

УДК 625.7/8

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-5-624-635>

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ВЕЛИЧИНЫ МОРОЗНОГО ПУЧЕНИЯ ЗОЛОШЛАКОВЫХ СМЕСЕЙ ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ

А.А. Лунёв¹, Д.А. Разуваев², В.В. Голубенко³, М.Г. Чахлов⁴

^{1,3} ФГБОУ ВО СибАДИ,

Россия, г. Омск,

^{2,4} ФГБОУ ВО СГУПС,

Россия, г. Новосибирск

АННОТАЦИЯ

Введение. Большинство исследователей, занимающихся вопросами использования золошлаковых материалов (в особенности в строительной области), концентрируют свое внимание на вопросах определения механических характеристик или изучения особенностей их влияния на окружающую среду. В то же время проектирование автомобильных дорог с насыпями из грунтовых материалов в северных регионах требует обязательного учета поведения материала в суровых климатических условиях.

Хотя золошлаковые материалы являются типичным представителем дисперсных грунтовых материалов, они в некоторой степени подвержены морозному пучению (за счет особенностей внутренней структуры). Кроме того, данные материалы не были всесторонне исследованы при разработке стандартов и сводов правил РФ по проектированию дорог. По этим причинам в профессиональной среде развивается гипотеза о недопустимости применения золошлаков в насыпях автомобильных дорог из-за избыточного морозного пучения этого материала, что, по нашему мнению, является несколько некорректным упрощением.

Методика исследования. Для выяснения реальных свойств морозного пучения золошлаковых смесей специалистами СГУПС были проведены дополнительные исследования по определению относительных деформаций морозного пучения образцов среднезернистой и крупнозернистой ЗШС, а специалистами СибАДИ выполнено сопоставление полученных результатов с более ранними исследованиями по определению относительных деформаций морозного пучения образцов мелкозернистых ЗШС, а также проведен анализ всего массива полученных данных.

Результаты. В результате совместной работы получена эмпирическая модель, позволяющая прогнозировать величину морозного пучения золошлакового материала в зависимости от его степени уплотнения, начальной влажности (при работе по закрытой схеме или влажности при промерзании по открытой системе), гранулометрического состава и температуры промораживания, что позволяет определить степень морозного пучения ЗШС по зерновому составу и расчетным характеристикам земляного полотна.

Заключение. На основе полученных результатов исследований и их анализа были выведены эмпирические зависимости для прогнозирования величины морозного пучения, которые требуют дополнительной опытной проверки на прочих видах ЗШС.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: строительство, автомобильные дороги, грунты, золошлаковые смеси, морозное пучение.

Поступила 06.10.20, принята к публикации 23.10.2020.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Прозрачность финансовой деятельности: авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах. Конфликт интересов отсутствует.

Для цитирования: А.А. Лунёв, Д.А. Разуваев, В.В. Голубенко, М.Г. Чахлов. Прогнозирование величины морозного пучения золошлаковых смесей для проектирования автомобильных дорог. Вестник СибАДИ. 2020; 17 (5): <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-5-624-635>

© Лунёв А.А., Разуваев Д.А., Голубенко В.В., Чахлов М.Г.



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-5-624-635>

PREDICTING THE FROST HEAVING OF BOTTOM ASH VALUE FOR ROAD DESIGN

Aleksandr A. Lunev¹, Denis A. Razuvaev², Vladimir V. Golubenko³, Mikhail G. Chakhlov⁴

^{1,2}*Cand. of Sci., Head of the Technogenic Building Materials Studying Research Laboratory, SibADI, Omsk, Russia,*

^{2,4}*Engineer of the Quality control of road clothing and soil Research Laboratory, Siberian State Transport University, Novosibirsk, Russia*

ABSTRACT

Introduction. Most of the researchers dealing with the use of ash and slag materials (especially in the construction) have focused on the study of their mechanical characteristics or assessment of their impact on the environment. At the same time, the design of roads with embankments of soil materials in the Northern regions requires taking into account the behavior of materials in cold climates.

Although ash and slag materials are a typical dispersed soil, it is prone to frost heaving (due to the peculiarities of the internal structure). In addition, these materials have not been sufficiently tested in the development of the Russian Federation standards and codes for road design. Therefore, the professional environment is developing a hypothesis about the inadmissibility of using ash and slag materials in road embankments due to excessive frost heaving of this material, which, in our opinion, is not the case.

Methods of research. To obtain real values of ash and slag frost heaving, specialists of Siberian State Transport University carried out additional studies to determine the relative deformations of frost heaving of medium-grained samples and coarse-grained ash slabs. SibADI specialists compared the results obtained with earlier studies to determine the relative deformations of frost heaving of fine-grained ash slabs samples, and analyzed the entire array of data obtained.

Results. As a result of joint work, an empirical model was obtained that makes it possible to predict the amount of frost heaving of ash and slag material depending on its degree of compaction, initial moisture content (when working in a closed circuit or moisture in freezing through an open system), particle size distribution and freezing temperature. This makes it possible to determine the degree of frost heaving of ash and slag systems based on the grain size composition and the calculated characteristics of the subgrade.

KEYWORDS: construction, highways, soil, ash and slag mixtures, frost heave.

Submitted 06.10.20, revised 23.10.2020.

The authors have read and approved the final manuscript.

Financial transparency: the authors have no financial interest in the presented materials or methods. There is no conflict of interest.

For citation: Aleksandr A. Lunev, Denis A. Razuvaev, Vladimir V. Golubenko, Mikhail G. Chakhlov. Predicting the frost heaving of bottom ash value for road design. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2020; 17 (5): <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-5-624-635>

© Lunev A.A., Razuvaev D.A., Golubenko V.V., Chakhlov M.G.



