



## CONSTRUCTION AND GEOTECHNICS

Т. 12, № 2, 2021

<http://vestnik.pstu.ru/arhit/about/inf/>



DOI: 10.15593/2224-9826/2021.2.03

УДК 625.7/8, 625.073, 624.131.43

### НЕСУЩАЯ СПОСОБНОСТЬ ИНЕРТНЫХ ЗОЛОШЛАКОВЫХ СМЕСЕЙ РАЗЛИЧНОГО ГЕНЕЗИСА

**А.А. Лунёв, А.В. Явинский**

Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет, Омск, Россия

#### О СТАТЬЕ

Получена: 10 февраля 2021  
Принята: 25 мая 2021  
Опубликована: 13 июля 2021

#### Ключевые слова:

строительство, земляное полотно, золошлаковые смеси, несущая способность.

#### АННОТАЦИЯ

Для изучения несущей способности золошлаковых смесей (ЗШС) были отобраны образцы с отвалов ряда электростанций Российской Федерации: Омской ТЭЦ-4, Новочеркасской ГРЭС, Серовской ГРЭС, Апатитской ТЭЦ, производящих золошлаковые смеси различного генезиса. Все изученные материалы относятся к классу F по ASTM C-618-12, т.е. инертным материалам.

На первом этапе исследования определены максимальная плотность сухого грунта и оптимальная влажность по методу Проктора (форма типа Б, и уплотняющий метод типа А), результаты сопоставлялись с результатами определения этих же параметров по методу СоюзДорНИИ (с использованием большого прибора стандартного уплотнения). На втором этапе было определено калифорнийское число несущей способности (CBR) всех образцов ЗШС в не насыщенном водой состоянии при различной плотности (соответствующей уплотнению 7, 21 и 56 ударами уплотняющего молота по слою ЗШС в форме Проктора). На третьем этапе исследования определялись модули деформации ЗШС на образцах с оптимальной влажностью и максимальной плотностью сухого грунта по методу компрессионного сжатия образцов нарушенной структуры, изготовленных с применением большого прибора стандартного уплотнения конструкции СоюзДорНИИ.

По окончании исследования проанализированы результаты и сделаны выводы о линейной связи параметров (оптимальной влажности и максимальной плотности скелета грунта), определенных по методу Проктора и СоюзДорНИИ, наличии корреляции между CBR и коэффициентом уплотнения ЗШС, а также отсутствии статистически значимой корреляции ( $R^2 < 10\%$ ) между CBR и модулем упругости при изучении ЗШС различного генезиса.

© ПНИПУ

© Лунёв Александр Александрович – кандидат технических наук, e-mail: [lunev.al.al@gmail.com](mailto:lunev.al.al@gmail.com), ORCID 0000-0001-5857-1891.  
Явинский Александр Викторович – магистрант, ORCID 0000-0003-1717-9302.

Aleksandr A. Lunev – Ph.D. in Technical Science, e-mail: [lunev.al.al@gmail.com](mailto:lunev.al.al@gmail.com), ORCID 0000-0001-5857-1891.  
Aleksandr A. Iavinskii – Master Student, ORCID 0000-0003-1717-9302.

## CALIFORNIA BEARING RATIO OF CLASS F POND ASH OF VARIOUS GENESIS

A.A. Lunev, A.V. Iavinskii

Siberian State Automobile and Highway University, Omsk, Russian Federation

---

### ARTICLE INFO

Received: 10 February 2021  
Accepted: 25 May 2021  
Published: 13 July 2021

#### Keywords:

construction, roadbed, pond ash, bearing capacity.

### ABSTRACT

To study the bearing capacity of pond ash, samples were taken from dumps of a number of power plants in the Russian Federation: Omsk TPP-4, Novocherkasskaya TPP, Serovskaya TPP, Apatitskaya TPP, producing pond of various genesis. All studied materials classified to class F according to ASTM C-618-12.

At the first stage of the study, the maximum dry density of soil and the optimum moisture content were determined by the Proctor method (type B mold and type A compaction hammer), the results of which were compared with the results of determining the same parameters by the SoyuzDorNII method (using a large standard compaction device).

At the second stage, the Californian bearing ratio (CBR) of all samples of pond ash in a water-unsaturated state at different densities was determined (corresponding to compaction 7, 21 and 56 by blows of a compaction hammer on a layer of pond ash in the a Proctor mold).

At the third stage of the study, the deformation modulus of pond ash were determined on samples with optimal moisture content and maximum dry density of soil by the method of oedometer test. Samples were prepared with the using a large standard compaction device of the SoyuzDorNII design.

At the end of the study, the results were analyzed and conclusions were drawn about the linear relationship of the parameters (optimal moisture content and maximum dry density) determined by the method of Proctor and SoyuzDorNII, the presence of a correlation between CBR and the compaction coefficient of the PA, and the absence of a statistically significant correlation ( $R^2 < 10\%$ ) between CBR and deformation modulus in the study of PA of various genesis.

© PNRPU

---

## Введение

Ежегодно суммарный объем хранящихся на золотвалах РФ золошлаков увеличивается пропорционально росту потребности в энергетических ресурсах. Особенности складирования гидратированных золошлаковых смесей (ЗШС) в отвалах обуславливают перспективность их использования путем прямой многотоннажной утилизации.

Большая часть направлений прямого использования золошлаковых материалов требует оценки их свойств и степени влияния на них прочих факторов. Так, например, для золошлаковых смесей гидрозолоудаления наибольшую полезность имеют исследования, направленные на изучение их механических характеристик и факторов, влияющих на их изменение.

При использовании золошлаков в земляном полотне автомобильных дорог и вертикальных планировок территории особую роль играют механические характеристики этих материалов.

Первые системные исследования механических характеристик золы-уноса, как материала для строительства насыпей, были выполнены коллективами авторов А.М. DiGioia и W.L. Nuzzo [1] и Gray и Lin [2]. Gray и Lin, B. Indraratna и др. [3] подобно изучали гранулометрический и минералогический составы, пуццолановые свойства, уплотняемость и прочностные характеристики активных зол-уноса, отобранных с электростанции Mae Moh в северном Тайланде. Результаты этих исследований подтвердили опыты Singh and Panda [4], Muhardy [5] и Marto [6], в работе которых отмечены те же особенности, характерные для золошлаковых материалов.

Оценку прочностных характеристик в приборах трехосного сжатия проводили S.K. Pal и A. Ghost [7], Jakka и др. [8]. Результаты частичных геотехнических испытаний представлены в работах Kumar, Mohanty [9,10]. J.P. Martin и др. [11], опубликовано исследование инертных зол-уноса, отобранных на трех станциях (Delaware Valley: Pensilvania, New Jersey, Delaware), для оценки их применения в дорожных насыпях.

N.S. Pandian [12] были проанализированы прочностные характеристики отвальной ЗШС и топливного шлака. А работы S.K. Tiwari [13], В. Kim и пр. [14] и Gimhan и пр. [15] посвящены в значительной мере оценке влияния гранулометрического состава зошлакошляковых смесей (а также комбинаций золы-уноса и шлака) на прочностные характеристики и несущую способность. В работе Muhunthan [16] также проводился анализ влияния гранулометрического состава и структуры ЗШС от сжигания твердых отходов.

