

# ПРОЕКТИРОВАНИЕ И СТРОИТЕЛЬСТВО ДОРОГ, МЕТРОПОЛИТЕНОВ, АЭРОДРОМОВ, МОСТОВ И ТРАНСПОРТНЫХ ТОННЕЛЕЙ

УДК 624.13:625.7/.8:67.08

DOI: 10.31675/1607-1859-2019-21-2-215-227

*А.А. ЛУНЁВ, В.В. СИРОТЮК,*

*Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет*

## **СОПОСТАВЛЕНИЕ ДЕФОРМАЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ ЗОЛОШЛАКОВОЙ СМЕСИ, ПОЛУЧЕННЫХ В ЛАБОРАТОРНЫХ И НАТУРНЫХ УСЛОВИЯХ**

В инженерной геологии и механике грунтов существуют зависимости, позволяющие переходить от параметров деформационных свойств, полученных в лаборатории, к параметрам в натуральных условиях, а также между параметрами, полученными при лабораторных испытаниях по разным методикам. Наличие таких зависимостей существенно упрощает и ускоряет выполнение изысканий. Однако для золошлаковых смесей, рассматриваемых в качестве техногенного грунта для сооружения насыпей, выведение таких зависимостей ранее не выполнялось. Целью настоящей работы является выведение этих деформационных параметров.

Для получения вышеуказанных зависимостей выполнены экспериментальные исследования по определению: модулей деформации, определённых в условиях компрессионного и трёхосного сжатия, модулей упругости, определённых в лабораторных условиях на рычажном прессе и в экспериментальном лотке, а также по методике штамповых испытаний на опытном участке насыпи из золошлаковых смесей и Калифорнийского числа несущей способности (в широком интервале плотности и влажности).

В ходе исследований установлено, что ранее выведенные для природных грунтов формулы перехода между параметрами деформационных свойств не подходят для золошлаковых смесей. Поэтому на основе результатов испытаний были выведены математические зависимости, связывающие деформационные параметры золошлаковых смесей, полученные в разных условиях.

Новизна и практическая значимость публикации обеспечивается получением новых зависимостей, которые базируются на опытных данных и позволяют получать искомые значения деформационных параметров насыпей из золошлаковых смесей с большей точностью, чем по математическим выражениям, полученным ранее другими авторами.

**Ключевые слова:** строительство; золошлаковая смесь; штамповые испытания; модуль упругости; модуль деформации; Калифорнийское число несущей способности; математические модели.

**Для цитирования:** Лунёв А.А., Сиротюк В.В. Сопоставление деформационных параметров золошлаковой смеси, полученных в лабораторных и натуральных

условиях // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2019. Т. 21. № 2. С. 215–227.  
DOI: 10.31675/1607-1859-2019-21-2-215-227

A.A. LUNEV., V.V. SYROTYUK,  
*Siberian State Automobile and Highway University*

## **BOTTOM-ASH MIXTURE DEFORMATION PARAMETERS OBTAINED IN LABORATORY AND NATURAL CONDITIONS**

In engineering geology and soil mechanics, there are dependencies that allow one to transfer from deformation parameters obtained in the laboratory conditions to that obtained in natural conditions and between parameters obtained during laboratory tests using different methods. These dependencies greatly simplify and facilitate research into the field. However, for bottom-ash mixtures, considered as man-made soil for the embankment construction, the construction of such dependencies has not been previously performed. The aim of this work is to obtain these dependencies and determine the modulus of deformation under triaxial compression, the elastic moduli determined in laboratory conditions on a lever press and experimental tray. The dependencies are also obtained using the plate test method on the experimental embankment and the California bearing ratio in a wide range of density and humidity.

It is found that the transfer equations derived earlier for deformation parameters are not suitable for the bottom-ash mixes. Mathematical dependencies are then derived for the deformation parameters of these mixes in different conditions.

The **Originality** and **practical implications** of this work is the derivation of new dependencies based on experimental data allowing to obtain desired values of these parameters for bottom-ash embankments with higher accuracy than achieved by other authors using mathematical calculations

**Keywords:** construction; bottom-ash mixture; plate test; modulus of elasticity; modulus of deformation; California bearing ratio; mathematical model.

**For citation:** Lunev A.A., Syrotyuk V.V. Sopotavlennie deformatsionnykh parametrov zoloshlakovoi smesi, poluchennykh v laboratornykh i naturnykh usloviyakh [Bottom-ash mixture deformation parameters obtained in laboratory and natural conditions]. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2019. V. 21. No. 2. Pp. 215–227.  
DOI: 10.31675/1607-1859-2019-21-2-215-227

### **Введение**

В связи с постоянным ростом потребности в энергоресурсах и низким уровнем внедрения альтернативных источников энергии, ежегодный объём образования золошлаковых смесей (ЗШС) в России постоянно возрастает. По прогнозам экспертов, к 2030 г. их количество достигнет 2,0 млрд т. Современные исследования позволяют широко использовать эти материалы в строительстве [1–12]. Однако почти всё имеющиеся технологии не относятся к крупнотоннажному использованию ЗШС, поэтому в Российской Федерации сохраняется крайне низкий уровень утилизации золошлаков.

Успешный зарубежный опыт эффективной крупнотоннажной утилизации ЗШС в строительстве [4–9] в России практически не анализируется и мало используется. Нормативно-методическая база по рассматриваемому вопросу в РФ нуждается в уточнении расчётных показателей механических свойств ЗШС.

