

## Особенности изменения проницаемости и микроструктуры песка при укреплении полиуретановыми смолами

Татьяна Викторовна Шилова\* , Оксана Александровна Иванова , Александр Сергеевич Сердюков 

Институт горного дела имени Н.А. Чинакала СО РАН, 630091, Новосибирск, Красный пр-кт, 54, Российская Федерация

\* Автор, ответственный за переписку: e-mail: shilovatanya@yandex.ru

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** В сложных геотехнических условиях при строительстве, эксплуатации инженерных объектов используют укрепление несвязных грунтов полиуретановыми составами. Анализ современных исследований показал, что влияние полимеров на фильтрационные свойства песчаного грунта изучено недостаточно. Целью работы является определение особенностей изменения проницаемости и микроструктуры химически укрепленного песка в зависимости от способа обработки, расхода полиуретановых смол и внешних сжимающих нагрузок. **Методы и материалы.** Эксперименты проводили с мелкими, среднезернистыми песками. Для укрепления использовали двухкомпонентную высокоэластичную и однокомпонентную полиуретановые смолы, основное назначение которых – усиление грунтов, гидроизоляция, формирование противофильтрационных завес. Влияние составов на проницаемость и микроструктуру породы оценивали по результатам экспериментов, которые включали формирование смесей полимер-песок способами однорастворной и двухрастворной обработки смолами при объемном соотношении жидкий состав/порода – 0,05–0,25, исследование микроструктуры, проведение фильтрационных тестов при различных условиях нагружения образцов. **Результаты и обсуждение.** Определены особенности изменения проницаемости песка в зависимости от способа укрепления полиуретанами. В случае однорастворной обработки высокоэластичной смолой при объемном соотношении состав/порода – 0,2, проницаемость образцов составляет  $7-13 \cdot 10^{-3}$  мкм<sup>2</sup>. Двукратное уменьшение содержания смолы приводит к повышению проницаемости на 1–2 порядка, поскольку в структуре преобладают открытые межзерновые пустоты, формирующие связанные поровые каналы. Добавка малого объема однокомпонентного жесткого полиуретанового состава снижает проницаемость песка в 1,5 – 3,2 раза и повышает устойчивость образцов в условиях сжимающих нагрузок. **Заключение.** Практическая значимость результатов состоит в повышении эффективности использования полиуретановых смол для задач снижения фильтрационных свойств песков. Выбор способа химического воздействия с учетом решаемой геотехнической задачи обеспечит как эффективное снижение проницаемости пород, так и уменьшение расхода дорогостоящих полимерных составов при возведении противофильтрационных завес и экранов в массиве.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** песок, полиуретановые составы, проницаемость, химическое укрепление, геоматериал, микроструктура, сжимающая нагрузка, способ обработки

**БЛАГОДАРНОСТИ:** Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-27-20055, <https://rscf.ru/project/25-27-20055/> и финансовой поддержки Правительства Новосибирской области.

### ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:

Шилова Т.В., Иванова О.А., Сердюков А.С. Особенности изменения проницаемости и микроструктуры песка при укреплении полиуретановыми смолами. *Нанотехнологии в строительстве*. 2026; 18(2):242–253. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2026-18-2-242-253>. – EDN: ZHLSAF.

## Changes in permeability and microstructure of sand during reinforcement with polyurethane resin

Tatiana V. Shilova\* , Oksana A. Ivanova , Aleksander S. Serdyukov 

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, 630091, Novosibirsk, Krasny Prospekt, 54, Russian Federation

\* Corresponding author: e-mail: shilovatanya@yandex.ru

### ABSTRACT

**Introduction.** In complex geotechnical conditions during construction and operation of engineering structures, polyurethane compositions are used to strengthen loose soils. Analysis of current research has shown that the effect of polymers on sandy soil filtration properties is poorly studied. The purpose of this study is to determine the dependence of permeability and microstructure of chemically strengthened sand on the treatment method, polyurethane resin consumption and external compressive loads. **Methods and Materials.** Experiments are carried out with fine and medium-grained sands. Two-component highly elastic and one-component polyurethane resins are used for strengthening. Their main purposes are soil stabilization, waterproofing, and formation of cutoff curtains. The effect of the resins on rock permeability and microstructure is assessed based on the experimental results. The experiments include formation of the polymer-sand mixtures using one-solution and two-solution resin treatments with resin/rock volume ratios of 0.05–0.25, microstructure study and filtration tests under various sample loading conditions. **Results and discussion.** The dependence of the sand permeability on the method of strengthening with polyurethanes has been determined. In the case of one-solution treatment with highly elastic resin with composition/rock volume ratio of 0.2, the permeability of the samples is  $7\text{--}13 \cdot 10^{-3} \mu\text{m}^2$ . A two-fold decrease of the resin content causes an increase in permeability by 1–2 orders of magnitude. Such behavior is explained by the structure in which open intergranular pores predominate and form connected pore channels. The addition of a small volume of a one-component rigid polyurethane composition reduces sand permeability by 1.5–3.2 times and improves the stability of samples under compressive loads. **Conclusion.** The practical significance of the results consists in the increasing efficiency of sand filtration properties reduction with polyurethane resins strengthening. The proper choice of a chemical treatment method with consider of the geotechnical problem provides both effective rock permeability reduction and decrease in the consumption of expensive polymer compositions for the construction of cutoff curtains and screens in the rock mass.

**KEYWORDS:** sand, polyurethane compositions, permeability, chemical strengthening, geomaterial, microstructure, compressive load, treatment method

**ACKNOWLEDGEMENTS:** Financial support for this work was provided by the Russian Science Foundation and the Government of the Novosibirsk Region, Russia under the grant No. 25-27-20055, <https://rscf.ru/project/25-27-20055/>.

### FOR CITATION:

Shilova T.V., Ivanova O.A., Serdyukov A.S. Changes in permeability and microstructure of sand during reinforcement with polyurethane resin. *Nanotechnology in Construction*. 2026;18(2):242–253. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2026-18-2-242-253>. – EDN: ZHLSAF.

