

DOI: 10.15593/2224-9826/2022.4.08

УДК 624.131.433

МОДИФИКАЦИЯ ПЕСКА СУСПЕНЗИЕЙ САПОНИТОВОЙ ГЛИНЫ – ОДНИМ ИЗ ОТХОДОВ АЛМАЗОДОБЫВАЮЩЕЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

А.Л. Невзоров, Ю.В. Саенко, А.М. Ширанов

Северный (Арктический) федеральный университет
имени М.В. Ломоносова, Архангельск, Россия

О СТАТЬЕ

Получена: 20 сентября 2022

Одобрена: 09 ноября 2022

Принята к публикации:

15 ноября 2022

Ключевые слова:

песчано-бентонитовая смесь,
суспензия, сапонит, мел, доломит,
кольматация, водопроницаемость,
коэффициент фильтрации, камера
трехосного сжатия.

АННОТАЦИЯ

Представлены результаты лабораторных исследований водопроницаемости песка, модифицированного высокодисперсной фракцией сапонитовой глины, содержащейся в отходах алмазодобывающей промышленности. Приведено обоснование способа внесения модифицирующей добавки в ложе накопителя отходов путем фильтрации суспензии.

Экспериментальная установка включала камеры трехосного сжатия и полуавтоматические устройства для подачи воды и суспензии. Камеры исключали пристенную фильтрацию в образцах и обеспечивали требуемые значения вертикальных и горизонтальных напряжений при измерении водопроницаемости. Исследовались образцы аллювиального мелкого песка и песка с добавками мела и доломита в количестве 3 и 5 %. После насыщения образцов измерялась скорость потока дистиллированной воды при четырех значениях градиента напора. Затем через образцы пропускали суспензию с концентрацией глинистых частиц 0,58...0,63 %. После промывки перфорированного вкладыша при циркуляции воды над верхним торцом образца через образцы снова определяли коэффициент фильтрации воды при четырех градиентах напора.

По результатам экспериментов установлено, что модификация исследуемого песка путем кольматации пор при фильтрации суспензии возможна при условии предварительного внесения в него добавок, вызывающих агрегацию глинистых частиц. В образцах с добавкой мела в количестве 3 % кольматация привела к снижению коэффициента фильтрации в 15...31 раз, а с добавкой 5 % – в 15...39 раз. Добавка доломита оказалась не столь эффективной – коэффициент фильтрации снизился максимум в 14,3 раза. Для достижения максимальной глубины кольматации рекомендовано пропускать суспензию через рыхлый песок с градиентом напора, обеспечивающим скорость потока выше 3,5 м/сут, после чего проводить уплотнение слоя.

© ПНИПУ

© **Невзоров Александр Леонидович** – доктор технических наук, профессор, e-mail: a.l.nevzorov@yandex.ru, ORCID: 0000-0002-6547-2741

Саенко Юрий Викторович – кандидат технических наук, доцент, e-mail: yuri_saenko@mail.ru.

Ширанов Алексей Михайлович – ассистент, e-mail: alexeyshiranov@gmail.com

Alexander L. Nevzorov – Doctor of Technical Sciences, Professor, e-mail: a.l.nevzorov@yandex.ru, ORCID: 0000-0002-6547-2741

Yuri V. Saenko – Ph. D. in Technical Sciences, Associate Professor, e-mail: yuri_saenko@mail.ru

Alexey M. Shiranov – Assistant, e-mail: alexeyshiranov@gmail.com

SAND MODIFICATION WITH A SAPONITE CLAY SUSPENSION AS A WASTE OF THE DIAMOND MINING INDUSTRY

A.L. Nevezorov, Yu.V. Saenko, A.M. Shiranov

Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Arkhangelsk, Russian Federation

ARTICLE INFO

Received: 20 September 2022
Approved: 09 November 2022
Accepted for publication:
15 November 2022

Keywords:

sand-bentonite mixture, suspension, saponite, chalk, dolomite, clogging, permeability, hydraulic conductivity, triaxial test chamber.

ABSTRACT

The results of the laboratory water permeability tests of a sand modified by a saponite clay fraction from the diamond mining industry waste are presented. The filtration of clay suspension through a landfill ground bed as a method of the additive enrichment is approved.

The experimental apparatus consisted of the triaxial test chambers and semi-automatic devices for water and suspension supplying. The chambers excluded a side-wall leakage in the samples and provided required values of the vertical and horizontal stresses when measuring permeability. The samples of an alluvial fine sand and a sand mixed with 3 and 5 % a chalk and a dolomite were investigated. After preliminary saturation the rate of distilled water flow through the samples were determined at four values of hydraulic gradient. Then the filtration of a suspension containing up to 0.58–0.63 % clay particles was conducted. After that, the pore disks at the top of samples were washed by circulating water flow. At the last step of experiments the velocity of water flow was measured again at four values of hydraulic gradient.

The experiments indicated that the modification of the sand by clogging the pores by the saponite clay fraction from a suspension flow is possible if a sand comprises the additives causing the aggregation of clay particles. The hydraulic conductivity of a sand with 3 % chalk decreased by 15–31 times, with 5 % – by 15–39 times at different values of relative compaction. The effect of a dolomite addition was not significant, the hydraulic conductivity decreased by a maximum of 14.3 times. To achieve the maximum depth of clogging, it is recommended to filtrate the suspension through a loose sand at a hydraulic gradient that provides a flow rate more than 3.5 m/day, after that, the sand layer should be compacted.

© PNRPU

Введение

В Архангельской области, отличающейся малой плотностью населения и неразвитой транспортной инфраструктурой, вывоз бытовых отходов на переработку или складирование на хорошо организованных полигонах представляет собой сложную, а иногда невыполнимую задачу. По этой причине в регионе эксплуатируются сотни мелких свалок. При их устройстве обычно ограничиваются созданием экранов из местных глинистых грунтов, которые не могут служить надежной защитой основания от проникновения фильтрата. Глинистым грунтам часто присуща неоднородность состава, например присутствие линз песка, они плохо уплотняются, а под действием промерзания / оттаивания и увлажнения / высушивания коэффициент фильтрации может увеличиться на два порядка [1, 2].

