

Научная статья  
УДК 625.81  
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-5-786-800>  
EDN: XCRHGS



## ЗАВИСИМОСТЬ МОДУЛЯ УПРУГОСТИ ГРУНТОВ, УКРЕПЛЕННЫХ НЕОРГАНИЧЕСКИМИ ВЯЖУЩИМИ, ОТ ПРОЧНОСТИ НА СЖАТИЕ

Н.А. Слободчикова<sup>1</sup>, С.В. Ключев<sup>2</sup> ✉, К.В. Плюта<sup>3</sup>

<sup>1</sup>ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет»,  
г. Иркутск, Россия

<sup>2</sup>ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет  
им. В.Г. Шухова»,  
г. Белгород, Россия

<sup>3</sup>ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет»,  
г. Иркутск, Россия

✉ ответственный автор  
[kv\\_plyuta@mail.ru](mailto:kv_plyuta@mail.ru)

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Модуль упругости относится к одной из основных физико-механических характеристик укрепленных местных грунтов. Деформации грунтов и строительных материалов принято описывать законом Гука. К основным методам лабораторных испытаний относятся методы с применением: одноосного сжатия, трехосного сжатия, жесткого штампа. Определение модуля упругости является сложным, продолжительным во времени и трудоемким испытанием. Существуют эмпирические модели, которые описывают взаимосвязь модуля упругости от разных параметров и характеристик (прочности на сжатие, содержания вяжущего в смеси и др.). Однако данные модели в основном разработаны для стабилизированных грунтов и для щебня, укрепленного портландцементом.

**Методы и материалы.** Для определения закономерности изменения модуля упругости грунтов, укрепленных неорганическими вяжущими материалами, от прочности на сжатие проведены исследования на образцах различных грунтов, укрепленных портландцементом и известью. Для изготовления образцов применялись существующие методики, указанные в нормативно-технической документации.

**Результаты.** На основе выполненных исследований разработаны две эмпирические модели, отражающие зависимость значений модуля упругости от значений прочности на сжатие грунтов, укрепленных портландцементом и известью.

**Обсуждение и заключение.** Существующие методы испытаний модуля упругости являются продолжительными и трудоемкими. Разработанные эмпирические модели позволяют получать ориентировочные значения модуля упругости от значений прочности на сжатие образцов грунтов, укрепленных портландцементом и известью.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** укрепленные грунты, модуль упругости, методы лабораторных испытаний, прочность на сжатие, эмпирические модели

Статья поступила в редакцию 31.07.2024; одобрена после рецензирования 02.10.2024; принята к публикации 17.10.2024.

Все 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: Слободчикова Н.А., Ключев С.В., Плюта К.В. Зависимость модуля упругости грунтов, укрепленных неорганическими вяжущими, от прочности на сжатие // Вестник СибАДИ. 2024. Т. 21, № 5. С. 786-800. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-5-786-800>

© Слободчикова Н.А., Ключев С.В., Плюта К.В., 2024



Контент доступен под лицензией  
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Original article  
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-5-786-800>  
EDN: XCRHGS

## DEPENDENCE OF THE SOILS' ELASTIC MODULUS REINFORCED WITH INORGANIC BINDERS ON COMPRESSIVE STRENGTH

Nadezhda A. Slobodchikova<sup>1</sup>, Sergey V. Klyuev<sup>2</sup> ✉, Kseniya V. Plyuta<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Irkutsk National Research Technical University,  
Irkutsk, Russia

<sup>2</sup>Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov,  
Belgorod, Russia

<sup>3</sup>Irkutsk National Research Technical University,  
Irkutsk, Russia

✉ corresponding author  
[kv\\_plyuta@mail.ru](mailto:kv_plyuta@mail.ru)

### ABSTRACT

**Introduction.** The modulus of elasticity refers to one of the main physical and mechanical characteristics of reinforced local grounds. Deformations of soils and building materials are usually described by Hooke's law. The main laboratory testing methods include applying of uniaxial compression, triaxial compression, rigid stamp technics. Determining the modulus of elasticity is a complex, time-consuming and labor-intensive test. There are empirical models that describe the relationship between the modulus of elasticity and various parameters and characteristics (compressive strength, binder content in the mixture, etc.). However, these models are mainly developed for stabilized soils and for crushed stone reinforced with Portland cement.