### ВВЕДЕНИЕ

Увеличение объемов строительства, возведение и эксплуатация инженерных объектов осложняются опасными экзогенными процессами, среди которых распространены подтопление, просадочные, эрозийные явления, связанные с подземными водами [1, 2]. Рыхлая структура, высокая проницаемость песчаных грунтов становятся причиной проявления таких негативных процессов, как интенсивная фильтрация флюидов, разжижение, просадочность. В сложных геотехнических условиях применяют методы физико-химического воздействия с целью улучшения эксплуатационных свойств грунтов. Часто используют способы укрепления рыхлых и нарушенных химическими реагентами пород, взаимодействующими между собой и/или с подземными водами,

среди которых широко распространены полимерные составы [3–6]. В отличие от традиционных армирующих композиций (цементов, силиката натрия), полимерные смолы хорошо «просачиваются» в горные породы, армируя их в процессе отверждения. Двухкомпонентные высокоэластичные полиуретаны – распространенный тип полимеров, применяемых в строительстве для связывания рыхлых грунтов, возведения противофильтрационных завес, непроницаемых экранов в породном массиве [7–9]. В них взаимодействие изоцианата (компонента Б) и полиэфирного соединения (компонента А) – смеси полифункциональных гидроксилсодержащих полиолов с пенообразователем и катализатором – приводит к образованию вспененного полиуретана и значительному увеличению объема композиции. Частицы рыхлого грунта связываются отвержденной смолой,

приобретая малую остаточную пористость [10–13]. Применение вспенивающихся составов обеспечивает низкие фильтрационные свойства песчаных грунтов после химического укрепления. По данным [14], проницаемость мелкозернистых песков, пропитанных полиуретанами, составляет  $10^{-4}$ – $10^{-3}$  мкм<sup>2</sup>, что соответствует малопроницаемым и практически непроницаемым горным породам. Анализ современных исследований показал, что влияние расхода, способа обработки полимерными составами, сжимающих нагрузок на фильтрационные свойства рыхлых грунтов недостаточно изучено. Вместе с тем большой объем лабораторных тестов по укреплению пород и определению их свойств позволит прогнозировать результаты планируемых полевых работ. Целью исследования является определение особенностей изменения проницаемости и микроструктуры химически укрепленного песка в зависимости от способа обработки породы, расхода полиуретановых составов и внешних сжимающих нагрузок.

## МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

### Материалы

Лабораторные эксперименты проводили с рыхлой породы, мелкими и среднезернистыми песками, отобранными на действующем карьере, расположенном в Новосибирском районе Новосибирской области. Предварительная подготовка экспериментальных образцов включала сушку до постоянной массы, ситовой рассев, определение гранулометрического состава породы. Песчаная фракция с размером зерен 0,2–0,3 мм составила около 80 масс. %, что соответствует мелкому и среднезернистому песку, согласно классификации по ГОСТ 25100–2020 «Грунты. Классификация» [15]. Доли крупной (более 0,5 мм) и мелкой (менее 0,2 мм) фракций получились около 7 и 12 масс. %, соответственно. Для дальнейших экспериментальных исследований использовали

выделенную фракцию 0,2–0,3 мм. В лабораторных условиях были определены абсолютная и объемная плотность песка, значения которых составили 2,65 г/см<sup>3</sup> и 1,6 г/см<sup>3</sup>. Далее оценивали коэффициент пористости неукрепленной рыхлой породы, среднее расчетное значение – 0,65. Эксперименты проводили с маловлажным песком со степенью водонасыщения около 0,1 д. е. (дольные единицы). В лабораторных условиях образцы искусственно увлажняли путем добавления воды до необходимой влажности.

С целью связывания и химического укрепления песка использовали двухкомпонентную высокоэластичную полиуретановую смолу (далее состав МС), которая предназначена для консолидации и гидроизоляции рыхлых пород, создания непроницаемых экранов в массивах, в строительстве – для ремонта трещин в подземных структурах (переходы, тоннели, основания), создания противофильтрационных завес на контакте грунт–бетон. Состав МС образуется путем смешивания отдельных жидких компонентов А и В в объемном соотношении 1:1 до однородной консистенции. Компонент А представляет собой смесь касторового масла, феноксипропанола и низкомолекулярного полипропиленгликоля, катализатора. Компонент В является смесью метилendiфенилдиизоцианата, полипропиленгликоля, пропиленкарбоната. Низкая вязкость, длительное время реакции (около 3,5 часов), медленное вспенивание состава МС способствует проникновению в мелкие пустоты, поровые каналы породы, что приводит к существенному снижению проницаемости укрепленного песка. Отвержденная полиуретановая смола представляет собой эластичный, непроницаемый материал, ее основные характеристики приведены в таблице 1 [16].

В экспериментах для химического укрепления песка также использовали однокомпонентную быстросхватывающую полиуретановую смолу (далее состав БС), которая предназначена как для связывания рыхлых и неустойчивых горных пород при возведении подземных сооружений, так и для снижения

**Таблица 1.** Свойства двух- и однокомпонентных полиуретановых составов [16]

Параметры	Состав МС	Состав БС
Назначение	Укрепление рыхлых грунтов, гидроизоляция, формирование непроницаемых завес	Укрепление рыхлых и неустойчивых пород, формирование противофильтрационных завес
Объемное отношение компонентов А и Б	1:1	–
Объемное отношение смола:вода	–	1:1 – 9:1
Плотность (компоненты А / Б), г/см <sup>3</sup>	1,01/1,21 при 23 °С	1,14 при 20 °С
Вязкость (компоненты А/Б/смесь), мПа·с	115/40/80 при 23 °С	800–1000 при 20 °С
Время отверждения, с	≈10 800	90–180

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ УЧЕНЫХ И СПЕЦИАЛИСТОВ

проницаемости грунтов, формирования противофильтрационных завес в массиве за строительными конструкциями. Реакция полимеризации состава БС происходит при его взаимодействии с водой. В случае соотношения жидкая смола/вода от 1:1 до 9:1 время полного отверждения составляет 90–180 секунд (табл. 1). В процессе реакции полимеризации происходит интенсивное вспенивание за счет выделения углекислого газа, который является продуктом взаимодействия изоцианата и воды. В экспериментах использовали объемное соотношение жидкая смола/вода, равное 5:1. После полного отверждения состава БС образуется мелкопористая пена, стабильная при значительных нагрузках. Ранее было установлено, что добавление малого объема быстродействующего однокомпонентного полиуретанового состава БС повышает прочностные характеристики песка в 1,3–3 раза, по сравнению с образцами, укрепленным лишь высокоэластичной смолой [16]. Однако резкое увеличение вязкости композиции в процессе полимеризации может уменьшать зону воздействия в укрепляемом грунте, особенно в низкопроницаемых и содержащих тонкие трещины породах. В данной работе экспериментальным путем предстоит выяснить влияние добавки быстродействующей однокомпонентной смолы на приобретенные фильтрационные свойства химически укрепленного песка.