В 80-х гг. прошлого века для изоляции бытовых отходов стали применять песчано-бентонитовые смеси (ПБС) [1, 3]. Указанные смеси при правильно подобранном составе и тщательном перемешивании отличаются низкой водопроницаемостью, отсутствием морозного пучения и усадки [4, 5]. Считается, что для применения смеси на свалках минимальная добавка бентонита к песку составляет 1,5 %, а внесение 5–10 % обеспечивает коэффициент фильтрации смеси не более 10^{-4} м/сут [6–8]. Смеси отличает однородность состава и свойств, удобоукладываемость, а наличие каркаса из песчаных частиц обуславливает высокие деформационно-прочностные характеристики и отсутствие усадки [5, 9, 10]. В последние годы рассматриваемый способ изменения свойств грунта иногда называют модификацией с помощью наноматериалов или наноглин [11]. Позднее ПБС стали приме-

нять для изоляции хранилищ радиоактивных отходов, тем более что бентонит способен сорбировать ионы тяжелых металлов [11, 12]. Проводились исследования по применению на свалках смесей бентонита с каменноугольной золой [13]. Используют ПБС и для изоляции каналов с высоковольтными кабелями [14].

Эксперименты с ПБС выявили проблему, связанную с их подготовкой. В лабораторных условиях смеси преимущественно готовят из сухих ингредиентов, применяя длительное механическое перемешивание, например в миксере с числом 300 об/мин в течение 30 мин [11, 15]. Даже небольшой рост влажности увеличивает неоднородность получаемой смеси из-за того, что частицы бентонита начинают преждевременно набухать и образуют агрегаты и комки [11, 16, 17]. Например, в лабораторных экспериментах для обеспечения равномерного увлажнения сухую смесь перемешивали с ледяной пудрой, а не с водой или выдерживали над парами воды [18, 19]. Обычно для применения в экранов сухие смеси готовят в заводских условиях. Имеется также опыт их приготовления перемешиванием с раствором, а точнее с суспензией, содержащей 4–10 % бентонита [5, 20, 21].

Таким образом, ПБС активно изучаются и находят применение для изоляции отходов различной степени опасности. Но бентонит – это лишь одна из высокодисперсных глин. В частности, на одном из предприятий алмазодобывающей промышленности Архангельской области не находят применения отходы обогащения кимберлитовой руды, минералогический состав которой отличает высокое содержание сапонита (до 87 %) – минерала группы монтмориллонитов [22]. Удаление отходов ведется средствами гидротранспорта, поэтому в хвостохранилище фракция высокодисперсной глины находится в виде суспензии. Из-за крайне медленной седиментации частиц и высоких затрат энергии на удаление воды высушиванием проекты, предусматривающие использование обезвоженного осадка, например, при производстве кирпича, цемента, не реализуются [23].

Принимая во внимание чрезвычайно высокую удельную поверхность сапонита (400...600 м²/г), можно ожидать, что даже небольшая его добавка будет существенно снижать водопроницаемость и повышать сорбционную емкость грунтов по отношению к поллютантам, содержащимся в фильтрате с накопителем отходов. Исходя из этого, можно рассчитывать, что проблемы недостаточной изоляции многочисленных свалок твердых бытовых отходов (ТБО), с одной стороны, и утилизации хвостов алмазодобывающей промышленности, с другой стороны, могут быть частично решены за счет модификации местных грунтов сапонитсодержащими фракциями отходов.

Как отмечалось выше, перемешивание песка с суспензией возможно, но требует тщательного перемешивания, а значит, и больших затрат энергии. Наиболее эффективным способом осуществления модификации грунтов могла бы стать кольматация пор глинистыми частицами при фильтрации суспензии, причем возможно применение этого способа как при организации новых накопителей отходов, так и на действующих свалках. Так, авторами получен патент на изобретение, согласно которому производится изоляция накопителей путем подачи в их основание глинистой суспензии [24].

Кольматация песков при фильтрации суспензии бентонитовой глины для снижения потерь воды из каналов исследовалась начиная с 50-х гг. прошлого века [25]. Эксперименты показали, что способ требует тщательного подбора режима фильтрации, в противном случае может происходить накопление глинистых частиц на поверхности песка или, наоборот, их вынос потоком воды при эксплуатации сооружения [25, 26].

Целью настоящих исследований было изучение возможности модификации песков основания накопителей отходов с помощью высокодисперсных фракций отходов обогащения алмазоносной руды и обоснование метода внесения модифицирующей добавки путем фильтрации сапонитсодержащей суспензии.

Материалы и методы

Испытания по кольматации пор сапонитсодержащей суспензией проводились на аллювиальном мелком песке со следующим содержанием фракций: менее 0,1 мм – 4,4...6,7 %; от 0,1 до 0,25 мм – 56,4...62,1 %; крупнее 0,25 мм – 31,7...37,0 %. Плотность частиц составляла 2,64...2,66 г/см³. Испытания проводились при трех значениях коэффициента уплотнения 0,90...0,92; 0,93...0,96 и 0,96...1,00, характерных для оснований накопителей, защитных слоев и ограждающих дамб.

Концентрация отобранной из пруда – отстойника хвостохранилища сапонитсодержащей суспензии составляла 0,58...0,63 %. Твердая фаза представлена преимущественно частицами размером менее 0,001 мм – 91,5...94,2 %, содержание частиц от 0,001 до 0,002 мм составляло 0,5...2,5 %.

Экспериментальная установка состояла из трех камер трехосного сжатия компании Geosopr и полуавтоматических устройств для подачи суспензии и воды (рис. 1). Применение камер с боковым обжатием образцов позволило исключить пристенную фильтрацию и обеспечить близкое к природному напряженно-деформированное состояние образцов [27]. Схема установки приведена на рис. 2.

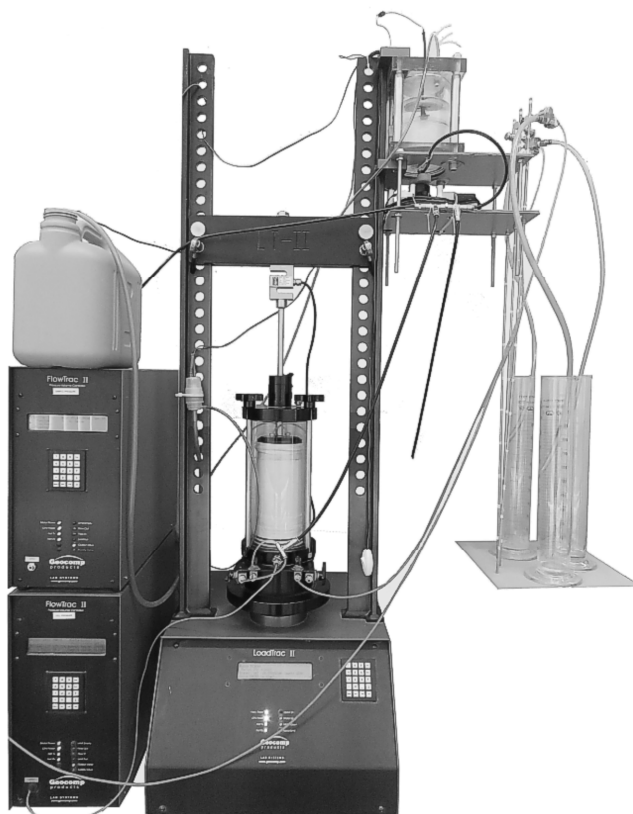


Рис. 1. Экспериментальная установка
Fig. 1. Experimental apparatus

Испытывались образцы диаметром 73 и высотой 145 мм. В камерах поддерживалось давление 100 кПа. Постоянный уровень жидкости в подающей емкости поддерживался в автоматическом режиме с помощью центробежного насоса, включение которого осуществлялось переключателем-герконом под воздействием магнитного поля от неодимового магнита, закрепленного на поплавке. Суспензию в ходе опыта постоянно перемаскивали магнитной мешалкой, размещенной под емкостью.

