

Т. В. Шилова^{1✉}, А. Н. Дробчик¹

Экспериментальные исследования деформационно-прочностных свойств глинистых грунтов после криогенного воздействия

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

Аннотация. В работе приведены результаты экспериментальных исследований деформационно-прочностных свойств пылевато-глинистых грунтов, укрепленных полиуретановыми составами, после циклического криогенного воздействия на образцы. Рассмотрены два способа полимерной обработки, представляющие собой полную объемную пропитку и формирование непроницаемого слоя в структуре породы. Протестированы двухкомпонентный медленно-реагирующий и однокомпонентный быстросхватывающийся полиуретановые составы. Установлено, что применение обоих методов приводит к повышению деформационно-прочностных свойств, стабильности пород в условиях циклического криогенного воздействия. Полная объемная пропитка пылевато-глинистого грунта двухкомпонентной смолой оказалась наиболее эффективной. По сравнению с не укрепленной породой, механическая прочность полученных геоматериалов увеличивается в 1,5. Отмечается наибольший прирост модуля деформации, значения повышается в 1,8 – 2 раза, по сравнению с не обработанным полиуретанами пылевато-глинистым грунтом.

Ключевые слова: глинистые грунты, деформационно-прочностные свойства, криогенное воздействие, полимерное укрепление, способ обработки

T. V. Shilova^{1✉}, A. N. Drobchik¹

Study of deformation and strength properties of clay soils after cryogenic impact

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

Abstract. This paper presents the results of experimental studies of the deformation and strength properties of silty clay soils strengthened with polyurethane compounds after cyclic cryogenic exposure. Two methods of polymer treatment are considered: complete volumetric impregnation and the formation of an impermeable layer in the rock structure. A two-component, slow-reacting polyurethane and a single-component, fast-setting polyurethane compositions were tested. It was found that the use of both methods leads to increase deformation and strength properties and rock stability under cyclic cryogenic exposure. Complete volumetric impregnation of silty clay soil with a two-component resin proved to be the most effective. Compared to not strengthened rock, the mechanical strength of the resulting geomaterials increases by 1.5 times. The greatest increase in the deformation modulus is noted, with values increasing by 1.8 to 2 times compared to silty clay soil not treated with polyurethanes.

Keywords: clay soils, deformation and strength properties, cryogenic impact, polymer strengthening, method of treatment

Введение

Сезонное промерзание грунтов наблюдается на большой части территории Западной Сибири [1, 2]. Для глинистых грунтов, пород, содержащих значительное количество ила, мелкого, пылеватого песка, характерны проявления морозного пучения, которое представляет собой процесс неравномерного увеличения объема воды в порах в условиях отрицательных температур. Морозное пучение вызвано, прежде всего, миграцией незамерзшей грунтовой воды к фронту промерзания и формированием ледяных линз в массиве [3 – 5]. В периоды сезонного потепления лед начинает таять, но грунтовая масса не может быстро «реабсорбировать» образовавшуюся воду. В результате повышается влажность, снижаются прочностные свойства. Эти явления наносят существенный ущерб транспортной инфраструктуре, инженерным сооружениям, вызывают негативные последствия в процессе разработки месторождений открытым способом [6 - 8]. В работе Zhang Y. et al., 2019 рассмотрены способы усиления грунтов в период сезонного оттаивания и смягчения процессов морозного пучения. Распространены физико-химические методы стабилизации пылеватоглинистых грунтов вяжущими материалами, полимерами, например, возведение геосинтетических барьеров в зоне промерзания породы. Укрепленные грунты в зависимости от примененных добавок могут выполнять функции гидроизоляционных, усиленных слоев [9 - 11]. Накопленный опыт практического использования цементных вяжущих показывает, что глинистые грунты не обладают достаточной морозоустойчивостью, эластичностью, что приводит к трещинообразованию, хрупкости при сезонных температурных воздействиях [12]. Эффективность армирования глинистых пород также зависит от их консистенции. Наиболее слабый эффект отмечается для мягкопластичных, текучепластичных, текучих глин и суглинков [13]. Актуальными направлениями исследования остаются оценка изменения деформационно-прочностных и фильтрационных свойств укрепленных пород в условиях криогенных воздействий. В работе приведены результаты экспериментальных исследований деформационно-прочностных свойств пылеватоглинистых грунтов в условиях циклов замораживания/оттаивания образцов и их укрепления полиуретанами, которые с одной стороны могут обеспечить непроницаемость, с другой – повышение прочности пород [14].

