

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЧНОСТИ ЗОЛОГРУНТОВЫХ МАТЕРИАЛОВ, УКРЕПЛЕННЫХ ИЗВЕСТЬЮ

А.В. Звягинцев, А.А. Лунёв, Р.С. Кацарский, Д.А. Шевченко

ФГБОУ ВО «Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ)»,  
г. Омск, Россия

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** В статье изучен предел прочности на сжатие укрепленных зологрунтовых материалов с разными соотношениями золошлаковой смеси, глинистого грунта и извести в различных пропорциях при внесении стабилизирующей добавки «Саттелит».

**Материалы и методы.** В рамках исследования были проведены испытания по определению максимальной плотности сухого грунта и оптимальной влажности смесей зологрунтовых материалов (100% ЗШС, 25% ЗШС и 75% суглинка, 50% ЗШС и 50% суглинка) и последующее определение предела прочности на одноосное сжатие в возрасте 7, 28 и 90 сут. Образцы набирали прочность в камере нормального твердения. За сутки до проведения испытания образцы помещались в устройство для капиллярного водонасыщения образцов.

**Результаты.** В результате данного исследования была выявлена закономерность увеличения предела прочности на сжатие зологрунтовых композиций в зависимости от количества вяжущего, пропорции материалов и возраста образцов. Также выявлено, что при увеличении дозировки глинистого грунта в золошлаковой смеси резко возрастает прочность полученного зологрунта.

**Практическое значение.** Результаты проведенных исследований показывают потенциальную возможность использования зологрунтовых материалов, укрепленных известью, при устройстве дополнительного слоя основания автомобильных дорог с капитальной или облегченной дорожной. Однако требуются дополнительные исследования по определению морозостойкости и водостойкости зологрунтовых композиций, укрепленных известью.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** строительство, автомобильные дороги, лабораторные испытания, грунты, золошлаковые материалы.

Поступила 17.05.21, принята к публикации 30.06.21.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

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

Для цитирования: Звягинцев, А.В. Исследование прочности зологрунтовых материалов, укрепленных известью / А.В. Звягинцев, А.А. Лунёв, Р.С. Кацарский, Д.А. Шевченко. – DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-3-330-341> // Вестник СибАДИ. – 2021. – Т. 18, № 3(79). – С. 330-341.

© Звягинцев А.В., Лунёв А.А., Кацарский Р.С., Шевченко Д.А., 2021



Контент доступен под лицензией  
Creative Commons Attribution 4.0 License.

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-3-330-341>

## STRENGTH OF LIME-STRENGTHENED ASH-AND-SLAG MATERIALS STUDY

*Alexandr V. Zvyagintsev, Aleksandr A. Lunev, Roman S. Katsarskiy, Denis A. Shevchenko*  
Siberian Automobile and Highway University,  
Omsk, Russia

### ABSTRACT

**Introduction.** The article studies the strength of hardened ash-soil materials, with different ratios of pond ash, natural clay soil and lime in various proportions when adding a stabilizing additive “Sattelit”.

**Materials and methods.** As part of the study, tests were carried out to determine the maximum density of dry soil and the optimal mixture of ash-soil materials (100% ash-and-slag mixture, 25% ash-and-slag and 75% loam and 50% ash-and-slag and 50% loam), and the subsequent determination of the ultimate strength for uniaxial compression at age seven, twenty-eight and ninety days. The samples were gaining strength in the normal hardening chamber. The samples are placed in a device for capillary water saturation of the samples.

**Results.** As a result of the study, a regularity of the increase in the strength of the soil-ash mixtures was revealed, depending on the amount of binder, the proportion of materials and the age of the mixture. It was also revealed that with an increase in the dosage of clay soil in the pond ash, the strength of the obtained soil-ash mixtures sharply increases.

**Discussion and conclusion.** The results of the studies carried out show the potential possibility of using zoological soil materials fortified with lime when installing an additional layer of the base of highways with capital or lightweight pavement on roads in the I-V road-climatic zone. However, additional research is required to determine the frost resistance and water resistance of zoological soil composites reinforced with lime.

**KEYWORDS:** construction, highways, soil, laboratory tests, pond ash.

**Submitted 17.05.21, revised 30.06.21.**

**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:* Zvyagintsev A.V., Lunev A.A., Katsarskiy R.S., Shevchenko D.A. Strength of lime-strengthened ash-and-slag materials study. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2021; 18 (3): 330-341. DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-3-330-341>

© Zvyagintsev A.V., Lunev A.A., Katsarskiy R.S., Shevchenko D.A., 2021



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

## ВВЕДЕНИЕ

Нагрузка от транспортного потока на дорожное полотно растет из года в год, постепенно изнашивая конструктивные элементы автомобильных дорог. Дорожные одежды, рассчитанные по устаревшим нормативам, не справляются с возросшими нагрузками. Всё это приводит к быстрому разрушению покрытий автомобильных дорог, колееобразованию. При этом приходится чаще ремонтировать покрытия нежестких одежд, межремонтные сроки сокращаются, что приводит к увеличению затрат на содержание и последующий ремонт дорожных одежд.

В работах [1, 2], а также в работе <sup>1</sup>авторами на основе анализа причин образования колеи на покрытии автомобильных дорог установлено, что накопление пластических деформаций в земляном полотне и конструктивных слоях дорожной одежды является одним из основных факторов колееобразования. Укрепление местных грунтов и их стабилизации в верхнем слое земляного полотна и основании дорожной одежды повышают их несущую способность и эксплуатационные показатели, что снижает потенциал накопления пластических деформаций в их конструкции. Это существенно замедляет процесс колееобразования и формирования волн на покрытии автомобильных дорог.

Кроме того, использование в земляном полотне глинистых грунтов в районах с высокой влажностью (необеспеченным стоком) может повышать деформативность земляного полотна в 2–4 раза, поскольку влажность грунта (особенно глинистого) коренным образом влияет на его прочность [3,4, 5, 6].

