

УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДИКИ КОМПРЕССИОННЫХ ИСПЫТАНИЙ НЕЦЕМЕНТИРУЮЩИХСЯ ЗОЛОШЛАКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ

IMPROVE METHODS OF COMPRESSION TESTS OF UNCEMENTED ASH-AND-SLAG MATERIALS

АНДРЕЕВА Е.В.

Старший научный сотрудник АО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева»,
к.т.н., г. Санкт-Петербург, evavniig@mail.ru

ANDREEVA E.V.

Senior research worker Vedeneev VNIIG, PhD
(candidate of science in Technics), Saint Petersburg, evavniig@mail.ru

Ключевые слова:

золошлаковый материал; компрессия; модуль деформации; классификация; коэффициент пористости; природный грунт.

Key words:

ash-and-slag material; compression; module of deformation; classification; coefficient of porosity; natural soil.

Аннотация

На основе анализа результатов лабораторных экспериментальных исследований, проведенных на нецементирующихся золошлаковых материалах различных ТЭС СНГ, разработаны классификация этих материалов по коэффициенту пористости и на ее основе рекомендации по усовершенствованию методики компрессионных испытаний: уточнены режим приложения уплотняющих нагрузок и критерий стабилизации деформаций.

Достоверность откорректированной методики подтверждена сравнительным анализом результатов, проведенных по ней компрессионных испытаний и идентичных параллельных испытаний, выполненных строго по ГОСТ 12248-2010. На примере двух представительных образцов золошлаковых материалов графически проиллюстрирована кинетика изменения относительной деформации сжатия в процессе компрессионного уплотнения, выполненного по стандартной и усовершенствованной методикам.

Abstract

On the basis of analysis of results of the laboratory experimental researches conducted on the uncemented ash-and-slag materials of different thermal power-stations of RF and Newly independent states, classification of these materials is worked out on the coefficient of porosity and, on her basis, recommendation on the improvement of methodology of compression tests: the mode of appendix of compacting loading and criterion of stabilizing of deformations are specified. Authenticity of corrected methodology is confirmed by the comparative analysis of results of the conducted on her compression tests and identical parallel tests, performed strictly for GOST 12248-2010.

On the example of two representative samples of ash-and-slag materials kinetics of change of relative deformation of compression is graphically illustrated in the process of the consolidation test performed on standard and improved methodologies.

Введение

При разработке проектов реконструкции и рекультивации существующих золошлакоотвалов (ЗШО) предварительно выполняются инженерные изыскания. При этом наряду со свойствами природных грунтов оснований и ограждающих дамб изучаются свойства золошлаковых материалов (ЗШМ) [4, 5, 9]. Необходимость таких исследований диктуется тем, что в расчетах дамб — основных напорных сооружений ЗШО, ЗШМ рассматривается как отдельный инженерно-геологический элемент. Этот материал не только используется для возведения дамб, подсыпок территорий, но и составляет верхний слой основания дамб ярусов наращивания. В связи с вышеизложенным актуальность приобретает проблема усовершенствования методики исследований деформационных свойств ЗШМ. Наиболее простым методом определения характеристик деформируемости является компрессионное сжатие.

Целью настоящих исследований является снижение продолжительности компрессионных испытаний нецементирующихся золошлаковых материалов. Для ее достижения полезен анализ исследований, проведенных на нецементирующихся ЗШМ различной плотности, являющихся продуктами сжигания различных видов топлива.

Согласно ГОСТ 25100-2011 [2] ЗШМ относится к техногенным грунтам и по гранулометрическому составу с учетом накопленных фактических данных [7] чаще всего — к категории песков. В ГОСТ 25100-2011 [2] приведена классификация песков по коэффициенту пористости (табл. 1).