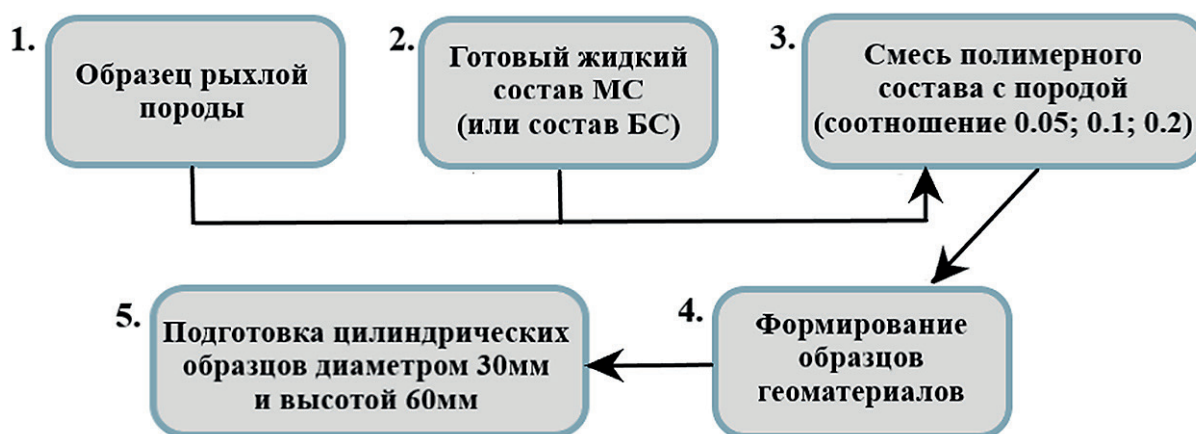
**Методы**

Влияние полиуретановых составов на проницаемость песка определяли по результатам лабораторных исследований. Экспериментальны включали:

подготовку образцов породы, обработку полимерными составами, формирование образцов укрепленного песка (далее геоматериалы), исследование микроструктуры, выполнение фильтрационных тестов. В экспериментах использовали два способа «связывания» песка смолами: однорастворный и двухрастворный. Однорастворный способ состоит в смешивании образца породы с готовым жидким полимерным составом МС или БС. Перемешивание проводили до получения однородной массы. Для обоих типов полиуретановых композиций геоматериалы формировали при соотношении жидкая смола/порода – 0,05; 0,1; 0,2 (рис. 1). Двухрастворный метод заключался в последовательном добавлении и смешивании готовых составов МС и БС с песком. Образцы геоматериалов формировали при соотношениях жидких составов МС/порода и БС/порода, равных 0,05–0,2 и 0,05, соответственно (рис. 2).

В обоих случаях полученные смеси песка с полиуретановыми смолами размещали в разъемных пластиковых цилиндрических формах, высотой 80 мм и диаметром 30 мм, выдерживали до полного отверждения полимеров, вынимали и обрезали до 60 мм. Сформированные образцы использовали для дальнейших фильтрационных тестов.

Проницаемость различных геоматериалов определяли на основе фильтрационных экспериментов. Тесты проводили на лабораторной установке, разработанной в Институте горного дела им. Н.А. Чинакала Сибирского отделения Российской академии наук и предназначенной для измерения проницаемости горных пород, пористых материалов в условиях стационарного линейного течения газа



**Рис. 1.** Однорастворный способ обработки песка полиуретановыми смолами: 1 – подготовка образца рыхлой породы (песка); 2 – подготовка полимерного состава МС (или состава БС); 3 – смешивание жидкого раствора с образцом рыхлой породы в соотношении 0,05, 0,1, 0,2; 4 – размещение смеси в цилиндрических формах диаметром 30 мм и высотой 80 мм, выдерживание до полного отверждения полимеров, извлечение образцов геоматериалов; 5 – подготовка геоматериалов для фильтрационных тестов: уменьшение высоты образцов до 60 мм

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ УЧЕНЫХ И СПЕЦИАЛИСТОВ



**Рис. 2.** Двухрастворный способ обработки песка полиуретановыми смолами: 1 – подготовка образца рыхлой породы; 2 – подготовка состава МС; 3 – смешивание жидкого состава МС с образцом рыхлой породы в соотношении 0,05; 0,1; 0,2; 4 – подготовка состава БС; 5 – добавление состава БС (объемное соотношение жидкая смола/порода равно 0.05) к смеси песка с составом МС; 6 – размещение смеси в цилиндрических формах диаметром 30 мм и высотой 80 мм, выдерживание до полного отверждения полимеров, извлечение образцов геоматериалов; 7 – подготовка геоматериалов для фильтрационных тестов: уменьшение высоты образцов до 60 мм

при осевом и боковом давлениях сжатия цилиндрических образцов. Схема установки, методика проведения экспериментов и определения проницаемости представлены в работах [17, 18]. Тесты проводили с образцами геоматериалов диаметром 30 мм и высотой 60 мм в условиях давления всестороннего сжатия 400, 600, 800 кПа (рис. 3). Коэффици-

енты проницаемости рассчитывали, используя выражение [17, 18]:

$$k = \frac{2 \times 10^4 V_{\mu} L P_{at}}{St \Delta P (\Delta P + 2P_{at})}, \quad (1)$$

где  $k$  – расчетный коэффициент проницаемости, мД (миллидарси, 1 мД =  $10^{-3} \cdot \text{мкм}^2$ );



**Рис. 3.** Геоматериалы для фильтрационных экспериментов: 1 – цилиндрический образец геоматериала; 2, 3 – боковое и осевое сжатие образцов внешним давлением; 4 – направление фильтрации газа

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ УЧЕНЫХ И СПЕЦИАЛИСТОВ

$\mu$  — вязкость, мПа·с;

$S$  — площадь поперечного сечения образца, см<sup>2</sup>;

$\Delta P$  — перепад давления на концах образца, 10<sup>-1</sup>·МПа;

$P_{ат}$  — давление на выходе из образца (атмосферное), 10<sup>-1</sup>·МПа;

$L$  — длина образца, см;

$t$  — время фильтрации, с;

$V$  — объем газа, прошедшего через образец, см<sup>3</sup>.

Микроструктуру химически укрепленного песка исследовали методом электронной сканирующей микроскопии (далее SEM). SEM — изображения использовали с целью изучения распределения неоднородностей и пустот, оценки содержания отвержденных полимеров в полученных геоматериалах, определения линейных размеров пор и пр. Анализ и статистическую обработку данных выполняли с помощью автоматизированного анализатора микроструктуры твердых материалов «Mineral C7» (компания SIAMS), применяя специализированное программное обеспечение: модуль «Исследование пористости», «Изучение структуры пор» [19, 20].