Одним из перспективных путей получения качественной дорожной одежды является совершенствование технологии строительства автомобильных дорог с применением методов стабилизации (укрепления) местных грунтов и отходов промышленности в конструкциях дорожных одежд и рабочего слоя земляного полотна [7, 8]. Причем за счет обилия отходов промышленного производства (зола-уноса, шлаки), а также их глубокой изученности рекомендуется широкое применение их в строительстве дорог.

В работе [11] авторами на основе проведенных исследований установлено, что в результате стабилизации грунт становится прочным, водонепроницаемым и водоустойчивым, что приводит к уменьшению его влажности. В результате этого уменьшается количество требуемых дорожно-строительных материалов, что снижает экономические затраты на строительство.

В работе <sup>2</sup>авторами указано, что при сооружении дороги «Сохачевская объездная дорога» 90% объема насыпи (250 тыс. т) было отсыпано из шлаковой смеси в качестве материала для дорожной насыпи. Данное проектное решение послужило значительному снижению стоимости строительства.

В работе «Укрепленные грунты» В.М. Безрука (1982 г.) приведены результаты исследования и опытные работы по укреплению высококальциевой золы-уноса как самостоятельного вяжущего не только песков, но и глинистых грунтов. Получены положительные результаты при устройстве однослойного основания из глины, укрепленной золой-уноса в количестве 85% и двухслойного основания с нижним слоем из пылеватых лессовых суглинков, укрепленных 8–12% золы-уноса и верхним слоем из того же грунта, укрепленного 6% золы-уноса, и таким же количеством портландцемента. Установлено, что грунты (пылеватые пески, глины, суглинки), укрепленные 5–15% золы-уноса, удовлетворяют требованиям, предъявляемым к грунтам, укрепленным цементом или известью. Однако нарастание прочности протекает медленней. Морозостойкость укрепленных грунтов в 42-суточном возрасте в большинстве случаев достигает значений, получаемых при укреплении аналогичных грунтов цементом в возрасте 28 сут.

В работе [12] авторами были изучены ЗШО Дарханской и Эрдэнэтской ТЭЦ с целью применения золошлаковых отходов в строительстве. Данные сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) с рентгеноспектральным микроанализом и рентгенофазового анализа показали, что данные ЗШС имеют кислый, высокоуглеродистый состав. Ввиду низких вяжущих свойств за счет адгезионных свойств они будут иметь хорошее сцепление только с теми грунтами, в которых достаточно сое-

<sup>1</sup> Нгуен, Ван Лонг. Разработка технологии повышения деформативной устойчивости асфальтобетонных покрытий автомобильных дорог в условиях Южного Вьетнама: дис. канд. техн. наук / Нгуен Ван Лонг. – Воронеж, 2013. – 146 с

<sup>2</sup> А. Мишковска, Т. Щигельски Опыт применения побочных продуктов сжигания угля в дорожном строительстве польши / А. Мишковска, Т. Щигельски // II Международная научно-практическая конференции. 2005. – С. 182–187.

динений кальция (высокоизвестковый грунт). Соответственно, в случае применения таких зол в грунтозолобетонах (смесь грунта, золы и неорганического вяжущего) для укрепления оснований автомобильных дорог придется использовать добавки цемента или извести.

В работе [13] авторами рассматривается стабилизация грунтов золой-уноса с высоким содержанием оксида кальция. Образцы с различным содержанием золы-уноса были испытаны для определения параметров прочности на сдвиг сцепления и значения угла внутреннего трения методом трехосного сжатия. При добавлении золы-уноса с высоким содержанием оксида кальция до 25% пористость и пустотность смеси при максимальной плотности в сухом состоянии могут быть увеличены на 51% и 117% соответственно.

Добавление 5% золы-уноса в грунт вызывает в среднем увеличение прочности на сдвиг от 27 кПа до 300 кПа. Прирост угла внутреннего трения в зависимости от содержания золы-уноса от 5 до 25% составляет от 6 до 15°. Результаты испытаний показывают, что зола-уноса с высоким содержанием извести может быть эффективно использована в грунте для улучшения прочности на сдвиг и, таким образом, улучшения несущей способности.

В работе [14] авторами рассматривается стабилизация мелкого песка с помощью золы-уноса с электростанции в Великобритании Ratcliffe-on Soar в Ноттингеме. Песок был стабилизирован тремя пропорциями золы-уноса (5%, 10% и 15%), цемент в количестве 3% использовался в качестве активатора. В результате испытаний обнаружено, что при введении золы-уноса и цемента увеличивается оптимальная влажность и уменьшается максимальная плотность. Наилучшие результаты были получены при 20% золы-уноса, 5% цемента. У образцов увеличилась оптимальная влажность до 15%, это на 1,6% выше по сравнению с чистым песком, максимальная плотность увеличилась с 17,01 кН/м<sup>3</sup> до 17,08 кН/м<sup>3</sup>.

В работе [15] авторами рассматривается стабилизация различных грунтов (песок Калахари, Каличе, илистый песок, ил со средней и низкой пластичностью) золой-уноса в различных концентрациях (4, 8, 16 и 24% от массы).

Коэффициент несущей способности всех грунтов увеличивается с добавлением золы-у-

носа за исключением песка Калахари, который сначала уменьшается, а затем увеличивается при концентрации золы-уноса более 16%.

Экспериментальные исследования грунтовых композитов в условиях трёхосного сжатия опубликовали М.А. Khan, А. Usmani, S.S. Shahand, Н. Abbas из Алигархского мусульманского университета [16]. Авторы исследовали слоистые золо-глинистые образцы. В результате исследования обнаружено, что образцы могут больше деформироваться без разрушения. Это вызвано наличием легкого суглинка. Также важно отметить, что образцы имеют меньшее сопротивление сжатию. Для образцов, укрепленных 25% золы-уноса, увеличение предела прочности на сдвиг до 166 кПа, для образцов, укрепленных 50 и 75% золы-уноса, увеличение предела прочности на сдвиг до 206 кПа, при пределе прочности на сдвиг исходного грунта равным 98,7 кПа.