Специалистами из ТГАСУ М.В. Балюра и В.В. Фурсовым проанализированы физико-механические характеристики ЗШС из отвалов Томской ГРЭС-2, Северской ТЭЦ, Кемеровской ТЭЦ, Новокемеровской ТЭЦ [17,18]. Полезная информация о механических свойствах ЗШС в зависимости от влажности и пористости этого материала приведена в работе П.Ю. Дьяконова [19].

Значительные исследования ЗШС как техногенного грунта проведены в СибАДИ Е.В. Ивановым и В.В. Сиротюком [20–22]. А позднее эти данные дополнены Г.В. Долгих и другими при оценке CBR [23] гидратированных золошлаков Омской ТЭЦ-4.

Кроме исследований ЗШС в чистом виде экспериментальные исследования слоистых золо-глинистых образцов в условиях трехосного сжатия были выполнены М.А. Khan с соавт. [24], а схожие исследования по смешению природных и техногенных грунтов проведены J. Prabaakar [25]. В этих работах отмечен рост прочностных параметров композита ЗШС и глинистого грунта по сравнению с исходными грунтами.

А.К. Sinha и соавт. [26] рассмотрели особенности расчета осадки насыпи из ЗШС на подтопляемом участке, используя Cone penetration test (CPT) и Standard Penetration Test (SPT). Схожие подходы в своей работе рассматривал Gruchot [27] с целью оценки пригодности лабораторных экспресс-методов оценки механических свойств ЗШС (крыльчатка образца армии США, конусного пенетрометра и портативного пенетрометра) для определения параметров прочности недренированной золы ТЭС.

Результаты, полученные в [26], были применены при оценке устойчивости откосных частей на болотистом участке между Kalindi Colony и Kalindi Kunj в Нью-Дели, Индия. Расчеты устойчивости подтопляемого участка дамбы из ЗШС с применением метода конечных элементов были выполнены R. Ossowski и K. Gwizdala [28] в рамках проекта “DredgDikes”, проводимого в Польше. Для расчетов использовался программный комплекс Plaxis 2D с моделью Кулона – Мора и параметры из [29, 30].

В то же время основными параметрами, которые позволяют оценить несущую способность грунтовых материалов, являются калифорнийское число несущей способности (CBR) и модуль деформации. Согласно материалам [31–36] для природных грунтов эти параметры могут быть связаны с физическими параметрами, изученными в работах [1–25]: максимальной плотностью сухого грунта, оптимальной влажностью, числом пластичности, границей текучести и пр., но не все из них применимы к ЗШС и не установлена форма этих связей на практике.

В современной практике проектирования информация о соотношениях между различными деформационными параметрами механических свойств грунтовых материалов имеет в основном эмпирический характер, выведенный для конкретных видов грунта [37].

В силу эмпирического подхода к проектированию дорожных конструкций в большинстве стран, иностранные специалисты, как правило, работают не со всем спектром деформационных параметров, а ограничиваются только определением CBR – калифорнийского числа несущей способности. Поэтому в литературе в основном связывают между собой CBR, модуль упругости и прочие параметры, определяемые экспресс-методами (OCR, SPT) [26, 27, 38], которые применительно к ЗШС РФ практически не были исследованы.

Так, в работе [39] представлены уравнения для связи CBR и модуля упругости грунтов, выведенные W. Heukelom и C.R. Foster [40], W. Heukelom и A.J.G. Klomp [41], Green and Hall [42], Witzak [43] и Powell et. al. [44]. В работе Putri et al. [45] представлена зависимость *NAASRA* для значений CBR более 5 %. А в Национальной-исследовательской программе по исследованиям в области транспортных перевозок (Board National Research Council) [46] приведены формулы для перехода между модулем упругости и CBR.

Текущий уровень исследований по оценке несущей способности ЗШС в основном базируется на оценке через калифорнийское число несущей способности, а значит, не может быть использован в РФ без установления форм связи между этим параметром и ранее определяемыми в работах [17–22] параметрами, что требует более системного изучения CBR ЗШС РФ и сопоставления с традиционными параметрами, такими как модуль деформации и пр. Кроме того, в исследованных работах стандартное уплотнение ведется по методу Проктора, что не соотносится с проводимыми в РФ испытаниями по методу СоюзДорНИИ, а следовательно, этот аспект также требует анализа и определения закономерностей между результатами, полученными различными методами.

## 1. Методика эксперимента и теоретические подходы

### 1.1. Используемые материалы

Золошлаковые смеси, используемые в исследовании, отбирали на 4 электростанциях Российской Федерации:

– Омская ТЭЦ-4 – АО «ТГК-11» (г. Омск, Омская область, Россия, GPS: 55.130423 N, 73.168744 E). ЗШС получали сжиганием угля Экибастузского угольного бассейна в пылеугольном котле;

– Новочеркасская ГРЭС – ПАО «ОГК-2» (г. Новочеркасск, Донская область, Россия, GPS: 47.393471 N, 40.219859 E). ЗШС получали сжиганием антрацитового штыба Донецкого угольного бассейна в пылеугольном котле;

– Серовская ГРЭС ПАО «ОГК-2» (г. Серов, Свердловская область, Россия, GPS: 59.657878 N, 60.778911 E). ЗШС получали сжиганием угля Экибастузского угольного бассейна в пылеугольном котле;

– Апатитская ТЭЦ ПАО «ТГК-1» (г. Апатиты, Мурманская область, Россия, GPS: 67.597608, N, 33.469558E). ЗШС получали сжиганием угля Кузнецкого/Интинского (зависит от точки) угольного бассейна в пылеугольном котле.

В соответствии с ASTM C-618-12 золошлаковые смеси были классифицированы как относящиеся к классу F с содержанием CaO менее 15 %. Химический анализ был выполнен на электронном микроскопе JEOL-5700 с рентгеновским энергодисперсионным спектрометром JED-2300 (табл. 1).

Плотность частиц грунта определялась по ГОСТ 5180–2015 (аналог ASTM D854-14). Определение зернового состава велось по методике ГОСТ 12536–2014 (аналог ASTM D422) с дополнительными ситами по ASTM E11-09e1. По результатам определения зернового со-

става устанавливалась степень фракционированности и вычислялся коэффициент кривизны (Unified Soil Classification System ASTM D2487-11), что согласуется с требованиями ГОСТ 25100–2020.

Максимальная плотность скелета грунта и оптимальная влажность определялись на большом приборе стандартного уплотнения СоюзДорНИИ в соответствии с ГОСТ 22733–2016 (аналог ASTM D698). Зерновой состав и некоторые физико-механические характеристики образцов исследованных золошлаковых смесей приведены в табл. 2.

