

УДК 539.3

**ХАРАКТЕР УВЕЛИЧЕНИЯ ОБЪЕМА
ПЕСЧАНО-БЕНТОНИТОВЫХ СМЕСЕЙ ПРИ НАБУХАНИИ**

М. Куруоглу, Г. Боран, О. Элмас

*Университет девятого сентября,
E-mail: mehmet.kuruoglu@deu.edu.tr, 35390, г. Измир, Турция*

Рассмотрен характер набухания песчано-бентонитовых смесей и чистого бентонита с учетом таких факторов, как процентное содержание бентонита в смеси, плотность смеси, уровень эффективного напряжения. Выполнены испытания на сжатие образцов песчано-бентонитовых смесей с содержанием бентонита 10 и 20 %, а также образцов чистого бентонита. Максимальный объемный вес в сухом состоянии и оптимальная влажность образцов с содержанием бентонита 20 % оказались выше, чем у образцов с содержанием бентонита 10 %. Чистый бентонит показал наименьший максимальный объемный вес в сухом состоянии и наибольшую влажность по сравнению с песчано-бентонитовыми смесями. При значениях вертикального эффективного напряжения до 25 кПа наблюдался процесс набухания смесей, при значениях 50 и 100 кПа — сжатие образцов. Отмечено, что нанесение уплотнительных ударов по образцам чистого бентонита не оказало существенного влияния на процесс набухания.

Песок, бентонит, набухание, коэффициент пористости, уровень уплотнения

DOI: 10.15372/FTPRPI20230104

Низкая проницаемость и набухание уплотненного бентонита и песчано-бентонитовых смесей (ПБС) позволяют эффективно использовать их в качестве буферных и закладочных материалов при возведении полигонов захоронения твердых бытовых отходов (ТБО) [1]. Песчаная составляющая ПБС снижает усадку в процессе высыхания, формируя механическую устойчивость смеси [2]. Бентонит относится к группе смектитов, являясь высокоактивным минералом, обладает высокой набухающей способностью, а также низкой проницаемостью. В большинстве инженерных областей он используется в измельченном виде [3].

Испытания набухающих грунтов в общем виде можно разделить на три типа: свободное набухание, набухание под нагрузкой и набухание при сохранении постоянного объема. Экспериментальное определение значений давления набухания посредством лабораторных испытаний требует значительных временных затрат [4].

В настоящей работе выполнены испытания набухания образцов песчано-бентонитовых смесей под нагрузкой с помощью обычного одометра, который используется при решении многих базовых задач в области механики грунтов. В зависимости от типа обменного катиона (Na^+ или Ca^{2+}) свободное набухание может составлять от 200 до 1200 % [5, 6]. Добавление песка в различных пропорциях позволяет снизить значения свободного набухания и давления гли-

нистых грунтов [7]. Для соответствия гидравлическим требованиям, минимизации расширения и предотвращения усадочного трещинообразования необходимо поддерживать содержание бентонита в смеси на максимально возможном низком уровне [8]. Наибольшее набухание требуется при использовании изоляционных ковров на полигонах захоронения ТБО и ядерных отходов, а также при закладке отсечных стен [9–12]. В области горного дела непроницаемый слой смеси предотвращает разрыхление геоматериалов, что повышает эффективность эксплуатации карьеров и шахт [13, 14].

Применение песчано-бentonитовых смесей — экономически целесообразное решение по предотвращению разрыхления геоматериалов на открытых горных выработках. Предпочтение отдается натриевому бентониту из-за большей способности к набуханию и крайне низкой гидропроводности [15]. После насыщения ПБС водой начинается процесс набухания. Полости, которые присутствовали в песчаной среде в сухом состоянии, заполняются набухающими частицами бентонита, что приводит к снижению гидропроводности смеси [16].

В научной литературе предлагаемое количество бентонита к добавлению в ПБС отличается в зависимости от области применения. В [17] рекомендуется содержание бентонита 5–15 %, для достижения требуемого уровня гидроизоляции ковров полигонов захоронения ТБО достаточно 12 % бентонита [18]. При сравнении цеолитово-бentonитовых смесей (ЦБС) и ПБС с одинаковым содержанием бентонита доказано, что ЦБС имеют большую гидропроводность [19]. В ПБС она не зависит от степени уплотнения, содержания воды и содержания бентонита, в отличие от ЦБС. Однако разница между гидропроводностью ЦБС и ПБС составляет один порядок [20]. При использовании бентонита для снижения утечек загрязнителей из полигонов захоронения ТБО предложена нижняя граница содержания бентонита — 15 % [21].

