — модуль деформации армирующего раствора

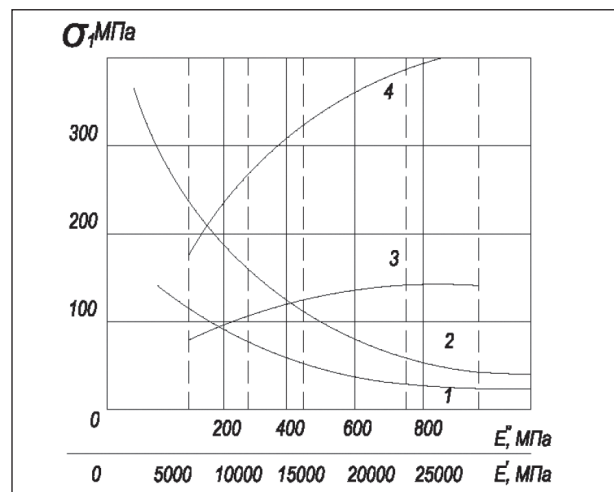


Рис. 3. Зависимость напряжения раствора σ от степени армирования, где 1 и 2 — E'' — модуль деформации грунта; 3 и 4 — E' — модуль деформации армирующего раствора

ется величиной возможного обжатия грунта при инъекции, то степень влияния армирования твердеющим раствором грунта носит ограниченный характер. С одной стороны, требуется создать арматурный каркас в виде

армирующих инъекционных элементов с высокими прочностными характеристиками, а с другой — с высокой податливостью.

Выводы

На основании вышеизложенного можно сделать выводы:

- увеличение деформативных и прочностных характеристик армогрунта обеспечивается консолидационным уплотнением грунтов;
- изменение прочностных характеристик армирующего раствора оказывает незначительное влияние на прочностные показатели армогрунта в целом;
- предложенная методика инженерного расчета позволяет количественно оценить работу грунта, армированного инъекционным раствором, с получением обобщенных (усредненных) прочностных и деформативных характеристик, которые могут быть использованы в расчетах создаваемых армогрунтовых конструкций [5, 6].

Список источников

1. Cambefort N. Injection des sols. Vol. 1. Principes et methods. Eyrolles, Paris, 1964.

2. Безродный К. П., Мацегора А. Г. Инъекционное укрепление грунтов // Метрострой. 1986. №7.

3. Лапин А. А. Плоская деформация резинокордовой ткани // Расчеты на прочность в машиностроении: сб. / МВТУ. М.: Машгиз, 1955.

4. Болотин В. В. Плоская задача теории упругости для деталей и армированных материалов // Расчеты на прочность: сб. Вып. 12. М.: Машиностроение, 1966.

5. Проектирование и технология инъекционного закрепления грунтов при строительстве транспортных тоннелей / А. Г. Мацегора [и др.]. М.: Ленметрогипротранс, 1997.

6. Фотиева Н. Н., Безродный К. П., Саммаль А. С. Расчет инъекционного упрочнения грунтов зон тектонических разломов // Методы искусственной стабилизации грунтов при строительстве Северомуйского тоннеля: сб. научных трудов. М.: ЦНИИС, 1990.

Дата обращения: 03.10.2025

Решение о публикации: 13.02.2026

Контактная информация:

ФИЛИППОВ Сергей Леонидович – инженер;
transport-stroy@mail.ru

Improvement of soil properties in tunnel construction, as demonstrated by the Severomuya Tunnel construction

S. L. Filippov

LLC. POLYEKO, app. 8, 3 Lineinaya str., Vladimir, 600020, Russia

For citation: *Filippov S. L.* Improvement of soil properties in tunnel construction, as demonstrated by the Severomuya Tunnel construction // Proceedings of Petersburg State Transport University, 2026. Vol. 23, iss. 1. Pp. 221–228. DOI: 10.20295/1815-588X-2026-1-221-228. (In Russian)

Abstract

Objective: to research the mechanisms of injection strengthening of soils in fault zones by investigating the physical and chemical processes that take place under conditions of severe soil disintegration, high moisture content, and elevated hydrostatic pressures. **Methods:** theoretical models for injection strengthening of

unstable, highly fragmented soils, including gravel, sand and clay, were examined, covering filtration mode injection and injection by consolidated compaction (the hydro-fracturing method). **Results:** ground consolidation yields predictable behavior of the treated soil mass along the tunnel alignment, and improves soil properties that can be incorporated into subsequent design calculations for reinforced soil structures. The mechanism of injection strengthening is interpreted as a complex interaction between the time-dependent hardening of injected solutions and their migration under the influence of hydrostatic pressure and filtration flow, following the sequence: injection well => natural cracks and large pores => artificial cracks and channels => small pores. **Practical importance:** the techniques described in this paper represent major developments and have been extensively employed as effective methods for artificially stabilizing disintegrated, unstable soils by treating them with injection solutions to enhance their properties. Injection strengthening methods, in various forms, have been applied to more than 150 faults of varying depths and lengths within the BAM tunnels.

Keywords: injection, filtration, strengthening/stabilization, soils, deformations

References

1. Cambefort N. Injection des sols. Vol. 1. Principes et shethods. Eyrolles, Paris, 1964.
2. Bezrodney K.P., Matsegora A.G. In"ektsionnoe ukreplenie gruntov // Metrostroj. 1986. No. 7. (In Russian)
3. Lapin A.A. Ploskaya deformatsiya rezinokordovoj tkani // Raschety na prochnost' v mashinostroenii: sb. / MVTU. M.: Mashgiz, 1955. (In Russian)
4. Bolotin V. V. Ploskaya zadacha teorii uprugosti dlya detalej i armirovannykh materialov // Raschety na prochnost': sb. Vyp. 12. M.: Mashinostroenie, 1966. (In Russian)
5. Proektirovanie i tekhnologiya in"ektsionnogo zakrepleniya gruntov pri stroitel'stve transportnykh tonnelej/A. G. Matsegora [i dr.]. M.: Lenmetrogiprotrans, 1997. (In Russian)
6. Fotieva N.N., Bezrodney K.P., Sammal' A.S. Raschet in"ektsionnogo uprochneniya gruntov zon tektonicheskikh razlomov // Metody iskusstvennoj stabilizatsii gruntov pri stroitel'stve Severomujskogo tonnelya: sb. nauchnykh trudov. M.: TsNIIS, 1990. (In Russian)

Received: 03.10.2025

Accepted: 13.02.2026

Author's information:

Sergey L. FILIPPOV — engineer;
transport-stroy@mail.ru