

Т. В. Шилова^{1✉}, И. М. Сердюк¹

Исследование изменения проницаемости песка, закрепленного полиуретановыми составами

¹Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН,
г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: shilovatanya@yandex.ru

Аннотация. В статье приведены результаты экспериментального исследования влияния типа, удельного расхода полиуретановых смол, способа смешения на проницаемость химически закрепленного мелкого песка. Установлено, что при удельном расходе двух- и однокомпонентных составов 5 – 10 об. % достигаются значения проницаемости геоматериалов, соответствующие слабопроницаемым породам. Двухкратное повышение содержания полиуретановых смол приводит к уменьшению значений еще на 1 - 2 порядка. Использование двухрастворного способа смешения составов с закрепляемой рыхлой породой также приводит к значительному снижению проницаемости. Получено, что геоматериалы, сформированные при удельном расходе двухкомпонентных высокоэластичных и однокомпонентных быстродействующих полиуретановых смол до 10 об. % и до 20 об. %, соответственно, стабильны в условиях давления всестороннего сжатия 400 – 800 кПа, и их фильтрационные свойства практически не меняются по мере увеличения нагрузки.

Ключевые слова: песок, химическое закрепление пород, полиуретановые составы, проницаемость, всестороннее сжатие, содержание смолы

T. V. Shilova^{1✉}, I. M. Serdyuk¹

Study of change of sand permeability when polyurethane compositions reinforcement

¹Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch of Russian Academy of Sciences,
Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: shilovatanya@yandex.ru

Abstract. The article presents the results of an experimental study of the influence of the type, specific consumption of polyurethane resins, and mixing method on the permeability of chemically reinforced fine sand. It has been established that with a specific consumption of two- and one-component compositions of 5–10 vol. %, the permeability values of geomaterials corresponding to low-permeability rocks are achieved. A two-fold increase in the content of polyurethane resins leads to a decrease in values by another 1–2 orders of magnitude. The use of a two-solution method of mixing compositions with reinforced loose rock also leads to a significant decrease in permeability. It has been found that geomaterials formed with a specific consumption of two-component high elastic and one-component fast-acting polyurethane resins of up to 10 vol. % and up to 20 vol. %, respectively, are stable under conditions of uniform compression pressure of 400–800 kPa, and their filtration properties remain virtually unchanged as the load increases.

Keywords: sand, chemical reinforcement of rocks, polyurethane compositions, permeability, all-round compression, resin content

Введение

Улучшение свойств рыхлых песчаных грунтов является актуальной задачей при возведении и эксплуатации инженерных объектов, разработке месторождений твердых полезных ископаемых и др. Высокая гидравлическая проводимость, пористость, плохая сортированность песков приводят к проявлению негативных физических процессов, таких как оседание, эрозия грунта и пр. Для улучшения свойств применяют закрепление полимерными смолами, среди которых широко распространены двухкомпонентные и однокомпонентные полиуретановые составы [1-3]. Отличительной особенностью таких композиций является способность проникать в горные породы за счет интенсивного вспенивания и расширения в процессе полимеризации. Наиболее интенсивное быстрое вспенивание характерно для однокомпонентных систем при их взаимодействии с водой. Такие составы предназначены для укрепления рыхлых, неустойчивых пород, устранения фильтрации воды и газа и пр. [4, 5]. На практике их использование осложняется быстрым ростом вязкости из-за малого времени реакции, что ограничивает глубину и равномерность проникновения в породы [6, 7]. В двухкомпонентных системах образование пенополиуретана происходит вследствие реакции изоцианата и смеси полифункциональных гидроксилсодержащих полиолов со вспенивающим агентом и катализатором [8]. Медленно-реагирующие двухкомпонентные высокоэластичные смолы эффективны при возведении непроницаемых завес и экранов в массиве горных пород, гидроизоляции грунтов, поскольку длительное сохранение низкой вязкости и регулируемое время их отверждения способствуют хорошему проникновению состава в массив. Ограничением является сильная зависимость отверждения таких смол от равномерности перемешивания компонентов А и Б. Неоднородное перемешивание приводит к частичному (неполному) схватыванию состава. Следует отметить, что рыхлые породы, армированные двухкомпонентными высокоэластичными полиуретанами, имеют низкую механическую прочность, для повышения которой можно использовать дополнительную добавку однокомпонентного быстродействующего состава [9]. Цель настоящей работы – исследовать проницаемость укрепленной рыхлой породы в зависимости от типа и удельного объемного расхода полиуретановых составов.