Свойства смесей грунта (индексные, гидромеханические и т. д.) изменяются в зависимости от свойств материалов, входящих в состав смеси. Использование различных соотношений бентонита к песку дает возможность использовать преимущества обоих материалов. Например, гидроизоляционная способность бентонита может сочетаться с высокой прочностью песка на сдвиг [22]. Если набухание бентонита превышает объем полостей в песчаной среде, то бентонит обволакивает частицы песка и полностью заполняет поры. Такие структурные изменения приводят к крайне низкой проницаемости смеси, близкой к значениям чистого бентонита [10, 23]. При малом содержании бентонита поры между частицами песка остаются незаполненными и вода легко попадает в них. Большое содержание бентонита способно снизить прочность смеси. Более того, при чрезмерном содержании бентонита невозможно достигнуть эффективного уплотнения смеси [22]. Следовательно, необходимо определить оптимальное соотношение между песком и бентонитом в ПБС для соответствия техническим требованиям проектирования гидроизоляционных ограждений.

Характеристики проницаемости ПБС могут быть улучшены с помощью добавок. Результаты испытаний показали, что введение биополимеров приводит к агрегации частиц бентонита [24]. Изучены прочностные и гидравлические характеристики ПБС при добавлении волокон корда [25]. Рассмотрено влияние размера частиц песка на характер консолидации ПБС [26]. Проанализирован механизм деформации ПБС и построена модель прогнозирования набухания при полном намокании для широкого диапазона содержания песка [27]. Исследовано гидромеханическое поведение (усадка, развитие трещин, давление набухания в анизотропных условиях) полномасштабных уплотненных песчано-бentonитовых блоков [28].

Цель настоящей работы — определение механизма, влияющего на характер набухания песчано-бentonитовых смесей (ПБС). Рассмотрены значения содержания бентонита 10 и 20 % как показательные для получения вероятных различий. По результатам испытаний построены соответствующие кривые и выполнено сравнение полученных данных с результатами других работ, описанных в научной литературе. Наряду с этим исследовался характер набухания чистого бентонита, а также изучено влияние уплотнения на характер набухания.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Образцы песка и бентонита получены от поставщиков Турции. Используемый бентонит состоит из Na-сметита (77 %), небольшого количества кристобалита (10 %), плагиоклаза (6 %), кварца (4.5 %) и иллита (2.5 %). Химический состав бентонита, определенный методом рентгеновской дифракции, приведен ниже:

Вещество	Массовая доля, %	Вещество	Массовая доля, %
SiO ₂	61.28	Na ₂ O	2.70
Al ₂ O ₃	17.79	MgO	2.10
CaO	4.54	K ₂ O	1.24
Fe ₂ O ₃	3.01	Другие вещества	7.34

Песок в основном состоит из SiO₂. Результаты испытания падающим конусом [31] показали, что бентонит является высокопластичным материалом. Согласно Единой системе классификации грунтов (USCS), образец песка относится к плохим пескам по гранулометрическому составу (SP), а бентонит соответствует глине высокой пластичности (CH). Ниже представлены геотехнические свойства песка и бентонита: удельный вес [29], оценка консистенции (предел текучести, предел пластичности и индекс пластичности) [30].

Свойство	Песок	Бентонит
Удельный вес [29]	2.65	2.71
Пределы Аттерберга:		
предел текучести [31]	Непластичен	405 %
предел пластичности [30]	—	57 %
индекс пластичности [30]	—	348 %
обозначение группы в USCS	SP	CH

Распределение частиц песка и бентонита в ПБС 10 и 20 % по размеру получено согласно [32]. Кривые распределения частиц по размеру показаны на рис. 1. Коэффициент неоднородности песка C_u составил 1.2; коэффициент кривизны графика гранулометрического состава C_c — 0.95; тогда как размеры частиц — $D_{60} = 0.72$ мм, $D_{30} = 0.64$ мм и $D_{10} = 0.6$ мм.