Первая серия экспериментов проводилась на образцах песка, вторая и третья серии – на образцах песка с добавками мела (CaCO_3) и доломита ($\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3$), вызывающими агрегацию глинистых частиц и способствующими их накоплению в слое песка [26]. Указанные добавки в количестве 3 и 5 % от массы сухого песка вносили в среднюю по высоте треть образцов. У мела и доломита предварительно отсеивали и удаляли частицы крупнее 0,1 мм.

В начале эксперимента образцы насыщали дистиллированной водой. Для этого воду при градиенте напора 0,25 пропускали через образцы снизу вверх в течение 12 ч. Далее при движении воды в том же направлении замеряли ее расход в течение 1 ч с двукратной повторностью при градиентах напора 0,25; 0,5; 0,75 и 1 (схема подключения на рис. 2, а). По результатам измерений определяли коэффициент фильтрации образцов при трех значениях коэффициента уплотнения. После насыщения приступали к фильтрации через образцы сапонитсодержащей суспензии. Она направлялась через образец сверху-вниз – как в основании накопителей отходов (схема подключения на рис. 2, б).

Известно, что при проведении опытов с ПБС проблему представляет накопление мелких частиц на пористых фильтрах, что может искажать получаемые значения коэффициента фильтрации исследуемого материала [7]. Опытным путем нами было установлено, что осаждение частиц сапонита на перфорированном вкладыше не происходит при скорости фильтрации суспензии через образец 3,5 м/сут и более. Из-за падения водопроницаемости песка по мере кольматации пор глинистыми частицами для поддержания указанной скорости требовалось постепенное повышение градиента напора. Фильтрацию начинали при градиенте напора «2», затем его повышали на один каждые 10 мин. При последнем значении градиента напора суспензию подавали в течение 60 мин для кольматации пор по всей высоте образцов. Подачу прекращали при градиенте напора «10» или при выходе частиц глины через нижний торец образца.

Следующий этап экспериментов заключался в очистке перфорированного вкладыша от осевших частиц сапонита путем циркуляции потока дистиллированной воды в надштамповом пространстве в течение 12 ч (схема подключения на рис. 2, в). Кроме того, опытным путем было установлено, что за указанное время происходила коагуляция глинистых частиц при взаимодействии мелом или доломитом.

В завершение каждого эксперимента определяли коэффициент фильтрации модифицированного образца при четырех постоянных градиентах напора – 0,25; 0,5; 0,75 и 1 – с пропуском дистиллированной воды снизу вверх (см. схему подключения на рис. 2, а). При каждом градиенте выполнялось не менее четырех замеров объема профильтровавшейся воды. Переход на следующую ступень напора осуществляли лишь при достижении равных значений коэффициента фильтрации в течение последних 12 ч (установившийся коэффициент фильтрации).

Каждая серия экспериментов повторялась два-три раза.