Схожие исследования проведены J. Prabakar [17], с той разницей, что он производил смешивание разных типов грунта с ЗШС. В его работе отмечен рост прочностных параметров при добавлении определённого количества ЗШС в глинистый грунт. Причём параметры композиции на 10–40% превосходили параметры исходных грунтов, с 0,250 до 0,325 кг/см<sup>2</sup> для образца Тип А, с 0,185 до 0,380 кг/см<sup>2</sup> для образца Тип В. А при определённых концентрациях смеси прочностные параметры выше, чем у исходного грунта и ЗШС.

Makhtar A.M. в работе <sup>3</sup>исследует смесь золы-уноса и золошлака из электростанций Танджунг Бин в Малайзии в различных концентрациях. Было доказано, что с увеличением концентрации золы-уноса линейно уменьшается максимальная плотность сухого грунта. В то же время коэффициент фильтрации снижается. Это связано с увеличением содержания мелких частиц ЗШС, что увеличивает удельную поверхность.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

### Методика проведения исследования

- *Определение максимальной плотности*

Определялась как наибольшая плотность сухого грунта, которая достигается при испытании грунта методом стандартного уплотнения. Суть метода заключается в установлении зависимости плотности сухого грунта от его

<sup>3</sup> Compaction Characteristics and Permeability of Tanjung Bin\* International Conference on Environment Science and Engineering IPCBEE, 2011. 8: 134-137

влажности. Испытание проводилось по ГОСТ 22733–2016 с учетом положений ГОСТ 23558–94. Золюгрунтовая смесь в различных пропорциях смешивалась в эксикаторе, общая масса навески составляет 1500 г. Влажность грунта для первого испытания составляла 20–22%. Шаг увлажнения 2%. Диаметр формы – 50 мм. Уплотнение проводилось 20 ударами груза с высоты 300 мм по наковальне, зафиксированной на направляющей штанге.

• *Определение предела прочности на сжатие*

Затем по вычисленным значениям оптимальной влажности максимальной плотности происходила формовка образцов. Формовка проводилась в приборе стандартного уплотнения по ГОСТ 22733–2016 с учетом положений ГОСТ 23558–94. Диаметр формы – 50 мм. Уплотнение проводилось 20 ударами груза с высоты 300 мм по наковальне, зафиксированной на направляющей штанге.

Далее образцы набирали прочность в камере нормального твердения 7, 28 и 90 сут, при температуре 22°C и 70% влажности. За сутки до проведения испытания образцы помещались в устройство для капиллярного водонасыщения образцов.

Затем производилось определение предела прочности на одноосное сжатие золюгрунта. Образцы испытывались на прессе с электро-механическим приводом, отвечающим требованиям ГОСТ 28840–90. Изначальная нагрузка 10 Н, скорость приложения нагрузки (3,0±0,3) мм/мин. Испытания проводились на универсальной испытательной машине ИР 5082–100.

### Используемые материалы

#### Суглинок

Для экспериментальных исследований в качестве наиболее типичного для регионов РФ был выбран природный суглинок тяжелый пылеватый, свойства которого представлены в таблице 1.

Отбор проб для исследований был выполнен в сосредоточенном резерве в месте строительства грунтовой дамбы, строящейся по адресу: Омская обл., г. Омск, на земельном участке с кадастровым номером 55:20:032002:5, расположенным в границах Богословского с/п, в районе сел Ульяновка и Густафьево.

Определение естественной влажности суглинка выполнялось в соответствии с ГОСТ 5180–2015. Результаты проведенного испытания показаны в таблице 1. В последующем были произведены испытания по определению максимальной плотности (плотность сухого грунта) суглинка и его оптимальной влажности в соответствии с ГОСТ 22733–2016. Испытания проводились при помощи прибора стандартного уплотнения, весов, балансного конуса Васильева, набору сит и другого оборудования.

Определение зернового состава определялось ареометрическим методом. 200 г средней пробы высушенного грунта просеивается через комплект сит с диаметром отверстий 1, 2, 5, 10 мм. Частицы, которые задержались на ситах и упали в поддон, взвешиваются. Отдельно отбираются образцы грунта весом не меньше 15 г для подсчета их удельного веса и природной влажности.

Таблица 1  
Физико-механические свойства грунта

Table 1  
Physical and mechanical properties of soil

Наименование показателя	Фактические данные	Ед. изм.
Естественная влажность	26,52	%
Влажность на границе текучести	30,97	%
Влажность на границе раскатывания	21,47	%
Число пластичности	13	-
Показатель текучести	0,32	-
Оптимальная влажность	18,10	%
Максимальная плотность скелета грунта	1,71	г/см <sup>3</sup>
Содержание песчаных частиц (2–0,05 мм)	4,5	%
Ph водной вытяжки	9,1	-
Потери при прокаливании	7,6	%



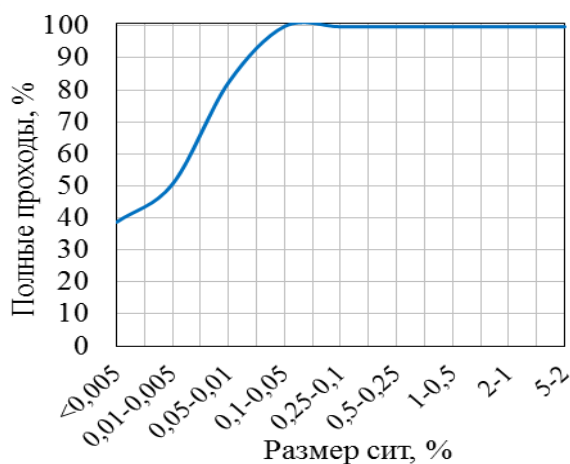
Из частиц, которые прошли через сито с отверстиями в 1 мм, отбирается средняя проба, помещается в фарфоровую чашу (вес уже известен) и взвешивается.