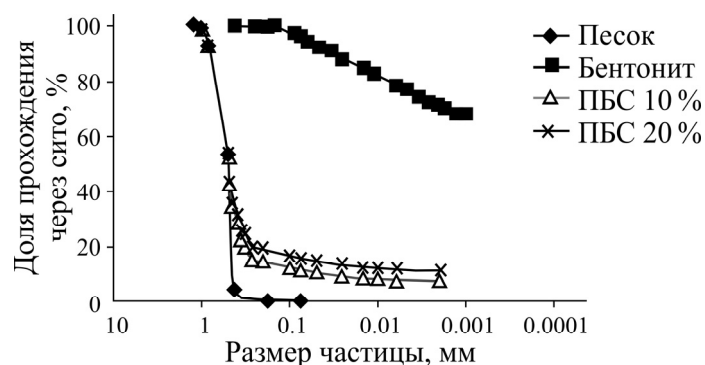


Рис. 1. Распределение частиц песка и бентонита по размеру

Выполнено испытание уплотнения ПБС в соответствии с [33]. В песок добавлено 20 % бентонита. Сухая смесь перемешивалась, после чего распылением добавлялась вода. Сначала готовились образцы с большей влажностью, которые помещались в полиэтиленовые мешки на 24 ч. Затем они уплотнялись с энергией 593 кДж по методу Проктора. Кривые уплотнения образцов песка, бентонита, ПБС 10 и 20 % представлены на рис. 2.

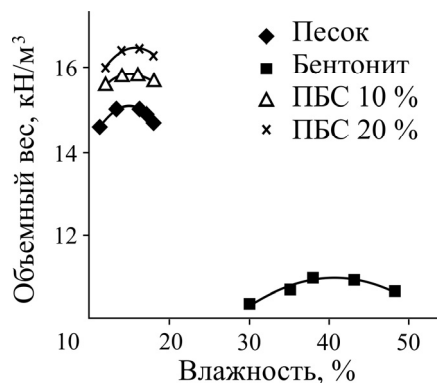


Рис. 2. Кривые уплотнения песка, бентонита, ПБС 10 и 20 %

Уплотнение ПБС 20 % имеет более высокую максимальную сухую плотность по сравнению с ПБС 10 %, т. е. малые высокопластичные частицы бентонита заполняют полости между частицами песка. Данный результат согласуется с ранее опубликованными работами [10, 22, 23]. Определены следующие значения максимального объемного веса в сухом состоянии: $\gamma_{\text{max,ПБС20\%}} = 16.5 \text{ кН/м}^3$ для ПБС 20 % и $\gamma_{\text{max,ПБС10\%}} = 15.8 \text{ кН/м}^3$ для ПБС 10 %. Максимальный объемный вес песка в сухом состоянии составил $\gamma_{\text{max,песок}} = 15.1 \text{ кН/м}^3$, бентонита $\gamma_{\text{max,бент}} = 11.0 \text{ кН/м}^3$. Значения оптимальной влажности равны 15.7 % для ПБС 20 %; 15.2 % для ПБС 10 %, что согласуется с изменениями оптимальной влажности ПБС в измельченном виде [23]. В [22] разница значений оптимальной влажности между ПБС 20 и 10 % также составила менее 1 %. Оптимальная влажность для песка — 15 %, для чистого бентонита — 41 %.

Характер набухания ПБС и чистого бентонита изучен в диапазоне вертикальных эффективных напряжений в соответствии с [34]. Образцы ПБС исследовались при вертикальных давлениях 1, 2.5, 5, 12.5, 25 и 50 кПа; образцы чистого бентонита при 1, 2.5, 5, 12.5, 25, 50 и 100 кПа. Согласно [35], начальное вертикальное эффективное напряжение находилось на отметке 1 кПа. Внутренний диаметр уплотнительного кольца составлял 70 мм, высота — 19 мм. Высота образца чистого бентонита — 3 мм и диаметр 70 мм. При условиях оптимальной влажности образцы помещались в кольцо одометра и ячейка заполнялась дистиллированной водой, затем образец подвергался вертикальному сжатию. Для предотвращения выхода образца за пределы кольца при набухании в условиях низкого вертикального давления высота образца ПБС выбиралась меньше 19 мм. Постоянство высоты образца обеспечивалось измерением в различных точках с помощью штангенциркуля. Во всех испытаниях уровень воды был постоянным. Высота образца отслеживалась до остановки процесса набухания, после чего рассчитывался коэффициент пористости исходя из изменения объема образца.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Характер набухания образцов чистого бентонита. Испытания образцов чистого бентонита продолжались 2–8 недель. В результате получена величина набухания и соотношение высоты набухания и времени для образцов бентонита, уплотненных 10 и 25 ударами при вертикальном эффективном напряжении.