Материалы и методы

Лабораторные исследования проводили с пылеватоглинистым грунтом, который состоит из мягкопластичной глины с примесью 15 масс. % пылеватого песка. Порода относится к сильнопучинистой, согласно классификации ГОСТ 28622-90 [15]. С целью повышения деформационно-прочностных и снижения фильтрационных свойств, образцы обрабатывали двумя типами составов: 1 – двухкомпонентная медленно-реагирующая полиуретановая смола (далее состав ДПУ), которая четырехкратно увеличивается в объеме в процессе полимеризации и в отвержденном виде представляет собой непроницаемый материал, стабильный при отрицательных температурах [14]. Время полного отверждения составляет около 3,5 часов; 2 – однокомпонентная быстросхватывающаяся полиуретановая смола (далее состав

БПУ), которая вспенивается при реакции с водой и увеличивается в объеме более чем в 10 раз. В отвержденном виде состав БПУ представляет собой жесткий пористый материал, стабильный при значительных нагрузках и в условиях отрицательных температурах. Время полного отверждения составляет около 90 секунд [14].

Влияние полимерной обработки на грунт исследовали в лабораторных условиях. Порядок проведения экспериментов включал:

- обработку породы полимерами и формирование смесей полимер/порода (далее геоматериал);
- криогенное воздействие: два цикла замораживания/оттаивания полученных геоматериалов;
- проведение деформационно-прочностных испытаний в условиях трехосного сжатия.

В лабораторных экспериментах использовали два способа обработки пылевато-глинистого грунта. Первый состоит в пропитке всего объема породы смолой ДПУ или БПУ. Для обоих типов полимеров образцы формировали при соотношении объемов жидкий состав /грунт 0,9 – 0,11. Второй способ включал создание в породе непроницаемого слоя, который представляет собой смесь грунта и полимера. В этом случае полученные геоматериалы состоят из необработанной породы и в верхней части - полимерного слоя, который занимает около одной трети объема образца. Текстура образцов неоднородна. Геоматериалы формировали при объемном соотношении жидких состава ДПУ и грунта 0,9 – 0,11 в слое, или при перерасчете на весь объем породы - 0,03 – 0,035. Для обоих способов обработки полученные образцы размещали в разъемных пластиковых цилиндрических формах высотой 14 см, диаметром 5 см, уплотняли и оставляли на 24 часа. Затем их ставили в термостат и выдерживали 24 часа при температуре -14° С, которая характерна для зимнего сезона региона. Далее замороженные цилиндрические образцы выравнивали до длины 10 см и оставляли до полного оттаивания. После чего повторяли цикл заморозки/оттаивания и приступали к деформационно-прочностным испытаниям. Свойства геоматериалов определяли по результатам тестов на трехосное сжатие. Испытания способом трехосного сжатия проводили на установке ГТ 1.3.5 по методике, регламентируемой ГОСТом 12248.3-2020 [16]. Боковое давление в экспериментах составляло 400, 600 кПа. Также были выполнены исследования с породами без полимерной обработки.

Результаты и обсуждение

Укрепление пылевато-глинистого грунта полиуретановыми смолами оценивали по результатам тестов на трехосное сжатие после циклов замораживания/оттаивания образцов. В случае использования двухкомпонентного медленно-реагирующего состава ДПУ способ обработки и внешние условия воздействия существенно влияют на свойства полученных геоматериалов. Установлено, что не укрепленная порода после двух циклов замораживания/оттаивания разрушается с выраженным пределом прочности (максимумом напряжения) в условиях боковой нагрузки в камере 400 кПа. Стадия пластической деформации наступает при значении относительной вертикальной деформации около 1,5%.

В случае формирования полимерного слоя в структуре пылевато-глинистого грунта образцы выдерживают нагрузки, которые в 1,5 - 2 раза выше, по сравнению с не обработанными полимерами породами. Полученные геоматериалы разрушаются при значениях девиаторного напряжения около 150 кПа. Разрыв сплошности происходит в основном на границе полимерный слой – необработанная порода и объясняется неоднородностями в структуре. Способ полной объемной пропитки пылевато-глинистого грунта составом ДПУ оказался более эффективным. Прочностные характеристики геоматериалов близки к значениям, полученным при формировании полимерного слоя (рис. 1). Образцы после объемной пропитки составом ДПУ деформируются на 15 об. % и более и восстанавливаются до исходного размера после снятия вертикальной нагрузки (рис. 2). Увеличение бокового давления до 600 кПа приводит к снижению механической прочности не укрепленного пылевато-глинистого грунта. В то же время, прочность геоматериалов, полученных в результате обоих способов полимерной обработки составом ДПУ, сохраняется в аналогичных условиях. По результатам деформационно-прочностных испытаний образцов были определены значения модуля деформации геоматериалов. Наибольший прирост модуля деформации имеет место при объемной пропитке пылевато-глинистого грунта полимером ДПУ, значения увеличиваются в 1,8 – 2 раза, по сравнению с не укрепленной породой (табл. 1).