При проектировании и обосновании устойчивости высоких насыпей из ЗШС специалисты сталкиваются с проблемами из-за недостатка информации об этом, относительно новом для них, техногенном грунте.

Наибольшие сложности при работе с ЗШС вызывает проведение инженерно-геологических изысканий, т. к. практически отсутствуют данные о связях деформационных параметров этого техногенного грунта между собой, а применимость зависимостей, установленных для природных грунтов, не подтверждается.

В современной практике информация о соотношениях между различными деформационными параметрами механических свойств грунтовых материалов имеет в основном эмпирический характер, выведенный для конкретных видов грунта. Это связано с тем, что в каждом виде испытаний создается своё особенное напряжённое состояние, а наличие грунтов различного генезиса, гранулометрического состава, плотности, влажности и формы частиц создает слишком большое число неопределенностей, чтобы можно было выразить переходы без использования дополнительных параметров, характерных для конкретного вида грунта [13].

Для перехода между параметрами механических свойств грунтов в РФ в основном пользуются поправочными коэффициентами, позволяющими приближенно перейти от одного параметра к другому [12]. Эти коэффициенты часто не учитывают изменения в характере деформирования грунта при изменении условий [13] проведения испытаний. Обычно учитывается влияние влажности и плотности в зависимости от вида грунта, как, например, в СП50-101–2004. Иногда учитывается большее количество факторов, но для этого требуется определение специальных дополнительных параметров [14]. Авторы не обнаружили публикаций, в которых отражаются результаты комплексного определения параметров механических свойств ЗШС, не найдено и сопоставление этих параметров.

За рубежом имеется ряд работ, в которых приведены результаты определения деформационных параметров ЗШС. Однако, в силу эмпирического подхода к проектированию дорожных конструкций в большинстве зарубежных стран, иностранные специалисты, как правило, работают не со всем спектром деформационных параметров, а ограничиваются только определением CBR – Калифорнийского числа несущей способности (Toth et al., Pandian, Martin et al.) [15–17]. Поэтому в иностранной литературе, в основном, связывают между собой CBR, модуль упругости и прочие эмпирические деформационные параметры (OCR, SPT) [18]. Так, в работе [19] представлены зависимости между CBR и модулем упругости материала, выведенные (W. Neukelom и C.R. Foster [20], W. Neukelomi A.J.G. Klomp [21]) в упрощенном виде:

$$E_y \approx 10 \cdot \text{CBR} ; \quad (1)$$

$$\text{CBR} \approx 0,1 \cdot E_y . \quad (2)$$

В той же работе представлены зависимости CBR и модуля упругости, полученные Green and Hall [22], Witczak [23] и Powell et al. [24]:

$$E_y \approx 37,294 \cdot \text{CBR}^{0,71} ; \quad (3)$$

$$\text{CBR} \approx 0,0061 \cdot E_y^{1,408} ; \quad (4)$$

$$E_y \approx 20,684 \cdot \text{CBR}^{0,65}; \quad (5)$$

$$\text{CBR} \approx 0,0095 \cdot E_y^{1,54}; \quad (6)$$

$$E_y \approx 17,616 \cdot \text{CBR}^{0,64}; \quad (7)$$

$$\text{CBR} \approx 0,0113 \cdot E_y^{1,56}. \quad (8)$$

В работе Putri et al. [25] представлена зависимость NAASRA для значений CBR более 5 %:

$$E_y \approx 22,4 \cdot \text{CBR}^{0,5}; \quad (9)$$

$$\text{CBR} \approx 0,21 \cdot E_y^2. \quad (10)$$

В Национальной-исследовательской программе по исследованиям в области транспортных перевозок (Board National Research Council) [26] приведены формулы для перехода между модулем упругости и CBR:

$$E_y \approx 2555 \cdot \text{CBR}^{0,64}; \quad (11)$$

$$\text{CBR} \approx 0,0004 \cdot E_y^{1,56}. \quad (12)$$

Ряд работ [27–32] связывает CBR с физическими параметрами грунтов: максимальной плотностью сухого грунта, оптимальной влажностью, числом пластичности, границей текучести и пр. Однако в них никак не учтено изменение деформируемости грунтов в зависимости от условий испытаний, что даёт очень приближённые значения параметров.

В некоторых исследованиях связывают прочностные параметры с CBR. Хотя это и отражает характер изменения параметров в зависимости от плотности и влажности, но не даёт возможности достоверно перейти к численным значениям деформационных параметров.

Применимость вышеперечисленных зависимостей (1) – (12) для ЗШС не установлена, что требует проверки на практике и оценки достоверности этих зависимостей для данного техногенного грунта.

В статье предпринята попытка частично ликвидировать данный пробел в знаниях и сопоставить результаты определения деформационных параметров механических свойств ЗШС с использованием различного измерительного оборудования [11, 12]. С этой целью собраны и проанализированы имеющиеся зависимости, связывающие деформационные параметры грунтов; выведены новые математические зависимости, связывающие деформационные параметры, определённые в лабораторных и натуральных условиях.

#### Методика испытаний

Определение модулей деформации ЗШС выполняли согласно ГОСТ 12248–2010 на компрессионных приборах КПр-1М. Образцы изготавливали с помощью большого прибора стандартного уплотнения, варьируя степень уплотнения числом ударов груза этого прибора. Влажность изменяли путём увлажнения сформированного массива заданной плотности.