pH водной вытяжки определялась по ГОСТ 26423–85. Для определения кислотности среды брали пробы массой 30 г, взвешенные с погрешностью не более 0,1 г, которые помещали в стеклянные колбы. К пробам приливали спринцовкой по 150 см<sup>3</sup> дистиллированной воды. Грунт с водой перемешивали в течение 3 мин с помощью магнитной мешалки, после чего оставляли на 5 мин для отстаивания. Грунтовую суспензию, полученную таким образом, сливают в химический стакан и используют для измерения pH. Настройку pH-метра перед измерением проводили по трем буферным растворам с pH 4,01, 7, и 10, приготовленным из стандарт-титров. Показания прибора считывали не ранее чем через 1,5 мин после погружения электродов в измеряемую среду, отсчет брали после прекращения дрейфа измерительного прибора. Во время работы настройку прибора периодически проверяли по буферному раствору с pH 7.

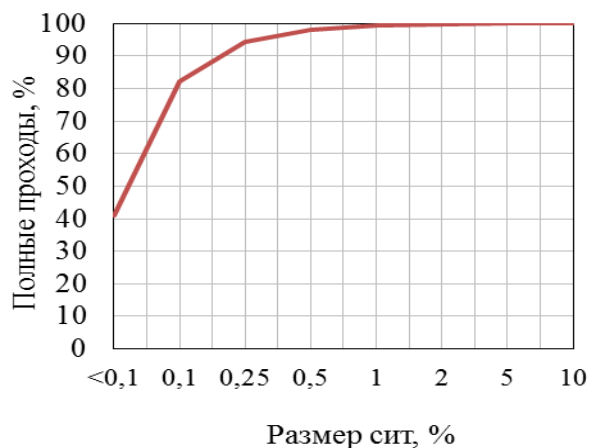
Потери массы пробы после прокаливания определялись по ГОСТ 26213–91. Метод основан на определении потери массы пробы после прокаливания при температуре 525 °С. Отбор проб для анализа проводили по ГОСТ 28168. Анализируемые пробы помещали в предварительно взвешенные фарфоровые тигли с таким расчетом, чтобы почва занимала не более 2/3 объема тигля, взвешивали их с погрешно-

стью не более 0,001 г, после чего помещали в холодный сушильный шкаф и нагревали его до 105 °С. Тигли с пробами почв, высушенными при (105±2) °С до постоянной массы, ставили в холодную муфельную печь, в которой постепенно доводили температуру до 200 °С. При появлении дыма печь отключали и приоткрывали дверцу. В течение 1 ч температуру в муфельной печи постепенно доводили до 300 °С. После прекращения появления дыма печь закрывали и температуру в муфельной печи поднимали до (525±25) °С. После нагревания тигли прокаливали в течение 3 ч.

Тигли с зольным остатком вынимали из муфельной печи, закрывали их крышками и ставили в эксикатор. Охлажденные до комнатной температуры тигли взвешивали с погрешностью не более 0,001 г. Несгоревшие частицы почвы дополнительно выжигали. Для этого в тигли добавляли несколько капель горячей дистиллированной воды с температурой более 90 °С и повторно прокаливали при температуре (525±25) °С в течение 1 ч, охлаждали в эксикаторе и взвешивали с погрешностью не более 0,001 г. После охлаждения и взвешивания оценивали изменение массы зольного остатка. Если изменение массы в сторону уменьшения или увеличения было менее 0,005 г, то анализ заканчивали и для расчета принимали наименьшее значение массы. При уменьшении массы на 0,005 г и более тигли с зольным остатком прокаливали дополнительно. Прокаливание заканчивали, если разность в массе при двух последовательных взвешиваниях составляла менее 0,005 г.



а



б

Рисунок 1 – Результаты определения зернового состава:  
а – суглинок тяжелый пылеватый; б – мелкозернистая золошлаковая смесь

Figure 1– Results of the determination of the grain composition  
a – heavy silt loam; b – fine ash and slag mixture

Результаты определения гранулометрического состава суглинка приведены на рисунке 1, а.

Исследованный суглинок согласно ГОСТ 33063–2014 классифицирован:

- по числу пластичности как суглинок легкий;
- по содержанию песчаных частиц как грунт пылеватый;
- по показателю текучести как тугопластичный.

*Золошлаковая смесь*

Для экспериментальных исследований наряду с природными грунтами был использован один из наиболее массовых и потенциально применимых техногенных грунтов – золошлаковая смесь из золоотвала СП ТЭЦ-4 АО «ТГК-11» г. Омска.

Отбор проб золошлаковых смесей производился на (GPS координаты места отбора 55.128071, 73.167423).

Определение естественной влажности суглинка выполнялось в соответствии с ГОСТ 5180–2015. Результаты проведенного испытания показаны в таблице 2. Определение зернового состава, потери при прокаливании, Ph водной вытяжки определялось аналогично испытаниям суглинка.

В последующем были произведены испытания по определению максимальной плотности (плотность сухого грунта) песка и его оптимальной влажности в соответствии с ГОСТ 22733–2016. Результаты проведенного испытания показаны в таблице 2.

Результаты ситового анализа в графической форме (кривые гранулометрического состава) приведены на рисунке 1, б.

По ГОСТ 33063–2014 по гранулометрическому составу и физико-механическим

свойствам ЗШС можно отнести к пескам пылеватым. По ГОСТ 33063–2014 по степени неоднородности гранулометрического состава ЗШС относится к неоднородным дисперсным грунтам.