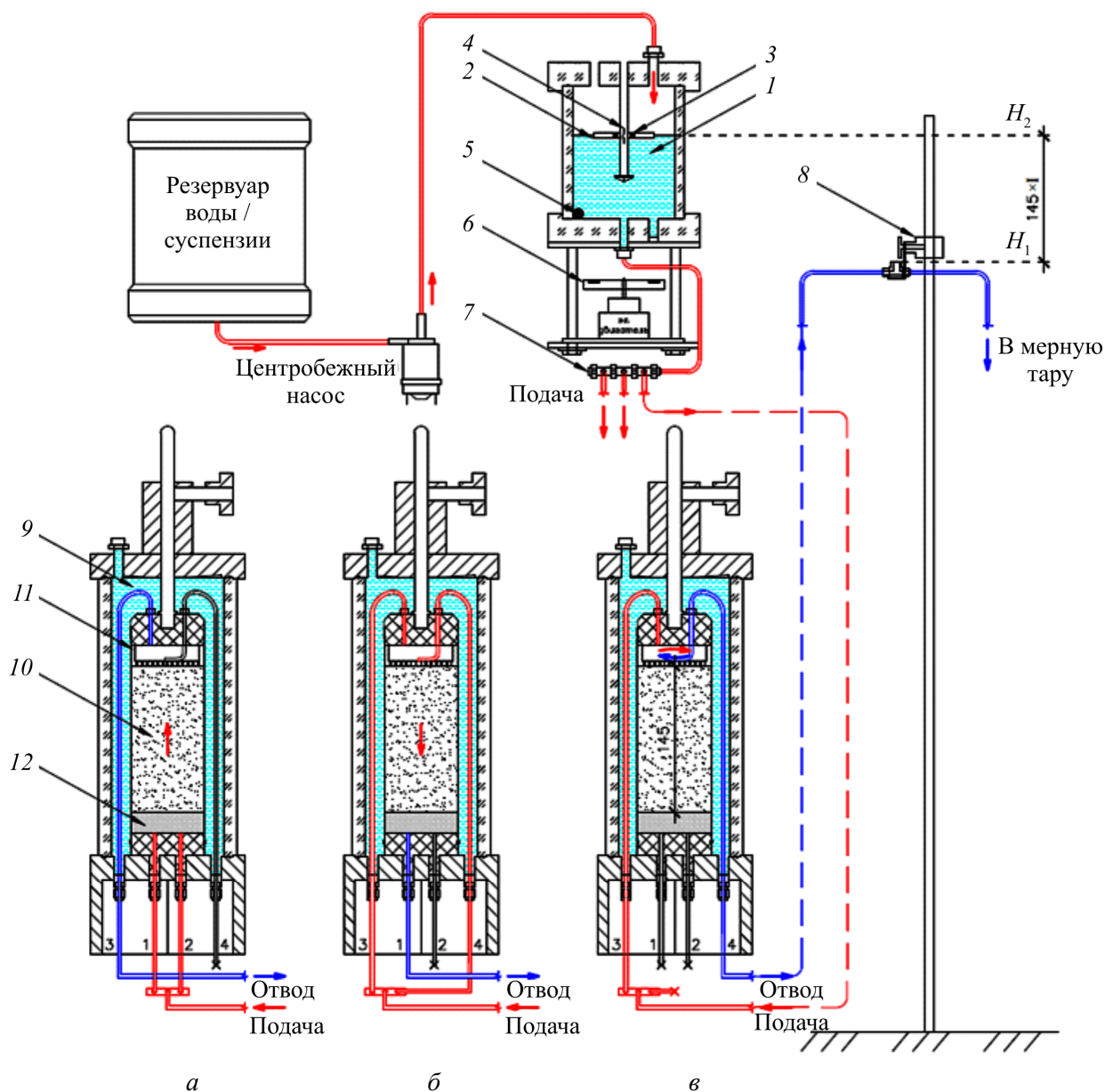


Рис. 2. Схема экспериментальной установки: *а* – схема подключения трубок при насыщении образца водой и определении исходного коэффициента фильтрации; *б* – при кольматации пор глинистыми частицами; *в* – при очистке перфорированного вкладыша от осевших частиц. 1 – вода/суспензия; 2 – поплавок; 3 – магнит; 4 – геркон; 5 – неодимовый шар для перемешивания суспензии; 6 – магнитная мешалка; 7 – коллектор для подачи воды/суспензии к трем камерам; 8 – регулятор положения сливного отверстия; 9 – рабочая жидкость для создания давления в камере; 10 – образец; 11 – верхний перфорированный вкладыш; 12 – гравийный фильтр (H_1, H_2 – уровни воды в установке)

Fig. 2. Experimental apparatus scheme: *a* – scheme of tubes connection during sample saturation and determination its initial water permeability; *b* – during the process of sample clogging by clay particles; *в* – during cleaning the perforated disk from sedimented particles. 1 – water/suspension; 2 – floating ring; 3 – magnet; 4 – reed switch; 5 – magnetic ball; 6 – magnetic mixer; 7 – connector for water/slurry supplying of the three chambers; 8 – drain hole positioner; 9 – operating fluid; 10 – sample; 11 – upper perforated disk; 12 – gravel filter (H_1, H_2 – уровни воды в установке)

Результаты

Зависимости скорости фильтрации воды через образцы песка от градиента напора $v = f(I)$ в первой серии экспериментов показаны на рис. 3, а. Средние значения исходного коэффициента фильтрации составили 2,0, 1,8 и 1,3 м/сут при коэффициенте уплотнения образцов песка 0,90...0,92; 0,93...0,96 и 0,96...1,00 соответственно.

При фильтрации сапонитсодержащей суспензии был зафиксирован вынос частиц глины через нижние торцы при градиенте напора «7» на образцах с коэффициентом уплотнения до 0,95 и при градиенте «10» – с коэффициентом уплотнения 0,98...0,99. Скорость потока суспензии при этом составляла 3,5–5,4 м/сут.

Зависимости $v = f(I)$ при повторном пропуске воды снизу вверх через модифицированные образцы, т.е. после пропуски через них суспензии, показаны на рис. 3, б. Оказалось, что средние значения коэффициента фильтрации изменялись в весьма узком интервале – 0,93...0,99 м/сут – вне зависимости от степени уплотнения образцов. Столь незначительное снижение водопроницаемости объясняется наблюдающимся уже при градиенте напора «0,25» выносом глинистых частиц потоком воды.

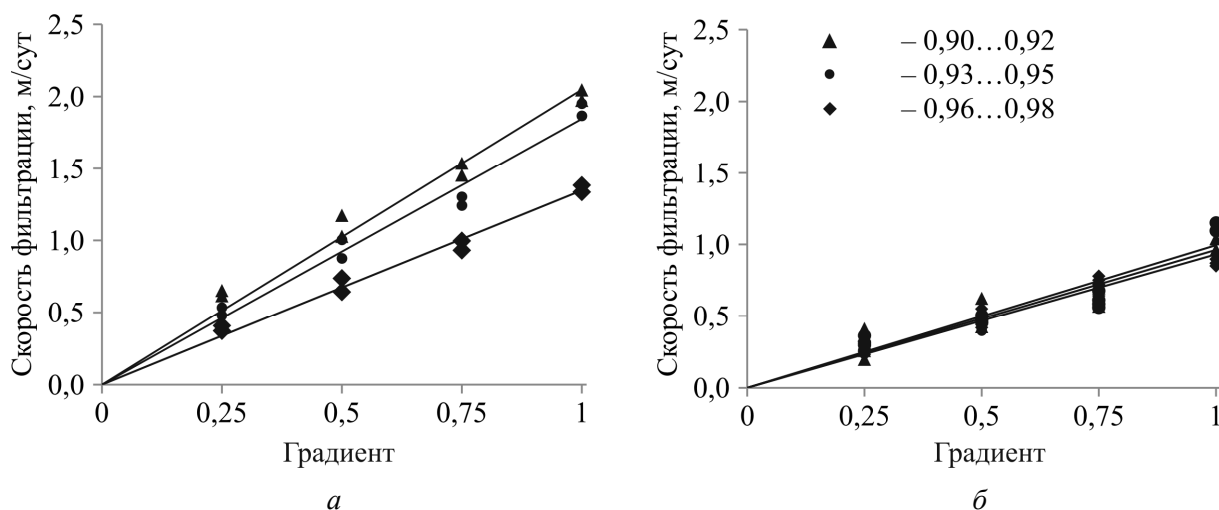


Рис. 3. Зависимости $v = f(I)$ для образцов песка: а – в исходном состоянии; б – после пропуски суспензии

Fig. 3. Relations $v = f(I)$ for sand samples: а – initial state; б – after clogging

При внесении мела в количестве 3 и 5 % от массы сухого песка в среднюю по высоте треть образцов исходный коэффициент фильтрации воды снизился по отношению к образцам песка без добавок в 1,29...1,42 и 1,85...3,20 раза, соответственно. Зависимости $v = f(I)$ показаны на рис. 4а и 5а. Следует отметить, что влияние добавки мела на начальный коэффициент фильтрации возрастало при снижении коэффициента пористости образцов.

При фильтрации сапонитсодержащей суспензии через образцы с мелом вынос глинистых частиц через их нижний торец не наблюдался. Подачу суспензии прекращали при градиенте напора «10», при этом скорость ее потока через образцы составляла 2,3...3,4 и 1,9...2,3 м/сут при содержании мела 3 и 5 % соответственно.

Зависимости $v = f(I)$ через модифицированные образцы показаны на рис. 4, б и 5, б соответственно. Средние значения коэффициента фильтрации при содержании мела 3 и 5 % составили 0,03...0,08 м/сут, т.е. коагуляция пор глинистыми частицами привела к снижению водопроницаемости образцов в 15...39 раз.