Зависимость модуля упругости ЗШС от влажности и степени уплотнения определяли по методике рычажного пресса, изложенной в ВСН 29-76.

Уплотнение образца в форме осуществляли с помощью гири от большого прибора стандартного уплотнения. В связи с разницей в диаметрах формы и гири ЗШС уплотняли послойно, перемещая штамп по схеме, применяемой в тесте «А» метода Проктора. В качестве нагружающего устройства использовали универсальную машину AL-7000 LA10, позволяющую прикладывать ступенчатую статическую нагрузку к деформируемому образцу. Нагрузку передавали посредством штампа диаметром 3,56 см, площадью 10 см<sup>2</sup>.

Испытания на трёхосное сжатие ЗШС проводили по методике ГОСТ 12248–2010. Изготовление образцов выполняли путём формовки монолита грунта в большом приборе стандартного уплотнения и последующей забивки гильзы в массив. Эти испытания проводили по консолидированно-дренированной схеме в стабилометре типа «А» при боковом давлении 100 кПа. Ступени вертикального нагружения и время стабилизации деформаций выбирали как для пылеватых песков в соответствии с ГОСТ 12248–2010.

Для получения численного значения Калифорнийского числа несущей способности (CBR) определяли давление, необходимое для вдавливания плунжера на 0,1 дюйма (2,5 мм). После этого полученное давление делили на давление, требующееся для вдавливания на ту же глубину в слой мелкого щебня. К сожалению, в РФ метод CBR не отражён ни в одном нормативном документе, однако он является основополагающим параметром в иностранной практике строительства, научной деятельности и регламентируется рядом иностранных документов.

Порядок проведения CBR теста описан в ASTM Standards D1883-05 (для приготовленных в лаборатории образцов). Для определения Калифорнийского числа несущей способности нами использовалась специальная стальная форма диаметром 152,4 мм и высотой 150 мм, цилиндрический плунжер диаметром 50 мм и универсальная машина AL-7000 LA10.

Контроль плотности и влажности во всех опытах осуществляли взвешиванием формы, заполненной грунтом, и отбором проб для определения влажности по ГОСТ 5180. Процесс проведения испытаний представлен на рис. 1.



Рис. 1. Экспериментальные исследования параметров ЗШС:

а – в компрессионных приборах; б – по методике рычажного пресса; в – в приборе трёхосного сжатия комплекса АСИС; г – по определению CBR

Для оценки модуля упругости в натуральных условиях был построен опытный участок автомобильной дороги с земляным полотном из ЗШС. Конструкция земляного полотна представляет собой насыпь высотой 1,20 м. На опытном участке проводилось два цикла испытаний: на этапе строительства участка, до устройства дорожной одежды и спустя пять лет со времени сооружения. Кроме того, проводились испытания в экспериментальном лотке из железобетона размером 6,0×2,0×1,0 м, заполненном золошлаковой смесью.

Первый цикл испытаний проводили в 2010 г. по методике Э.В. Костерина. Измерение модуля упругости выполняли путём установки жёсткого штампа на поверхности земляного полотна в трёх точках участка. Для испытаний применялся жёсткий металлический штамп диаметром 0,33 м. Нагрузка передавалась посредством гидравлического цилиндра с максимальным усилием 40 кН, который упирался в подрессоренную часть грузового автомобиля. Нагрузку прикладывали ступенями по 0,05 МПа до достижения максимального расчётного значения 0,3 МПа.

Второй цикл испытаний выполняли по методике ОДМ 218.5.007–2016. Испытания проводили в четырёх точках земляного полотна. Перед испытаниями были сделаны вырубki в покрытии и основании дорожной одежды. Для второго цикла штамповых испытаний использовался жёсткий пресс-штамп ПШ-050С диаметром 0,33 м, нагружаемый при помощи гидравлического цилиндра с максимальным усилием 50 кН.

Пресс-штамп также упирал в подрессоренную часть загруженного автомобиля. Индикаторы часового типа ИЧ-10 крепили к стальной балке, не допускающей перемещений под действием ветра, нагрузок и случайных прикосновений к ней. Нагрузку на штамп прикладывали ступенями, как указано в ОДМ. Контроль нагрузки вели с помощью электронного динамометра ДЭП/3-1Д-50С-2. Дополнительное увлажнение ЗШС осуществляли посредством подачи воды через шланг в лунку (рис. 2).



Рис. 2. Проведение испытаний в лотке и на земляном полотне из ЗШС:

*а* – первый цикл штамповых испытаний; *б* – испытания в лотке; *в* – увлажнение насыпи опытного участка из ЗШС; *г* – размещение пресс-штампа в лунке; *д* – установка для испытаний под грузовым автомобилем

Испытания в экспериментальной лотке проводились аналогично второму циклу штамповых испытаний на опытном участке. Только для крепления пресса-штампа и размещения датчиков часового типа использовали имеющуюся в лотке анкерную систему. ЗШС в лотке также дополнительно увлажняли и проводили повторные испытания по вышеуказанной методике. Контроль полученной влажности ЗШС проводили по ГОСТ 5180 путём отбора проб после испытаний. Отбор проб осуществляли вертикальным бурением земляного полотна для получения образцов с глубины 0,40 и 0,80 м. Для каждой лунки отбирали не менее 9 образцов ЗШС на влажность.

### Результаты исследований

Результаты исследований, полученные в ходе испытаний, приведены на рис. 3 и 4.