Content is available under the license
Creative Commons Attribution 4.0 License.

ВВЕДЕНИЕ

Проектирование автомобильных дорог в Российской Федерации невозможно без учета суровых климатических условий. Существенные отрицательные температуры воздуха в зимний период способствуют промораживанию грунта, в процессе которого увеличивается объем грунта в дорожной конструкции за счет явления морозного пучения [1]. Это, с одной стороны, вызывает существенные деформации дорожных одежд (а иногда и их разрушение) за счет достижения предельных деформаций, а с другой стороны, способствует снижению несущей способности грунтового основания в весенний период (за счет миграции влаги при промораживании) [2].

Подверженность грунтов морозному пучению, происходящему в насыпях земляного полотна при эксплуатации автомобильных дорог в северных регионах, является основополагающим фактором, влияющим на пригодность того или иного грунта, для использования в дорожной конструкции [3]. Испытания по определению относительной величины морозного пучения (являющейся характеристикой степени пучинистости) практически не проводят в связи с их дороговизной, сложностью, длительностью и отсутствием жестких требований действующих стандартов по их выполнению. Подход, который используется в инженерной практике РФ, когда степень пучинистости грунта определяется на основе таблиц, приведенных в своде правил 34.13330.2012, не обеспечивает требуемой точности проектирования, кроме того, для ряда нестандартных строительных материалов эти величины не приведены в СП.

Особенно остро эта ситуация стоит для золошлаковых смесей (которые согласно многочисленным исследованиям пригодны для строительства автомобильных дорог [4, 5, 6, 7, 8]), что отмечено исследованиями Е.В. Иванова и В.В. Сиротюка [9, 10, 11]. Помимо них и менее системно этой проблемой занимались специалисты ТГАСУ Фурсов и Балюра [12, 13]. Данными коллективами было отмечено, что золошлаковые смеси, как и прочие грунты, не подвержены пучению при испытаниях по закрытой системе и этот параметр может существенно изменяться в зависимости от условий испытания. Однако ни в одних, ни в других исследованиях не было отмечено достаточного числа экспериментальных данных для прогнозирования величины морозного пучения ЗШС в зависимости от условий промораживания.

Помимо вышеуказанных авторов проблемами изучения ЗШС занимались и другие исследователи, причем во времена существования СССР исследования велись практически независимо. Одни из первых исследований (за пределами нынешнего СНГ), посвященные оценке применения золошлаков как материала для строительства насыпей, были опубликованы в 1972 г. коллективом авторов А.М. DiGioia и W.L. Nuzzo [14]. В ходе опытов на приборах прямого среза и трёхосного сжатия ими была установлена пригодность ЗШС как материала для насыпей земляного полотна, а проведенные испытания по изучению вибрационных нагрузок на ЗШС показали высокую уплотняемость золы.

Более поздние исследования, проведенные Gray и Lin [15], были сконцентрированы на изучении изменения прочностных и физических характеристик золошлаков в зависимости от их зернового и химического составов, а также от формы частиц, слагающих смесь. Кроме того, в их исследовании поднимался вопрос пуццолановой активности золошлаков и их особенностей морозного пучения. К сожалению, несмотря на близкий характер выполненных исследований, они были проведены применительно к золам-уноса с электростанций штата Мичиган, которые обладают гидравлической активностью (из-за основной природы).

Коллективом авторов под руководством J.P. Martin [16] в 1990 г. опубликованы результаты исследований зол-уноса класса F (соответствующим согласно классификации РФ килым). Исследуемые материалы были отобраны на трёх электростанциях США (Delaware Valley: Pensilvania, New Jersey, Delaware) для дальнейшего определения возможных направлений их применения в дорожных насыпях. Эта работа затрагивала и вопросы морозного пучения, но весьма поверхностно. Однако авторами отмечено, что особенности структуры зольных частиц (пористых) позволяют формироваться кристаллам льда в массиве ЗШС таким образом, что не происходит выпучивания грунта. Такой эффект отмечается только, если влажность ЗШС меньше влажности при полной влагоемкости (есть свободные поры). Авторами были сделаны выводы, что для ликвидации пучения при существенном подтоке воды следует не использовать ЗШС в рабочем слое или выполнять гидроизоляцию массива ЗШС внутри конструкции.

Исследование R. Ossowski и K. Gwizdala [17] в рамках проекта Dredg Dikes, проводимо-

го в Польше, затрагивает основные аспекты прогнозирования устойчивости насыпного сооружения (дамбы) из ЗШС и её смеси с глинистым грунтом. Однако в [17], как и в статьях их коллег по проекту Dredg Dikes, L. Balochowski B Z. Sikora [18], Ossowski и Sikora [19], не учитывается влияние морозного пучения, хотя рассматриваются вопросы прочности и фильтрации.

В то же время изучение природных грунтов (и смесей на их основе [20]) и процессов, проходящих в них при промерзании, активно ведутся, например, в соседней Польше [21, 22] и Китае [23, 24], а также Канаде [25]. Поэтому, с нашей точки зрения, требуется вести работу, схожую с приведенной в [21, 22, 23, 24, 25], а учитывая большой опыт ранее проведенных исследований [9, 10, 11], целесообразно продолжать эксперименты с другими видами золошлаков.

МЕТОДЫ

В ходе исследования представлены результаты ранее проведенных исследований по оценке степени морозного пучения мелкозернистых ЗШС и выполнены новые исследования средне и крупнозернистых золошлаковых смесей.