*Стабилизатор грунта «Сателлит»*

Стабилизатор грунта «Сателлит» при взаимодействии с компонентами техногенного грунта изменяет их водно-физические свойства, способствует образованию прочных химических связей в кристаллических решетках. Техногенный грунт приобретает гидрофобные свойства, не подвержен набуханию и размоканию и образованию сложных коллоидных растворов.

Стабилизатор грунта на основе минеральной кислоты и поверхностно-активных веществ обеспечивает нейтрализацию токсикантов и благодаря присутствующим в составе стабилизатора поверхностно-активных веществ обеспечивает также стабилизацию и укрепление грунта. Разработан по ТУ 20.16.57-003-012970772-2019.

*Известь*

Известь – гашеная гидратная Ca(OH)<sub>2</sub>, получаемая в результате воздействия на негашеную известь CaO расчетного количества воды. В данном исследовании применялась белая, негашеная известь с активностью 50–60% по содержанию (CaO+MgO).

Химический состав извести по содержанию окислов, %:

- SiO<sub>2</sub> – 3,1;
- Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 0,85;
- CaO+MgO – 92,4;
- CO<sub>2</sub> – 1,2;
- MgO – 0,28;
- Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 0,42;
- K<sub>2</sub>O – 0,054.

Таблица 2  
Физико-механические свойства грунта

Table 2  
Physical and mechanical properties of soil

Наименование показателя	Фактические данные	Ед. изм.
Естественная влажность	20,1	%
Оптимальная влажность	27,1	%
Максимальная плотность скелета грунта	1,31	г/см <sup>3</sup>
Содержание песчаных частиц (2–0,05мм)	4,5	%
Потери при прокаливании	2,3	%
Ph водной вытяжки	9,3	-

## РЕЗУЛЬТАТЫ

Для исследования был приготовлен 81 образец зологрунта. Для удобства испытания образцы были разделены на 3 серии (таблица 3).

*Испытание №1. Укрепление зологрунта в пропорции 50% грунта и 50% ЗШС негашеной известью в различных пропорциях. Стабилизатор 0,4%.*

Результаты испытания по определению максимальной плотности (плотность сухого грунта) зологрунта и его оптимальной влажности показаны на графике (рисунок 2).

В результате смешивания суглинка и золошлака резко изменится показатель оптималь-

ной влажности полученной смеси. В сравнении с чистым золошлаком оптимальная влажность зологрунта уменьшилась на 11,5%, с 27,1 до 24%. При этом увеличилась на 8,4% плотность сухого грунта (с 1,31 до 1,42–1,44 г/см<sup>3</sup>). Введение извести не оказало значимых результатов.

*Испытание №2. Укрепление зологрунта в пропорции 25% грунта и 75% ЗШС негашеной известью в различных пропорциях. Стабилизатор 0,4%.*

Результаты испытания по определению максимальной плотности (плотность сухого грунта) зологрунта и его оптимальной влажности показаны на графике (рисунок 3).

Таблица 3  
Описание рецептов исследования

Table 3  
Description of the study recipes

Наименование серии испытаний	Рецепт			
	% ЗШС	% грунта	% извести	% стабилизатора
Испытание №1 Зологрунт в пропорции 50/50%	50	50	2	0,4
			4	
			6	
Испытание №2 Зологрунт в пропорции 75/25%	75	25	2	0,4
			4	
			6	
Испытание №3 Золошлаковая смесь 100%	100	0	2	0,4
			4	
			6	