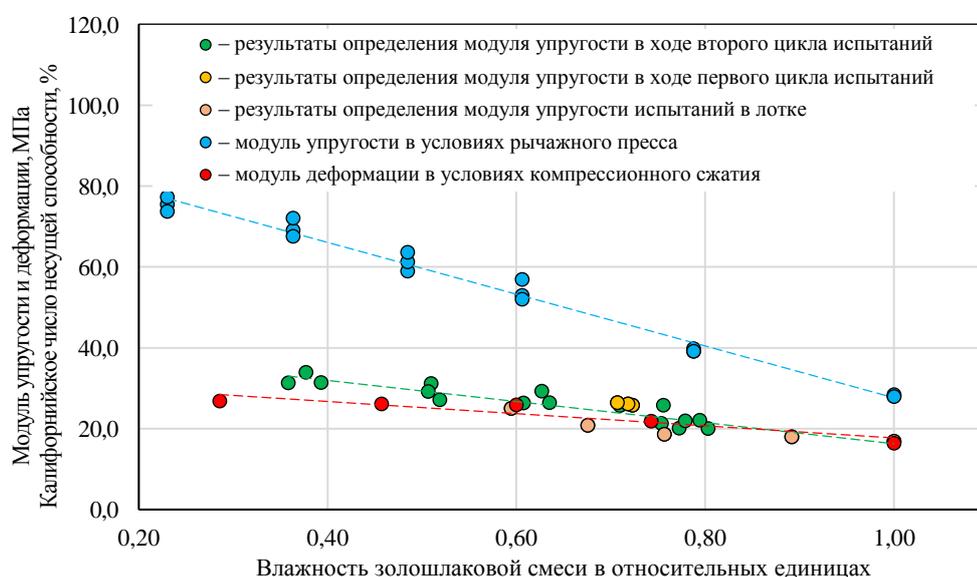


Рис. 3. Зависимость модулей от методики испытаний и влажности ЗШС

Из представленных данных следует, что результаты испытаний, полученные в лотке и на опытном участке, не имеют существенных отличий. Это указывает на то, что сжимаемая зона при использовании пресс-штампа диаметром 0,33 м меньше, чем глубина массива ЗШС, сформированного в экспериментальной лотке (0,80 м). Поэтому зависимости, полученные в обоих циклах натуральных и лотковых испытаний, рассматриваются в комплексе.

Полученные зависимости имеют высокую точность (ошибка аппроксимации для линий наибольшего приближения разных экспериментов составляет от 0,2 до 3,5 %).

Анализ формул (1) – (12) и зависимостей, приведённый в работах [26–30], показывает, что представленные математические модели непригодны при СВР свыше 10 %. Это свидетельствует о неприменимости этих моделей для прогно-

зирования механических свойств ЗШС в большом диапазоне плотности-влажности материала. Выход CBR за порог в 10 % для ЗШС также подтверждается опытами Pandian, Martin и Toth [16–18].

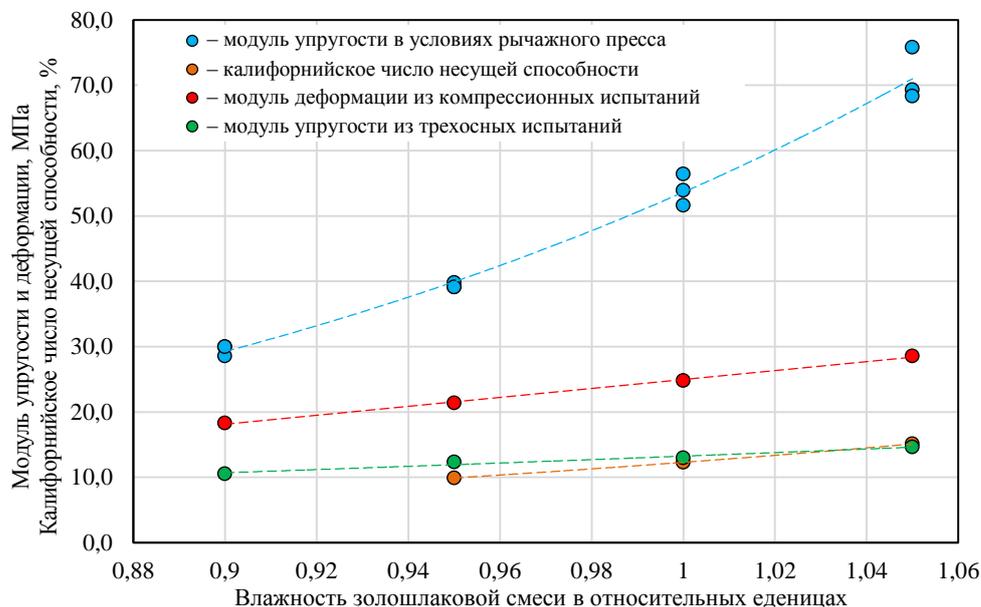


Рис. 4. Зависимость модулей упругости, деформации и CBR от степени уплотнения ЗШС и методики испытаний

Нелинейный характер некоторых зависимостей на рис. 3 и 4 предполагает нелинейную математическую зависимость между указанными выше параметрами. На основании этого были критически проанализированы уравнения Green and Hall, Witzzaki, Powell et al. Анализ показал непригодность этих уравнений, связывающих модуль упругости и калифорнийское число несущей способности, для ЗШС. Ошибки в определении деформационных параметров ЗШС по этим уравнениям достигали 10-кратного значения.