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

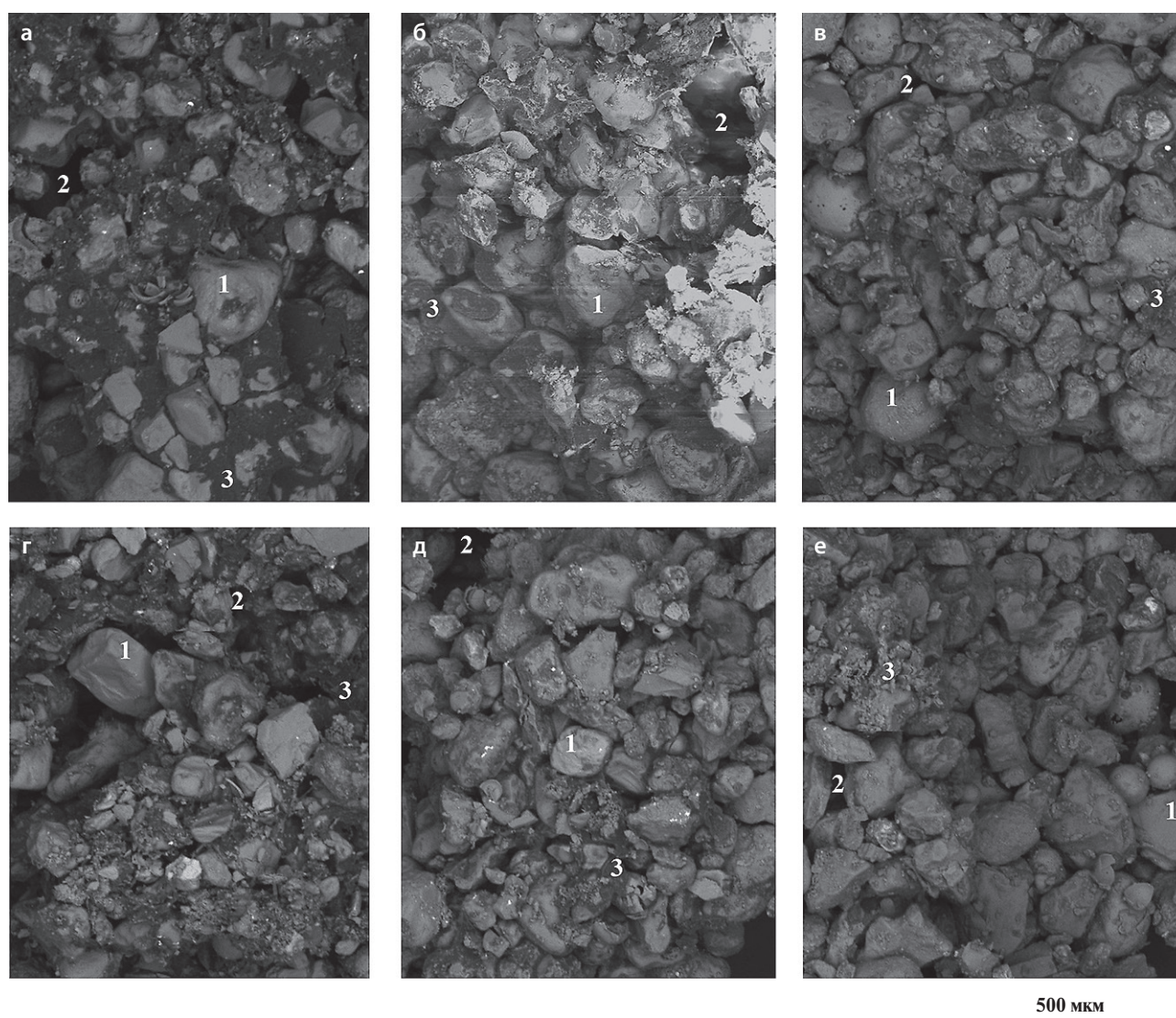
Распределение отвержденных полиуретановых составов в пустотном пространстве песков, заполнение и характеристики пор оценивали, исследуя микроструктуру геоматериалов по SEM — изображениям. В случае использования однорастворного способа обработки песка составом МС при соотношении жидкая смола/порода — 0,2, консолидированный песок приобретает базальную структуру, для которой характерно распределение зерен в основной массе связующего вещества (отвержденного полимера). Заполненность пустотного пространства отвержденным полимером составляет 54–58% (рис. 4, 5). После укрепления песка смолой пористость уменьшается более чем в 5 раз, по сравнению с неармированной породой. Для геоматериалов характерно наличие мелких замкнутых пустот в агрегатах отвержденного полимера размером сотни нанометров — несколько микрометров и небольшое количество более крупных межзерновых пор, диаметр которых в среднем составляет 16,5 мкм. При двух- и четырехкратном уменьшении объема жидкого состава МС, до соотношений жидкий состав МС/порода, равных 0,1 и 0,05, содержание отвержденного полимера снижается до 30–45% или в среднем в 1,3–1,6 раза (рис. 4, 5). Микроструктуру полученных геоматериалов можно описать как контактную, согласно классификации, представленной в работе [21]. Отвержденный состав МС представляет собой вещество, сосредоточенное на границах песчаных зерен, соединяющее их единой связующей полимерной «матрицей». Размер

таких связующих агрегатов — 10–20 мкм (рис. 4). В структуре геоматериалов преобладают межзерновые поры, диаметр которых в среднем составляет 18,3 и 20,5 мкм для образцов, сформированных при соотношениях жидкий состав МС/порода — 0,1 и 0,05, соответственно. Зависимость содержания отвержденного полимера МС в пустотном объеме геоматериалов от соотношения состав МС/порода описывается линейной аппроксимацией с высоким коэффициентом детерминации  $R_2 = 0,85$ .

В случае укрепления песка однорастворным способом составом БС при соотношении жидкая смола/порода — 0,2, заполненность порового пространства отвержденным полимером составляет 48–54% (рис. 4, 5). Для геоматериалов характерно наличие как мелких замкнутых пустот в агрегатах отвержденного полимера, так и значительного количества более крупных межзерновых пор со средним диаметром 12 мкм. Снижение объема жидкого полиуретанового состава БС до соотношений жидкая смола/порода 0,1, 0,05 приводит к уменьшению содержания отвержденного полимера в образцах до 25–45% или в 1,2–1,9 раза (рис. 5). Полученные геоматериалы обретают контактную структуру, как и в случае укрепления песка низковязким составом МС. Размер связующих полимерных агрегатов составляет 12–16 мкм (рис. 4). В образцах преобладают межзерновые поры со средним диаметром 13,5 и 17 мкм для геоматериалов, сформированных при соотношениях жидкий состав БС / порода — 0,1 и 0,05, соответственно. Линейная аппроксимация зависимости содержания отвержденного полимера БС в пустотном объеме геоматериалов от соотношения жидкий состав БС/порода имеет коэффициент детерминации  $R_2 = 0,8$  (рис. 5).