В исследовании оценивалось морозное пучение ряда золошлаковых смесей, обладающих различным химическим составом. Данные по химическому составу приведены в таблице 1. Золошлаковые смеси Омской ТЭЦ-4 и Беловской ГРЭС относятся к мелкозернистыми и ранее были исследованы научным коллективом СибАДИ, золошлаковые смеси Новосибирской ТЭЦ-3 относятся к средне – и крупнозернистым и были исследованы научным коллективом СГУПС в рамках разработки стандарта организации СТО 73116035-001–2019 «Материал золошлаковый, получаемый в результате деятельности новосибирской ТЭЦ-3, для дорожного строительства».

Согласно представленной в нормативных документах методике, для определения относительной деформации морозного пучения грунтов образцы необходимо испытывать при постоянном, свободном увлажнении нижней границы образца. Из-за этого огреха методики учет реальной величины морозного пучения в конструкции автомобильной дороги, как правило, не определяется, что ведет к необоснованному отказу от использования потенциально пучинистых грунтов на участках без избыточного увлажнения. Для ликвидации данного огреха было принято решение разделить исследование по изучению морозного пучения по открытой системе и по закрытой.

На первом этапе исследования изучали изменение относительной деформации морозного пучения в зависимости от начальной влажности золошлаковой смеси при фиксированном коэффициенте уплотнения и заданной температуре промораживания без подтока воды.

На втором этапе изучали изменение относительной деформации морозного пучения в зависимости от коэффициента уплотнения ЗШС и температуры промораживания при неограниченном подтоке воды к нижней границе образца.

Испытания первого этапа эксперимента моделировали закрытую систему, то есть имитировали рабочий слой земляного полотна в сухих условиях или в оболочке из гидроизоляции. На втором этапе исследования моделировали открытую систему, при которой неограниченный подток влаги к нижней части образца моделирует низкую насыпь в условиях избыточного увлажнения.

Испытание на морозное пучение обоими научными коллективами выполнялась согласно ГОСТ 28622. Однако для удобства повествования методы, использованные коллективами СибАДИ и СГУПС, приведены отдельно в хронологическом порядке.

Таблица 1
Химический состав (по оксидам) золошлаковых материалов, % от сухой массы

Table 1
Chemical composition (by oxides) of bottom ash, % by dry weight

Место отбора	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	K ₂ O	CaO	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	Na ₂ O	MgO	ППП ^а
Омская ТЭЦ-4	21.3-30.4	53.9-65.0	0.0	0.3-3.6	0.1-1.5	0.3-3.4	-	1.8-13.7	0.3	0.1-1.5	0.3-5.0
Новосибирская ТЭЦ-3	13.2	31.4	0.0	2.4	0.7	36.3	-	7.4	1.0	6.2	1.7-11.1
Беловская ГРЭС	18.8	58.9	-	0.25	0.9	5.5	-	7.2	2.7	2.4	5.3

ИССЛЕДОВАНИЯ СИБАДИ

Первые исследования, которые выполняли Е.В. Иванов и В.В. Сиротюк (с дальнейшим привлечением автора этой статьи [11]) на базе ФГБОУ ВО «СибАДИ», потребовали конструирования прибора для определения величины морозного пучения. Внутренняя часть прибора была выполнена в виде сборной формы из полипропиленовых колец (соединенных пазами) с внутренним диаметром 100 мм, каждое из которых имело высоту 20 мм. Собранный форма для хранения образца перед каждым испытанием устанавливалась в теплоизолирующий кожух из вспененного пенополиуретана (толщина стенки 80 мм, термическое сопротивление не ниже $2.1 \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{Дж}$) с направляющими (для фиксации датчиков) и опорной частью с резервуаром для воды, который был соединен шлангом (теплоизолированным) с емкостью для воды за пределами климатической камеры (рисунок 1). Образцы ЗШС для испытания приготавливали в собранной форме из ПП колец методом стандартного уплотнения до установки в кожух. Более поздние исследования вели на стандартизированном измерителе степени пучинистости грунтов УПГ-МГ4.01/2 «Грунт» НИЛ «ИТСМ» (см. рисунок 1).

Все испытания проводили без нагрузки на образцы. Для исключения влияния примерзания грунта к стенкам и снижения сил трения их выстилали полиэтиленовой пленкой.

Деформации морозного пучения в установке из сборных колец измеряли индикаторами часового типа ИЧ-10 с точностью 0,01 мм, а

в измерителе степени пучинистости грунтов УПГ-МГ4.01/2 «Грунт» штатным датчиком с точностью 0,001 мм.

Закрытая система

Эксперименты, проводимые в закрытой системе, имели своей целью установить зависимость степени пучинистости (относительной деформации морозного пучения) от начальной влажности золошлаковой смеси. В экспериментах учет влажности выполнялся через параметр относительной влажности для возможного сопоставления результатов, полученных на разных ЗШС. Испытания выполнялись согласно методике, приведенной в ГОСТ 2862–2012, с некоторыми отличиями (не осуществлялся подток воды). Образцы ЗШС приготавливались при оптимальной влажности и степени уплотнения соответствующей коэффициенту уплотнения образца 0,99–1,00.

Открытая система

Во ходе экспериментального исследования в открытой системе использовалась методика ГОСТ 28622–2012, которая была несколько расширена. Помимо испытаний с температурой минус $4 \text{ }^\circ\text{C}$, которая регламентирована ГОСТ, Е. В. Ивановым и В. В. Сиротюком [25] было выполнено математическое планирование двухфакторного эксперимента. Значения нулевых уровней факторов и интервалов варьирования приведены в таблице 2 (количество образцов в каждом опыте было не менее трёх) [25].