В соответствии с ГОСТ 12248-2010 [1] величины первых ступеней давления при проведении компрессионных испытаний песчаных грунтов назначаются в зависимости от их коэффициента пористости e . Каждая последующая ступень уплотняющей нагрузки в компрессионных опытах удваивается. При испытании рыхлых песков с коэффициентом пористости более 1,0 прикладывается первая ступень вертикальной уплотняющей нагрузки величиной 0,005 МПа. Для рыхлых песков с $1,0 > e \geq 0,75$ рекомендуемая величина первой ступени нагрузки равна 0,0125 МПа, для песков преимущественно средней плотности с $0,75 > e > 0,6$ — 0,025 МПа.

Условия намыва и крупность материала взаимосвязаны: крупность осаждаемого материала уменьшается по мере удаления от выпуска пульпы за счет снижения скорости осаждения, которая зависит от таких факторов, как скорость подачи пульпы, температура. Исследования проводились на ЗШМ различного гранулометрического состава: на золах, осаждавшихся в отстойном пруду или на надводном откосе намыва (пляже) и на золошлаках, осаждавшихся вблизи выпусков.

ЗШМ, отложившийся в зоне отстойного пруда или на надводном откосе намыва ЗШО, в большинстве случаев представляет собой пылеватый песок. Золошлаковый материал, осевший непосредственно под пульповыпуском, как правило, является песком средней крупности или крупным, реже пылеватым, мелким или гравелистым [2, 8].

Результаты авторских исследований и ряд литературных источников [6–8] подтверждают, что деформируемость ЗШМ в том или ином интервале нагрузок в значительной мере обусловлена его начальным коэффициентом пористости, величина которого, в свою очередь, зависит от таких факторов, как условия намыва, продолжительность самоуплотнения, условия консолидации и др. Факторы, влияющие на характер деформируемости ЗШМ, взаимосвязаны. Плотность сложения ЗШМ в значительной степени обусловлена его структурными особенностями (размером и взаимным расположением частиц, их формой) — наиболее плотным сложением характеризуется ЗШМ неоднородного гранулометрического состава, который зависит от скоростей пульпы, условий движения ее потоков в отстойном пруду золоотвала (расстояний до водобросных колодцев, наличия струнаправляющих дамб и т.п.).

Химико-минералогический состав ЗШМ гораздо разнообразнее, чем у природных песков, поскольку включает в себя три группы веществ: кристаллические, стекловидные и органические [7]. В группе кристаллических веществ преобладают магнетит, гематит, кварц, силикаты, алюмосиликаты и алюмоферриты кальция; во всех ЗШМ, но в различных количествах содержатся сульфаты и карбонаты кальция.

Ко второй группе веществ относятся продукты незавершенных топочных превращений. В основе стекловидной компоненты — различные оксиды: алюминия, железа, кальция, магния, натрия, калия. В зависимости от состава исходного топлива ЗШМ может содержать то или иное количество обожженного глинистого вещества. Органическая составляющая ЗШМ образуется за счет преобразования в топке соответствующего вида веществ и представлена в виде кокса и полукокса с малой гигроскопичностью.

Разнообразие химико-минералогического состава ЗШМ приводит к тому, что у него в отличие от природных песков появляются коагуляционные физико-химические связи между частицами и разделяющей их жидкой компонентой, позволяющими отнести этот материал к дисперсным грунтам. По этой причине он характеризуется и большей, чем природный песок [6], величиной естественной и оптимальной влажности.

В настоящей работе представлены результаты авторских исследований, проведенных за последние 4 года на нецементирующихся ЗШМ различных ТЭС СНГ. На рис. 1 и 2 изображены графики зависимости компрессионного модуля деформации E от начального коэффициента пористости для двух основных гранулометрических разновидностей ЗШМ: золы (песков пылеватых и мелких) (рис. 1) и золошлаков (песков средней крупности и более) (рис. 2).