На рис. 3 видно, что в начале испытания (первые 24 ч) набухание происходит с большой скоростью, с течением времени оно замедляется. При малом диапазоне вертикального эффективного напряжения (1–5 кПа) высота образца увеличилась в 3–4 раза относительно начального значения (деформация образца достигла 200–350 %). При увеличении вертикального эффективного напряжения набухание уменьшается. При вертикальном эффективном напряжении 100 кПа высота образца увеличилась с 0.3 до 0.4 см, деформация образца составила 33 %. Набухание наблюдалось при всех рассмотренных значениях вертикального напряжения. Отмечено, что при 25 уплотнительных ударах набухание немного больше, чем при 10. Это увеличение обусловлено близким контактом ориентированных частиц, возникшим при большем количестве уплотнительных ударов. Рост связности частиц позволяют воспринять большее количество воды, что приводит к увеличению набухания смеси. Тем не менее образцы, уплотненные как при 10, так и при 25 уплотнительных ударах, показали похожий характер набухания. В [8] отмечается, что уплотнение не оказывает значительного влияние на характер набухания.

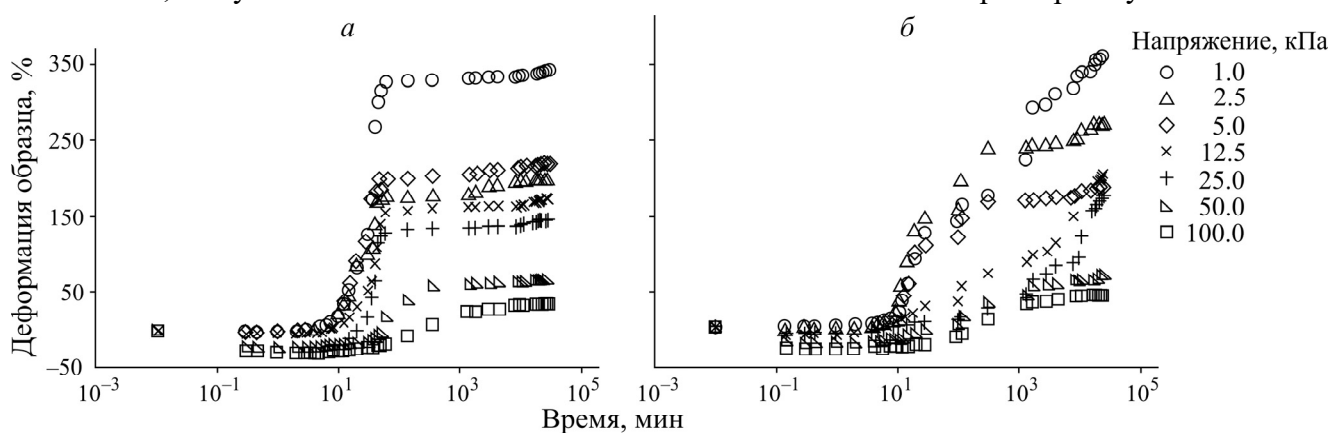


Рис. 3. Изменение деформации образца чистого бентонита, уплотненных 10 ударами (а), 25 ударами (б) при различных вертикальных эффективных напряжениях [36]

Изменение рассчитанных окончательных значений коэффициента пористости от вертикальных эффективных напряжений ($e_c - \sigma_v$) образцов чистого бентонита при полном насыщении водой и сравнение с результатами из научной литературы показано на рис. 4.