Сопоставление результатов испытаний в лотке и на опытном участке с результатами, полученными по методике рычажного пресса, позволило вывести зависимости, достоверно связывающие эти параметры:

$$E_{\text{нат}} = 1,167 \cdot E_{\text{лаб}}^{0,794}; \quad (13)$$

$$E_{\text{лаб}} = 0,822 \cdot E_{\text{нат}}^{1,26}; \quad (14)$$

где  $E_{\text{нат}}$  – результаты определения модуля упругости по методу штамповых испытаний, МПа;  $E_{\text{лаб}}$  – результаты определения модуля упругости по методу рычажного пресса, МПа.

Аналогичным образом выявлены зависимости, связывающие модуль деформации ЗШС, полученный в условиях компрессионного сжатия и при испытаниях по методике рычажного пресса:

$$E_{\text{лаб}} = 0,093 \cdot E_{\text{комп}}^{1,99} ; \quad (15)$$

$$E_{\text{комп}} = 3,29 \cdot E_{\text{лаб}}^{0,503} , \quad (16)$$

где  $E_{\text{комп}}$  – результаты определения модуля деформации по методу компрессионного сжатия, МПа.

На основе сопоставления результатов испытаний получены уравнения, связывающие компрессионный модуль деформации ЗШС и модуль упругости при штамповых испытаниях

$$E_{\text{комп}} = 2,955 \cdot E_{\text{нат}}^{0,636} ; \quad (17)$$

$$E_{\text{нат}} = 0,213 \cdot E_{\text{комп}}^{1,53} . \quad (18)$$

Результаты определения компрессионных модулей деформации, модулей упругости на рычажном прессе, секущих модулей упругости и CBR в зависимости от плотности ЗШС, приведённые на рис. 4, позволили вывести аналогичные зависимости для модулей упругости, полученные в условиях трёхосного сжатия и на рычажном прессе, компрессионного модуля упругости и CBR.

Связь компрессионных модулей деформации с секущим модулем упругости и Калифорнийским числом несущей способности:

$$E_{\text{сек}} = 1,4 \cdot E_{\text{комп}}^{0,7} ; \quad (19)$$

$$\text{CBR} = 0,117 \cdot E_{\text{комп}}^{1,45} , \quad (20)$$

где  $E_{\text{сек}}$  – секущий модуль упругости, полученный в результате трёхосных испытаний, МПа; CBR – калифорнийское число несущей способности, %.

Подставляя зависимости (16), (17) в формулы (19), (20), можно выразить секущий модуль упругости и Калифорнийское число несущей способности через модуль упругости, определённый по методике рычажного пресса, и штамповый модуль упругости:

$$E_{\text{сек}} = 3,24 \cdot E_{\text{лаб}}^{0,353} ; \quad (21)$$

$$\text{CBR} = 0,67 \cdot E_{\text{лаб}}^{0,73} ; \quad (22)$$

$$E_{\text{сек}} = 2,99 \cdot E_{\text{нат}}^{0,445} ; \quad (23)$$

$$\text{CBR} = 0,57 \cdot E_{\text{нат}}^{0,922} . \quad (24)$$

Обратные зависимости между параметрами можно выразить через уже имеющиеся уравнения.

Малая ошибка аппроксимаций, полученных нами, и опытных данных позволяет отказаться от концепции поправочных коэффициентов, поскольку их введение существенно снижает универсальность решения и вносит большие ошибки аппроксимации. Работы, посвящённые определению параметров ЗШС [8–10, 15–17], не содержат информации о связи деформационных параметров и не могут дать информации об адекватности предложенных моделей.

Следует учитывать, что зависимости (13) – (24) выведены для мелкозернистых золошлаковых смесей, получаемых на теплоэлектростанциях с сухим шлакоудалением. Поэтому для прогнозирования механических свойств прочих золошлаковых материалов (например, с жидким шлакоудалением) могут потребоваться иные зависимости.

Полученные зависимости позволяют не только проводить геотехнические расчёты, связывая параметры между собой, но и интерпретировать результаты иностранных исследований и сравнивать их с российскими исследованиями.

### Заключение

По результатам исследований сделаны следующие краткие выводы.

1. Результаты штамповых испытаний ЗШС на опытном участке и в экспериментальном лотке глубиной более двух диаметров штампа дают практически идентичные результаты.

2. Связь между различными деформационными параметрами для ЗШС имеет нелинейный характер.

3. Известные зависимости между деформационными параметрами природных грунтов непригодны для мелкозернистых золошлаковых смесей тепловых электростанций.