Показатели свойств исследованных зол находятся в следующих диапазонах значений: влажности — от 16,6 до 80,3%, оптимальной влажности — от 24,0 до 72,4%, плотности сухого грунта — от 690 до 1170 кг/м³, максимальной плотности сухого грунта — от 770 до 1450 кг/м³. Золы характеризуются следующими показателями: при естественной плотности-влажности — коэффициентом пористости от 0,86 до 2,28, компрессионным модулем деформации от 2,1 до 14,8 МПа; при оптимальной влажности и коэффициенте уплотнения 0,95, соответственно, значения коэффициента пористости зол варьируются в интервале 0,61–2,00, а компрессионного модуля деформации — в пределах 3,4–29,0 МПа. Таким образом, диапазон начальных коэффициентов пористости всех исследованных зол — от 0,61 до 2,28.

Влажность исследованных золошлаков варьирует от 4,1 до 38,4%, оптимальная влажность — от 9,1 до 35,7%, плотность сухого грунта — от 860 до 1340 кг/м³, максимальная плотность сухого грунта — от 950 до 1480 кг/м³. При естественной плотности-влажности величина коэффициента пористости золошлаков составляет от 0,72 до 1,71, модуля деформации — от 6,8 до 25,0 МПа. При оптимальной влажности и коэффициенте уплотнения 0,95 модули деформации золошлаков варьируются в интервале 9,5–32,3 МПа, а коэффициенты пористости — от 0,56 до 1,45. Таким образом, общий диапазон начальных коэффициентов пористости всех исследованных золошлаков — от 0,56 до 1,71.

На графиках рис. 1 и 2 нанесены нормативные значения модулей деформации ЗШМ в диапазоне нагрузок 0–0,1 МПа, представляющем наибольший интерес, поскольку на практике высота каждого яруса ограждающих дамб ЗШО не превышает 5 м. Результаты проведенных экспериментальных исследований показывают, что золы обладают достаточно высоким мо-

Таблица 1

Классификация песчаных грунтов по величине коэффициента пористости согласно ГОСТ 25100-2011 [1]			
Разновидность песков	Коэффициент пористости e , д.ед.		
	Пески гравелистые, крупные и средней крупности	Пески мелкие	Пески пылеватые
Плотный	$e \leq 0,55$	$e \leq 0,60$	$e \leq 0,60$
Средней плотности	$0,55 < e \leq 0,70$	$0,60 < e \leq 0,75$	$0,60 < e \leq 0,80$
Рыхлый	$e > 0,70$	$e > 0,75$	$e > 0,80$