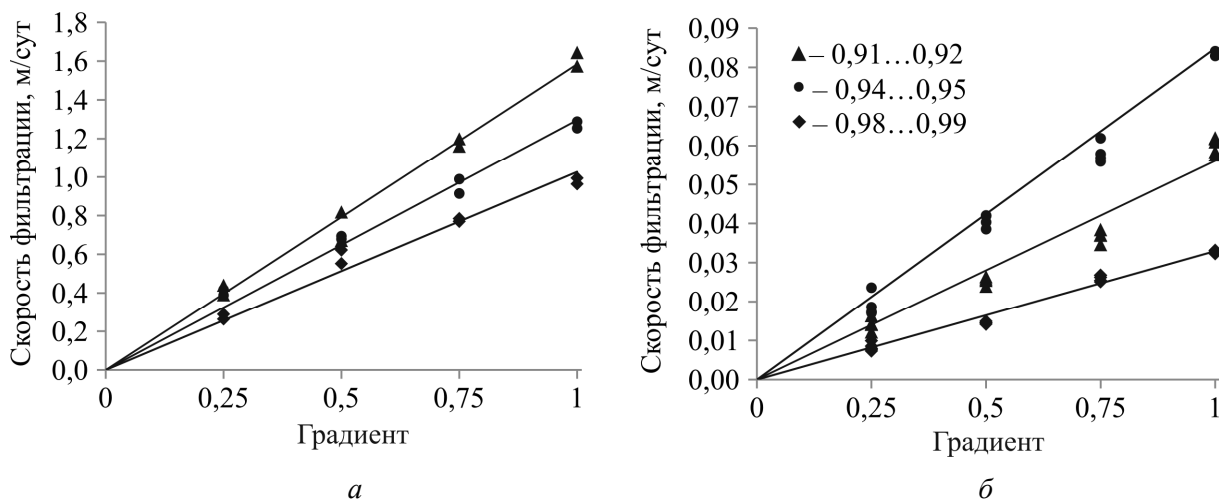


Рис. 4. Зависимости $v = f(I)$ для образцов песка с добавкой мела 3 %: *a* – в исходном состоянии; *б* – после пропуска суспензии

Fig. 4. Relations $v = f(I)$ for sand samples with addition of chalk 3 %: *a* – initial state; *б* – after clogging

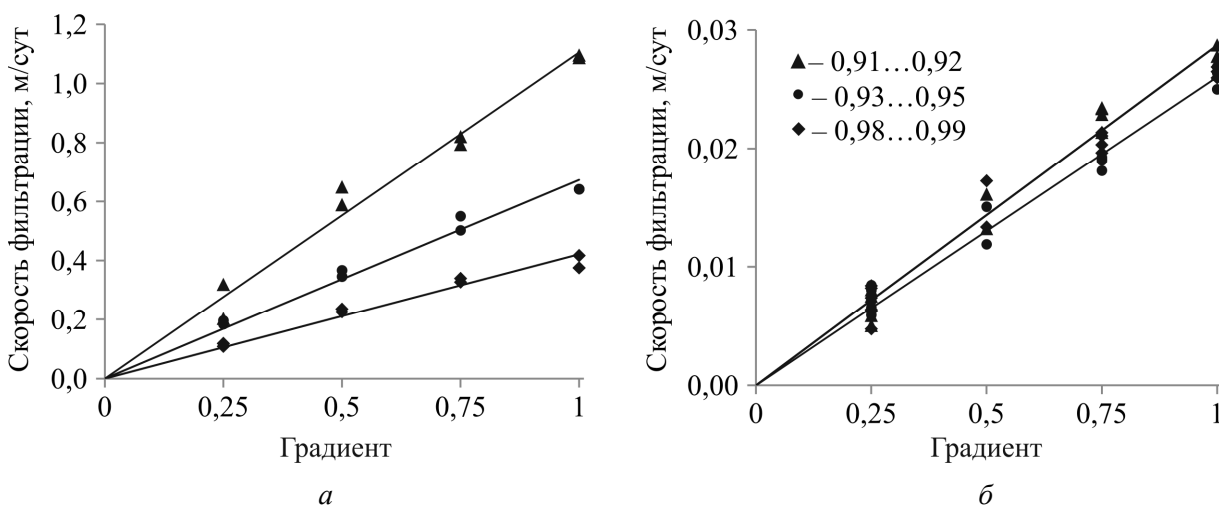


Рис. 5. Зависимости $v = f(I)$ для образцов песка с добавкой мела 5 %: *a* – в исходном состоянии; *б* – после пропуска суспензии

Fig. 5. Relations $v = f(I)$ for sand samples with addition of chalk 5 %: *a* – initial state; *б* – after clogging

При добавке 3 % доломита в среднюю треть образцов начальный коэффициент фильтрации по сравнению с образцами песка практически не изменился, а при 5 % уменьшился в 1,41–1,89 раза. Зависимости $v = f(I)$ показаны на рис. 6, *a* и 7, *a* соответственно.

При фильтрации суспензии через образцы с содержанием доломита 3 % был зафиксирован вынос частиц глины при градиенте напора «7», «9» и «10» для коэффициентов уплотнения 0,91...0,92; 0,94...0,95 и 0,98...0,99 соответственно, скорость потока суспензии при этом составляла 3,5...4,7 м/сут.

При фильтрации суспензии через образцы с добавкой 5 % доломита при градиенте напора «10» вне зависимости от плотности их сложения скорость потока составляла 3,3–4,2 м/сут.