Таблица 1

Химический состав образцов золошлаковых смесей (мас. %)

Table 1

Chemical composition of pond ash. Values in % by weight

Источник материала	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	CaO	TiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	MgO	ППП <sup>а</sup>
Омск	24,37	61,50	0,39	3,41	0,49	2,92	0,78	2,53	0,88	0,29	2,44
Новочеркасск	16,20	38,41	0,00	0,62	2,60	2,81	0,82	12,4	0,82	1,53	23,79
Серов	24,08	59,94	0,00	0,09	0,76	1,38	1,18	4,18	0,44	0,11	7,84
Апатиты	20,32	51,86	0,25	0,56	1,80	2,40	1,18	12,05	1,24	1,96	6,38

Примечание: а – потери при прокаливании, определенные при температуре 900 °С

Таблица 2

Зерновой состав и физико-механические характеристики золошлаковых смесей

Table 2

Grain composition and engineering properties of pond ash

Параметр	Источник материала			
	Омск	Новочеркасск	Серов	Апатиты
Истинная плотность, г/см <sup>3</sup>	2,33	2,40	2,14	2,30
Зерновой анализ, мас. %	В соответствии с USCS (ASTM D2487-11)			
Крупные пески (Course sand)	2,3	16,8	0,0	3,9
Средние пески (Medium sand)	6,9	14,1	1,2	2,4
Мелкие пески (Fine sand)	51,5	47,8	2,3	31,5
Пылеватые и глинистые частицы (Silt & clay)	39,3	21,3	96,5	62,2
Степень фракционированности C <sub>u</sub>	3,71	37,5	1,67	20,0
Коэффициент кривизны C <sub>c</sub>	1,78	0,24	1,07	0,14
Число пластичности	–	–	–	–
Оптимальная влажность, %	32,1	17,7	46,1	30,0
Максимальная плотность скелета грунта, г/см <sup>3</sup>	1,23	1,38	1,01	1,21

## 2.2. Методы исследования

### 2.2.1. Максимальная плотность скелета грунта и оптимальная влажность по Проктору

Максимальная плотность скелета грунта и оптимальная влажность золошлаковых смесей определены в соответствии с методикой ПНСТ 324–2019, который является аналогом ASTM D698. Для теста использовали стальную форму типа Б диаметром 150,0 мм и высотой 120 мм, а также уплотняющий молот типа А.

### 2.2.2. Калифорнийское число несущей способности (CBR)

Определение калифорнийского числа несущей способности велось по методике ПНСТ 323–2019, который является аналогом ASTM D1883–16. Образцы для исследования были приготовлены при оптимальной влажности (*unsoaked condition*) и различных степенях уплотнения, соответствующих 7,21 и 56 ударам уплотняющего молота типа А на каждый слой, что примерно соответствует интервалам коэффициента уплотнения от 0,85–1,00.

Для теста использовали стальную форму типа Б диаметром 150,0 мм и высотой 120 мм, цилиндрический плунжер диаметром 50 мм. Для нагружения образцов использовали универсальную машину AL-7000 LA 10, позволяющую задавать требуемую скорость нагружения (1,27 мм/мин) и прилагать нагрузки ступенями не более 44 Н.

### 2.2.3. Модуль деформации

Модуль деформации определялся по методике ГОСТ 12248–2010 (который является аналогом ASTM D 2435-11). Испытания велись на образцах с оптимальной влажностью и максимальной плотностью скелета грунта. Испытания вели в компрессионном одометре автоматизированного комплекса «АСИС». В процессе испытания проводили две ветви нагружения и одну ветвь разгрузки. Вертикальные напряжения на первой ветви нагружения изменяли ступенями 25, 50, 100 и 200 кПа с контролем вертикальных деформаций, после условной их стабилизации на каждом уровне напряжений.

## 3. Результаты

### 3.1. Максимальная плотность скелета грунта и оптимальная влажность по Проктору

Результаты определения максимальной плотности сухого грунта и оптимальной влажности по методу Проктора приведены на рис. 1.

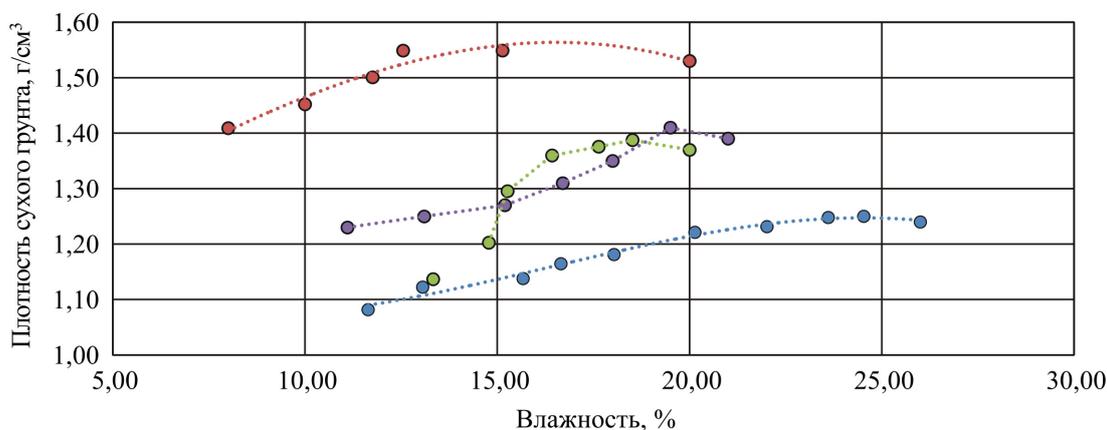


Рис. 1. Графики стандартного уплотнения ЗШС:

● – Новочеркасская ГРЭС; ● – Омская ТЭЦ-4; ● – Апатитская ТЭЦ; ● – Серовская ГРЭС

Fig. 1. Standard compaction diagrams of pond ash:

● – Novocherkasskaya PP; ● – Omsk TPP-4; ● – Apatity TPP; ● – Serovskaya PP

Данные показывают, что максимальная плотность связана с зерновым составом и плотностью частиц грунта, причем чем выше плотность частиц и больше крупность золошлакового материала, тем выше максимальная плотность скелета грунта.

### 3.2. Калифорнийское число несущей способности (CBR)

Значения CBR в зависимости от плотности и типа ЗШС приведены на рис. 2.

Toth с соавт. [47] отмечали, что величина CBR ненасыщенных образцов ЗШС варьируется от 22,0 до 36,4 %, а D. Kumar с соавт. в [9] получали значения CBR от 8,68 до 26,9 % для комбинаций золы-уноса и ЗШС. Это частично подтверждает Pandian [12], которая исследовала CBR отвальных шлаков, золы-уноса и топливного шлака при насыщении их водой и без насыщения. Полученные нами значения CBR сопоставимы с данными [9, 12, 47] для ЗШС другого генезиса при схожей степени уплотнения.