Рисунок 1 – Оборудование, использованное в опытах на базе ФГБОУ ВО СибАДИ:
а – установка для определения деформации морозного пучения;
б – измеритель степени пучинистости грунтов УПГ-МГ4.01/2 «Грунт»

Figure 1 – The equipment used in the experiments on the base of SibADI:
a – equipment for assessing the degree of frost heaving;
b – device for measuring the degree of frost heaving УПГ-МГ4.01/2 “Grunt”

Таблица 2
Интервалы варьирования факторов

Table 2
Intervals of factors variation

Факторы		Уровни варьирования			Интервал варьирования
Натуральный вид	Кодированный вид	-1	0	+1	
Коэффициент уплотнения $K_{упл}$	X_1	0.90	0.95	1.00	0.05
Относительная температура промораживания $t_{отн}, ^\circ\text{C}$	X_2	0.67	1	1.33	0.33

Таблица 3
Максимальная плотность и оптимальная влажность исследуемых ЗШС

Table 3
Maximum dry density and optimum moisture content of the bottom ashes

Характеристика	Тип-3 – Золошлаковая смесь среднезернистая	Тип-4 – Золошлаковая смесь крупнозернистая
Оптимальная влажность, %	46	21
Максимальная плотность скелета, г/см^3	1,13	1,80

В ходе исследования в климатической камере поддерживали стабильную температуру воздуха, требуемую для каждой точки интервала варьирования. Испытания проводили при температуре минус 4 °С, минус 6 °С и минус 8 °С. Каждый из образцов непосредственно перед началом цикла испытаний был выдержан в климатической камере (внутри эксикатора) одни сутки при температуре 1 °С.

ИССЛЕДОВАНИЯ СГУПС

Методика проведения исследований величины морозного пучения научным коллективом СГУПС соответствовала ГОСТ 28622–2012 и практически не отличалась от методики, примененной коллегами из СибАДИ. В качестве исследуемого материала использовались бурогольные золошлаковые смеси, отобранные на золошлакоотвале Новосибирской ТЭЦ-3. Величину морозного пучения определяли для схемы без подтока воды в зону промерзания (закрытой системе). Целью экспериментального исследования специалистов СГУПС было проведение анализа изменения относительной деформации морозного пучения ЗШС от начальной влажности образца. Учет влажности, так же как и в исследованиях коллектива СибАДИ, производится через показатель относительной влажности.

Величина морозного пучения определялась для золошлаков, отнесенных к Тип-3

(среднезернистая ЗШС с содержанием шлаковых частиц 28%) и Тип-4 (крупнозернистая ЗШС с содержанием шлаковых частиц 57%).

Перед началом исследования ЗШС на степень пучинистости для Тип-3 и Тип-4 по ГОСТ 22733–2016 определены максимальная плотность и оптимальная влажность. Результаты приведены в таблице 3. Образцы ЗШС приготавливались при оптимальной влажности и степени уплотнения, соответствующей коэффициенту уплотнения образца 0,99–1,00. После чего влажность образцов доводилась до необходимых в ходе испытания значений.

Для промораживания грунтов использовалась морозильная камера объемом 6 м³ (рисунк 2), которая обеспечивала одновременное испытание образца в трех повторностях.

В ходе испытаний образцы золошлаковой смеси устанавливали в специальную двойную обойму, выполненную из фторопласта (фторосодержащего полимера с крайне низкой поверхностной энергией). За счет этого поверхность обоймы практически не смерзается с грунтом и обеспечивает низкое трение, это позволяет золошлаковой смеси свободно перемещаться в обойме в процессе морозного пучения. Для этих же целей внутренняя форма (обойма) была выполнена из отдельных колец по 20 мм высотой, что добавляло подвижности образцу при пучении внутри сплошной наружной обоймы.



Рисунок 2 – Морозильная камера НИЛ «Геология, основания и фундаменты» СГУПС

Figure 2 – Freezer of the Research Laboratory “Geology, Foundations and Foundations”, Siberian State Railway University

Результаты исследований специалистов СГУПС и СибАДИ, полученные в рамках закрытой системы были приведены к одинаковому виду и приведены на рисунке 3.

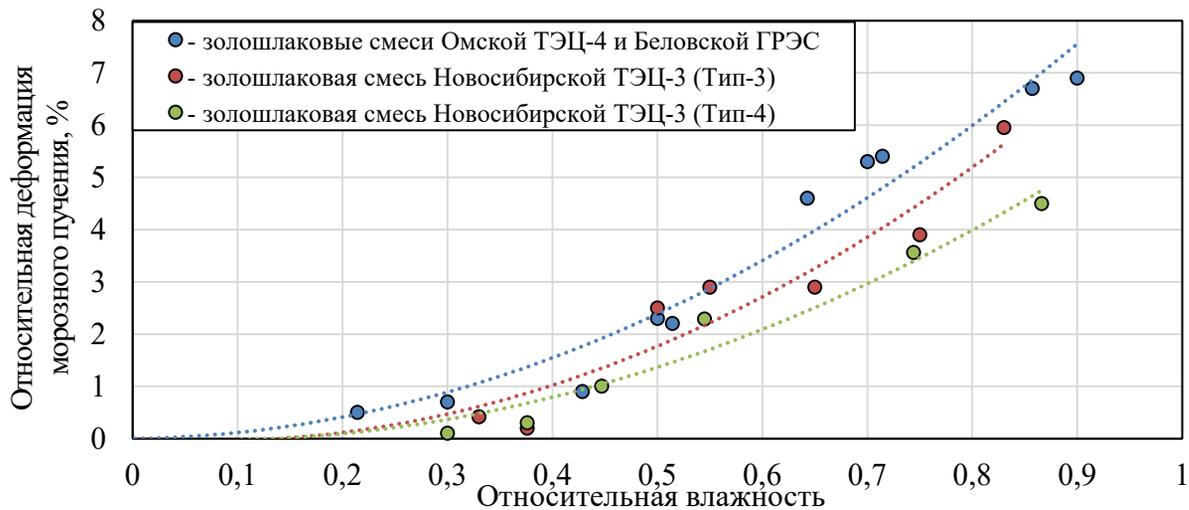


Рисунок 3 – Зависимости относительной деформации пучения от относительной влажности ЗШС