Рис. 4. Соотношение между окончательным коэффициентом пористости глины и вертикальным эффективным напряжением

Соотношение между окончательным коэффициентом пористости и вертикальным напряжением образцов бентонита можно описать экспоненциальной зависимостью на полулогарифмической шкале. Данный результат согласуется с графиками подобного соотношения для об-

разцов бентонита в [8] и [37]. Причиной получения похожих результатов является наличие высоких значений предела текучести на отметке 407 % в [8] и на отметках 276 % (бентонит GMZ), 474 % (бентонит Kunigel VI), 411 % (бентонит МХ 80) в [37]. Соотношение между коэффициентом пористости и вертикальным напряжением образцов бентонита имело более низкую границу по сравнению с результатами в [8] и полученными результатами в настоящей работе. Разница обнаруживается на примере бентонита с более низким пределом текучести (бентонит GMZ). Кривая данной зависимости не является линейной, как в [8]. Ее тренд более похож на кривую из [37]. Кроме того, в [8] кривая уменьшается до нулевого значения коэффициента пористости при вертикальном напряжении около 400 кПа, что крайне трудно получить в условиях реальной консолидации.

Характер набухания образцов песчано-бentonитовой смеси. Набухание образцов ПБС 10 и 20 % при вертикальном эффективном напряжении 1 кПа составило около 22 и 28 мм соответственно. Заметное набухание образцов ПБС отмечалось при значениях вертикального эффективного напряжения 1, 2.5, 5, 12.5 и 25 кПа. При 50 кПа до отметки 10^3 мин наблюдалось сжатие, после — небольшое набухание; при 100 кПа — полное сжатие образцов (рис. 5). Следовательно, содержание бентонита в смеси существенный фактор, влияющий на характер набухания, но не единственный.

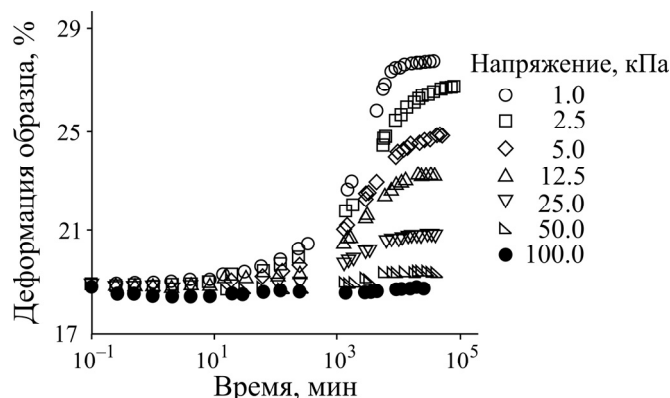


Рис. 5. Зависимость деформаций образцов песчано-бentonитовых смесей 20 % от времени

В ПБС твердая составляющая состоит из песка и глины, а жидкая — из воды. Состояние бентонита в смеси можно описать коэффициентом пористости глины. На рис. 6 представлен состав песчано-бentonитовой смеси [8]. Видно, что песок не поглощает воду, которая заполняет полости между частицами песка.

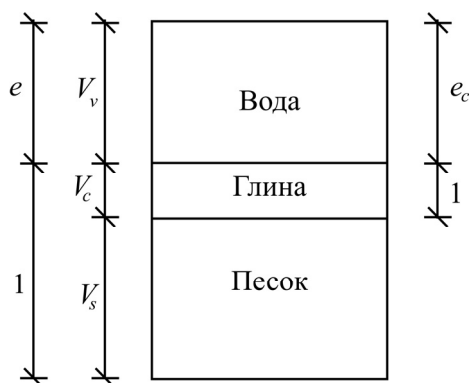


Рис. 6. Состав песчано-бentonитовой смеси: e — коэффициент пористости глины; V_v — объем полостей, V_c — объем глины, V_s — объем песка

В [8] показано, что кривая ПБС соответствует линейной кривой чистого бентонита до определенного порогового значения вертикального эффективного напряжения. После превышения пороговых значений зависимость окончательного коэффициента пористости глины от вертикального эффективного напряжения изменяется и следует линейному тренду. Пороговое значение вертикального эффективного напряжения зависит от содержания бентонита в смеси. Расчет ПБС выполнялся на основе предположения о том, что в частицах песка отсутствуют полости. Однако полости между частицами песка заполняются бентонитом, в результате происходит набухание смеси. При низком вертикальном эффективном напряжении глина в составе ПБС легко набухает и смещает частицы песка для достижения такого же коэффициента пористости [8].