Материалы и методы

Лабораторные эксперименты проводили с мелким песком, более 90 масс. % которого составляет фракция размером 0,2 – 0,3 мм. Предварительная обработка включала высушивание породы до постоянной массы, определение абсолютной и насыпной плотностей, которые в среднем составили 2,6 г/см³ и 1,6 г/см³, соответственно. Расчетный коэффициент пористости – 0,65. Для химического закрепления породы в экспериментах использовали два типа полиуретановых составов: двухкомпонентную высокоэластичную низковязкую смолу (далее состав МС) и однокомпонентную быстротвердеющую смолу (далее состав БС). Состав МС образуется при смешивании до однородной консистенции компонентов А и Б в

объемном отношении 1:1 и предназначен для армирования, гидроизоляции несвязных грунтов. В отвержденном виде он является непроницаемым, эластичным материалом. Состав БС предназначен для укрепления рыхлых, неустойчивых пород, устранения фильтрации воды и газа, возведения противопрофильтрационных завес. Полимеризация состава происходит при смешивании и реакции с водой со значительным увеличением объема. Время полного отверждения – 90 - 180 секунд при температуре 25°C. В отвержденном виде композиция представляет собой мелкопористую пену.

Экспериментальная процедура включала: химическое закрепление породы полиуретановыми смолами методом смешения, формирование цилиндрических образцов закрепленного песка (далее геоматериалы) диаметром 30 мм и длиной 60 мм, проведение фильтрационных тестов с целью определения коэффициента проницаемости при давлениях всестороннего сжатия образцов 400 - 800 кПа (рис.1). В тестах использовали два способа смешения породы с полимерными смолами: однорастворный с готовыми составами МС или БС; двухрастворный – последовательно с составами МС и БС. Геоматериалы формировали при объемных соотношениях жидкой смолы и песка 0,05; 0,1; 0,15; 0,2; 0,25.

Проницаемость геоматериалов определяли по результатам фильтрационных тестов на лабораторной установке, предназначенной для изучения фильтрации газа в породах при линейном стационарном характере течения. Технические характеристики установки приведены в работе [10]. Коэффициенты проницаемости k образцов определяли в условиях всестороннего равномерного сжатия $\sigma = 400 - 800$ кПа, с помощью методики ГОСТ 26450.2-85 [11].



Рис. 1. Образцы укрепленного песка для фильтрационных тестов

Результаты и обсуждение

По результатам фильтрационных экспериментов определены коэффициенты проницаемости геоматериалов, сформированных при различных способах смешения, типах, удельных расходах полиуретановых композиций. В случае применения способа однорастворного смешения песка с 20 об. % состава МС значения коэффициента проницаемости полученных геоматериалов составили 7 – 13 мД. При использовании 20 об. % быстродействующего полиуретанового состава БС проницаемость геоматериалов - 15 – 20 мД (см. рис. 2). Таким образом,

закрепленный полиуретанами мелкий песок приобретает фильтрационные свойства, характерные для некоторых типов суглинков, песчаных глин, глинистых сланцев, относящихся к классу весьма слабопроницаемых пород.