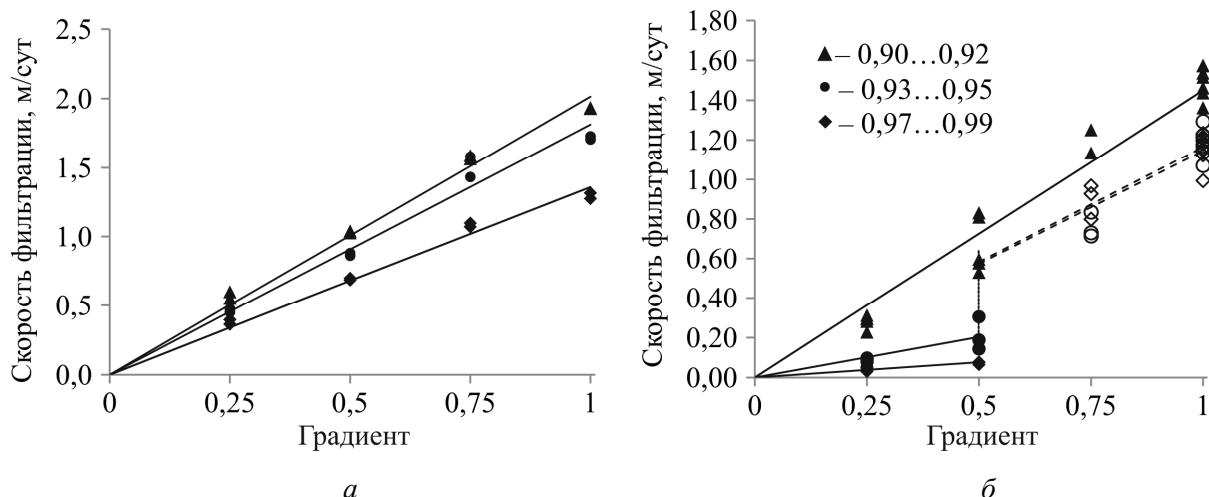


Рис. 6. Зависимости $v = f(I)$ для образцов песка с добавкой доломита 3 %: a – в исходном состоянии; \bar{b} – после пропуска суспензии

Fig. 6. Relations $v = f(I)$ for sand samples with addition of dolomite 3 %: a – initial state; \bar{b} – after clogging

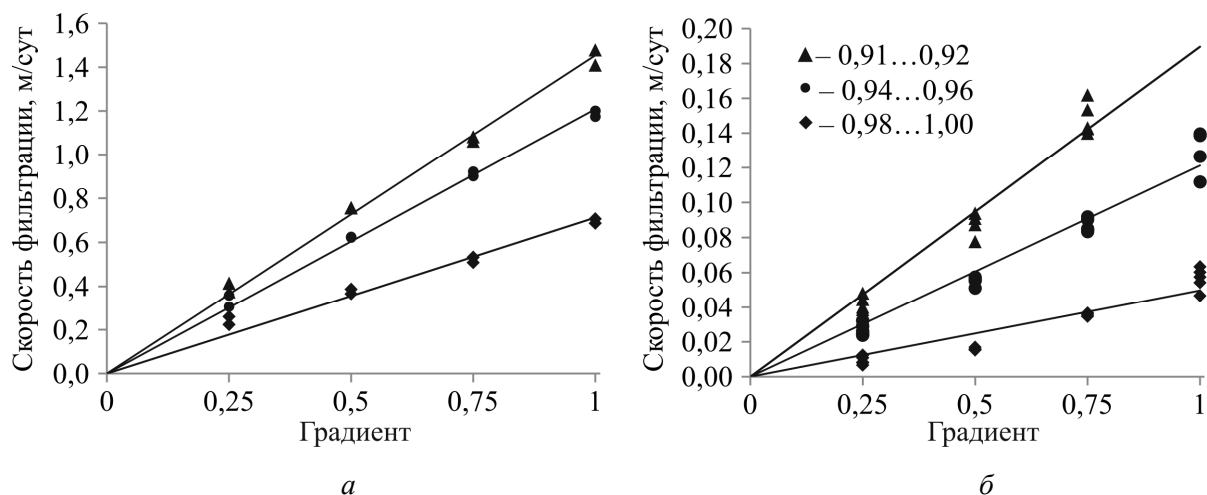


Рис. 7. Зависимости $v = f(I)$ для образцов песка с добавкой доломита 5 %:
 a – в исходном состоянии; \bar{b} – после пропуска суспензии

Fig. 7. Relations $v = f(I)$ for sand samples with addition of dolomite 5 %:
 a – initial state; \bar{b} – after clogging

Зависимости $v = f(I)$ при фильтрации воды через модифицированные образцы песка с добавкой доломита показаны на рис. 6, \bar{b} и 7, \bar{b} соответственно. Заметим, что при повторном пропуске воды через образцы с добавкой 3 % доломита происходил активный вынос глинистых частиц при градиенте напора 0,25 и 0,5 при коэффициенте уплотнения грунта 0,91...0,92 и 0,94...0,99 соответственно. После выноса глины коэффициент фильтрации образцов вернулся к исходному значению, а на графиках появился скачок (см. рис. 6, \bar{b}).

Средние значения коэффициента фильтрации модифицированного песка с содержанием доломита 5 % вне зависимости от плотности его сложения изменяются незначительно и составляют 0,05–0,19 м/сут, т.е. за счет кольтматации пор водопроницаемость образцов уменьшилась в 8...14 раз.

Результаты экспериментов приведены в сводной таблице, где обозначено: K_{com} – коэффициент уплотнения образцов, k_0 – исходный коэффициент фильтрации, k_m – коэффици-

ент фильтрации модифицированных образцов (после пропуска суспензии), n – отношение k_0 / k_m , I_0 – градиент напора суспензии при котором наблюдается выход частиц глины через нижний торец образца, v_c – скорость потока суспензии при последнем значении градиента напора, i – критический градиент напора воды, при котором происходит вынос глинистых частиц из модифицированных образцов.

Результаты экспериментов

Experimental results

Серия опытов	Описание образцов	K_{com}	k_0 , м/сут	k_m , м/сут	n	I_0	v_c	i
1	Песок	0,90...0,92	2,05	0,99	2,1	7	3,5–5,4	0,25
		0,93...0,95	1,85	0,96	1,9	7		0,25
		0,96...0,98	1,35	0,93	1,4	10		0,25
2	Песок, 3 % CaCO ₃	0,91...0,92	1,58	0,05	29,9	> 10	2,3–3,4	–
		0,94...0,95	1,30	0,08	15,3	> 10		–
		0,98...0,99	1,03	0,03	31,1	> 10		–
	Песок, 5 % CaCO ₃	0,91...0,92	1,11	0,03	38,5	> 10	1,9–2,3	–
		0,93...0,95	0,67	0,03	25,9	> 10		–
		0,98...0,99	0,42	0,03	14,7	> 10		–
3	Песок, 3 % CaCO ₃ ·MgCO ₃	0,90...0,92	2,01	1,45	1,4	7	3,5–4,7	0,25
		0,93...0,95	1,81	0,41*	4,5	9		0,5
		0,97...0,99	1,36	0,15*	8,9	10		0,5
	Песок, 5 % CaCO ₃ ·MgCO ₃	0,91...0,92	1,45	0,19	7,7	10	3,3–4,2	–
		0,94...0,96	1,21	0,12	10,0	10		–
		0,98...1,00	0,71	0,05	14,3	10		–

Примечание: * – значения коэффициента фильтрации при градиенте напора до 0,5.

Выводы

1. Модификация исследуемого песка путем кольматации пор при фильтрации сапонитсодержащей суспензии для использования в накопителях отходов возможна при условии предварительного внесения в него добавок, вызывающих агрегацию глинистых частиц и способствующих их накоплению в порах, например, мела или доломита.