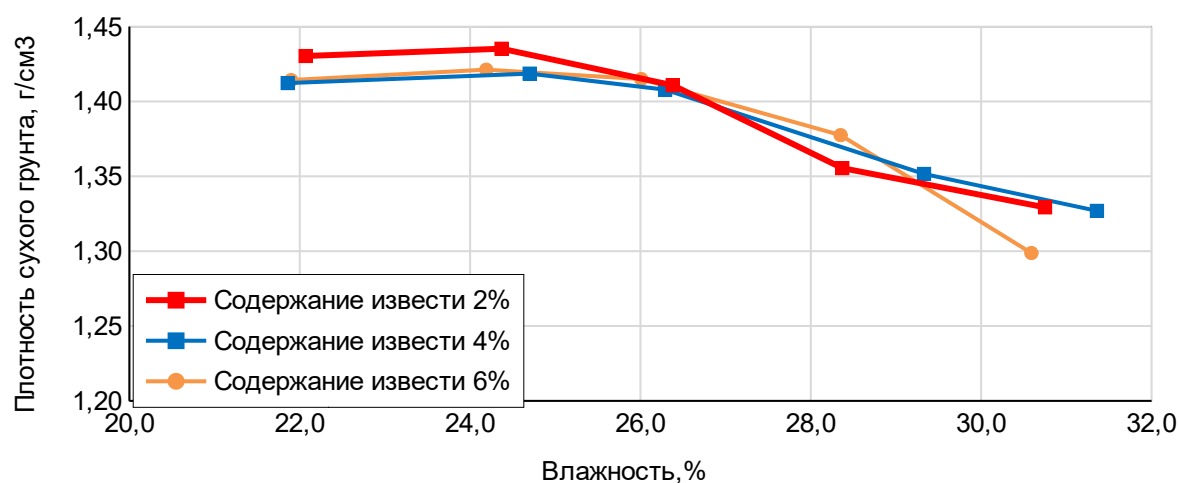


Рисунок 2 – График зависимости плотности сухого грунта от влажности

Figure 2 – Graph of the dependence of dry soil density on humidity



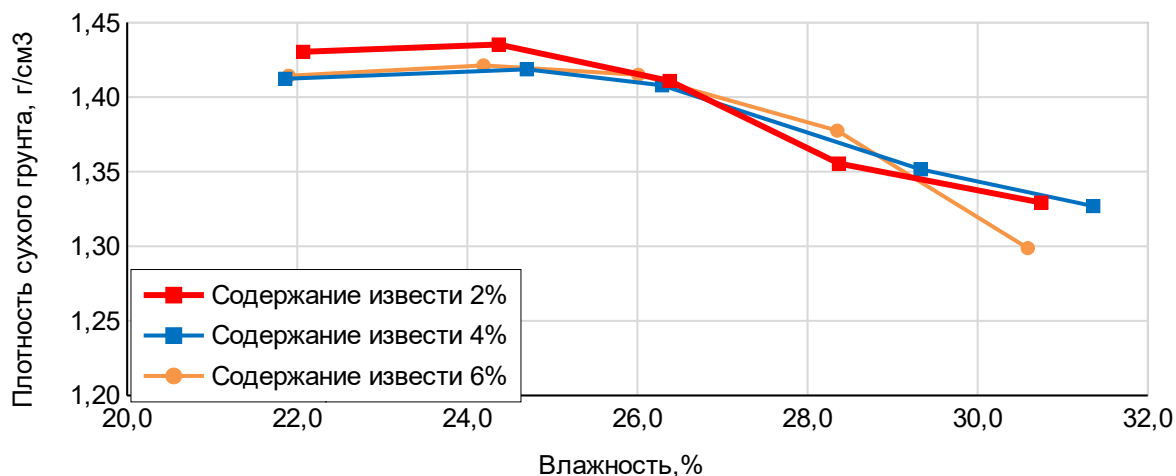


Рисунок 3 – График зависимости плотности сухого грунта от влажности

Figure 3 – Graph of the dependence of dry soil density on humidity

В сравнении с чистым золошлаком оптимальная влажность зологрунта уменьшилась на 4,1–11,5%, с 27,1 до 24–26%. При этом увеличилась на 2,3–6,1% плотность сухого грунта (с 1,31 до 1,34–1,39 г/см³). Введение извести в пропорции 2% от массы показало лучший результат. В сравнении с другими образцами плотность сухого грунта увеличилась на 1,5%.

**Испытание №3. Укрепление золошлаковой смеси негашеной известью в различных пропорциях. Стабилизатор 0,4%.**

При укреплении золошлаковой смеси в 2%, 4% и 6% известью оптимальная влажность

$W_{opt} = 26\%$ , максимальная плотность  $\rho_{max} = 1,66$  г/см³.

**Испытание №4. Определение предела прочности на сжатие зологрунта, укрепленного негашеной известью в различных пропорциях.**

В заключение производилось определение предела прочности на одноосное сжатие зологрунта. Образцы испытывались на прессе с электромеханическим приводом, отвечающим требованиям ГОСТ 28840–90. Результаты исследований показаны на графике (рисунок 4).

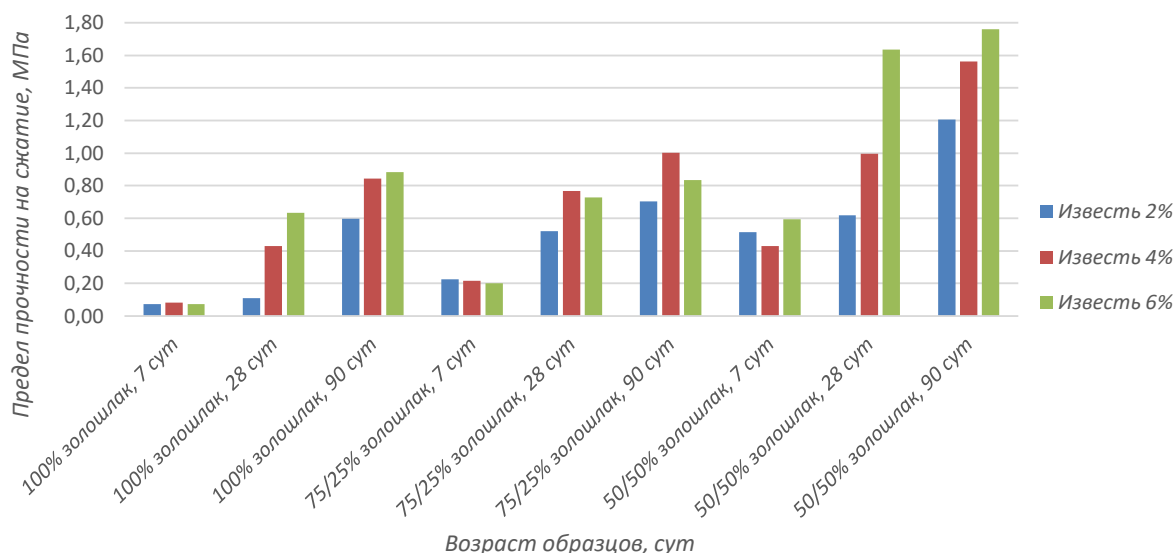


Рисунок 4 – Сводный график зависимости предела прочности на сжатие от возраста образцов при различном содержании негашеной извести по массе

Figure 4 – Summary plot of compressive strength vs. age of specimens with different contents of quicklime by mass

Судя по полученным данным, явно заметна зависимость предела прочности на сжатие от пропорции зологрунтовой смеси и количества извести. Так, различия в пределе прочности на сжатие между чистым золошлаком и зологрунтом в пропорции 50/50 при одинаковом количестве извести и возрасте образцов может составлять от 190 до 696%. В то же время различия в пределе прочности на сжатие между образцами с различной пропорцией извести при одинаковом возрасте образцов составляет от 117 до 640%.

## ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании проведенного анализа можно сделать заключение о том, что зологрунт в пропорции 50% золошлаковой смеси и 50% суглинка, укрепленный 6% извести и 0,4% стабилизатором, в возрасте 90 сут имеет предел прочности на сжатие 1,76 Мпа, что соответствует марке М10. Такая прочность достаточна для того, чтобы использовать ЗШС при строительстве рабочего слоя земляного полотна или нижних слоев оснований дорожной одежды.

Важно учесть, что добавка суглинка в высоких пропорциях (50%) способствует большему набору прочности. Это вызвано тем, что суглинок обладает большей удельной поверхностью и потенциалом катионного обмена с водой в сравнении с ЗШС.