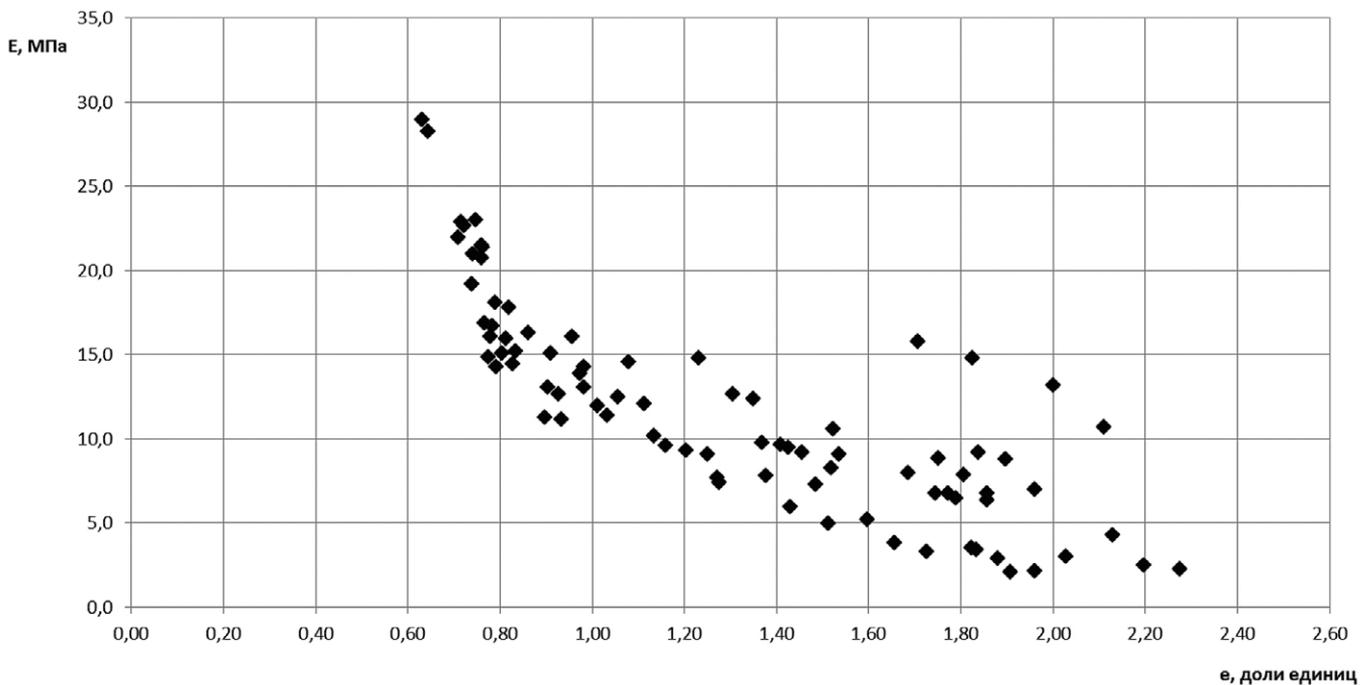


Рис. 1. Зависимость модуля деформации E зол от коэффициента пористости e

дулем деформации E (≥ 10 МПа) при начальных коэффициентах пористости не более 1,00, а золошлаки — при коэффициентах пористости не более 1,10. Согласно табл. В.4 ГОСТ 25100-2011 [2] вышеупомянутые ЗШМ относятся к категории среднедеформируемых грунтов, и, следовательно, с учетом уже отмеченной принадлежности к песчаным грунтам по гранулометрическому составу их можно отнести к пескам средней плотности, а не к рыхлым, как регламентируется в табл. Б12 ГОСТ 25100-2011 [2] (см. табл. 1). Таким образом, представляется перспективным дополнить базу данных о ЗШМ как о техногенном песчаном грунте отдельной его классификацией в зависимости от коэффициента пористости с учетом деформационных

свойств, а, соответственно, частично изменить или дополнить методику компрессионных испытаний этого материала, в частности уточнить рекомендуемые величины первой степени нагружения и критерии стабилизации деформаций.

Приведем классификацию нецементирующегося золошлакового материала по коэффициенту пористости, разработанную на основе результатов выполненных экспериментальных исследований и анализа имеющихся литературных данных и рекомендации по назначению величины первой степени нагрузки при компрессионном уплотнении (табл. 2) в соответствии с этой классификацией. Несложно заметить, что при этом в большинстве случаев компрессионный опыт