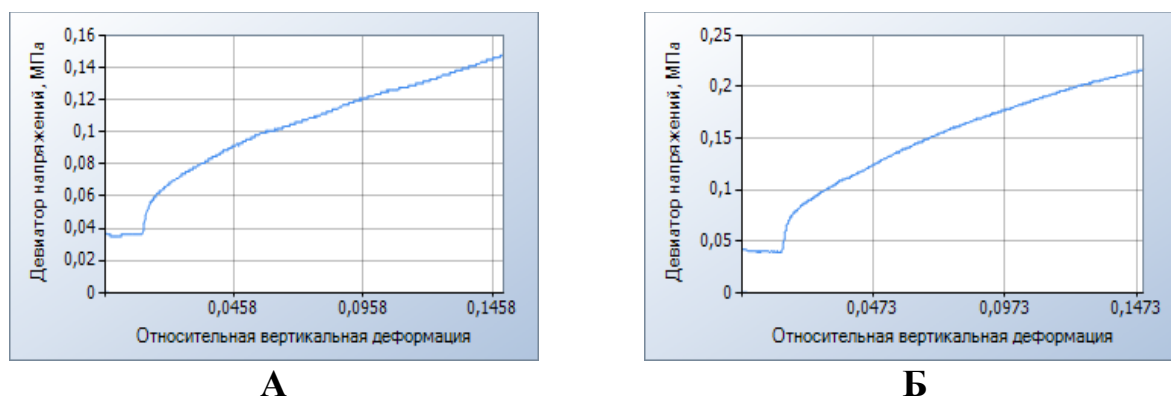


Рис. 1. Диаграммы «девиатор напряжений – относительная осевая деформация» образцов геоматериалов, полученных при укреплении пылевато-глинистого грунта двухкомпонентной полиуретановой медленно-реагирующей смолой ДПУ, после двух циклов замораживания/оттаивания, боковое давление в камере – 400кПа: а – формирование полимерного слоя в структуре; б – объемная пропитка породы

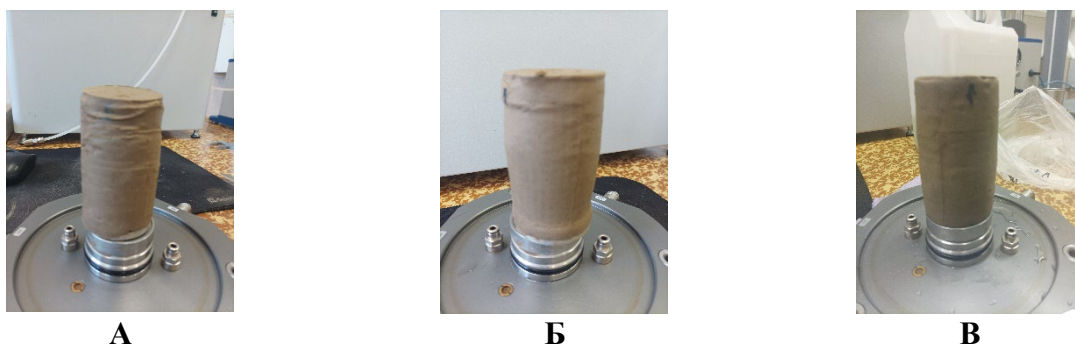


Рис. 2. Пылевато-глинистый грунт и геоматериалы, полученные после укрепления двухкомпонентным составом ДПУ после циклов заморзания/оттаивания и тестов на трехосное сжатие при давлении в камере 400 кПа: а – порода без укрепления; б – геоматериал, полученного при формировании полимерного слоя в структуре породы; в – геоматериал, полученный при полной объемной пропитке полимером

В случае укрепления пылевато-глинистого грунта однокомпонентным быстродействующим составом БПУ был реализован только способ объемной пропитки. Установлено, что после циклического криогенного воздействия и в условиях боковой нагрузки 400 кПа прочность полученных геоматериалов повышается на 5 – 15%, по сравнению с не укрепленной породой. Стадия пластической деформации наступает при относительной вертикальной деформации образца около 4,5%. При повышении бокового давления в камере до 600 кПа геоматериалы стабильны, сохраняют приобретенные деформационно-прочностные характеристики.