Фактический характер набухания бентонита связан с несколькими общими явлениями [37]. В отличие от результатов в [8], коэффициент пористости бентонита и вертикальное эффективное напряжение соотносятся линейно при низких значениях напряжения, но при достижении определенного значения напряжения образуется песчаный скелет в матрице грунта. После прохождения данной точки наблюдается отклонение графика и устанавливается другая линейная зависимость между коэффициентом пористости бентонита и вертикальным линейным напряжением. Отмечается, что чем больше содержание песка в смеси, тем меньшее вертикальное напряжение необходимо для отклонения. Однако это можно объяснить свойствами бентонита, примененного в испытаниях. Например, при использовании натриевого бентонита Kunigel VI при добавлении 10 и 20 % песка таких данных не обнаружено. Отклонение от линейности начинает проявляться при меньших значениях вертикального напряжения, когда содержание песка выше. Градиент вторичного участка линейности уменьшается при увеличении содержания песка.

Выполнено сравнение методов подготовки образцов: трамбовки и уплотнения на окончательные соотношения коэффициента пористости и вертикального эффективного напряжения (рис. 7). При трамбовке наблюдаются более высокие значения коэффициента пористости при одинаковых значениях вертикального эффективного напряжения. Тем не менее тренд кривой остается таким же, как и при уплотнении образца, т. е. фиксируется наличие двух линий с пороговой точкой отклонения.

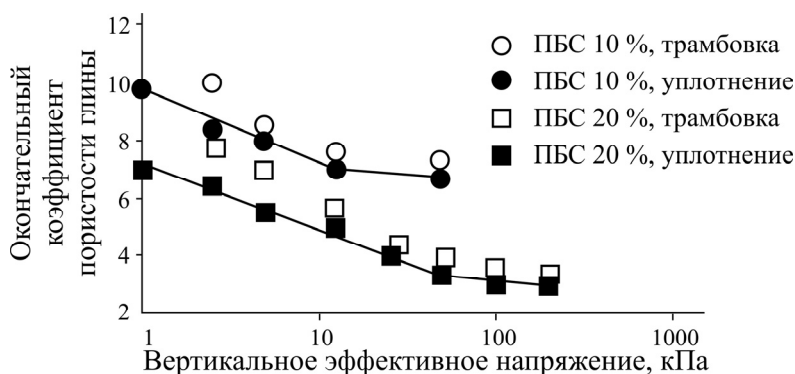


Рис. 7. Зависимость окончательного коэффициента пористости от вертикального эффективного напряжения образцов ПБС, подготовленных различными методами

ВЫВОДЫ

Набухание песчано-бентонитовых смесей зависит от содержания в них бентонита. Повышение давления сжатия ограничивает набухание. Так, набухание с увеличением давления 1 – 100 кПа снизилось до 1.21 для образцов с 10 % содержанием бентонита и до 1.49 для ПБС

20 %. Содержание глины в смеси — определяющий фактор, влияющий на характер набухания смесей. Другими факторами могут быть: чистота бентонита, высокая активность ионов Na, изоморфное замещение ионов Na в растворимой среде.

При испытании образцов чистого бентонита, уплотненных 10 и 25 ударами, набухание наблюдалось при всех значениях напряжения (1, 2.5, 5, 12.5, 25, 50 и 100 кПа). При увеличении напряжения до 100 кПа набухание чистого бентонита снижалось. Различие набухания при 10 и 25 уплотнительных ударах находилось в диапазоне 0.3–2.0 мм. Набухание образцов, подготовленных при 25 уплотнительных ударах, составило немного больше, чем при 10 ударах.

Образцы, подготовленные трамбовкой, показали большие значения коэффициента пористости по сравнению с образцами, подготовленными традиционным уплотнением. Несмотря на метод подготовки образцов, кривые соотношения коэффициента пористости и вертикального эффективного напряжения имели два выраженных участка. Результаты исследования подтвердили наличие на кривой двух областей, обусловленных минералогическим составом бентонита. Пороговое значение давления, при котором меняется угол наклона кривой, составило 12.5 кПа для ПБС 10 % и 50 кПа для ПБС 20 %.