Figure 3 – Dependences of the relative frost heaving deformation on the relative moisture content of ash and slag materials

Как и в экспериментальном исследовании СибАДИ образец и внутренняя обойма находились в теплоизолирующем кожухе (теплоизоляция была выполнена из прессованного пенополистирола). Это техническое решение обеспечивало направленное промораживание от верхней границы образца в устройстве. В ходе испытания выполнялся контроль абсолютной деформации морозного пучения по индикатору часового типа с точностью до 0,01 мм.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ДИСКУССИЯ

Закрытая система

Результаты исследований специалистов СГУПС и СибАДИ, полученные в рамках закрытой системы были приведены к одинаковому виду и представлены на рисунке 3.

Как можно заметить, независимо от происхождения золошлаковой смеси (её генезиса) золошлаковые смеси с влажностью, находящейся в границах от гигроскопической до оптимальной ЗШС относятся к непучинистым грунтам (по классификации ГОСТ 25100–2011) и к слабопучинистым грунтам (по классификации СП 34.13330.2012); золошлаковые смеси с влажностью, находящейся в границах от оптимальной влажности до влажности при полной влагоёмкости, могут достигать значений относительной деформации морозного пучения, позволяющей отнести их к среднепучинистым грунтам (по классификации ГОСТ 25100–2011) или пучинистым (по классификации СП 34.13330.2012); насыщение золошлаковых смесей водой до величины полной влагоёмкости может перевести этот техногенный грунт в разряд сильнопучинистого (как по классификации СП 34.13330.2012, так и ГОСТ 25100–2011).

Анализ данных позволил вывести эмпирическую зависимость для прогнозирования величины относительной деформации морозного пучения золошлаковых смесей в зависимости от относительной влажности и содержания шлаковых частиц

$$\varepsilon = 4 \cdot W_{\text{отн}}^2 \cdot e^{1-\text{Ш}}, \quad (1)$$

где $W_{\text{отн}}$ – фактическая влажность грунта; д.ед.;
Ш – содержание шлаковых частиц в долях от единицы.

Открытая система

В результате обработки полученных данных, Е. В. Ивановым была выведена корреляционная зависимость, проверка адекватности которой для принятого уровня доверительной вероятности (95%) показала адекватность. В раскодированном виде зависимость приведена авторами в следующем виде [26]:

$$\varepsilon_{\text{фн}} = 87,3 - 155,6K_{\text{упл}} - 7,3t_{\text{отн}} + 75K_{\text{упл}}^2 + 0,8t_{\text{отн}}^2 + 3K_{\text{упл}} \cdot t_{\text{отн}}. \quad (2)$$

Вывод общих зависимостей

В результате анализа полученных зависимостей (эмпирических) для прогнозирования относительной деформации морозного пучения золошлаковых смесей в зависимости от влажности, коэффициента уплотнения и температуры промораживания установлено, что возможно объединить зависимости (1) и (2). Это возможно за счет приведения результатов исследований, выполненных в условиях закрытой системы, к одной из точек интервала варьирования в открытой системе. Полученная в результате такой обработки математическая модель приведена ниже и может быть использована для закрытой системы:

$$\varepsilon_{\text{фн}} = \frac{4 \cdot W_{\text{отн}}^2 \cdot e^{1-\text{Ш}}}{100 \cdot \varepsilon_{\text{f0}}} (87,3 - 155,6K_{\text{упл}} - 7,3t_{\text{отн}} + 75K_{\text{упл}}^2 + 0,8t_{\text{отн}}^2 + 3K_{\text{упл}} \cdot t_{\text{отн}}); \quad (3)$$

где $W_{\text{отн}}$ – влажность золошлаковой смеси, относительная;

$K_{\text{упл}}$ – коэффициент уплотнения золошлаковой смеси;

$t_{\text{отн}}$ – температура промерзания, относительная;

ε_{f0} – относительная деформация пучения золошлаковой смеси, полученная в ходе испытаний по открытой системе при постоянном коэффициенте уплотнения ($K_{\text{упл}}=1,0$) и относительной температуре промораживания ($t=0,67$).

Величина относительной деформации морозного пучения в (3), при значениях коэффициента уплотнения $K_{\text{упл}}=1,0$ и температуре t –минус 4°С ($t_{\text{отн}}=0,67$) соответствует одной из точек планирования эксперимента Е.В. Иванова (при варьировании фактора X_1 на верхнем

уровне и фактора X_2 на нижнем уровне) [26]. Следовательно, при $K_{упл}=1,0$ и $t_{отн}=0,67$ справедливо выражение

$$\frac{(87,3-155,6K_{упл}-7,3t_{отн}+75K_{упл}^2+0,8t_{отн}^2+3K_{упл}\cdot t_{отн})}{\varepsilon_{f0}} = 1, \quad (4)$$

т.е. формула (3) превращается в эмпирическую зависимость (2).

Полученные зависимости (1) и (3) позволяют устанавливать величину морозного пучения ЗШС различного генезиса. Однако формула (3) является более полной и позволяет прогнозировать относительную деформацию морозного пучения в зависимости от гранулометрического состава, степени уплотнения, влажности и скорости промерзания.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе исследования было отмечено, что независимо от происхождения золошлаковой смеси (её генезиса) имеют место следующие закономерности:

- золошлаковые смеси с влажностью, находящейся в границах от гигроскопической до оптимальной ЗШС, относятся к непучинистым грунтам (по классификации ГОСТ 25100–2011) и к слабопучинистым грунтам (по классификации СП 34.13330.2012);

- золошлаковые смеси с влажностью, находящейся в границах от оптимальной влажности до влажности при полной влагоёмкости, могут достигать значений относительной деформации морозного пучения, позволяющей отнести их к среднепучинистым грунтам (по классификации ГОСТ 25100–2011) или пучинистым (по классификации СП 34.13330.2012);

- насыщение золошлаковых смесей водой до величины полной влагоёмкости может перевести этот техногенный грунт в разряд сильнопучинистого (как по классификации СП 34.13330.2012, так и ГОСТ 25100–2011).