2. Кольматация пор глинистыми частицами в образцах с добавкой мела в количестве 3 % от массы сухого песка привела к снижению коэффициента фильтрации в 15...31 раз, с добавкой 5 % – в 15...39 раз.

3. Внесение доломита в песок оказалось не столь эффективным по сравнению с мелом, что объясняется более крупными размерами частиц и меньшей активностью.

4. Для достижения максимальной глубины кольматации пор в песке рекомендуется подавать сапонитсодержащую суспензию до его уплотнения и с градиентом напора, обеспечивающим скорость потока выше 3,5 м/сут, после чего проводить уплотнения слоя.

Финансирование. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 22-27-20013).

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Вклад авторов. Все авторы сделали равный вклад в подготовку публикации.

Библиографический список

1. Chapuis R.P. Sand-bentonite liners: predicting permeability from laboratory tests // *Can. Geotech. J.* – 1990. – Vol. 27. – P. 47–57.
2. Vadlamudi S. Engineering behavior of sand-bentonite mixtures and the influence of particle size of sand: PhD thesis, 2017. – 208 p.
3. Permeability and durability testing of soil/bentonite backfill Mix. – St. Louis, Michigan: Conestoga-Rovers & Associates Limited, 1983. – 52 p.
4. Carey N.J. An evaluation of the effectiveness of bentonite as a soil additive for the cover material on the KL avenue sanitary landfill: Master's Theses Kalamazoo, Michigan, 1986. – 123 p.
5. Ghazi A.F. Engineering characteristics of compacted sand-bentonite mixtures: Master's Theses. – 2015. – 84 p.
6. LFE10 – Using bentonite enriched soils in landfill engineering // Environment Agency. – 2014. – 51 p.
7. Chapuis R.P. The 2000 R.M. Hardy Lecture: Full-scale hydraulic performance of soil-bentonite and compacted clay liners // *Can. Geotech. J.* – 2002. – Vol. 39. – P. 417–439. DOI: 10.1139/T01-092
8. Chalermyanont T., Arrykul S. Compacted sand-bentonite mixtures for hydraulic containment liners // *Songklanakarin J. Sci. Technol.* – 2005. – Vol. 27, № 2. – P. 313–323.
9. Otoko G.R., Otoko G.U. Permeability of ocean sand with bentonite // *Int. J. of Eng. and Tech. Res.* – 2014. – Vol. 2, № 1. – P. 1–6.
10. Proia R., Croce P., Modoni G. Experimental investigation of compacted sand-bentonite mixtures // *J. Procedia Engineering.* – 2016. – Vol. 158. – P. 51–56. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.08.404
11. Influence of bentonite type and producing method on hydraulic conductivity of sand-bentonite mixture / T. Sakita [et al.] // *E3S Web Conf.* – 2020. – № 205. DOI: 10.1051/e3sconf/202020510005
12. Clay soil modification techniques for the adsorption of heavy metals in Aqueous Medium: A Review / A. Kayode [et al.] // *J. Int. Adv. Res. Chem. Sci.* – 2019. – № 6. – P. 14–31. DOI: <https://doi.org/10.20431/2349-0403.0606003>
13. Wasil M. Effect of bentonite addition on the properties of fly ash as a material for landfill sealing layers // *J. Appl. Sci.* – 2020. – Vol. 10, № 1488. DOI: 10.3390/app10041488
14. Compressive strength and thermal properties of sand-bentonite mixture / M. Zakarka [et al.] // *J. Open Geosciences.* – 2021. – Vol. 13. – P. 988–998. DOI: <https://doi.org/10.1515/geo-2020-0289>
15. Al-Moadhen M., Clarke B., Chen X. Hydraulic conductivity of composite soils // *Proceedings of the 2nd Symposium on Coupled Phenomena in Environmental Geotechnics.* – Leeds, UK. – 2017.
16. Czaban J., Siebielec G. Effects of bentonite on sandy soil chemistry in a long-term plot experiment (II); effect on pH, CEC, and macro- and micronutrients // *Pol. J. Environ. Stud.* – 2013. – Vol. 22. – P. 1669–1676.
17. Srikanth V., Mishra A.K. A laboratory study on the geotechnical characteristics of sand-bentonite mixtures and the role of particle size of sand // *Int. J. of Geosynth. and Ground Eng.* – 2016. – Vol. 2, № 3. DOI: 10/1007/s40891-015-0043-1
18. Swelling Properties and Permeability of GMZ Bentonite-Sand Mixtures during Different Solutions Infiltration / Y.-P. Wang [et al.] // *Sustainability.* – 2021. – Vol. 13. DOI: 10.3390/su13041622
19. Hydraulic conductivity and microstructure changes of compacted bentonite/sand mixture during hydration / Q. Wang [et al.] // *J. Eng. Geol.* – 2013. – Vol. 164. – P. 67–76. DOI: 10/1016/j.enggeo.20113.06.013

20. Shen S.-Q., Wei M.-L. Hydraulic conductivity of polymer-amended sand-bentonite backfills permeated with lead nitrate solutions // *J. Adv. In Civ. Eng.* – 2018. – Vol. 2018. DOI: <https://doi.org/10.1155/2018/9435194>

21. Yeo S.-S., Shackelford C., Evans J. Consolidation and hydraulic conductivity of nine model soil-bentonite backfills // *J. of Geotech. And Geoenviron. Eng.* – 2005. – Vol. 10. – P. 1189–1198. DOI: 10.1061/(ASCE)1090-0241(2005)131:10(1189)

22. Карпенко Ф.С. Условия накопления сапонитсодержащих осадков и технология их сгущения в хвостохранилище месторождения алмазов им. М.В. Ломоносова: автореф. дис. ... канд. геол.-минералог. наук. – М., 2019. – 39 с.

23. Зубкова О.С. Комплексная переработка сапонитовых руд с добавкой щелочного алюмосиликатного сырья: дис. ... канд. техн. наук. – СПб., 2020. – 131 с.

24. Способ рекультивации участков хранения твердых бытовых отходов: пат. 2771018 С1 Рос. Федерация / Невзоров А.Л. [и др.]. – 25.04.2022.

25. Орнатский Н.В., Сергеев Е.М., Шехтман Ю.М. Исследование процесса кольматации песков. – М.: Изд-во Моск. ун-та, 1955. – 185 с.

26. Грунтоведение / Е.М. Сергеев [и др.]; под ред. Е.М. Сергеева – М.: Изд-во Моск. ун-та, 1983. – 392 с.