Таблица 1. Модуль деформации пылевато-глинистого грунта и геоматериалов, полученных при укреплении полиуретановым составом ДПУ, после циклического криогенного воздействия и при боковых давлениях (σ)

Способ укрепления	Модуль деформации, МПа	
	$\sigma = 400$ кПа	при $\sigma = 600$ кПа
нет	7,5	7,7
полимерный слой	9,5	11,1
объемная пропитка	13,3	14,5

Заключение

Использование способов укрепления пылевато-глинистых грунтов полиуретановыми составами приводит к повышению деформационно-прочностных свойств, стабильности пород в условиях циклического криогенного воздействия. Наиболее эффективным оказался метод полной объемной пропитки грунта двухкомпонентной медленно-реагирующей полиуретановой смолой. По сравнению с не укрепленной породой, прочность и модуль деформации полученных геоматериалов увеличиваются в 1,5 и 1,8 – 2 раза, соответственно.

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. Гиличинский Д. А. Закономерности сезонного промерзания пород южной части Западной Сибири и прогноз его изменения в связи с природными и антропогенными факторами. – 1984.
2. Пармузин Ю. П. Средняя Сибирь: очерк природы. – ООО ДиректМедиа, 2016.
3. Teng J. et al. Frost heave in soils: Research status and perspectives //Earth-Science Reviews. – 2026. – С. 105462.
4. Rempel A. W. Formation of ice lenses and frost heave //Journal of Geophysical Research: Earth Surface. – 2007. – Т. 112. – №. F2.
5. Lay R. D. Development of a frost heave test apparatus. – Brigham Young University, 2005.
6. Liu H. et al. Study on the frost heave mechanism of the water conveyance canal and optimized design of slope protection //Bulletin of Engineering Geology and the Environment. – 2021. – Т. 80. – №. 11. – С. 8397-8417.
7. Zhang Y., Michalowski R. L. Thermal-hydro-mechanical analysis of frost heave and thaw settlement //Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering. – 2015. – Т. 141. – №. 7. – С. 04015027.
8. Andersland O. B., Ladanyi B. Frozen ground engineering. – 2004.
9. Zhang Y., Xiong L., Liu L. A Comparison of soil improvement techniques for frost heave mitigation //International Congress and Exhibition " Sustainable Civil Infrastructures: Innovative Infrastructure Geotechnology". – Cham Springer International Publishing, 2018. – С. 193-203.
10. Хабибуллина И. Н., Бешенов М. Е., Гелеверя Т. И. Использование укрепленных грунтов для устройства противопучинистых слоев на автомобильных дорогах //Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. – 2011. – №. 2 (16). – С. 257-261.
11. Чернышева И. А., Мащенко А. В. Сравнение методов защиты от морозного пучения грунта //Construction and Geotechnics. – 2016. – Т. 7. – №. 4. – С. 64-72.
12. Алексеев А. В., Кнатько В. М., Эйзлер П. П. Технология улучшения эксплуатационных свойств укрепленных грунтов и проблемы утилизации резинопolyмеров в крупных мегаполисах северных регионов мира //Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле. – 2009. – №. 3. – С. 66-68.
13. Салахов Р. Р. Химические методы стабилизации глинистых грунтов //Транспорт. Транспортные сооружения. Экология. – 2023. – №. 3. – С. 59-64.
14. Shilova T. V., Serdyukov S. V., Drobchik A. N. Experimental research of stress-strain properties of sandy soil when strengthened with polyurethane compounds //Mining Science and Technology (Russia). – 2025. – Т. 10. – №. 1. – С. 15-24.
15. ГОСТ 28622-90. МЕТОД ЛАБОРАТОРНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ СТЕПЕНИ ПУЧИНИСТОСТИ. – Москва: Издательство стандартов. 1990 – 8с.
16. ГОСТ 12248.3-2020. Грунты. Определение характеристик прочности и деформируемости методом трехосного сжатия. – Москва: Стандартинформ, 2020 – 28с.

© Т. В. Шилова, А. Н. Дробчик, 2026