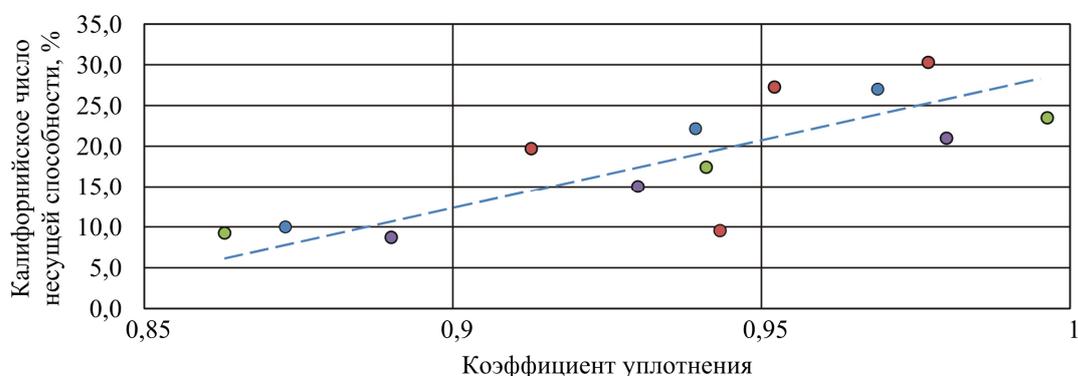


Рис. 2. Зависимость CBR от степени увлажнения:

● – Новочеркасская ГРЭС; ● – Омская ТЭЦ-4; ● – Апатитская ТЭЦ; ● – Серовская ГРЭС

Fig. 2. Dependence of CBR on the degree of moisture:

● – Novocherkasskaya PP; ● – Omsk TPP-4; ● – Apatity TPP; ● – Serovskaya PP

### 3.3. Модуль деформации

Результаты определения модуля деформации, полученного по ветви первичного и вторичного нагружения при уровне напряжений 100–200 кПа, приведены в табл. 3.

Таблица 3

Результаты определения модуля деформации

Table 3

Deformation modulus results

Источник золошлаковой смеси	Модуль деформации, МПа	
	1-я ветвь	2-я ветвь
Омская ТЭЦ-4	4,9	11,3
Новочеркасская ГРЭС	5,8	13,1
Серовская ГРЭС	3,9	8,2
Апатитская ТЭЦ	4,8	11,1

## 4. Обсуждение

### 4.1. Сопоставление максимальной плотности скелета грунта и оптимальной влажности по методам СоюзДорНИИ и Проктора

Анализ полученных данных и результатов ранее проведенных исследований (см. табл. 2) показывает, что есть корреляции между максимальной плотностью скелета грунта и оптимальной влажностью, полученными по методам СоюзДорНИИ и Проктора. Эти корреляции имеют ярко выраженный линейный характер и приведены на рис. 3.

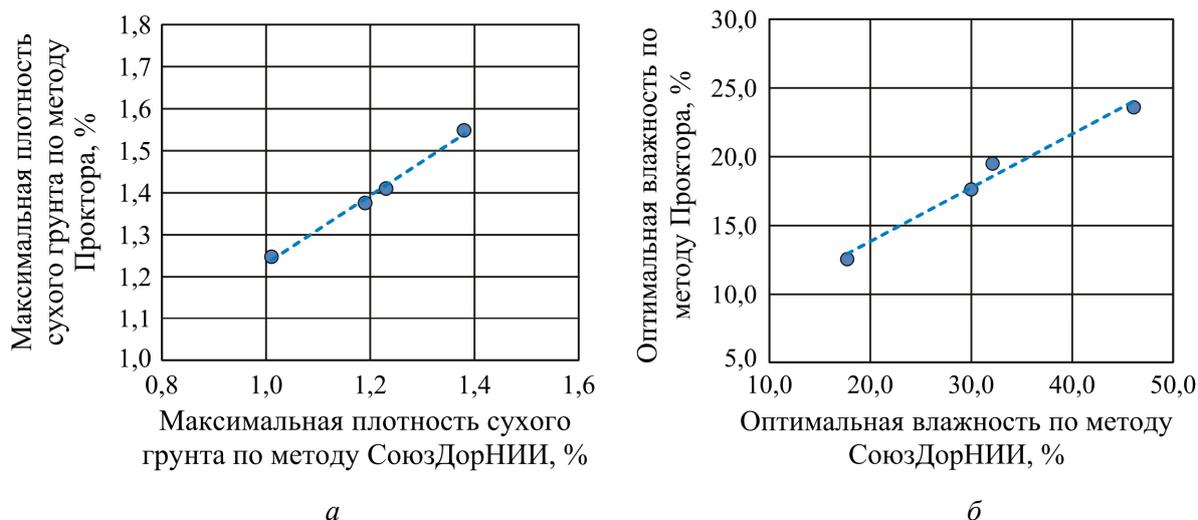


Рис. 3. Корреляции между: *а* – оптимальными влажностями различных ЗШС; *б* – максимальными плотностями скелета грунта различных ЗШС  
 Fig. 3. Correlations between: *a* – optimal moisture content; *b* – maximum dry density

Предварительно можно говорить о некоторой эмпирической связи для параметров, полученных по различным методам, которые выведены на основе текущего исследования и приведены ниже:

$$W_p \approx 0,39 \cdot W_s + 6,03, \quad (1)$$

$$\rho_p \approx 0,81 \cdot \rho_s + 0,42, \quad (2)$$

где  $W_p$  – оптимальная влажность по методу Проктора;  $W_s$  – оптимальная влажность по методу СоюзДорНИИ;  $\rho_p$  – максимальная плотность скелета грунта по методу Проктора;  $\rho_s$  – максимальная плотность скелета грунта по методу СоюзДорНИИ.

### 4.2. Калифорнийское число несущей способности (CBR)

Результаты указывают на однозначно положительное влияние степени уплотнения на CBR для всех представленных ЗШС, а также слабое влияние химического состава на свойства ЗШС, относящихся к классу F (кислым ЗШС). Однако не прослеживается ярко выраженной зависимости между плотностью и величиной CBR (рис. 4) различных типов ЗШС. Это в первую очередь может говорить о влиянии прочих факторов на CBR.

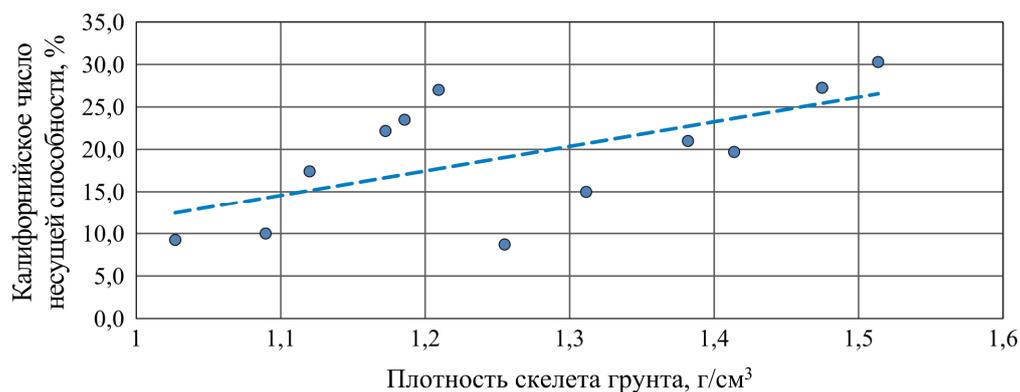


Рис. 4. Зависимость CBR от плотности скелета грунта  
Fig. 4. Dependence CBR on soil skeleton density

Как и в работе [33], не было обнаружено четкой корреляции между плотностью сухого грунта и CBR, что говорит о необходимости провести дополнительные исследования для определения CBR различных ЗШС и установить возможность корреляции с другими параметрами (степень уплотнения, влажность, зерновой состав).