Для чистого бентонита окончательный коэффициент пористости глины имеет линейную зависимость от вертикального эффективного напряжения. Для ПБС кривая отклоняется от линейности при определенном пороговом значении напряжения и следует горизонтальной тенденции. Пороговое значение напряжения ПБС с низким содержанием бентонита ниже, чем у ПБС с более высоким содержанием. Таким образом, ПБС с содержанием бентонита 20% имеет наиболее подходящие характеристики набухания и уплотнения для использования в качестве непроницаемых подкладочных слоев на полигонах захоронения ТБО и на открытых горных выработках.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Komine H. and Ogata N.** Predicting swelling characteristics of bentonites. *J Geotech. and Geoenv. Eng.*, 2004, Vol. 130, No. 8. — P. 818–829.
2. **Dixon D. A., Gray M. N., and Thomas A. W.** A study of the compaction properties of potential clay-sand buffer mixtures for use in nuclear fuel waste disposal, *Eng. Geol.*, 1985, Vol. 21. — P. 247–255.
3. **Oscarson D. W., Dixon D. A., Gray M. N.** Swelling capacity and permeability of an unprocessed and a processed bentonitic clay, *Eng. Geol.*, 1990, Vol. 28. — P. 281–289.
4. **Vanapalli S. K., Lu L., Sedano J. I., and Oh W. T.** Swelling characteristics of sand-bentonite mixtures. In *Unsaturated Soils: Research and Applications*, Springer Berlin Heidelberg, 2012. — P. 77–84.
5. **Cowland J. W. and Leung B. N.** A field trial of a bentonite landfill liner, *Waste Manage. Res.*, 1991, Vol. 9. — P. 277–291.
6. **Wu J. Y. and Khera R. P.** Properties of a treated-bentonite/sand mix in contaminant environment, *Physio-chemical Aspects of Soil and Related Materials*, 1990. — P. 47–59.
7. **Abdelrahman, G. E. and Shahien M. M.** Swelling treatment by using sand for Tamia swelling soil, *Proc. Int. Eng. Conf.*, Mansoura University, Sharm-el-Sheikh, Egypt, 2004.
8. **Mollins L. H., Stewart D. I., and Cousens T. W.** Predicting the properties of bentonite-sand mixtures, *Clay Miner.*, 1996, Vol. 31. — P. 243–252.
9. **Daniel D. and Benson C.** Water content-density criteria for compacted soil liners, *J. Geotech. Eng.*, ASCE, 1990, Vol. 116, No. 12. — P. 1811–1830.
10. **Kenney T., Van Veen M., Swallow M., and Sungaila M.** Hydraulic conductivity of compacted bentonite-sand mixtures, *Can. Geotech. J.*, 1992, Vol. 29. — P. 364–374.