4. Получены математические зависимости, связывающие: компрессионный модуль деформации; модуль упругости, определённый по методике рычажного пресса; модуль упругости, определённый по методике штамповых испытаний; секущий модуль упругости и Калифорнийское число несущей способности для мелкозернистой ЗШС с сухим шлакоудалением.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Аньшаков А.С., Гаусс К.С., Волокитин О.Г., Шеховцов В.В. Современные технологии создания и обработки строительных материалов с использованием энергии термической плазмы // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2018. № 4. С. 135–144. Условия доступа : <https://doi.org/10.31675/1607-1859-2018-204-135-144>
2. Косач А.Ф., Ращупкина М.А., Кузнецова И.Н., Дарулис М.А. Влияние ультрадисперсного наполнителя на основе золы гидроудаления на свойства цементного камня // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2019. № 1. С. 150–158. Условия доступа : <https://doi.org/10.31675/1607-1859-2019-21-1-150-158>
3. Путилин Е.И., Цветков В.С. Применение зол уноса и золошлаковых смесей при строительстве автомобильных дорог. М.: Изд-во Союздорнии, 2003. 58 с.
4. *User Guidelines for Waste and Byproduct Materials in Pavement Construction*. URL : <https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/pavements/97148/019.cfm> (дата обращения: 19.01.2019).
5. Collins R.J., Srivastava L. Use of Ash in Highway Construction: Delaware Demonstration Project, Final Report No. GS-6540. Palo Alto: Electric Power Research Institute, 1989. 126 p.
6. Brendel G.F., Glogowski P.E. Ash Utilization in Highways: Pennsylvania Demonstration Project, Report No. GS-6431. Palo Alto: Electric Power Research Institute, 1989. 132 p.
7. Haleema A., Luthrab S., Mannana B., Khurana S., Kumarc S. Critical factors for the successful usage of fly ash in roads & bridges and embankments: Analyzing Indian perspective // Resources Policy. 2016. V. 49. P. 334–348.
8. Hadbaatar A., Mashkin N.A., Stenina N.G. Study of Ash-Slag Wastes of Electric Power Plants of Mongolia Applied to their Utilization in Road Construction // Procedia Engineering. 2016. V. 150. P. 1558–1562.
9. Pal S.K., Ghosh A. Shear strength behavior of Indian flu ashes // Indian Geotechnical Conference Geotechnics in Infrastructure Development (GEOTIDE). 2009. V. 1. P. 18–22.
10. Иванов Е.В. Обоснование применения золошлаковых смесей для строительства земляного полотна с учетом водно-теплового режима: дис. ... канд. техн. наук. Омск, 2015. 165 с.
11. Sirotyuk V.V., Lunev A.A. Strength and deformation characteristics of ash and slag mixture // Magazine of Civil Engineering. 2017. № 6. P. 3–16. DOI: 10.18720/MCE.74.1.

12. Лунёв А.А., Сиротюк В.В. Влияние влажности на несущую способность земляного полотна из золошлаковых смесей // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2017. № 12. С. 14–20.
13. Болдырев Г.Г., Мельников А.В., Новичков А.Г. Интерпретация результатов лабораторных испытаний с целью определения деформационных характеристик грунтов // Инженерные изыскания. 2014. № 5–6. С. 98–108.
14. Казанцев В.С. Определение поправочных коэффициентов к компрессионному модулю деформации пылевато-глинистых элювиальных, неогеновых и палеогеновых грунтов континентального генезиса Челябинской области // Вестник ЮУрГУ. 2017. № 14. С. 38–43.
15. Toth P.S., Chan H.T., Cragg C.B. Coal ash as structural fill with special reference to Ontario experience // Canadian Geotechnical Journal. 1987. V. 25. P. 694–704.
16. Pandian N.S. Fly ash characterization with reference to geotechnical application // Journal Indian Institute of Science. 2004. V. 84. P. 189–216.
17. Martin J.P., Collins R.A., Browning J.S., Biehl F.J. Properties and use of fly ashes for embankments // Energy. 1990. V. 116 (2). P. 71–86.
18. El-kasaby E.A. Estimation of Guide Values for the Modulus of Elasticity of Soil // Bulletin of Faculty of Engineering. 1991. V. 19. № 1. P. 1–7.
19. Семенова Т.В., Долгих Г.В., Полугородник Б.Н. Применение калифорнийского числа несущей способности и динамического конусного пенетрометра для оценки качества уплотнения грунта // Вестник СибАДИ. 2013. № 1. С. 59–66.
20. Heukelom W., Foster C.R. Dynamic Testing of Pavements // Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE. Vol. 86. 1960. No. SM1. Pp. 1-28.
21. Heukelom W., Klomp A.J.G. Dynamic Testing as a Means of Controlling Pavements During and After Construction // 1st International Conference on Structural Design of Asphalt Pavements. 1962. V. 203. P. 495–510.
22. Green J.L., Hall J.W. Nondestructive Vibratory Testing of Airport Pavements Volume I: Experimental Test Results and Development of Evaluation Methodology and Procedure // Federal Aviation Administration Report No. FAA-RD-73-205-1. Washington: NTIS, 1975. P 214.
23. Witczak M.W., Qi X., Mirza M.W. Use of Nonlinear Subgrade Modulus in AASHTO Design Procedure // Journal of Transportation Engineering. 1995. V. 121. № 3. P. 273–282.
24. Powell W.D., Potter J.F., Mayhew H.C., Nunn M.E. The Structural Design of Bituminous Roads // Transport and Road Research Laboratory, TRRL Laboratory Report 1132. Crowthorne: Department of Transport, 1984. P. 62. URL : <https://trl.co.uk/sites/default/files/LR1132.pdf> (дата обращения: 19.01.2019).
25. Putri E.E., Kameswara N.S.V.R., Mannan M.A. Evaluation of Modulus of Elasticity and Modulus of Subgrade Reaction of Soils Using CBR Test // Journal of Civil Engineering Research. 2012. V. 2. P. 34–40.
26. Guide for mechanistic-empirical design of new and rehabilitated pavement structures. Final document appendix CC-1: correlation of CBR values with soil index properties. Illinois: Ara, Inc, 2001. P 204. URL : [http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/archive/mepdg/2appendices\\_CC.pdf](http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/archive/mepdg/2appendices_CC.pdf) (дата обращения: 19.01.2019).
27. Jayamali K.V.S.D., Nawagamuwa U.P. Empirical Correlations Between CBR and Index Properties for Sri Lankan Soils // Conference: International conference on Geotechnical Engineering. 2015. V. 1. P. 189–192.
28. John A., Josen A., Venia J., Chandran K.B., Chacko A. Correlation Of CBR Value With Properties Of Red Soil // International Research Journal of Engineering and Technology. 2017. V. 4. I. 3. P. 2042–2044.
29. Rani S., Nagaraj. Prediction of CBR Value with Soil Index Properties; Case Study on Yadadri Region // International Journal of Latest Engineering and Management Research. 2017. V. 2. I. 7. P. 09–12.
30. Kumar K.S.P., Nanduri R.K., Kumar N.D. Validation of Predicted California Bearing Ratio Values from Different Correlations // American Journal of Engineering Research. 2014. V. 3. I. 8. P. 344–352.
31. Rakaraddi P.G., Gomarsi V. Establishing relationship between CBR with different soil properties // International Journal of Research in Engineering and Technology. 2015. V. 4. I. 2. P. 182–188.
32. Yashas. S.R., Harish S.N., Muralidhara H.R. Effect of California Bearing Ratio on the Properties of Soil // American Journal of Engineering Research. 2016. V. 5. I. 4. P. 28–37.