Значения CBR, полученные в ходе исследования, показывают, что ЗШС имеют несущую способность не ниже, чем у прочих природных грунтов, которые были ранее изучены в работах [31–36]. Вероятно, это связано с влиянием при испытаниях на CBR прочностных характеристик материала.

Также полученные значения были выше, чем в работе [23], что, по-видимому, говорит о получении заниженных значений CBR при использовании трамбовки от прибора СоюзДорНИИ по сравнению с методом Проктора.

#### 4.3. Сопоставление калифорнийского числа несущей способности (CBR) и модуля деформации

Сопоставление данных по определению CBR и модулей деформации не позволяет говорить о наличии четкой корреляции между этими параметрами для золошлаковых материалов различного генезиса, о которой говорится в работах применительно к природным грунтам [39, 42–45] (рис. 5).

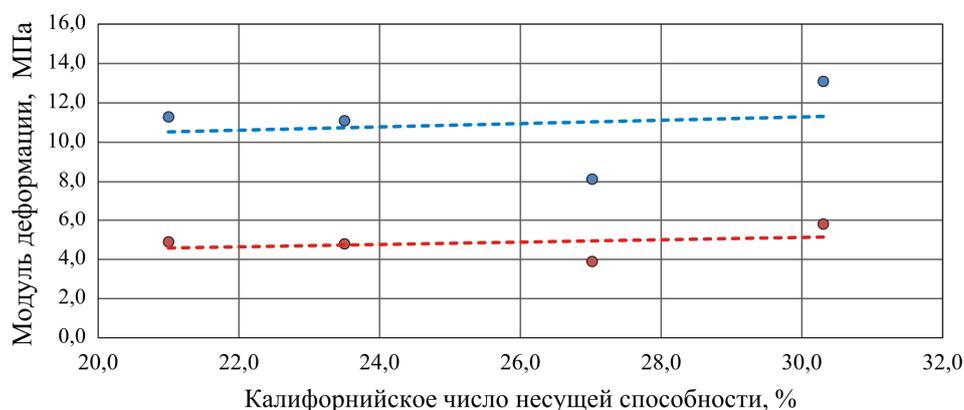


Рис. 5. Зависимость модуля деформации от калифорнийского числа несущей способности:

● – ветвь первичного нагружения; ● – ветвь вторичного нагружения

Fig. 5. Dependence of the deformation modulus on the California bearing ratio:

● – primary loading; ● – secondary loading

Результаты испытаний указывают на некоторую зависимость между плотностью ЗШС и модулем упругости, что отражено на рис. 6. Это говорит о влиянии на CBR не только деформационных характеристик, но и других параметров материала.

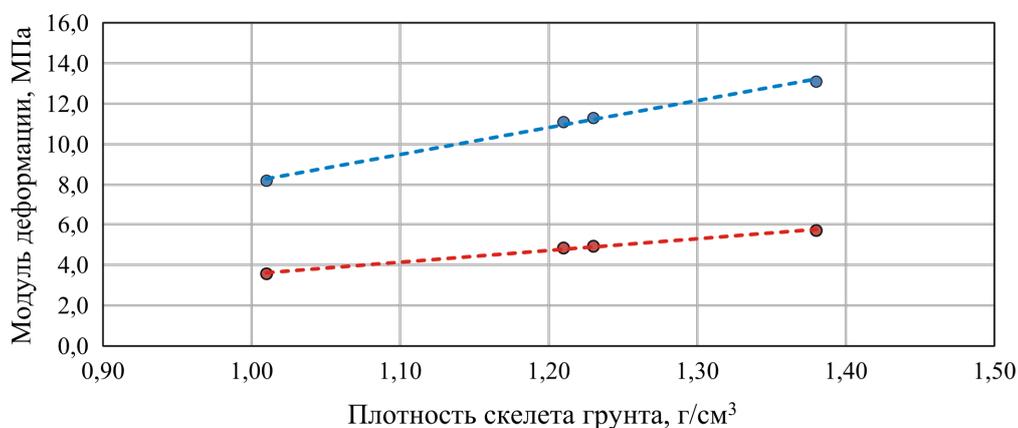


Рис. 6. Зависимость модуля деформации от плотности скелета грунта:

● – ветвь первичного нагружения; ● – ветвь вторичного нагружения

Fig. 6. Dependence of the deformation modulus on the dry density of the soil:

● – primary loading; ● – secondary loading

Эти результаты говорят о необходимости дополнительного сопоставления прочностных характеристик исследованных ЗШС и параметра CBR.

## Выводы

1. Связь между максимальной плотностью скелета грунта и оптимальной влажностью золошлаковых смесей различного генезиса, полученных по методу СоюзДорНИИ и Проктора, ярко выражена и описывается линейной зависимостью.

2. Рост плотности, хотя и ведет к повышению CBR, не имеет корреляции со значениями плотности сухого грунта при изучении ЗШС различного генезиса. Однако при рассмотрении конкретного золошлакового материала положительно влияет на CBR (рост составляет 1,07–1,35 % на 0,01 ед. коэффициента уплотнения).

3. Модуль деформации не имеет статистически значимой корреляции ( $R^2 < 10\%$ ) с CBR при изучении ЗШС различного генезиса. Однако имеется ярко выраженная связь между модулями деформации и плотностью скелета грунта ( $R^2 > 98\%$ ).

4. Значения CBR золошлаковых смесей класса F, исследованных в работе, показывают значения выше, чем у ряда природных грунтов, причем одно из наиболее рациональных объяснений этому – повышенные значения угла внутреннего трения.

5. Следует отметить, что требуются более объемные исследования этой тематики для определения причин повышенного CBR и изучения факторов, влияющих на него.

## Библиографический список

1. Digioia A., Nuzzo W. Fly ash as a structural fill // Journal of the Power Division. – 1970. – Vol. 98, No 1. – P. 77–92.
2. Gray D.H., Lin Y.K. Engineering properties of compacted fly ash // J. Soil Mech. Found. Div. – 1972. – Vol. 98, No 4. – P. 361–380.