11. Koerner R. M., Gartung E., and Zanzinger H. Geosynthetic Clay Liners, CRC Press, 1995. — 350 p.
12. Sun D., Cui H., and Sun W. Swelling of compacted sand-bentonite mixtures, *Appl. Clay Sci.*, 2009, Vol. 43, No. 3–4. — P. 485–492.
13. Moosavi E., Shirinabadi R., and Gholinejad M. Prediction of seepage water pressure for slope stability at the Gol-e-Gohar open pit mine, *J. Min. Sci.*, 2016, Vol. 52, No. 6. — P. 1069–1079.
14. Nazarov L., Nazarova L., and Golikov N. Granular geomaterials: Poroperm properties-stress dependence by unsteady permeability tests, *Springer Geology*, 2022. — P. 173–182.
15. Alawaji H. A. Swell and compressibility characteristics of sand-bentonite mixtures inundated with liquids, *Appl. Clay Sci.*, 1999, Vol. 15. — P. 411–430.
16. Srikanth V. and Mishra A. K. A laboratory study on the geotechnical characteristics of sand-bentonite mixtures and the role of particle size of sand, *Int. J. Geosynth. Ground Eng.*, 2016, Vol. 2. — P. 1–10.
17. Hoeks J., Glas H., Hofkamp J., and Ryhiner A. H. Bentonite liners for isolation of waste disposal sites, *Waste Manage. Res.*, 1987, Vol. 5, No. 1. — P. 93–105.
18. Gueddouda M. K., Lamara M., Nabil A., and Taibi S. Hydraulic conductivity and shear strength of dune sand-bentonite mixtures, *Electron J. Geotech. Eng.*, 2008, Vol. 13. — P. 1–15.
19. Oren A. H., Kaya A., and Kayalar A. S. Hydraulic conductivity of zeolite bentonite mixtures in comparison to sand bentonite mixtures, *Can. Geotech. J.*, 2011, Vol. 48, No. 9. — P. 1343–1353.
20. Oren A. H., Durukan S., and Kayalar A. S. Influence of compaction water content on the hydraulic conductivity of sand-bentonite and zeolite-bentonite mixtures, *Clay Minerals*, 2014, Vol. 49. — P. 109–121.
21. Pusch R. Bentonite Clay, Environmental Properties and Applications, CRC Press, 2015. — 360 p.
22. Proia R., Croce P., and Modoni G. Experimental investigation of compacted sand-bentonite mixtures, *Procedia Eng.*, 2016, Vol. 158. — P. 51–56.
23. Howell J. L., Schakelford C. D., Amer N. H., and Stern R. T. Compaction of sand-processed clay soil mixtures, *Geotechnical Testing J.*, 1997, Vol. 20. — P. 443–458.
24. Biju M. S. and Arnepalli D. N. Effect of biopolymers on permeability of sand-bentonite mixtures, *J. Rock Mech. Geotech. Eng.*, 2020, Issue 5. — P. 1093–1102.
25. Mukherjee K. and Mishra A. K. Evaluation of hydraulic and strength characteristics of sand-bentonite mixtures with added tire fiber with landfill application, *J. Environ. Eng., ASCE*, 2019, Vol. 145, Issue 6.
26. Vadiamudi S. and Mishra A. K. Consolidation characteristics of sand-bentonite mixtures and the influence of sand particle size, *J. Hazardous, Toxic and Radioactive Wastes, ASCE*, 2018, Vol. 22, Issue 4.
27. Sun W. J., Zong F. Y., Sun D. A., Wei Z. F., Shanz T., and Fatahi B. Swelling prediction of bentonite-sand mixtures in the full range of sand content, *Eng. Geol.*, 2017, Vol. 222. — P. 146–155.
28. Tan Y., Zhang H., Zhang T., Zhang G., He D., and Ding Z. Anisotropic hydro-mechanical behavior of full-scale compacted bentonite-sand blocks, *Eng. Geol.*, 2021, Vol. 287. — P. 146–155.
29. ASTM D 854. Standard test methods for specific gravity of soil solids by water pycnometer, American Society for Testing and Materials (ASTM), Philadelphia, USA, 2002.
30. ASTM D 4318. Standard test methods for liquid limit, plastic limit, and plasticity index of soils, American Society for Testing and Materials (ASTM), Philadelphia, USA, 2000.
31. BS1377. Methods of test for soils for civil engineering purposes, Part 2/4.3: Classification Tests, Cone Penetrometer Method, United Kingdom, 2007.
32. ASTM D 422. Standard test method for particle-size analysis of soils, American Society for Testing and Materials (ASTM), Philadelphia, USA, 2007.
33. ASTM D 698. Standard test methods for laboratory compaction characteristics of soil using standard effort, American Society for Testing and Materials (ASTM), Philadelphia, USA, 2012.
34. ASTM D 2435. Standard test method for one-dimensional consolidation properties of soils, American Society for Testing and Materials (ASTM), Philadelphia, USA, 2002.

35. **ASTM D 4546-08.** Standard test methods for one-dimensional swell or collapse of soils, American Society for Testing and Materials (ASTM), Philadelphia, USA, 2014.
36. **Boran G.** Investigating the swelling behavior of compacted high plasticity clays. MSc Thesis, DokuzEylul University, Graduate School of Natural and Applied Sciences, Supervisor: Asst. Prof. Dr. Mehmet Kuruoglu, Izmir, Turkey, 2017. — 106 p.
37. **Sun D. A., Zhang J. Y., Zhang J. R., Zhang L.** Swelling characteristics of GMZ bentonite and its mixtures with sand, Appl. Clay Sci., 2013, Vol. 83. — P. 224–230.
38. **Hammad T., Fleureau J.-M., and Hattab M.** Kaolin/montmorillonite mixtures behavior on oedometric path and microstructural variations, European J. Env. Civil Eng., 2013, Vol. 17, No. 9. — P. 826–840.

Поступила в редакцию 22/VI 2022

После доработки 07/XII 2022

Принята к публикации 19/I 2023