## REFERENCES

1. Anshakov A.A., Gauss K.S., Volokitin O.G., Shekhovtsov V.V. Sovremennye tekhnologii sozdaniya i obrabotki stroitel'nykh materialov s ispol'zovaniem energii termicheskoi plazmy [Modern production and treatment technologies using thermal PLASMA energy]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture*. 2018. V. 20. No. 4. Pp. 135–144. (rus)
2. Kosach A.F., Rashchupkina M.A., Darulis M.A., Gorchakov V.G. Issledovanie vliyaniya ul'tradispersnogo napolnitelya na osnove zoly gidroudaleniya na svoistva tsementnogo kamnya [Cement brick properties modified by ultrafine ash-based additive]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture*. 2019. V. 21. No. 1. Pp. 150–158. (rus)
3. Putilin E.I., Tsvetkov V.C. Primenenie zol unosa i zoloshlakovykh smesei pri stroitel'stve avtomobil'nykh dorog [The use of fly ash and bottom-ash mixtures in automobile road construction]. Moscow: Soyuzdormii, 2003. 58 p. (rus)
4. *User guidelines for waste and byproduct materials in pavement construction*. Available: [www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/pavements/97148/019.cfm](http://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/pavements/97148/019.cfm) (accessed January 19, 2019).
5. Collins R.J., Srivastava L. Use of ash in highway construction: Delaware demonstration project, Final Report N GS-6540. Palo Alto: Electric Power Research Institute, 1989. 126 p.
6. Brendel G.F., Glogowski P.E. Ash utilization in highways: Pennsylvania demonstration project, Report N GS-6431. Palo Alto: Electric Power Research Institute, 1989. 132 p.
7. Haleema A., Luthrab S., Mannana B., Khurana S., Kumarc S. Critical factors for the successful usage of fly ash in roads and bridges and embankments: analyzing Indian perspective, Resources Policy. 2016. V. 49. Pp. 334–348.
8. Hadbaatar A., Mashkin N.A., Stenina N.G. Study of ash-slag wastes of electric power plants of Mongolia applied to their utilization in road construction. *Procedia Engineering*. 2016. V. 150. Pp. 1558–1562.
9. Pal S.K., Ghosh A. Shear strength behavior of Indian flu ashes. *Indian Geotechnical Conference Geotechnics in Infrastructure Development (GEO-TIDE)*. 2009. V. 1. Pp. 18–22.
10. Ivanov E.V. Obosnovanie primeneniya zoloshlakovykh smesei dlya stroitel'stva zemlyanogo polotna s uchedom vodno-teplovogo rezhima [Rationale for the use of bottom-ash mixtures for earth-bed construction in water-thermal regime]. Omsk: SibADI, 2015. 165 p.
11. Sirotyuk V.V., Lunev A.A. Strength and deformation characteristics of ash and slag mixture. *Magazine of Civil Engineering*. 2017. No. 6. Pp. 3–16. doi: 10.18720/MCE.74.1.
12. Lunev A.A., Sirotyuk V.V. Vliyanie vlazhnosti na nesushchuyu sposobnost' zemlyanogo polotna iz zoloshlakovykh smesei [Effect of humidity on bearing capacity of bottom-ash mixtures]. *Vestnik BGTU im. V.G. Shukhova*. 2017. V. 12. Pp. 14–20. (rus)
13. Boldyrev G.G., Mel'nikov A.V., Novichkov A.G. Interpretatsiya rezul'tatov laboratornykh ispytaniy s tsel'yu opredeleniya deformatsionnykh kharakteristik gruntov [Interpretation of field test results to determine soil strength characteristics]. *Inzhenernye izyskaniya*. 2014. V. 5–6. Pp. 98–108. (rus)
14. Kazantsev V.S. Opredelenie popravochnykh koeffitsientov k kompressionnomu modulyu deformatsii pylevato-glinistykh elyuvial'nykh, neogenovykh i paleogenovykh gruntov kontinental'nogo genezisa chelyabinskoi oblasti [Correction factors for compression modulus of deformation of silty-clayed eluvial, Neogene and paleogene soils of continental genesis in the Chelyabinsk region]. *Vestnik YuUrGU*. 2017. V. 14. Pp. 38–43. (rus)
15. Toth P.S., Chan H.T., Cragg C.B. Coal ash as structural fill with special reference to Ontario experience. *Canadian Geotechnical Journal*. 1987. V. 25 Pp. 694–704.
16. Pandian N.S. Fly ash characterization with reference to geotechnical application. *Journal Indian Institute of Science*. 2004. V. 84. Pp. 189–216.
17. Martin J.P., Collins R.A., Browning J.S., Biehl F.J. Properties and use of fly ashes for embankments. *Energy*. 1990. V. 116. Pp. 71–86.
18. El-kasaby E.A. Estimation of guide values for the modulus of elasticity of soil. *Bulletin of Faculty of Engineering*. 1991. V. 19.No. 1. Pp. 1–7.
19. Semenova T.V., Dolgikh G.V., Polugorodnik B.N. Primenenie kaliforniiskogo chisla nesushchei sposobnosti i dinamicheskogo konusnogo penetrometra dlya otsenki kachestva up-