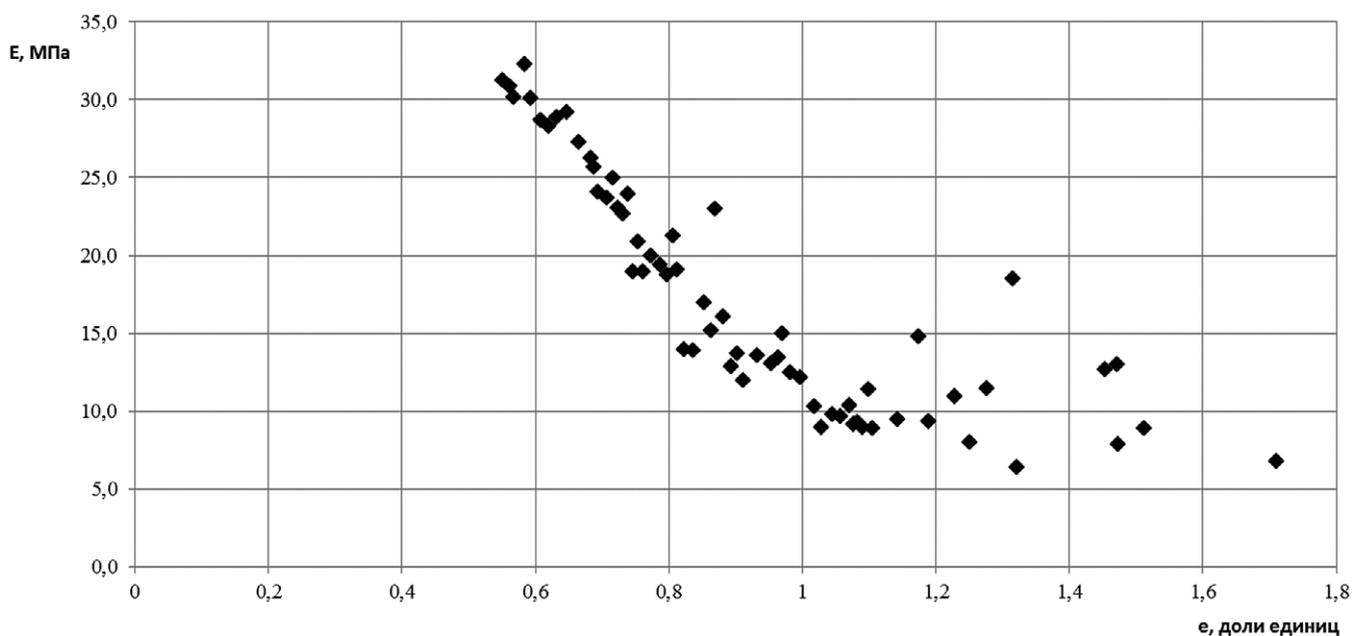
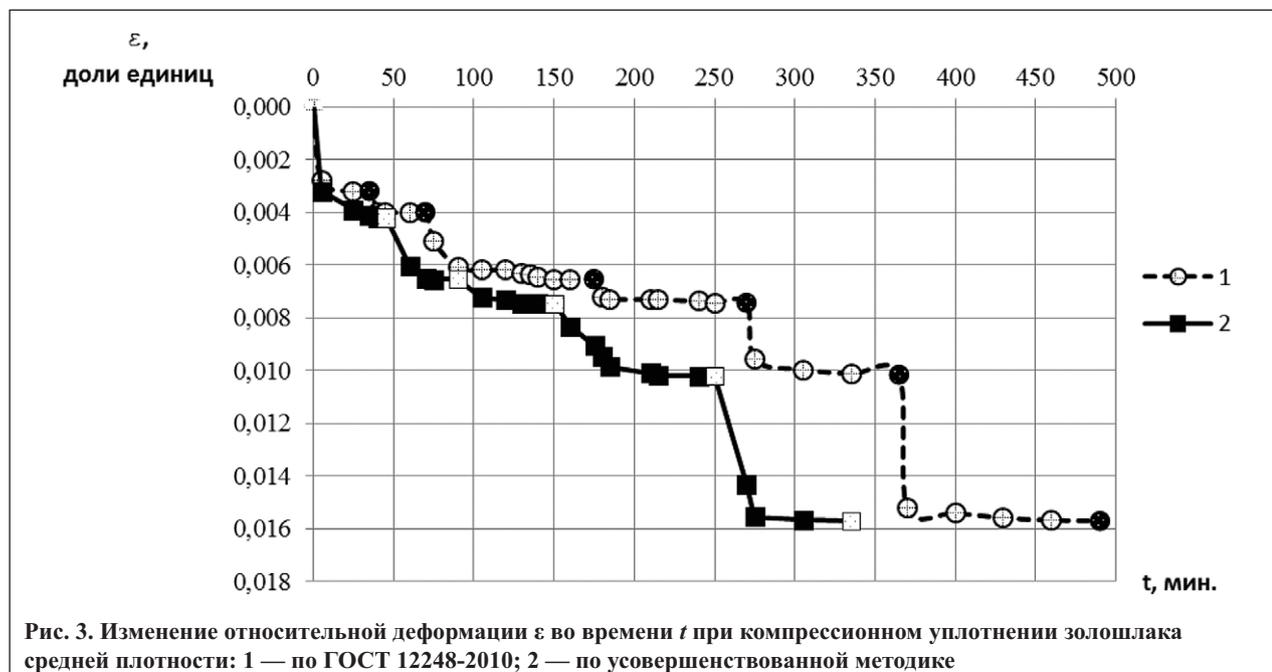


Рис. 2. Зависимость модуля деформации E золошлаков от коэффициента пористости e



оказывается короче проведенного по всем правилам ГОСТ 12248-2010 [1] на одну ступень нагружения.