3. Engineering behaviour of a low carbon, pozzolanic fly ash and its potential as a construction fill / B. Indraratna [et al.] // *Can. Geotech. J.* – 1991. – Vol. 28, No 4. – P. 542–555. DOI: 10.1139/T91-070
4. Singh R.S., Panda A.P. Utilization of fly ash in geotechnical construction // *Proc. Indian Geotechnical Conf.* – Madras, 1996. – P. 547–550.
5. Marto A., Awang A.M., Mahir Makhtar A. Compaction characteristics and permeability of tanjung bin coal ash mixtures // *International Conference on Environment Science and Engineering IPCBEE.* – Singapore: IACSIT Press, 2011. – No 8. – P. 134–137.
6. Engineering characteristics of tanjung bin coal ash / A. Marto [et al.] // *Electron. J. Geotech. Eng.* – 2010. – Vol. 15. – P. 1117–1129.
7. Pal S., Ghosh A. Shear strength behaviour of indian fly ashes // *Indian Geotechnical Conference Geotechnics in Infrastructure Development (GEOTIDE).* – 2009. – P. 763–778.
8. Jakka R.S., Ramana G.V., Datta M. Shear behaviour of loose and compacted pond ash // *Geotech. Geol. Eng.* – 2010. – Vol. 28, No 6. – P. 763–778.
9. Kumar D., Kumar N., Gupta A. Geotechnical properties of fly ash and bottom ash mixtures in different proportions // *Int. J. Sci. Res.* – 2014. – Vol. 3, No 9. – P. 1487–1494.
10. Mohanty S., Patra N.R. Geotechnical characterization of Panki and Panipat pond ash in India // *Int. J. Geo-Engineering.* – 2015. – Vol. 6, No 1. – P. 1–18. DOI 10.1186/s40703-015-0013-4
11. Properties and use of fly ashes for embankments / J.P. Martin [et al.] // *J. Energy Eng. American Society of Civil Engineers.* – 1990. – Vol. 116, No 2. – P. 71–86.
12. Pandian N.S.P. Fly ash characterization with reference to geotechnical applications // *Indian Geotechnical Conference Geotechnics in Infrastructure Development (GEOTIDE).* – 2005. – P. 189–216.
13. Tiwari S.K., Ghiya A. Strength behavior of compacted fly ash, bottom ash and their combinations // *Electron. J. Geotech. Eng.* – 2013. – Vol. 18. – P. 3106.
14. Kim B., Prezzi M., Salgado R. Geotechnical properties of fly and bottom ash mixtures for use in highway embankments // *J. Geotech. Geoenvironmental Eng.* 2005. – Vol. 131, No 7. – P. 914–924. DOI: 10.1061/(ASCE)1090-0241(2005)131:7(914)
15. Gimhan P.G.S., Disanayaka J.P.B., Nasvi M.C.M. Geotechnical engineering properties of fly ash and bottom ash: use as civil engineering construction material // *Eng. J. Inst. Eng. Sri Lanka. Sri Lanka Journals Online (JOL).* – 2018. – Vol. 51, No 1. – P. 49. DOI: <http://doi.org/10.4038/engineer.v51i1.7287>
16. Muhunthan B., Taha R., Said J. Geotechnical engineering properties of incinerator ash mixes // *J. Air Waste Manag. Assoc.* – 2004. – Vol. 54, No 8. – P. 985–991. DOI: 10.1080/10473289.2004.10470959
17. Балюра М.В. Исследование строительных свойств золы Томской ГРЭС-2 // *Проблемы гидрогеологии, инженерной геологии, оснований и фундаментов: сб. науч. тр.* – Томск: Изд-во ТГУ, 1988. – С. 97–104.
18. Фурсов В.В., Балюра М.В. Исследование морозоустойчивости золошлаковых отходов тепловых электростанций для целей строительства // *Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета.* – 2013. – № 1. – С. 242–252.
19. Дьяконов П.Ю. Утилизация отходов теплоэнергетики в дорожном строительстве // *Вестник МГСУ.* – 2012. – No 8. – С. 175–180. DOI: 10.22227/1997-0935.2012.8.175-180
20. Иванов Е.В. Обоснование применения золошлаковых смесей для строительства земляного полотна с учетом водно-теплового режима: дис. ... канд. техн. наук. – Омск, 2014. – 165 с.

21. Иванов Е., Исаков А., Сиротюк В. Экспериментальное исследование и математическое моделирование промерзания земляного полотна из золошлаковой смеси // Вестник Сибирской государственной автомобильно-дорожной академии. – 2013. – № 3 (31). – С. 71–76.

22. Сиротюк В.В., Иванов Е.В., Шевцов В.Р. Результаты мониторинга опытного участка земляного полотна автодороги из золошлаковой смеси // Золошлаки ТЭС: удаление, транспортировка, переработка, складирование: материалы IV Междунар. науч.-практ. сем. – М.: Изд. дом МЭИ, 2012. – С. 85–88.

23. Dolgih G. V, Ignatov V.F., Utkin V.A. Parameters of strength and deformability of ash and slag mixture of Ekibastuz coals // IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng. 2019. – No 687. – P. 044037. DOI: 10.1088/1757-899X/687/4/044037

24. A study of multilayer soil-fly ash layered system under cyclic loading / Khan [et al.] // Int. J. Civ. Eng. 2008. – Vol. 6, – No 2. – P. 73–89.

25. Prabakar J., Dendorkar N., Morchhale R.K. Influence of fly ash on strength behavior of typical soils // Constr. Build. Mater. 2004. – Vol. 18, No 4. – P. 263–267.

26. Investigation and design of a fly ash road embankment in India by CPT / A.K. Sinha [et al.] // 2nd International Symposium on Cone Penetration Testing. 2009. – P. Paper No. 3–49.

27. Gruchot A., Zydrón T. Impact of a test method on the undrained shear strength of a chosen fly ash // J. Ecol. Eng. Polish Society of Ecological Engineering (PTIE), 2016. – Vol. 17, No 4. – P. 41–49. DOI: 10.12911/22998993/63955

28. Ossowski R., Gwizdała K. Mechanical Properties of a Dike Formed from a Soil-ash Composite // Procedia Engineering. – 2017. – Vol. 172. – P. 816–822. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.02.129

29. Sikora Z., Ossowski R. Geotechnical aspects of dike construction using soil-ash composites // Procedia Engineering. – 2013. – Vol. 57. – P. 1029–1035. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.04.130>

30. Bałachowski L., Sikora Z. Mechanical properties of bottom ash – dredged material mixtures in laboratory tests // Stud. Geotech. Mech. – 2014. – Vol. 35, No 3. – P. 3–11. DOI: 10.2478/sgem-2013-0026

31. Jayamali K.V.S.D., Nawagamuwa U.P. Empirical Correlations Between CBR and Index Properties for Sri Lankan Soils // International conference on Geotechnical Engineering. 2015. – P. 189–192.

32. Correlation Of CBR Value With Properties Of Red Soil / A. John [et al.] // Int. Res. J. Eng. Technol. 2017. – Vol. 4, No 3. – P. 2042–2044.

33. Sandhya Rani, Nagaraj. Prediction of CBR Value with Soil Index Properties; Case Study on Yadadri Region // Int. J. Latest Eng. Manag. Res. – 2017. – Vol. 02. – P. 9–12. DOI: 10.1007/s12594-020-1409-0

34. Kumar K.S.P, Nanduri R.K., Kumar N.D. Validation of predicted California Bearing Ratio Values from different correlations // Am. J. Eng. Res. 2014. – Vol. 3, No 8. – P. 344–352.

35. Rakaraddi P.G., Gomarsi V. Establishing relationship between CBR with different soil properties // Int. J. Res. Eng. Technol. 2015. – Vol. 4, No 2. – P. 182–188.

36. Yashas M.S.R., Harish M.S.N., Muralidhara H.R. Effect of California Bearing Ratio on the properties of soil // Am. J. Eng. Res. AJER, 2016. – No 5. – P. 28–37.