- lotneniya grunta [Californian number of bearing capacity and dynamic cone penetrometer in assessment of soil compaction quality]. *Vestnik SibADI*. 2013. V. 1. Pp. 59–66. (rus)
20. Heukelom W., Foster C.R. Dynamic testing of pavements. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE*. 1960. V. 86. No. SM1. Pp. 1–28.
  21. Heukelom W., Klomp A.J.G. Dynamic testing as a means of controlling pavements during and after construction. *Proc. 1st Int. Conf. on Structural Design of Asphalt Pavements*. 1962. V. 203. Pp. 495–510.
  22. Green J.L., Hall J.W. Nondestructive vibratory testing of airport pavements. Vol. I: Experimental test results and development of evaluation methodology and procedure. Federal Aviation Administration Report N FAA-RD-73-205-1. Washington: NTIS, 1975. P. 214.
  23. Wiczak M.W., Qi X., Mirza M.W. Use of nonlinear subgrade modulus in AASHTO design procedure. *Journal of Transportation Engineering*. 1995. V. 121. No. 3. Pp. 273–282.
  24. Powell W.D., Potter J.F., Mayhew H.C., Nunn M.E. The structural design of bituminous roads. Transport and Road Research Laboratory, TRRL Laboratory Report 1132. Crowthorne: Department of Transport, 1984. P. 62. Available: <https://trl.co.uk/sites/default/files/LR1132.pdf> (accessed January 19, 2019).
  25. Putri E.E., Kameswara N.S.V.R., Mannan M.A. Evaluation of Modulus of elasticity and modulus of subgrade reaction of soils using CBR test. *Journal of Civil Engineering Research*. 2012. V. 2. Pp. 34–40.
  26. *Guide for mechanistic-empirical design of new and rehabilitated pavement structures*. Final document appendix CC-1: correlation of CBR values with soil index properties. Illinois: Ara, Inc, 2001. P. 204. Available: [http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/archive/mepdg/2appendices\\_CC.pdf](http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/archive/mepdg/2appendices_CC.pdf) (accessed January 19, 2019).
  27. Jayamali K.V.S.D., Nawagamuwa U.P. Empirical correlations between CBR and index properties for Sri Lankan soils. *Proc. Int. Sci. Conf. on Geotechnical Engineering*. 2015. V. 1. Pp. 189–192.
  28. John A., Josen A., Venia J., Chandran K.B., Chacko A. Correlation of CBR value with properties of red soil. *International Research Journal of Engineering and Technology*. 2017. V. 4. I. 3. Pp. 2042–2044.
  29. Rani S., Nagaraj. Prediction of CBR value with soil index properties; case study on Yadadri Region. *International Journal of Latest Engineering and Management Research*. 2017. V. 2. I. 7. Pp. 09–12.
  30. Kumar K.S.P., Nanduri R.K., Kumar N.D. Validation of predicted California bearing ratio values from different correlations. *American Journal of Engineering Research*. 2014. V. 3. I. 8. Pp. 344–352.
  31. Rakaraddi P.G., Gomarsi V. Establishing relationship between CBR with different soil properties. *International Journal of Research in Engineering and Technology*. 2015. V. 4. I. 2. Pp. 182–188.
  32. Yashas. S. R., Harish S.N., Muralidhara H.R. Effect of California bearing ratio on the properties of soil. *American Journal of Engineering Research*. 2016. V. 5. I. 4. Pp. 28–37.

#### Сведения об авторах

Лунёв Александр Александрович, аспирант, Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ), 644065, г. Омск, пр. Мира, 5, [lunev.al.al@gmail.com](mailto:lunev.al.al@gmail.com)

Сиротюк Виктор Владимирович, докт. техн. наук, профессор, Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ), 644065, г. Омск, пр. Мира, 5, [sirvv@yandex.ru](mailto:sirvv@yandex.ru)

#### Authors Details

Aleksandr A. Lunev, Research Assistant, Siberian State Automobile and Highway University, 5, Mira Ave., 644080, Omsk, Russia, [lunev.al.al@gmail.com](mailto:lunev.al.al@gmail.com)

Viktor V. Sirotyuk, DSc, Professor, Siberian State Automobile and Highway University, 5, Mira Ave., 644080, Omsk, Russia, [sirvv@yandex.ru](mailto:sirvv@yandex.ru)