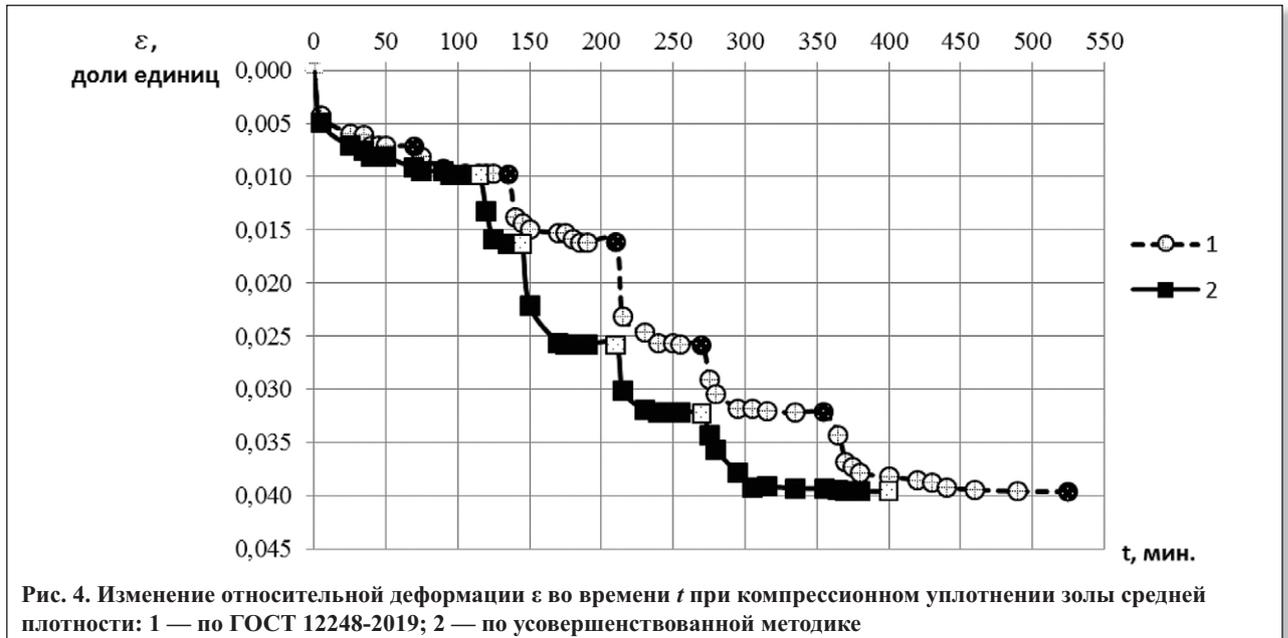
Пониженная деформируемость ЗШМ по сравнению с аналогичными по гранулометрическому составу и пористости природными песками обусловлена такими структурными особенностями ЗШМ, как меньшая степень окатанности частиц золы и шлака. Эти частицы образуются в процессе сжигания пылевидного, неоднородного по составу топлива в котлах при температурах 1000–1600 °С в течение короткого промежутка времени при минимальном контактировании между собой. Такая особенность процесса приводит к тому, что ЗШМ представлен частицами не только различных размеров, но и формы — от неправильной в виде иглы или щепы до идеально сферической. Более подробное сравнение природных песков и ЗШМ по структурным признакам и деформационным свойствам приводится в [6–8].