Особенности структуры пород, укрепленных двухрастворным способом, схожи с характеристиками геоматериалов, полученных при однорастворном способе обработки низковязким составом МС. При использовании 20 об. % состава МС и добавки смолы БС — 5 об. %, заполненность пустотного пространства отвержденным полимером составляет 53–62%, образцы имеют базальную структуру с преобладанием мелких закрытых пор в полимерных агрегатах диаметром сотни нанометров — несколько микрометров. По мере снижения суммарного объема жидких композиций до 10 об. %, уменьшается содержание отвержденных полимеров, увеличиваются количество и размеры межзерновых пор, геоматериалы приобретают контактную структуру.

Экспериментальные исследования показали, что при объемных суммарных соотношениях жидких составов МС, БС к породе, не превышающих 0,15, в структуре укрепленного песка образуется значительное количество открытых межзерновых пустот, размер которых увеличивается по мере уменьшения



**Рис. 4.** SEM – изображения химически укрепленного песка, полученные при обработке породы однорастворным способом полиуретановыми составами МС и БС. Соотношение жидкого состава МС с породой: а – 0,2; б – 0,1; в – 0,05. Соотношение жидкого состава БС с породой: г – 0,2; д – 0,1; е – 0,05. Обозначения: 1 – песчаные зерна; 2 – межзерновые пустоты; 3 – отвержденные полимеры

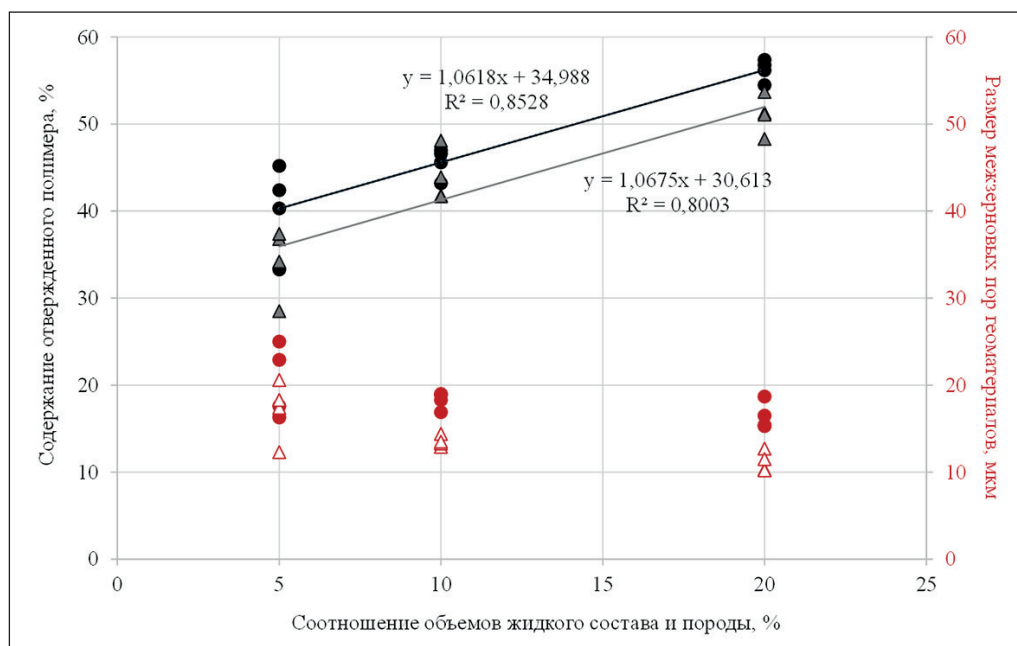
содержания смол. Такие пустоты могут формировать связанные поровые каналы в образцах, существенно влияя на фильтрацию жидкостей, газов и проницаемость полученных геоматериалов.

По результатам лабораторных экспериментов определены коэффициенты проницаемости геоматериалов, которые были сформированы при различных методах химического укрепления песка, типах и объемных расходах полиуретановых смол. В случае использования способа однорастворной обработки песка полимерным составом БС при объемном соотношении жидкая смола БС/порода – 0,2, проницаемость геоматериалов составляет 15 – 20 мД (рис. 6). Образцы химически укрепленного песка стабильны

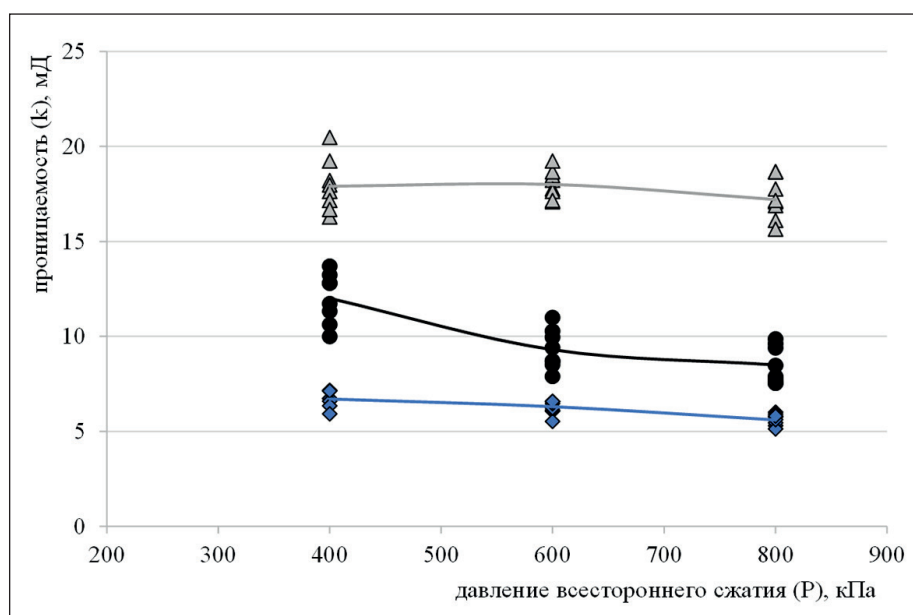
при сжимающих нагрузках 400–800 кПа, значения коэффициентов проницаемости практически не изменяются. Это связано со свойствами отвержденного однокомпонентного состава БС, который представляет собой жесткий вспененный материал, стабильный при значительных нагрузках.