27. Wu Y.-H. Permeability and volume change characteristics of bentonite-sand mixes in a contaminant environment: Doctor Eng. Thesis, 1989. – 242 p.

28. Experimental investigation of consolidation properties of nano-bentonite mixed clayey soil / Cheng G. [et al.] // *Sustainability*. – 2020. – Vol. 12. DOI: 10.3390/su12020459

References

1. Chapuis R.P. Sand-bentonite liners: predicting permeability from laboratory tests. *Can. Geotech. J.*, 1990, vol. 27, pp. 47–57.

2. Vadlamudi S. Engineering behavior of sand-bentonite mixtures and the influence of particle size of sand. Ph. D. thesis, 2017, 208 p.

3. Permeability and durability testing of soil/bentonite backfill Mix. St. Louis, Michigan, Conestoga-Rovers & Associates Limited, 1983, 52 p.

4. Carey N.J. An evaluation of the effectiveness of bentonite as a soil additive for the cover material on the KL avenue sanitary landfill, Kalamazoo, Michigan. Master's Thesis, 1986, 123 p.

5. Ghazi A.F. Engineering characteristics of compacted sand-bentonite mixtures. Master's Thesis, 2015, 84 p.

6. LFE10 – Using bentonite enriched soils in landfill engineering. *Environment Agency*, 2014, 51 p.

7. Chapuis R.P. The 2000 R.M. Hardy Lecture: Full-scale hydraulic performance of soil-bentonite and compacted clay liners. *Can. Geotech. J.*, 2002, vol. 39, pp. 417–439. doi: 10.1139/T01-092.

8. Chalermyanont T., Arrykul S. Compacted sand-bentonite mixtures for hydraulic containment liners. *Songklanakarinn J. Sci. Technol.*, 2005, vol. 27, no. 2, pp. 313–323.

9. Otoko G.R., Otoko G.U. Permeability of ocean sand with bentonite. *Int. J. of Eng. and Tech. Res.*, 2014, vol. 2, no. 1, pp. 1–6.

10. Proia R., Croce P., Modoni G. Experimental investigation of compacted sand-bentonite mixtures. *J. Procedia Engineering*, 2016, vol. 158, pp. 51–56. doi: 10.1016/j.proeng.2016.08.404.

11. Cheng G. [et al.]. Experimental investigation of consolidation properties of nano-bentonite mixed clayey soil. *Sustainability*, 2020, vol. 12. doi: 10.3390/su12020459.
12. Kayode A. [et al.]. Clay soil modification techniques for the adsorption of heavy metals in Aqueous Medium: A Review. *J. Int. Adv. Res. Chem. Sci.*, 2019, no. 6, pp. 14–31. doi: <https://doi.org/10.20431/2349-0403.0606003>.
13. Wasil M. Effect of bentonite addition on the properties of fly ash as a material for land-fill sealing layers. *J. Appl. Sci.*, 2020, vol. 10, no. 1488. doi: 10.3390/app10041488.
14. Zakarka M. [et al.]. Compressive strength and thermal properties of sand-bentonite mixture. *J. Open Geosciences*, 2021, vol. 13, pp. 988–998. doi: <https://doi.org/10.1515/geo-2020-0289>.
15. Al-Moadhen M., Clarke B., Chen X. Hydraulic conductivity of composite soils. *Proceedings of the 2nd Symposium on Coupled Phenomena in Environmental Geotechnics*. Leeds, UK, 2017.
16. Czaban J., Siebielec G. Effects of bentonite on sandy soil chemistry in a long-term plot experiment (II); effect on pH, CEC, and macro- and micronutrients. *Pol. J. Environ. Stud.*, 2013, vol. 22, pp. 1669–1676.
17. Srikanth V., Mishra A.K. A laboratory study on the geotechnical characteristics of sand-bentonite mixtures and the role of particle size of sand. *Int. J. of Geosynth. and Ground Eng.*, 2016, vol. 2, no. 3. doi: 10/1007/s40891-015-0043-1.
18. Wang Y.-P. [et al.]. Swelling properties and permeability of gmz bentonite-sand mixtures during different solutions infiltration. *Sustainability*, 2021, vol. 13. doi: 10.3390/su13041622.
19. Wang Q. [et al.]. Hydraulic conductivity and microstructure changes of compacted bentonite/sand mixture during hydration. *J. Eng. Geol.*, 2013, vol. 164, pp. 67–76. doi: 10/1016/j.enggeo.20113.06.013.
20. Shen S.-Q., Wei M.-L. Hydraulic conductivity of polymer-amended sand-bentonite backfills permeated with lead nitrate solutions. *J. Adv. In Civ. Eng.*, 2018, vol. 2018. doi: <https://doi.org/10.1155/2018/9435194>.
21. Yeo S.-S., Shackelford C., Evans J. Consolidation and hydraulic conductivity of nine model soil-bentonite backfills. *J. of Geotech. And Geoenviron. Eng.*, 2005, vol. 10, pp. 1189–1198. doi: 10.1061/(ASCE)1090-0241(2005)131:10(1189).
22. Karpenko F.S. Usloviya nakoplenija saponitsoderzhashhih osadkov i tehnologija ih sgushhenija v hvostohranilishhe mestorozhdenija almazov im. M.V. Lomonosova [Conditions for the accumulation of saponite-containing sediments and the technology of their thickening in the tailings of the diamond deposit named after M.V. Lomonosov]. Abstract of Ph. D. thesis. Moscow, 2019, 39 p.
23. Zubkova O.S. Kompleksnaja pererabotka saponitovyh rud s dobavkoj shhelochnogo aljunosilikatnogo syr'ja [Complex processing of saponite ores with the addition of alkaline aluminosilicate raw materials]. Ph. D. thesis. Saint-Petersburg, 2020, 131 p.
24. Nevzorov A.L. [et al.]. Sposob rekul'tivacii uchastkov hranenija tverdyh bytovyh otvodov [Method for recultivation of solid domestic waste storage areas]. Patent Rossiiskaia Federatsiia no. 2771018 C1 (2022).
25. Ornatkij N.V., Sergeev E.M., Shehtman Ju.M. Issledovanie processa kol'matacii peskov [Investigation of the sand clogging process]. Moscow, Moscow University press, 1955, 185 p.
26. Sergeev E.M. [et al.]. Gruntovedenie [Soil Science]. Moscow, Moscow University press, 1983, 392 p.
27. Wu Y.-H. Permeability and volume change characteristics of bentonite-sand mixes in a contaminant environment. Doctor's degree dissertation, 1989, 242 p.
28. Cheng G. [et al.]. Experimental investigation of consolidation properties of nano-bentonite mixed clayey soil. *Sustainability*, 2020, vol. 12. doi: 10.3390/su12020459.