По этой же причине результаты многочисленных компрессионных испытаний ЗШМ, за исключением рыхлого (согласно табл. 2), показывают, что за критерий условной стабилизации деформации сжатия на той или иной ступени нагружения можно принять приращение деформации не более чем на 0,05% от ее первоначальной величины в течение 20, а не 30 минут, как рекомендовано в табл. 5.3 ГОСТ 12248-2010 [1]. На рисунках 3 и 4 на примере двух представительных образцов ЗШМ средней плотности иллюстрируется сравнение кинетики изменения относительной деформации

сжатия по двум методикам: выполнения опытов строго по ГОСТ 12248-2010 и с учетом предложенных изменений. К сожалению, не представляется возможным привести подобные графики для всех исследованных образцов (более 100 разновидностей ЗШМ с разных ТЭС, различной плотности-влажности, гранулометрического состава, исходного вида топлива). Рисунок 3 отражает кинетику процесса компрессионного уплотнения золошлака надводного откоса намыва золошлакоотвала Луганской ТЭС (коэффициент пористости 0,90), а рис. 4 — кинетику уплотнения золы зоны подводного намыва золоотвала Интинской ТЭС (коэффициент пористости 1,05). Золошлак Луганской ТЭС является отходом сжигания донецкого угля, а зола Интинской ТЭС образовалась при сжигании интинского угля. Рисунки 3 и 4 показывают, что при проведении компрессионных испытаний двух образцов-близнецов по ГОСТ 12248-2010 и по усовершенствованной методике в первом случае уплотняющая нагрузка прикладывается за 6 ступеней, а во втором — за 5 ступеней (окончание каждой ступени отмечено на графиках особыми маркерами). Сравнительный анализ результатов свидетельствует о незначительных различиях (не более чем на 0,1–0,3 МПа) в модулях деформации, полученных по этим двум методикам, и о том, что продолжительность эксперимента, выполненного по усовершенствованной методике, меньше на 2–2,5 часа. Эта незначительная на первый взгляд разница в длительности

Таблица 2

Рекомендуемая классификация нецементирующегося ЗШМ по коэффициенту пористости				
Разновидность ЗШМ	Коэффициент пористости e , д.ед.		Рекомендуемая первая ступень нагрузки при компрессионном испытании, МПа	
	Пески гравелистые, крупные и средней крупности (золошлак)	Пески мелкие и пылеватые (зола)	По ГОСТ 12248-2010	По откорректированной методике
Плотный	$e \leq 0,65$	$e \leq 0,70$	0,05 при $e > 0,60$ — 0,025	0,05
Средней плотности	$0,65 < e \leq 1,00$	$0,70 < e \leq 1,10$	0,025 при $e > 0,75$ — 0,0125	0,025
Рыхлый	$e > 1,00$	$e > 1,10$	0,005	0,0125 при $e > 1,30$ — 0,005



испытаний зачастую может оказаться весомой при выполнении большого объема лабораторных работ для инженерных изысканий и ограниченном количестве имеющихся приборов.

Выводы

В результате исследований физических и деформационных свойств различных видов нецементирующегося ЗШМ, а также анализа имеющихся литературных источников можно сформулировать следующие выводы и рекомендации.

1. Согласно ГОСТ 25100-2011 по гранулометрическому составу ЗШМ относится к категории песков — от пылеватого, осевшего в процессе намыва в зоне отстойного пруда, до крупного и гравелистого, отложенного непосредственно под пульповыпуском.

2. Пылеватый и мелкий ЗШМ (золу) с коэффициентом пористости до 1,10, а более крупный (золашлак) — с коэффициентом пористости до 1,00 рекомендуется относить к категории песков средней плотности. Для природных грунтов этот предел значительно ниже и составляет 0,60–0,80. В связи с этим примерно 15% исследованных зол и 50% золашлаков, являющихся согласно

ГОСТ 25100-2011 рыхлыми песками, можно именовать техногенными песчаными грунтами средней плотности.