В случае способа однорастворной обработки песка при объемном соотношении жидкий состав МС/порода, равном 0,2, значения коэффициента проницаемости образцов составили 7–13 мД. Установлено, что фильтрационная способность геоматериалов снижается примерно в 1,5 раза, по мере увеличения давления всестороннего сжатия от 400 до 800 кПа (рис. 6). Это объясняется высоким содержанием вы-

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ УЧЕНЫХ И СПЕЦИАЛИСТОВ



**Рис. 5.** Зависимость содержания отвержденных полимеров МС, БС в пустотном объеме и размера межзерновых пор от объемного соотношения жидкий состав/порода по данным анализа SEM - изображений. Черные и красные круги – экспериментальные данные исследования геоматериалов (содержание отвержденного полимера и размер пор, соответственно), полученных при одностороннем способе обработки песка составом МС. Серые и белые треугольники – данные исследования геоматериалов (содержание отвержденного полимера и размер пор), полученных при одностороннем способе обработки породы составом БС. Черная и серая линии – линейные аппроксимации результатов экспериментов



**Рис. 6.** Зависимость проницаемости геоматериалов (k), полученных при одностороннем и двухрастворном способах химического укрепления песка полиуретановыми составами МС и БС, от давления всестороннего сжатия (P). Экспериментальные данные исследования образцов, полученных при одностороннем способе обработки при соотношении жидкий состав/порода – 0,2: черные круги – укрепление составом МС, серые треугольники – укрепление составом БС. Голубые ромбы – данные исследования образцов, полученных при двухрастворном способе обработки породы смолами МС и БС при соотношениях жидкий состав/порода – 0,2 и 0,05, соответственно. Сплошные линии – кривые, построенные по средним значениям коэффициентов проницаемости

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ УЧЕНЫХ И СПЕЦИАЛИСТОВ

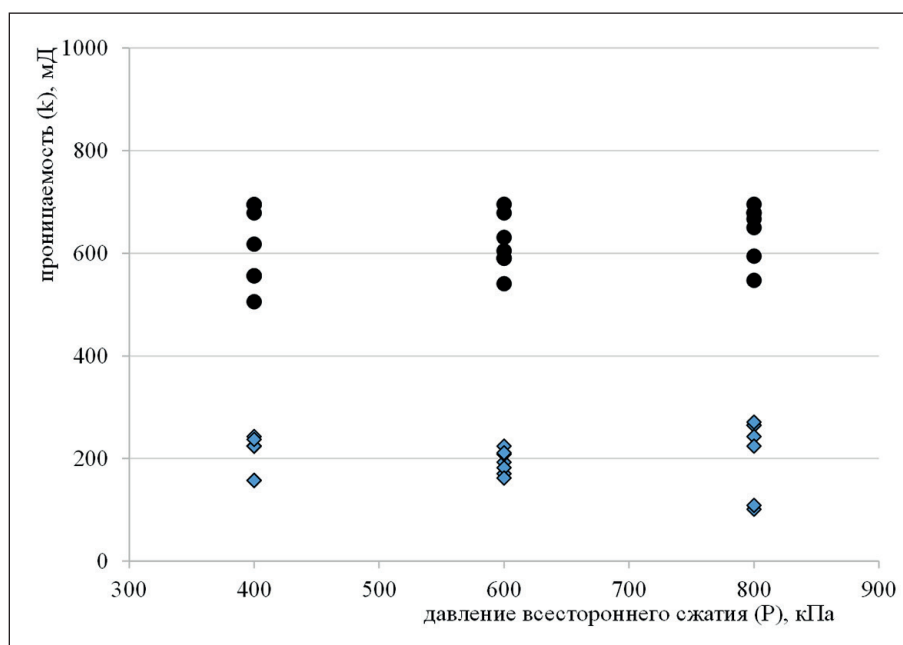
сокоэластичного материала в образцах (54–58%) – отвержденного полимерного состава МС, который деформируется при низких сжимающих нагрузках, приводя к уменьшению пустотного объема в структуре. Дополнительная добавка 5 об. % жидкой смолы БС и применение двухрастворного способа обработки приводят снижению проницаемости в 1,5–1,8 раза и повышению устойчивости образцов при сжимающих напряжениях. Возможной причиной является формирование упрочняющего полимерного «каркаса» в структуре породы из отвержденного состава БС, который связывает песчаные зерна.

Однокомпонентный способ обработки и снижение расхода состава МС до объемного соотношения жидкая смола МС/песок – 0,1 приводит к увеличению коэффициента проницаемости на 1–2 порядка, до значений 500–700 мД. Полученные геоматериалы менее чувствительны к воздействию сжимающей нагрузки, и проницаемость сохраняется при двухкратном увеличении давления всестороннего сжатия (рис. 7). Это связано со снижением содержания высокоэластичного деформируемого материала (отверженной смолы МС) до 30–45% в консолидированных песках. Добавка 5 об. % жидкого состава БС и использование двухрастворного способа обработки породы приводит к значительному снижению фильтрационной способности геоматериалов. Коэффи-

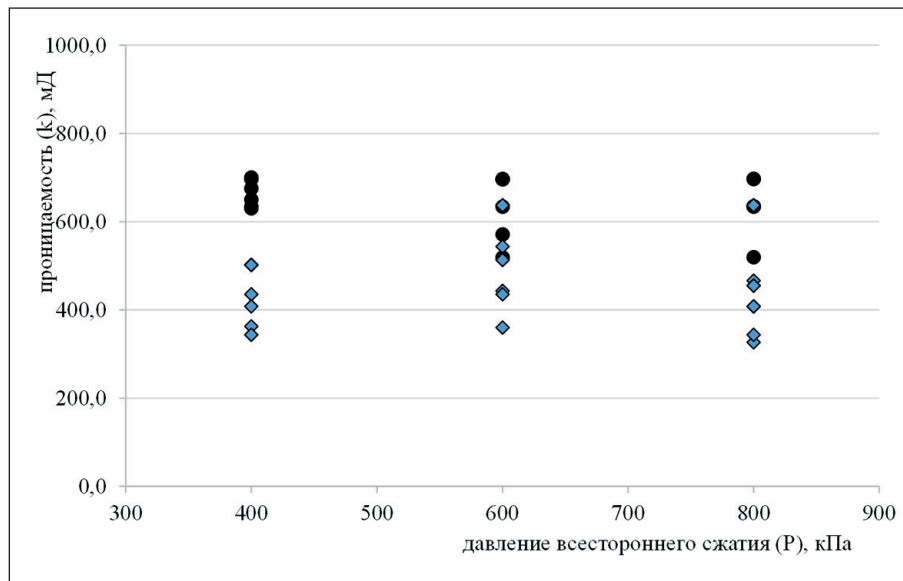
циенты проницаемости уменьшаются в 2,9–3,2 раза (рис. 7). Полученные геоматериалы стабильны при давлениях всестороннего сжатия 400–800 кПа.