37. Казанцев В.С. Определение поправочных коэффициентов к компрессионному модулю деформации пылевато-глинистых элювиальных, неогеновых и палеогеновых грунтов континентального генезиса Челябинской области // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия Строительство и архитектура. – 2007. – № 14 (86). – С. 38–43.

38. El-sayed Abdelfattah E. Estimation of Guide Values for the Modulus of Elasticity of Soil // *Bull. Fac. Eng.* – 1991. – Vol. 19, – No 1. – P. 1–7.
39. 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.
40. Heukelom W., Foster C.R. Dynamics Testing of Pavements // *J. Soil Mech. Found. Div. ASCE*, 1960. – Vol. 86. – P. 1–28.
41. Heukelom W., Klomp A. Dynamic testing as a means of controlling pavements during and after construction // *1st Int. Conf. Struct. Des. Asph. Pavements*. 1962. – Vol. 203, No 1.
42. 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, 1975. 214 p.
43. Witczak M.W., Qi X., Mirza M.W. Use of Nonlinear Subgrade Modulus in AASHTO Design Procedure // *J. Transp. Eng. American Society of Civil Engineers*, 1995. – Vol. 121, No 3. – P. 273–282.
44. The structural design of bituminous roads / W.D. Powell [et al.] // *TRRL LABORATORY REPORT*. Wokingham, Berkshire United Kingdom, 1984. – No 1115. 62 p.
45. Putri E.E., Kameswara Rao V.N.S., Mannan M.A. Evaluation of Modulus of Elasticity and Modulus of Subgrade Reaction of Soils Using CBR Test // *J. Civ. Eng. Res. Scientific and Academic Publishing*, 2012. – Vol. 2, No 1. – P. 34–40. doi: 10.5923/j.jce.20120201.05
46. Guide for Mechanistic-Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures Final Document Appendix CC-1: Correlation of CBR Values with Soil Index Properties NCHRP. Illinois, 2001. 219 p.
47. Toth P.S., Chan H.T., Cragg C.B. Coal ash as structural fill, with special reference to Ontario experience // *Can. Geotech. J.* 1988. – Vol. 25, No 4. – P. 694–704. <https://doi.org/10.1139/t88-080>

## References

1. Digioia A., Nuzzo W. Fly ash as a structural fill. *Journal of the Power Division*, 1970, vol. 98, no 1, pp. 77–92.
2. Gray D.H., Lin Y.K. Engineering properties of compacted fly ash. *J. Soil Mech. Found. Div.*, 1972, vol. 98, no. sm4, pp. 361–380.
3. Indraratna B. et al. Engineering behaviour of a low carbon, pozzolanic fly ash and its potential as a construction fill. *Can. Geotech. J.*, 1991, vol. 28, no. 4, pp. 542–555. DOI: 10.1139/T91-070.
4. Singh R.S., Panda A.P. Utilization of fly ash in geotechnical construction. *Proc. Indian Geotechnical Conf*, Madras. 1996, pp. 547–550.
5. Marto A., Awang A.M., Mahir Makhtar A. Compaction characteristics and permeability of tanjung bin coal ash mixtures. *International Conference on Environment Science and Engineering IPCBEE*, Singapore, IACSIT Press, 2011, no. 8, pp. 134–137.
6. Marto A. et al. Engineering characteristics of tanjung bin coal ash. *Electron. J. Geotech. Eng.*, 2010, vol. 15, pp. 1117–1129.
7. Pal S., Ghosh A. Shear strength behaviour of indian fly ashes. *Indian Geotechnical Conference Geotechnics in Infrastructure Development (GEOTIDE)*, 2009, pp. 763–778.
8. Jakka R.S., Ramana G.V., Datta M. Shear behaviour of loose and compacted pond ash. *Geotech. Geol. Eng.*, 2010, vol. 28, no. 6, pp. 763–778.

9. Kumar D., Kumar N., Gupta A. Geotechnical Properties of Fly Ash and Bottom Ash Mixtures in Different Proportions. *Int. J. Sci. Res.*, 2014, vol. 3, no. 9, pp. 1487–1494.
10. Mohanty S., Patra N.R. Geotechnical characterization of Panki and Panipat pond ash in India. *Int. J. Geo-Engineering*. 2015, vol. 6, no. 1, pp. 1–18. DOI 10.1186/s40703-015-0013-4.
11. Martin J.P. et al. Properties and Use of Fly Ashes for Embankments. *J. Energy Eng. American Society of Civil Engineers*, 1990, vol. 116, no. 2, pp. 71–86.
12. Pandian N.S.P. Fly ash characterization with reference to geotechnical applications. *Indian Geotechnical Conference Geotechnics in Infrastructure Development (GEOTIDE)*. 2005, pp. 189–216.
13. Tiwari S.K., Ghiya A. Strength behavior of compacted fly ash, bottom ash and their combinations. *Electron. J. Geotech. Eng.*, 2013, vol. 18, pp. 3106.
14. Kim B., Prezzi M., Salgado R. Geotechnical properties of fly and bottom ash mixtures for use in highway embankments. *J. Geotech. Geoenvironmental Eng.*, 2005, vol. 131, no. 7, pp. 914–924. DOI: 10.1061/(ASCE)1090-0241(2005)131:7 (914).
15. Gimhan P.G.S., Disanayaka J.P.B., Nasvi M.C.M. Geotechnical engineering properties of fly ash and bottom ash: use as civil engineering construction material. *Eng. J. Inst. Eng. Sri Lanka*. Sri Lanka Journals Online (JOL), 2018, vol. 51, no. 1, pp. 49. DOI: <http://doi.org/10.4038/engineer.v51i1.7287>.
16. Muhunthan B., Taha R., Said J. Geotechnical engineering properties of incinerator ash mixes. *J. Air Waste Manag. Assoc.*, 2004, vol. 54, no. 8, pp. 985–991. DOI: 10.1080/10473289.2004.10470959.
17. Balyura M.V. Issledovaniye stroitel'nykh svoystv zoly Tomskoy GRES-2 [Investigation of the construction properties of ash from Tomsk GRES-2]. *Problemy gidrogeologii, inzhenernoy geologii, osnovaniy i fundamentov: sb. nauch. tr.* Tomsk, TGU, 1988, pp. 97–104.
18. Fursov V.V., Balyura M.V. Issledovaniye morozoustoychivosti zoloshlakovykh otkhodov teplovykh elektrostantsiy dlya tseley stroitel'stva [Research of frost resistance of ash and slag waste of thermal power stations for construction purposes]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta*, 2013, vol. 1, pp. 242–252.
19. D'yakonov P.Y. Utilizatsiya otkhodov teploenergetiki v dorozhnom stroitel'stve [Using waste products of heat-and-power engineering in road building]. *Vestnik MGSU*, 2012, no. 8, pp. 175–180. DOI: 10.22227/1997-0935.2012.8.175-180.
20. Ivanov Ye.V. Obosnovaniye primeneniya zoloshlakovykh smesey dlya stroitel'stva zemlyanogo polotna s uchetom vodno-teplovogo rezhima [Justification of the use of ash and slag mixtures for the construction of a roadbed, taking into account the water-thermal regime]. Ph.D. thesis. Omsk, 2014, 165 p.
21. Ivanov E., Isakov A., Sirotiyuk V. Eksperimental'noye issledovaniye i matematicheskoye modelirovaniye promerzaniya zemlyanogo polotna iz zoloshlakovoy smesi [Experimental study and mathematical modeling of road bed freezing made of ash mixture]. *Vestnik Sibirskoy gosudarstvennoy avtomobil'no-dorozhnoy akademii*, 2013, vol. 3 (31), pp. 71–76.
22. Sirotiyuk V.V., Ivanov E.V., Shevtsov V.R. Rezul'taty monitoringa opytnogo uchastka zemlyanogo polotna avtodorogi iz zoloshlakovoy smesi [The results of monitoring the experimental section of the roadbed of the road from the ash-and-slag mixture]. *Materialy IV Mezhdunarodnogo nauchno-prakticheskogo seminarra "Zoloshlaki TES: udaleniye, transportirovka, pererabotka, skladirovaniye"*. Moscow, Izdatel'skiy dom MEI, 2012, pp. 85–88.