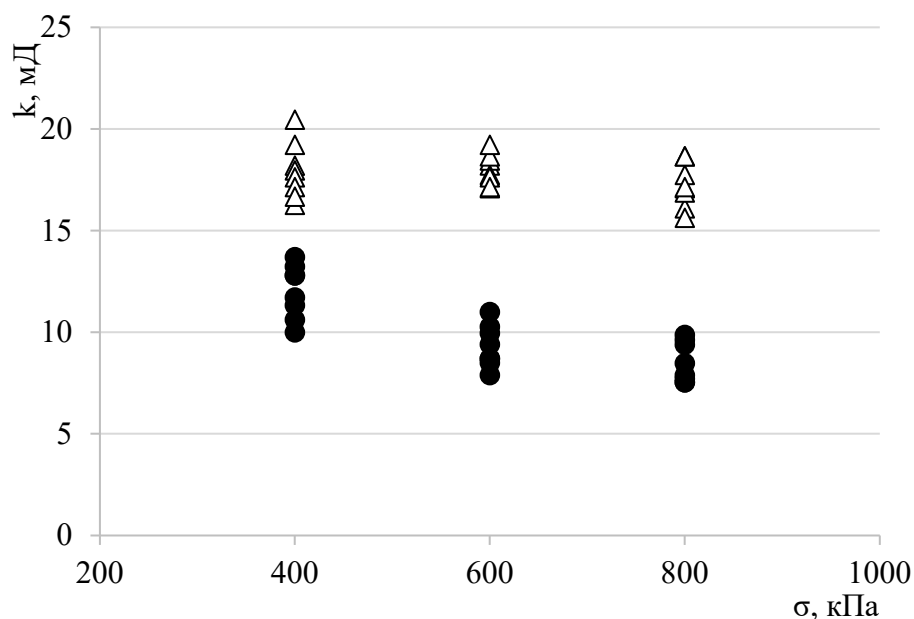


Рисунок 2 – Зависимость коэффициента проницаемости песка, закрепленного 20 об. % смолы, от давления всестороннего сжатия образца. Черные кружки – геоматериалы, полученные при использовании двухкомпонентного полиуретанового состава МС; белые треугольники - геоматериалы, полученные при использовании однокомпонентного полиуретанового состава БС

Двухкратное снижение удельного расхода составов приводит к увеличению коэффициента проницаемости на 1 – 2 порядка, до значений слабопроницаемых пород. Последующее двухкратное уменьшение содержания полиуретановой смолы, до 5 об. %, незначительно влияет на фильтрационные свойства геоматериалов. Значения, полученные для однорастворного способа смешения и разных типов полиуретановых составов схожи (рис. 3, табл. 1). Использование двухростворного способа смешения позволило дополнительно снизить проницаемость геоматериалов. Добавка 5 об. % быстродействующего состава БС к составу МС при закреплении песка, привела к уменьшению значений проницаемости в 1,5 – 3 раза (см. табл. 1).

Исследовано влияние всестороннего сжатия на изменение проницаемости геоматериалов. Экспериментально установлено, что при удельном объемном расходе полиуретановых составов МС и БС до 10 об. %, и до 20 об. %, соответственно, образцы стабильны при нагрузках 400 – 800 кПа, и фильтрационные свойства незначительно меняются. В случае повышения содержания состава МС до 20 об. % проницаемость полученных геоматериалов снижается примерно в 1,5 раза с увеличением сжимающей нагрузки в 2 раза. Это связано с высоким содер-

жанием высокоэластичного материала в образцах – отвержденного двухкомпонентного состава МС.

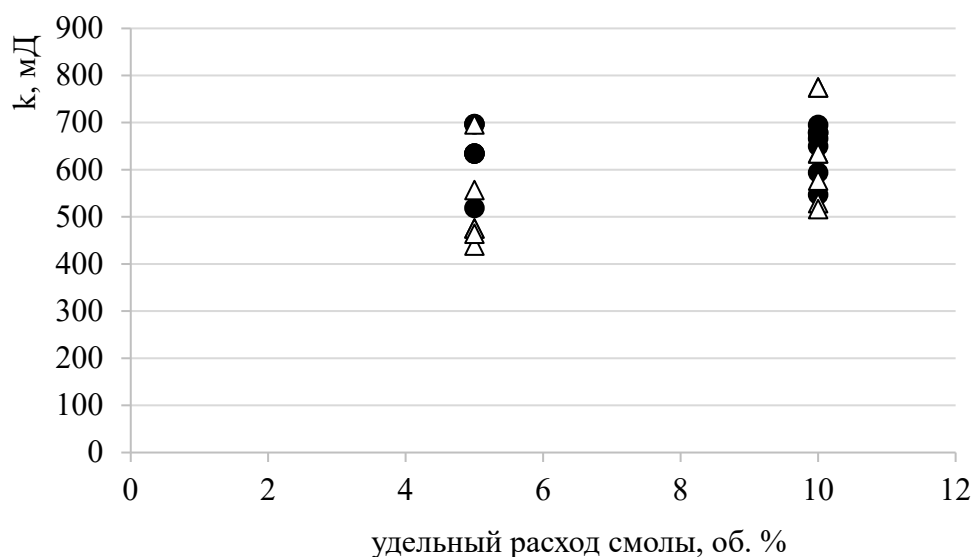


Рисунок 3 – Зависимость коэффициента проницаемости песка, закрепленного полиуретановыми смолами, от удельного объемного расхода состава. Черные круги – геоматериалы, полученные при использовании двухкомпонентного полиуретанового состава МС; белые треугольники - геоматериалы, полученные при использовании однокомпонентного полиуретанового состава БС