Кроме того, было выявлено, что величина морозного пучения ЗШС различного генезиса зависит от:

- гранулометрического состава;
- степени уплотнения;
- влажности материала;
- скорости промерзания.

Также установлена степень влияния этих факторов на величину морозного пучения.

На основе полученных результатов исследований и их анализа были выведены эмпирические зависимости для прогнозирования величины морозного пучения, которые требуют дополнительной опытной проверки на прочих видах ЗШС.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Yang L., Sihong L., Eduardo A., Liujiang W., Lei X., Zhuo L. Volume changes and mechanical degradation of a compacted expansive soil under freeze-thaw cycles // *Cold Regions Science and Technology*. 2019. Vol. 157. Pp. 206-214. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2018.10.008>.

2. Isakov A., Razuvaev D., Gudkova I., Chakhlov M. Modeling the operation of road pavement during the thawing of soil in the subgrade of highways // *MATEC Web of Conferences*. X. 2018. Vol. 239. 05001. DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201823905001>.

3. Talamucci F. Freezing processes in porous media: Formation of ice lenses, swelling of the soil // *Mathematical and Computer Modelling*. 2003. Vol. 37. Iss. 5-6. Pp. 595-602. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0895-7177\(03\)00053-0](https://doi.org/10.1016/S0895-7177(03)00053-0).

4. Sushovan D., Nadaf M.B., Mandal J.N. An Overview on the Use of Waste Plastic Bottles and Fly Ash in Civil Engineering Applications // *Procedia Environmental Sciences*. 2016. Vol. 35. Pp. 681-691. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2016.07.067>.

5. Haleema A., Luthrab B., Mannana S., Khurana S. Kumar Critical factors for the successful usage of fly ash in roads & bridges and embankments: Analyzing indian perspective // *Resources Policy*. 2016. Vol. 49. Pp. 334-348. DOI: [10.1016/j.resourpol.2016.07.002](https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2016.07.002).

6. 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. Vol. 150. Pp. 1558-1562. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.07.111>.

7. Seymour J., Bozok O., Hughes A., Bodine B. Condition of coal ash embankments [Electronic resource] // *2015 World of Coal Ash (WOCA) : Conference in Nashville, TN, May 5-7. 2015*. Pp. 1-27. URL: <http://www.flyash.info/2015/028-seymour-2015.pdf> (date of reference: 05.10.2020).

8. Пичугин Е.А. Аналитический обзор накопленного в Российской Федерации опыта вовлечения в хозяйственный оборот золошлаковых отходов тепловых электростанций // *Проблемы региональной экологии*. 2019. № 4. С. 77–87. DOI: [10.24411/1728-323X-2019-14077](https://doi.org/10.24411/1728-323X-2019-14077).

9. Сиротюк В.В., Иванов Е.В., Шевцов В.Р. Результаты мониторинга опытного участка земляного полотна автодороги из золошлаковой смеси [Электронный ресурс] // *Золошлаки ТЭС: удаление, транспортировка, переработка, складирование: материалы IV Международного научно-практического семинара*. М.: Издательский дом МЭИ. 2012. С. 85-88. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=29056375> (дата обращения: 05.10.2020).

10. Иванов Е.В., Исаков А.Л., Сиротюк В.В. Экспериментальное исследование и математическое моделирование промерзания земляного полотна из золошлаковой смеси [Электронный ресурс] // *Вестник СибАДИ*. 2013. Выпуск 3 (31). С. 71-76. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=19032655> (дата обращения: 05.10.2020).

11. Сиротюк В.В., Лунёв А.А., Иванов Е.В. Золошлаковая смесь для земляного полотна // *Автомобильные дороги*. 2016. № 6(1015). С. 72-79.

12. Фурсов В.В., Балюра М.В. Исследование морозостойчивости золошлаковых отходов тепловых электростанций для целей строительства // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2013. № 1. С. 242-252.

13. Балюра М.В. Исследование строительных свойств золы Томской ГРЭС-2 // Проблемы гидрогеологии, инженерной геологии, оснований и фундаментов. Томск : Изд-во ТГУ, 1988. С. 97-104.

14. DiGioia A.M., Nuzzo W.L. Fly Ash as Structural Fill // Journal of Power Division. 1972. Vol. 98. Iss. 1. Pp. 77-92.

15. Gray D.H., Lin Y. K. Engineering Properties of Compacted Fly Ash // Soil Mechanics and Foundation Engineering Division. 1972. Vol. 98. No. 4. Pp. 361-380.

16. Martin J.P., Collins B.J., Biehl F.J. Properties and use of fly ashes for embankments // Energy. 1990. Vol. 116(2). Pp. 71-86.

17. Ossowski R., Gwizdala K. Mechanical properties of a dike formed from a soil-ash composite // Procedia Engineering. 2017. Vol. 172. Pp. 816-822. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.02.129>.

18. Sikora Z., Ossowski R. Geotechnical Aspects of Dike Construction Using Soil-Ash Composites // Procedia Engineering. 2013. Vol. 57. Pp. 1029-1035. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.04.130>.