23. Dolgih G. V., Ignatov V.F., Utkin V.A. Parameters of strength and deformability of ash and slag mixture of Ekibastuz coals. *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, 2019, no. 687, pp. 044037. DOI: 10.1088/1757-899X/687/4/044037.
24. Khan et al. A study of multilayer soil-fly ash layered system under cyclic loading. *Int. J. Civ. Eng.*, 2008, vol. 6, no. 2, pp. 73–89.
25. Prabakar J., Dendorkar N., Morchhale R.K. Influence of fly ash on strength behavior of typical soils. *Constr. Build. Mater.*, 2004, vol. 18, no. 4, pp. 263–267.
26. Sinha A.K. et al. Investigation and design of a fly ash road embankment in India by CPT. *2nd International Symposium on Cone Penetration Testing*, 2009, pp. 3–49.
27. Gruchot A., Zydrón T. Impact of a test method on the undrained shear strength of a chosen fly ash. *J. Ecol. Eng. Polish Society of Ecological Engineering (PTIE)*, 2016, vol. 17, no. 4, pp. 41–49. DOI: 10.12911/22998993/63955.
28. Ossowski R., Gwizdała K. Mechanical properties of a dike formed from a soil-ash composite. *Procedia Engineering*, 2017, vol. 172, pp. 816–822. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.02.129.
29. Sikora Z., Ossowski R. Geotechnical aspects of dike construction using soil-ash composites. *Procedia Engineering*, 2013, vol. 57, pp. 1029–1035. DOI: 10.1016/j.proeng.2013.04.130.
30. Bałachowski L., Sikora Z. Mechanical properties of bottom ash – dredged material mixtures in laboratory tests. *Stud. Geotech. Mech.* Walter de Gruyter GmbH, 2014, vol. 35, no. 3, pp. 3–11. DOI: 10.2478/sgem-2013-0026.
31. Jayamali K.V.S.D., Nawagamuwa U.P. Empirical Correlations Between CBR and Index Properties for Sri Lankan Soils. *International Conference on Geotechnical Engineering*, 2015, pp. 189–192.
32. John A. et al. Correlation of CBR value with properties of red soil. *Int. Res. J. Eng. Technol.*, 2017, vol. 4, no. 3, pp. 2042–2044.
33. Sandhya Rani, Nagaraj. Prediction of CBR value with soil index properties; case study on Yadadri Region. *Int. J. Latest Eng. Manag. Res.*, 2017, vol. 02, pp. 9–12. DOI: 10.1007/s12594-020-1409-0.
34. Kumar K.S.P, Nanduri R.K., Kumar N.D. Validation of predicted California Bearing Ratio values from different correlations. *Am. J. Eng. Res.*, 2014, vol. 3, no. 8, pp. 344–352.
35. Rakaraddi P.G., Gomarsi V. Establishing relationship between CBR with different soil properties. *Int. J. Res. Eng. Technol.*, 2015, vol. 4, no. 2, pp. 182–188.
36. Yashas M.S.R., Harish M.S.N., Muralidhara H.R. Effect of California Bearing Ratio on the properties of soil. *Am. J. Eng. Res.*, 2016, no. 5, pp. 28–37.
37. Kazantsev V.S. Opredeleniye popravochnykh koeffitsiyentov k kompressionnomu modulyu deformatsii pylevato-glinistykh elyuvial'nykh, neogenovykh i paleogenovykh gruntov kontinental'nogo genezisa Chelyabinskoy oblasti [Determination of correction factors for the compression modulus of deformation of silty-clayey eluvial, Neogene and Paleogene soils of continental genesis in the Chelyabinsk region] *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Stroitel'stvo i arkhitektura*, 2007, no. 14 (86), pp. 38–43.
38. El-sayed Abdelfattah E. Estimation of guide values for the modulus of elasticity of soil. *Bull. Fac. Eng.*, 1991, vol. 19, no. 1, pp. 1–7.
39. Semenova T.V., Dolgikh G.V., Polugorodnik B.N. Primeneniye kaliforniyskogo chisla nesushchey sposobnosti i dinamicheskogo konusnogo penetrometra dlya otsenki kachestva uplotneniya grunta [California application number of carrying capacity and dynamic cone penetrometry to assess the quality of compacted soil]. *Vestnik SibADI*, 2013, vol. 1, pp. 59–66.

40. Heukelom W., Foster C.R. Dynamics Testing of Pavements. *J. Soil Mech. Found. Div. ASCE*, 1960, vol. 86, pp. 1–28.
41. Heukelom W., Klomp A. Dynamic testing as a means of controlling pavements during and after construction. *1st Int. Conf. Struct. Des. Asph. Pavements*, 1962, vol. 203, no. 1.
42. 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 No. FAA-RD-73-205-1. Washington, 1975. 214 p.
43. Witzczak M.W., Qi X., Mirza M.W. Use of nonlinear subgrade modulus in AASHTO design procedure. *J. Transp. Eng. American Society of Civil Engineers*, 1995, vol. 121, no. 3, pp. 273–282.
44. Powell W.D. et al. The structural design of bituminous roads. TRRL LABORATORY REPORT. Wokingham, Berkshire United Kingdom, 1984. no. 1115. 62 p.
45. Putri E.E., Kameswara Rao V.N.S., Mannan M.A. Evaluation of modulus of elasticity and modulus of subgrade reaction of soils using CBR test. *J. Civ. Eng. Res. Scientific and Academic Publishing*, 2012. vol. 2, no. 1, pp. 34–40. doi: 10.5923/j.jce.20120201.05.
46. Guide for Mechanistic-Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures Final Document Appendix CC-1: Correlation of CBR Values with Soil Index Properties NCHRP. Illinois, 2001. 219 p.
47. Toth P.S., Chan H.T., Cragg C.B. Coal ash as structural fill, with special reference to Ontario experience. *Can. Geotech. J.*, 1988, vol. 25, no. 4, pp. 694–704. <https://doi.org/10.1139/t88-080>.