Также стоит отметить, что применение неорганического вяжущего дало неоднозначные результаты. Виден явный прирост предела прочности при сжатии от введения извести. Но он незначителен. Возможно это вызвано тем, что известь потеряла свою активность. При этом необходимо учитывать тот факт, что при применении извести в качестве неорганического вяжущего материала значительно увеличивается время реакции. Так набор прочности до максимальных значений может занимать более 90 сут.

Результаты проведенных исследований показывают потенциальную возможность использования зологрунтовых материалов, укрепленных известью, при устройстве дополнительного слоя основания автомобильных дорог с капитальной или облегченной дорожной одеждой на дорогах в I–V дорожно-климатической зоне.

В завершение необходимо учесть, что для получения полной картины изучения зологрунтовых материалов следует провести лабораторные испытания с применением различных вяжущих (цемент, битум и т.д.) и выяснить, ка-

кое вяжущее и в каком количестве наиболее целесообразно применять. Также неясно влияние стабилизатора. Необходимо провести испытания без него. Требуется провести дополнительные исследования по определению морозостойкости и водостойкости зологрунтовых композитов, укрепленных известью.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Нгуен Ван Лонг. Предложения по расчету конструкций дорожных одежд с учетом колебательности при повышенных температурах в условиях Вьетнама // Научный вестник Воронежского ГАСУ. Строительство и архитектура. 2013. № 2 (30). С. 74–82.
2. Подольский В.П., Нгуен Ван Лонг, Черноусов Д.И. Причины колееобразования на асфальтобетонных покрытиях и методы повышения их деформативной устойчивости в условиях Южного Вьетнама // Научный вестник Воронежского ГАСУ. Строительство и архитектура. 2013. № 1 (29). С. 57–65.
3. Wooltorton, Moisture content and the CBR method of design, Proceedings of the Thirty-Seventh Annual Meeting of the Highway Research Board, 1958, 1(40): 268-297.
4. B.R. Phanikumar, K. Amrutha, "Effect of overburden pressure and degree of saturation on compressibility characteristics," International Journal of Geomechanics and Geoengineering, 2013, vol. 9, no. 1, pp. 52-62.
5. I.L. Sabri, "Study on the impact of moisture content on subgrade strength," in Proc. 5th International Symposium, Sri Lanka, 2015, pp. 71-76
6. Effect of Soaking Period of Clay on its California Bearing Ratio Value Proceedings of the 4th World Congress on Civil, Structural, and Environmental Engineering (CSEE'19) Rome, Italy – April, 2019 Paper No. ICGRE 162 DOI: 10.11159/icgre19.162)
7. Kazemian, "Assessment of stabilization methods for soft soils by admixtures", International Conference on Science and Social Research (CSSR), On Page(s): 118 – 121, 2010
8. Emerging trends in expansive soil stabilisation: A review Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2019. Vol. 11.
9. Raju Sarkar & A.R. Dawson (2017) Economic assessment of use of pond ash in pavements, International Journal of Pavement Engineering, Vol. 18, pp. 578-594,
10. Maneli, A. & Kupolati, W. & Abiola, Oladapo & Ndambuki, Jm. (2015). Influence of fly ash, ground-granulated blast furnace slag and lime on unconfined compressive strength of black cotton soil. Road Materials and Pavement Design. 17: 1-9.
11. Подольский В.П., Нгуен Ван Лонг, Нгуен Дык Ши. О возможности расширения ресурсной базы дорожного строительства за счет стабилизации и укрепления грунтов // Научный вестник Воронежского ГАСУ. Строительство и архитектура. 2014. № 1 (33). С. 102–111.

12. Машкин Н.А., Стенина Н.Г., Машкин А.Н., Хадбаатар А. Золошлаковые отходы ТЭЦ Монголии и их применение в грунтозолобетоне // *Инновации в жизнь*. 2015. С. 119–122.

13. Güneyli H. Influence of Afın-Elbistan highly limy fly ash on engineering behavior of a cohesive soil / H. Güneyli // *Scientific Research and Essays*. 2010. 5 (11): 1307-1316

14. Effect of class F fly ash on fine sand compaction through soil stabilization Heliyon, 2017. Vol. 3. e00274 <http://dx.doi.org/10.1016/j.heliyon.2017.e00274>

15. Improvement in California Bearing Ratio of various soils in Botswana by fly ash\* International Ash Utilization Symposium, 2001. pp 90.

16. Khan M.A. A study of multilayer soil-fly ash layered system under cyclic loading / M.A. Khan, A.Usmani, S.S. Shah, H. Abbas // *International Journal of Civil Engineering*. 6. 2: 73-89.

17. Prabakar J. Influence of fly ash on strength behavior of typical soil / J. Prabakar, N. Dendorkar, R.K. Morchhale // *Construction and Building Materials*. 2004. 18: 263-267

## REFERENCES

1. Nguen, Van Long. Predlozheniya po raschetu konstrukcij dorozhnyh odezhd s uchetom koleeustojchivosti pri povyshennyh temperaturah v usloviyah V'etnama [Proposals for the calculation of pavement structures taking into account track resistance at elevated temperatures in Vietnam] / N. V. Long. *Nauchnyj vestnik Voronezhskogo GASU. Stroitel'stvo i arhitektura*, 2013. 2 (30): 74-82.

2. Podol'skij, VI. P. Prichiny koleeobrazovaniya na asfal'tobetonnyh pokrytiyah i metody povysheniya ih deformativnoj ustojchivosti v usloviyah YUzhnogo V'etnama [Reasons for rutting on asphalt concrete pavements and methods for increasing their deformation resistance in the conditions of South Vietnam] / VI. P. Podol'skij, Nguen Van Long, D. I. CHernousov // *Nauchnyj vestnik Voronezhskogo GASU. Stroitel'stvo i arhitektura*. – 2013. 1 (29): 57–65. (In Russian)

3. Wooltorton, Moisture content and the CBR method of design, Proceedings of the Thirty-Seventh Annual Meeting of the Highway Research Board, 1958, 1(40): 268-297.