19. Balachowski L., Sikora Z. Mechanical properties of fly ash – dredged material mixtures on laboratory test // Studia Geotechnica et Mechanica. 2013. Vol. 35(3). Pp. 3-11. DOI: 10.2478/sgem-2013-0026.

20. Hotineanu A., Bouasker M., Aldaood A., Al-Mukhtar M. Effect of freeze-thaw cycling on the mechanical properties of lime-stabilized expansive clays // Cold Regions Science and Technology. 2015. Vol. 119. Pp. 151-157. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2015.08.008>.

21. Cwiakala M., Gajewska B., Kraszewski C., Rafalski L. Laboratory investigations of frost susceptibility of aggregates applied to road base courses // Transportation research procedia. 2016. Vol.14. Pp. 3476-3484. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2016.05.312>.

22. Kraszewski C., Rafalski L. Laboratory Examination of Frost-Heaving Properties of Road Unbound Mixtures Based on Fines Content and Plasticity Index // Procedia Engineering. 2016. Vol. 143. Pp. 836-843. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.06.136>.

23. Yangsheng B., Xiaoyan D., Qianli Z., Jinfei C. Frost Heave Deformation Analysis Model for Microheave Filler. [Electronic resource] // Geotechnical Engineering. Advances in Soil Mechanics and Foundation Engineering. 2019. April 9th. Pp. 1-28. DOI: <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.82575>. URL: <https://pdfs.semanticscholar.org/188c/f12c6c4977aa56efefaf0d9112cd0231d3c6.pdf> (date of reference: 05.10.2020).

24. Pingsheng W., Guoqing Z. Frost-heaving pressure in geotechnical engineering materials during freezing process // International Journal of Mining Science and Technology. 2018. Vol. 28.

Issues 2. Pp. 287-296. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2017.06.003>.

25. Liu H., Maghoul P., Shalaby A., Bahari A. Thermo-Hydro-Mechanical Modeling of Frost Heave Using the Theory of Poroelasticity for Frost-Susceptible Soils in Double-Barrel Culvert Sites // Transportation Geotechnics. 2019. Vol. 20. 100251. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2019.100251>.

26. Иванов Е.В. Обоснование применения золошлаковых смесей для строительства земляного полотна с учетом водно-теплового режима. Омск, 2015. 165 с.

REFERENCES

1. Yang L., Sihong L., Eduardo A., Liujiang W., Lei X., Zhuo L. Volume changes and mechanical degradation of a compacted expansive soil under freeze-thaw cycles. *Cold Regions Science and Technology*. 2019; 157: 206-214. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2018.10.008>.

2. Isakov A., Razuvaev D., Gudkova I., Chakhlov M. Modeling the operation of road pavement during the thawing of soil in the subgrade of highways. *MATEC Web of Conferences*. X. 2018. 239. 05001. DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201823905001>.

3. Talamucci F. Freezing processes in porous media: Formation of ice lenses, swelling of the soil. *Mathematical and Computer Modelling*. 2003; 37 (5-6): 595-602. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0895-7177\(03\)00053-0](https://doi.org/10.1016/S0895-7177(03)00053-0).

4. Sushovan D., Nadaf M.B., Mandal J.N. An Overview on the Use of Waste Plastic Bottles and Fly Ash in Civil Engineering Applications. *Procedia Environmental Sciences*. 2016; 35: 681-691. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2016.07.067>.

5. Haleema A., Luthrab B., Mannana S., Khurana S. Kumarc Critical factors for the successful usage of fly ash in roads & bridges and embankments: Analyzing indian perspective. *Resources Policy*. 2016; 49: 334-348. DOI: 10.1016/j.resourpol.2016.07.002.

6. 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; 150: 1558-1562. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.07.111>.

7. Seymour J., Bozok O., Hughes A., Bodine B. Condition of coal ash embankments. *2015 World of Coal Ash (WOCA) : Conference in Nashville 5-7*. 2015. 1-27. URL: <http://www.flyash.info/2015/028-seymour-2015.pdf> (date of reference: 05.10.2020).

8. Pichugin E.A. Analiticheskij obzor nakoplennoy v Rossijskoj Federacii opyta vovlecheniya v hozyajstvennyj oborot zoloshlakovyh othodov teploelectrostancij [Analytical review of the experience of involving ash slag waste of thermal power plants in economic circulation in the russian federation]. *Problemy regional'noj ekologii*. 2019; 4: 77-87. DOI: 10.24411/1728-323X-2019-14077. (in Russian)

9. Sirotyuk V.V., Ivanov E.V., Shevcov V.R. Rezul'taty monitoringa opytnogo uchastka zemlyanogo polotna avtodorogi iz zoloshlakovoj smesi [Elektronnyj resurs]. *Zoloshlaki TES: udalenie, transportirovka, pererabotka, skladirovanie : materialy IV Mezhdunarod-*

nogo nauchno-prakticheskogo seminara. Moscow, Izdatel'skij dom MEI. 2012. 85-88. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=29056375> (data obrashcheniya: 05.10.2020). (in Russian)

10. Ivanov E.V., Isakov A.L., Sirotyuk V.V. Eksperimental'noe issledovanie i matematicheskoe modelirovanie promerzaniya zemlyanogo polotna iz zoloshlakovoj smesi [Experimental study and mathematical modeling of roadbed freezing made of ash mixture] [Elektronnyj resurs]. *Vestnik SibADI*. 2013; 3(31): 71-76. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=19032655> (data obrashcheniya: 05.10.2020). (in Russian)

11. Sirotyuk V.V., Lunyov A.A., Ivanov E.V. Zoloshlakovaya smes' dlya zemlyanogo polotna. *Avtomobil'nye dorogi*. 2016; 6(1015): 72-79. (in Russian)