Дальнейшее двухкратное уменьшение содержания полиуретанового состава МС, до объемного соотношения жидкая смола/порода – 0,05, незначительно влияет на фильтрационные свойства химически укрепленного песка. Значения проницаемости геоматериалов, полученных при однорастворном способе обработки, достигают 520–700 мД (рис. 8). Дополнительная добавка 5 об. % жидкого состава БС и использование двухрастворного способа обработки снижает проницаемость образцов в 1,3–1,5 раза. Геоматериалы стабильны в условиях сжимающих нагрузок 400–800 кПа.

Полученные коэффициенты проницаемости химически укрепленного песка сравнивали с типовыми значениями, характерными для разных классов грунтов и представленными в работе [22]. Установлено, что при объемном соотношении жидкий полимерный состав/порода 0.2 и более, независимо от типа полимера и способа обработки, геоматериалы приобретают проницаемость, свойственную слабопроницаемым и полупроницаемым породам: песчаные глины, очень слаботрешиноватые породы, суглинки (табл. 2). Низкая фильтрационная способность может быть связана с преобладанием в структуре



**Рис. 7.** Зависимость проницаемости геоматериалов (к), полученных при однорастворном и двухрастворном способах химического укрепления песка полиуретановыми составами МС и БС, от давления всестороннего сжатия (Р). Черные круги – экспериментальные данные исследования образцов, полученных при однорастворном способе обработки при соотношении жидкий состав МС/порода – 0,1. Голубые ромбы – данные исследования образцов, полученных при двухрастворном способе обработки породы смолами МС и БС при соотношениях жидкий состав/порода – 0,1 и 0,05, соответственно



**Рис. 8.** Зависимость проницаемости геоматериалов ( $k$ ), полученных при однорастворном и двухрастворном способах химического укрепления песка полиуретановыми составами МС и БС, от давления всестороннего сжатия ( $P$ ). Черные круги – экспериментальные данные исследования образцов, полученных при однорастворном способе обработки при соотношении жидкий состав МС/порода – 0,05. Голубые ромбы – данные исследования образцов, полученных при двухрастворном способе обработки породы смолами МС и БС при соотношениях жидкий состав/порода – 0,05 и 0,05, соответственно

**Таблица 2.** Проницаемость химически укрепленного песка при различных способах обработки, объемном расходе полимера, давлениях всестороннего сжатия

Способ обработки песка полимерными смолами	Содержание составов, об. % (состав МС; состав БС)	Среднее значение коэффициента проницаемости укрепленного песка, $k_{cp}$ (мД) при различных давлениях сжатия, $P$ (кПа)		
		$P = 400$	$P = 600$	$P = 800$
Однорастворный	(20; 0)	12	9,3	8,5
Однорастворный	(10; 0)	614,7	618,6	644,3
Однорастворный	(5; 0)	665,2	635,5	636,0
Двухрастворный	(20; 5)	6,7	6,3	5,6
Двухрастворный	(10; 5)	205,0	198,2	202,4
Двухрастворный	(5; 5)	459,4	509,8	436,4

замкнутых пустот размером сотни нанометров – несколько микрометров, которые не образуют сплошные поровые каналы.

В случае объемного соотношения жидкий полимерный состав/порода – 0,05–0,15 полученным геоматериалам свойственна проницаемость, характерная для класса проницаемых пород [22]. Повышение фильтрационной способности химически укрепленных песков связано с увеличением количества и размера открытых межзерновых пор в структуре образцов, которые могут формировать сплошные поровые каналы, способствующие фильтрации флюидов.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Способ химического укрепления песка полиуретановыми составами, объемный расход смол существенно влияют на заполнение пустотного пространства отвержденным полимером, свойства остаточной пористости, проницаемость полученных геоматериалов. Выявлено, что в случае обработки песка двухкомпонентным высокоэластичным полиуретаном при объемном соотношении жидкая смола/порода не менее 0,2 образцы приобретает базальную структуру, для которой характерно распределение зерен в основной массе связующего

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ УЧЕНЫХ И СПЕЦИАЛИСТОВ

вещества – отвержденного полимера. В структуре преобладают мелкие замкнутые пустоты размером сотни нанометров – несколько микрометров. При объемных суммарных соотношениях жидких полиуретановых составов к породе, не превышающих 0,15, в структуре геоматериалов распространены открытые межзерновые поры, размер которых увеличивается по мере уменьшения содержания смол. Такие пустоты формируют связанные поровые каналы, существенно влияя на проницаемость химически укрепленных песков. По результатам экспериментов определены особенности изменения проницаемости геоматериалов в зависимости от способа армирования песка полиуретановыми смолами. Получено, что в случае способа односторонней обработки песка при объемном соотношении двухкомпонентная высокоэластичная смола/порода, равном 0,2, значения коэффициента проницаемости образцов составляют 7–13 мД и снижаются примерно в 1,5 раза по мере увеличения сжимающей нагрузки от 400 до 800 кПа. Это связано с высоким содержанием высокоэластичного материала, который деформируется при сжатии, приводя к уменьшению пустотного объема в структуре. Дополнительная добавка 5 об. % жесткой однокомпонентной смолы и применение двухрастворного способа обработки приводят к снижению проницаемости в 1,5–1,8 раза, повышению устойчивости образцов при аналогичных сжимающих напряжениях. Установлено, что использование одностороннего способа укрепления и двухкратное снижение расхода высокоэластичной смолы приводят к увеличе-