3. На основе предлагаемого уточнения критериев отнесения ЗШМ к различным категориям по плотности и анализа результатов компрессионных испытаний ЗШМ предпринята попытка усовершенствования методики компрессионных испытаний ЗШМ по сравнению с методикой, разработанной для природных песчаных грунтов. Основное направление усовершенствования — сокращение продолжительности компрессионных испытаний. Рекомендовано:

- уменьшить количество ступеней нагружения как минимум на две;
- принять условный критерий стабилизации деформации сжатия — не более чем на 0,05% от ее первоначальной величины в течение 20 минут.

Общая продолжительность каждого компрессионного испытания, проведенного с учетом этих изменений, сокращается на 2–2,5 часа.

5. Достоверность откорректированной методики подтверждена сравнительным анализом результатов, проведенных по ней компрессионных испытаний и идентичных параллельных испытаний, выполненных строго по ГОСТ 12248-2010. 

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 12248-2010. Грунты. Методы лабораторного определения характеристик прочности и деформируемости. М.: Стандартинформ, 2011.
2. ГОСТ 25100-2011. Грунты. Классификация. М.: МНТКС, 2013.
3. *Зелинская Е.В., Толмачева И.А., Барахтенко В.В., Бурдонов А.Е., Головин А.В.* К вопросу рециклинга золы уноса тепловых электростанций // Науки о Земле. 2011. № 6. С. 22–25.
4. Инструкция по проектированию, эксплуатации и рекультивации полигонов для твердых бытовых отходов. М.: Министерство строительства Российской Федерации, 1996.
5. *Кутепов Ю.И., Кутепова Н.А., Сольский С.В., Чукалина А.С.* Способы подготовки территорий золошлакоотвалов для строительства // Гидротехника XXI века. 2011. № 1. С. 27–30.
6. *Ларина Э.А., Пантелеев В.Г., Трофимов В.Н.* Классификация формы частиц золошлаковых материалов // Труды координационных совещаний по гидротехнике. Л.: ВНИИГ имени Б.Е. Веденеева. 1977. Вып.113. С. 52–58.
7. *Пантелеев В.Г., Ларина Э.А., Мелентьев В.А. и др.* Состав и свойства золы и шлака ТЭС. Л.: Энергоатомиздат, 1985.
8. *Пантелеев В.Г., Сирота Ю.Л., Андреева Е.В.* Особенности геотехконтроля при возведении дамб золоотвалов из разнородного золошлакового материала // Труды международной научно-технической конференции «Реконструкция Архангельска-99». 24–25 июня 1999 г. Архангельск, 1999. Том 1. С. 61–66.
9. РД 34.02.202-95. Рекомендации по рекультивации отработанных золошлакоотвалов тепловых электростанций. М.: СПО ОРГРЭС, 1997.

ПОДПИСКА НА ЖУРНАЛЫ

«ИНЖЕНЕРНЫЕ ИЗЫСКАНИЯ», «ИНЖЕНЕРНАЯ ГЕОЛОГИЯ»,
«ГЕОТЕХНИКА» И «ГЕОРИСК»



Реклама

Стоимость годовой подписки на журналы (через редакцию) с учетом почтовых расходов и НДС

- «Инженерные изыскания» (14 номеров) – 9660 рублей.
- «Инженерная геология» (6 номеров) – 3600 рублей.
- «Геориск» (4 номера) – 2400 рублей.
- «Геотехника» (6 номеров) – 3900 рублей.

Полный комплект журналов — 19560 рублей.

ОТДЕЛ ПОДПИСКИ
И РАСПРОСТРАНЕНИЯ

+7 (495) 210-89-92

PR@GEOMARK.RU
WWW.GEOMARK.RU

Подписку на журналы можно оформить через подписные агентства

Оформление подписки на журналы возможно через агентства «Роспечать» и «Урал-пресс». Стоимость подписки устанавливается агентствами самостоятельно и может отличаться от стоимости, указанной редакцией.

Подписные индексы ОАО «Агентство "Роспечать"»

«Инженерные изыскания»	71509
«Инженерная геология»	36611
«ГеоРиск»	71510
«Геотехника»	22780

Подписку через агентство «Урал-пресс» можно оформить на официальном сайте — www.ural-press.ru