12. Fursov V.V., Balyura M.V. Issledovanie morozoustojchivosti zoloshlakovykh othodov teplovykh elektrostancij dlya celej stroitel'stva [Research of frost resistance of ashes and slag waste of thermal power stations for construction purposes]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta*. 2013; 1: 242-252. (in Russian)

13. Balyura M.V. Issledovanie stroitel'nykh svojstv zoly Tomskoj GRES-2. *Problemy gidrogeologii, inzhenernoj geologii, osnovanij i fundamentov*. Tomsk, Izd-vo TGU, 1988. 97-104. (in Russian)

14. DiGioia A.M., Nuzzo W.L. Fly Ash as Structural Fill. *Journal of Power Division*. 1972; 98(1): 77-92.

15. Gray D.H., Lin Y. K. Engineering Properties of Compacted Fly Ash. *Soil Mechanics and Foundation Engineering Division*. 1972; 98(4): 361-380.

16. Martin J.P., Collins B.J., Biehl F.J. Properties and use of fly ashes for embankments. *Energy*. 1990; 116(2): 71-86.

17. Ossowski R., Gwizdala K. Mechanical properties of a dike formed from a soil-ash composite. *Procedia Engineering*. 2017; 172: 816-822. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.02.129>.

18. Sikora Z., Ossowski R. Geotechnical Aspects of Dike Construction Using Soil-Ash Composites. *Procedia Engineering*. 2013; 57: 1029-1035. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.04.130>.

19. Balachowski L., Sikora Z. Mechanical properties of fly ash - dredged material mixtures on laboratory test. *Studia Geotechnica et Mechanica*. 2013; 35(3): 3-11. DOI: 10.2478/sgem-2013-0026.

20. Hotineanu A., Bouasker M., Aldaood A., Al-Mukhtar M. Effect of freeze-thaw cycling on the mechanical properties of lime-stabilized expansive clays. *Cold Regions Science and Technology*. 2015; 119: 151-157. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2015.08.008>.

21. Cwiakala M., Gajewska B., Kraszewski C., Rafalski L. Laboratory investigations of frost susceptibility of aggregates applied to road base courses. *Transportation research procedia*. 2016; 14: 3476-3484. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2016.05.312>.

22. Kraszewski C., Rafalski L. Laboratory Examination of Frost-Heaving Properties of Road Unbound Mixtures Based on Fines Content and Plasticity Index. *Procedia Engineering*. 2016; 143: 836-843. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.06.136>.

23. Yangsheng B., Xiaoyan D., Qianli Z., Jinfei C. Frost Heave Deformation Analysis Model for Microheave Filler. [Electronic resource]. *Geotechnical Engineering. Advances in Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 2019. 1-28. DOI: <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.82575>. URL: <https://pdfs.semanticscholar.org/188c/f12c6c4977aa56efefaf0d9112cd0231d3c6.pdf> (date of reference: 05.10.2020).

24. Pingsheng W., Guoqing Z. Frost-heaving pressure in geotechnical engineering materials during freezing process. *International Journal of Mining Science and Technology*. 2018; 28 (2): 287-296. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2017.06.003>.

25. Liu H., Maghoul P., Shalaby A., Bahari A. Thermo-Hydro-Mechanical Modeling of Frost Heave Using the Theory of Poroelasticity for Frost-Susceptible Soils in Double-Barrel Culvert Sites. *Transportation Geotechnics*. 2019; 20: 100251. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2019.100251>.

26. Ivanov E.V., Obosnovanie 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]. Omsk, 2015. 165 p. (in Russian)

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Лунёв Александр Александрович – канд. техн. наук, руководитель НИЛ «ИТСМ», доц. кафедры «Проектирование дорог» ФГБОУ ВО «Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет» (644008, г. Омск, пр. Мира, 5, тел. 8-999-453-39-30; e-mail: lunev.al.al@gmail.com).

Разуваев Денис Алексеевич – канд. техн. наук, заведующий НИЛ «Контроль качества дорожных одежд и земляного полотна», доц. кафедры «Изыскания, проектирование и постройка железных и автомобильных дорог» ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет путей сообщения» (630049, г. Новосибирск, ул. Дуси Ковальчук, 191).

Голубенко Владимир Владимирович – канд. техн. наук, директор ООО «АДМ», доц. кафедры «Проектирование дорог», ФГБОУ ВО «Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет» (644008, г. Омск, пр. Мира, 5).

Чахлов Михаил Геннадьевич – инженер НИЛ «Контроль качества дорожных одежд и земляного полотна», ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет путей сообщения» (630049, г. Новосибирск, ул. Дуси Ковальчук, 191).

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Alexander A. Lunev (Omsk, Russia) - Cand. of Sci., Head of the Technogenic Building Materials Studying Research Laboratory, Associate Professor of the Road Design Department, Siberian State Automobile and Highway University (644080, Omsk, Prospect Mira, 5, tel. : 8-999-453-39-30; email: lunev.al.al@gmail.com).

Denis A. Razuvaev (Novosibirsk, Russia), Cand. of Sci., Head of the Quality Control of Road Clothing and Soil Research Laboratory, Associate Professor of the Research, Design and Construction of iron and

steel Roads Department, Siberian State Transport University (630049, Novosibirsk region, Novosibirsk, Dusi Kovalchuk st., 191).

Vladimir V. Golubenko (Omsk, Russia), Cand. of Sci., Associate Professor, Road Design Department, Siberian State Automobile and Highway University (644080, Omsk, Prospect Mira, 5).

Mikhail G. Chakhlov (Novosibirsk, Russia), Engineer of the Quality control of road clothing and soil Research Laboratory, Siberian State Transport University (630049, Novosibirsk Region, Novosibirsk, Dusi Kovalchuk st., 191).