4. B.R. Phanikumar, K. Amrutha, "Effect of overburden pressure and degree of saturation on compressibility characteristics," *International Journal of Geomechanics and Geoengineering*, 2013. 9(1): 52-62,

5. I.L. Sabri, "Study on the impact of moisture content on subgrade strength," in Proc. 5th International Symposium, Sri Lanka, 2015: 71-76

6. Effect of Soaking Period of Clay on its California Bearing Ratio Value Proceedings of the 4th World Congress on Civil, Structural, and Environmental Engineering (CSEE'19) Rome, Italy – April, 2019 DOI: 10.11159/icgre19.162

7. Kazemian, "Assessment of stabilization methods for soft soils by admixtures", International Conference

on Science and Social Research (CSSR), 2010: 118–121.

8. Emerging trends in expansive soil stabilisation: A review *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2019. 11.

9. Raju Sarkar & A.R. Dawson (2017) Economic assessment of use of pond ash in pavements, *International Journal of Pavement Engineering*, 18(7): 578-594,

10. Maneli, A. & Kupolati, W. & Abiola, Oladapo & Ndambuki, Jm. (2015). Influence of fly ash, ground-granulated blast furnace slag and lime on unconfined compressive strength of black cotton soil. *Road Materials and Pavement Design*. 17: 1-9

11. Podol'skij, VI. P. o vozmozhnosti rasshireniya resursnoj bazy dorozhnogo stroitel'stva za schet stabilizacii i ukrepleniya gruntov [on the possibility of expanding the resource base of road construction through stabilization and strengthening of soils] / VI. P. Podol'skij, Nguen Van Long, Nguen Dyk SHi // *Nauchnyj vestnik Voronezhskogo GASU. Stroitel'stvo i arhitektura*. 2014. 1 (33): 102-111. (In Russian)

12. N.A. Mashkin Zoloshlakovye othody TEC Mongolii i ih primeneniye v gruntozobetonah [Ash and slag waste from thermal power plants of Mongolia and their application in soil-ash concrete]. N.A. Mashkin, N.G. Stenina, A.N. Mashkin *Innovacii v zhizn'*, 2015. 1 (12): 119-122 (In Russian)

13. Güneyli H. Influence of Afın-Elbistan highly limy fly ash on engineering behavior of a cohesive soil / H. Güneyli // *Scientific Research and Essays*. 2010. 5 (11): 1307-1316

14. Effect of class F fly ash on fine sand compaction through soil stabilization Heliyon, 2017. 3.

15. Improvement in California Bearing Ratio of various soils in Botswana by fly ash\* International Ash Utilization Symposium, 2001: 90.

16. Khan M.A. A study of multilayer soil-fly ash layered system under cyclic loading. M.A. Khan, A.Usmani, S.S. Shah, H. Abbas *International Journal of Civil Engineering*. 6.(2): 73-89.

17. Prabakar J. Influence of fly ash on strength behavior of typical soil / J. Prabakar, N. Dendorkar, R.K. Morchhale. *Construction and Building Materials*. 2004. 18.: 263-267 (In Russian)

## ВКЛАД СОАВТОРОВ

*Звягинцев А.В. Автор статьи.*

*Лунев А.А. Консультирование по методике проведения исследования.*

*Кацарский Р. С. Консультирование по методике проведения исследования.*

*Шевченко Д.А. Помощь в проведении исследований.*

## COAUTHORS' CONTRIBUTION

*Alexandr V. Zvyagintsev, the author of the article.*

*Alexander A. Lunev, advice on research methods.*

*Roman S. Katsarsky, advice on research methods.*

*Denis A. Shevchenko, research assistance*

**ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ**

*Звягинцев Александр Владимирович – студент гр. См-19МА6 ФГБОУ ВО «СибАДИ» (644080, г. Омск, пр. Мира, 5, e-mail: sahasvjgencev@mail.ru).*

*Лунев Александр Александрович – канд. техн. наук, доц. кафедры «Проектирование дорог» ФГБОУ ВО «СибАДИ» (644080, г. Омск, пр. Мира, 5, e-mail: lunev.al.al@gmail.com).*

*Кацарский Роман Сергеевич – инженер-лаборант НИЛ «ИТСМ» ФГБОУ ВО «СибАДИ» (644080, г. Омск, пр. Мира, 5, e-mail: katsarroman@mail.ru).*

*Шевченко Денис Александрович – студент гр. АДб-17Д1 ФГБОУ ВО «СибАДИ» (644080, г. Омск, пр. Мира, 5, e-mail: Kirintor.rom@icloud.com).*

**INFORMATION ABOUT THE AUTHORS**

*Alexandr V. Zvyagintsev (Omsk, Russia) – Student of the Master and Postgraduate Studies Institute,*

*Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Siberian State Automobile and Highway University (SibADI) (644080, Omsk, Mira Ave., 5 e-mail: sahasvjgencev@mail.ru).*

*Alexander A. Lunev (Russia, Omsk) – Cand. of Sci., Associate Professor of the Road Design Department, Siberian State Automobile and Highway University (SibADI)” (644080, Mira, 5 prospect, e-mail: Scientific adviser.*

*Roman S. Katsarsky (Russia, Omsk) –Engineer of the research laboratory, Siberian State Automobile and Highway University (SibADI)” (644080, Mira, 5 prospect, e-mail: katsarroman@mail.ru).*

*Denis A. Shevchenko (Russia, Omsk) – Student of the Highways and Bridges Faculty, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Siberian State Automobile and Highway University (SibADI) (644080, Omsk, Mira Ave., 5 e-mail: Kirintor.rom@icloud.com).*