Таблица 1

Проницаемость песка, закрепленного полиуретановыми смолами, в зависимости от типа, удельного расхода состава, давления всестороннего сжатия

Содержание составов, об. % (состав МС; состав БС)	Среднее значение коэффициента проницаемости геоматериала, $k_{ср}$, мД при различных давлениях сжа- тия образцов, σ , кПа		
	$\sigma=400$ кПа	$\sigma=600$ кПа	$\sigma=800$ кПа
(20; 0)	12,0	9,3	8,5
(10; 0)	614,7	618,6	644,3
(5; 0)	665,2	635,5	636,0
(20; 5)	6,72	6,26	5,62
(10; 5)	205,0	198,2	202,4
(0; 20)	17,9	18,0	17,2
(0; 10)	590,3	662,1	634,6
(0; 5)	616,9	569,4	617,0

Заключение

По результатам исследований определены особенности изменения проницаемости мелкозернистого песка, закрепленного двух- и однокомпонентными полиуретановыми смолами. Получено, что при удельном расходе составов 5 – 10 об. % достигаются значения проницаемости геоматериалов, соответствующие слабопроницаемым породам. Двухкратное повышение содержания полиуретановых смол приводит к уменьшению значений еще на 1-2 порядка. Также значительное снижение фильтрационных свойств достигается в случае использования двухрастворного способа смешения составов с закрепляемой породой. Установлено, что при удельном объемном расходе полиуретановых составов МС и БС до 10 об. %, и до 20 об. %, соответственно, образцы закрепленного песка стабильны при нагрузках 400 – 800 кПа, и их проницаемость практически не меняется.

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.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Liu J., Qi, X.; Zhang, D.; Feng, Q.; Wang, Y.; Kanungo, D.P. Study on the permeability characteristics of polyurethane soil stabilizer reinforced sand //Advances in Materials Science and Engineering. – 2017. – Т. 2017. – №. 1. – С. 5240186.
2. 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. – Т. 63. – №. 3. – С. 101299.
3. Liu J., Bu F., Bai Y., Chen Z., Kanungo D. P., Song Z., Wang Y., Qi C., and Chen J. Study on engineering properties of sand strengthened by mixed fibers and polyurethane organic polymer, Bull. Eng. Geol. Env., 2020, Vol. 79. — P. 3049 – 3062.
4. Васильев В. В. Полимерные композиции в горном деле. Москва: Наука; 1986. 294 с.
5. Liu H., Wang, F., Shi, M., & Tian, W. Mechanical behavior of polyurethane polymer materials under triaxial cyclic loading: a particle flow code approach //Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed. – 2018. – Т. 33. – С. 980-986.
6. Šňupárek R., Souček K. Laboratory testing of chemical grouts //Tunnelling and Underground Space Technology. – 2000. – Т. 15. – №. 2. – С. 175-185.
7. Jinpeng Z., Limin L., Yang L. Mechanism and experiment of self-stress grouting reinforcement for fractured rock mass of underground engineering //Tunnelling and Underground Space Technology. – 2023. – Т. 131. – С. 104826.
8. de Souza, F. M., Kahol, P. K., & Gupta, R. K. Polyurethane chemistry: Renewable polyols and isocyanates. Pittsburg: ASC Publications; 2021. Chapter 1, Introduction to polyurethane chemistry, p. 1 - 24.
9. 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. – Т. 10. – №. 1. – С. 15-24.
10. Serdyukov S. V., Shilova T. V., Drobchik A. N. Laboratory installation and procedure to determine gas permeability of rocks //Journal of mining science. – 2017. – Т. 53. – С. 954-961.
11. ГОСТ 26450.2-85. Методы определения коэффициента абсолютной газопроницаемости при стационарной и нестационарной фильтрации. — М.: Изд-во стандартов, 1985. — 17 с.

© Т. В. Шилова, И. М. Сердюк, 2025