нию коэффициента проницаемости на 1–2 порядка, до значений 500–700 мД. Добавка 5 об. % жидкого однокомпонентного полиуретанового состава вызывает снижение проницаемости в 2,9–3,2 раза. Полученные геоматериалы устойчивы при давлениях всестороннего сжатия 400–800 кПа. Дальнейшее двухкратное уменьшение содержания полиуретановых смол до объемного соотношения жидкая смола/порода – 0.05 незначительно влияет на фильтрационные свойства химически укрепленного песка. Сравнение полученных коэффициентов проницаемости геоматериалов с типовыми значениями показало, что при объемном соотношении жидкий полимерный состав/порода, равном 0,2 и более, образцы имеют проницаемость, свойственную породам класса слабопроницаемых и полупроницаемых: песчаные глины, очень слаботрещиноватые породы, суглинки. Практическая значимость результатов заключается в повышении эффективности использования полиуретановых смол для задач снижения фильтрационных свойств несвязных грунтов. Выявленные зависимости проницаемости геоматериалов от свойств песка, способа обработки, объемных соотношений жидких смол и породы, условий нагружения образцов указывают на необходимость выбора оптимального способа химического воздействия с учетом решаемой геотехнической задачи. Это обеспечит как эффективное снижение фильтрационных свойств несвязных грунтов, так и уменьшение расхода дорогостоящих полимерных составов при возведении противофильтрационных завес и экранов в массиве.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Леонова А.В. *Основы гидрогеологии и инженерной геологии: учебное пособие*. Томск: Изд-во Томского политехнического университета; 2013. 149.
2. Нуднер В.А и др. *Гидрогеология СССР. Том 16. Западно-Сибирская равнина (Тюменская область, Омская область, Новосибирская область, Томская область)*. Москва: Недра; 1970. 368.
3. Zuber S.S., Kamarudin H., Abdullah M.M.A.B., Binhussain M. Review on soil stabilization techniques. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*. 2013;7(5):258–265.
4. Firoozi A.A., Guney Olgun, C., Firoozi, A.A., Baghini M.S. Fundamentals of soil stabilization. *International Journal of Geo-Engineering*. 2017;8(1):1–26. <https://doi.org/10.1186/s40703-017-0064-9>. – EDN: MIK1BR.
5. Chang I., Prasadhi A. K., Im J., Cho G. C. Soil strengthening using thermo-gelation biopolymers. *Construction and Building Materials*. 2015;77:430–438. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.12.116>
6. Ma S., Ma M., Huang Z., Hu Y., Shao Y. Research on the improvement of rainfall infiltration behavior of expansive soil slope by the protection of polymer waterproof coating. *Soils and Foundations*. 2023;63(3):1–17. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2023.101299>. – EDN: ZYNOLW.
7. Saleh S., Yunus N.Z.M., Ahmad K., Ali N. Improving the strength of weak soil using polyurethane grouts: A review. *Construction and Building Materials*. 2019;202:738–752. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.01.048>. – EDN: AKAMDJ.
8. Anagnostopoulos C.A., Aggelidis V. Factors affecting properties of polymer grouted sands. *CivilEng*. 2024; 5(1): 65–88. <https://doi.org/10.3390/civileng5010004>. – EDN: WLWBSQ.
9. Guo C., Sun B., Hu D., Wang F., Shi M., Li X. A field experimental study on the diffusion behavior of expanding polymer grouting material in soil. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 2019;56(3):171–177. <https://doi.org/10.1007/s11204-019-09586-7>. – EDN: YINLRB.

10. De Souza F.M., Kahol P.K., Gupta R.K. Chapter 1. Introduction to polyurethane chemistry. In: *Polyurethane Chemistry: Renewable Polyols and Isocyanates*. Pittsburg: ASC Publications; 2021.
11. Komurlu E., Kesimal A. Experimental study of polyurethane foam reinforced soil used as a rock-like material. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2015;7(5):566-572. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2015.05.004>
12. Wang X., Zhang F., Wu J., Qiang S., Li B., Zhang G. Diffusion Behavior of Polyurethane Slurry for Simultaneous Enhancement of Reservoir Strength and Permeability Through Splitting Grouting Technology. *Polymers*. 2025;17(18):2513. <https://doi.org/10.3390/polym17182513>. – EDN: TFGPLJ.
13. Hao M., Zhang J., Zou L., Li X., Zhong Y., Cvetkovic V. Influence of component parameters on propagation characteristics of foaming polyurethane grout in rock fractures. *Construction and Building Materials*. 2024;428:136227. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.136227>. – EDN: XBECLE.
14. Шилова Т.В., Сердюк И.М., Сердюков С.В., Иванова О.А., Сердюков А.С. Изменение проницаемости рыхлой породы при неполном насыщении высокоэластичной полимерной смолой. *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. 2024;1:26–32. <https://doi.org/10.15372/FTPRPI20240103>. – EDN: IJESYJ.
15. ГОСТ 25100-2020 Грунты. Классификация. Введ. 2021-01-01 М.: Стандартинформ, 2020. 38.
16. Шилова Т.В., Сердюков С.В., Дробчик А.Н. Экспериментальные исследования деформационно-прочностных свойств песчаного грунта при его укреплении полиуретановыми составами. *Горные науки и технологии*. 2025; 10(1): 15-24. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2024-08-303>. – EDN: LMLQJK.
17. Serdyukov S.V., Shilova T.V., & Drobchik A.N. Laboratory installation and procedure to determine gas permeability of rocks. *Journal of mining science*. 2017;53(5):954-961. <https://doi.org/10.1134/S1062739117052994/>. – EDN: YBVXJJ.
18. ГОСТ 26450.2-85 Породы горные. Метод определения коэффициента абсолютной газопроницаемости при стационарной и нестационарной фильтрации. Введ. 1986-07-01 М.: Издательство стандартов, 1985. 17.
19. Siams. Available online: <https://siams.com/minerals7/?ysclid=mhvlgl41qb576492978> (accessed on 27 October, 2025).
20. Ni H., Liu J., Huang B., Pu H., Meng Q., Wang Y., & Sha Z. Quantitative analysis of pore structure and permeability characteristics of sandstone using SEM and CT images. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*. 2021; 88: 103861. <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2021.103861>. – EDN: KQRNME.
21. Bodi J., Bodi Z., Scucka J., Martinec P. Chapter 14. Polyurethane grouting technologies. In: Zafar F., Sharmin E. (eds.) *Polyurethane. IntechOpen*. 2012:307–336. <https://doi.org/10.5772/35791>
22. Зеливянская О.Е. *Петрофизика: учебное пособие*. Ставрополь: Изд-во СКФУ, 2015. 111.

#### ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Авторы заявляют о том, что при подготовке статьи не использовались технологии генеративного искусственного интеллекта и технологии, основанные на искусственном интеллекте.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

**Шилова Татьяна Викторовна** – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Институт горного дела имени Н.А. Чинакала, 630091, Новосибирск, Красный пр-кт, 54, Российская Федерация, shilovatanya@yandex.ru, <http://orcid.org/0000-0001-5056-9279>

**Иванова Оксана Александровна** – младший научный сотрудник, Институт горного дела имени Н.А. Чинакала, 630091, Новосибирск, Красный пр-кт, 54, Российская Федерация, ksu\_88@bk.ru, <http://orcid.org/0000-0002-9334-4173>

**Сердюков Александр Сергеевич** – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Институт горного дела имени Н.А. Чинакала, 630091, Новосибирск, Красный пр-кт, 54, Российская Федерация, aleksanderserdyukov@yandex.ru, <http://orcid.org/0000-0002-2726-6904>

#### ВКЛАД АВТОРОВ:

**Шилова Т.В.** – постановка целей и задач исследования; развитие методологии; проведение экспериментальной части исследования; написание исходного текста; итоговые выводы.

**Иванова О.А.** – литературный обзор; проведение экспериментальной части исследования; обработка результатов; итоговые выводы.

**Сердюков А.С.** – обработка результатов; графическое и табличное оформление результатов; доработка текста.

#### Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 19.01.2026; одобрена после рецензирования 02.04.2026; принята к публикации 08.04.2026.