**Methods and materials.** To determine the pattern of change in the modulus of soils' elasticity reinforced with inorganic binding materials from compressive strength, studies were conducted on samples of various soils strengthened with Portland cement and lime. Existing methods specified in the regulatory and technical documentation were used to produce the samples.

**Results.** Based on the performed research, two empirical models were developed that reflect the dependence of the elastic modulus values on the compressive strength values of soils reinforced with Portland cement and lime.

**Discussion and conclusions.** Existing testing methods of the elastic modulus are lengthy and labor-intensive. The developed empirical models allow us to obtain approximate values of the elastic modulus from the values of compressive strength of soil samples reinforced with Portland cement and lime.

**KEYWORDS:** reinforced soils, modulus of elasticity, laboratory testing methods, compressive strength, empirical models

**The article was submitted: 31.07. 2024; approved after reviewing: 02.10.2024; accepted for publication: 17.10.2024.**

**All 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.** Slobodchikova N.A., Klyuev S.V., Plyuta K.V. Dependence of the soils' elastic modulus reinforced with inorganic binders on compressive strength. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2024; 21 (5): 786-800. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-5-786-800>

© Slobodchikova N.A., Klyuev S.V., Plyuta K.V., 2024



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

## ВВЕДЕНИЕ

Укрепление местных грунтов неорганическими вяжущими материалами является одной из эффективных технологий строительства автомобильных дорог. Методам укрепления грунтов посвящены работы различных авторов. В работе [1] приведены результаты исследований влияния добавок неорганических вяжущих, в том числе техногенных отходов, на дисперсность глинистых грунтов. В работе [2] представлены результаты лабораторных исследований получения комплексного неорганического вяжущего на основе золы-уноса и фторгипса для укрепления грунтов. В работе [3] рассмотрены методы подбора составов грунтов, укрепленных известью. В [4] показаны результаты исследований влияния техногенных отходов на деформации, вызванные набуханием и усадкой глинистых грунтов. В [5] приведены результаты применения различных тип золы-уноса для укрепления грунтов и их влияние на прочностные характеристики. В [6] представлены результаты исследования свойств укрепленных грунтов, имеющих в своем составе известь. В [7] приведены результаты исследований укрепления глинистых грунтов различными техногенными отходами. Подбор составов грунтов, укрепленных неорганическими вяжущими материалами, производится путем изготовления лабораторных образцов и определения физико-механических характеристик. К таким характеристикам относится модуль упругости  $E$ , который также используется при расчете конструкций дорожных одежд автомобильных дорог.

При сжатии, растяжении или сдвиге укрепленного грунта происходит смещение отдельных минеральных частиц, сжатие воды и водных пленок. После окончания действия нагрузки объем воды и воздуха восстанавливается. Одновременно с упругими возникают остаточные деформации, когда число остаточных деформаций значительно превосходит упругие, материал разрушается. Упругой деформации соответствует модуль упругости, полной деформации (условно включающей упругие и остаточные деформации) соответствует модуль деформации.

Исследованиями деформационных характеристик укрепленных и стабилизированных грунтов занимались<sup>1</sup> [8, 9, 10, 11, 12, 13, 14,

15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26]. Деформации грунтов и строительных материалов принято описывать законом Гука

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon}, \quad (1)$$

где  $E$  модуль упругости, Па;

$\sigma$  напряжение, вызываемое в образце действующей силой, Па.

$$\sigma = \frac{F}{A}, \quad (2)$$

где  $F$  – действующая на образец сила, Н;

$A$  – площадь приложения силы, м<sup>2</sup>;

$\varepsilon$  – упругая относительная деформация материала, вызванная напряжением.

$$\varepsilon = \frac{l_1 - l_0}{l_0} \cdot 100\%, \quad (3)$$

где  $l_1$  – размер образца после деформации;

$l_0$  – первоначальный размер образца.

В нормативной и научно-технической литературе приведены различные методы определения деформационных характеристик [11, 20].

К основным методам относятся методы с применением:

1. Одноосного сжатия.
2. Трехосного сжатия.
3. Жесткого штампа.

При этом определяемые разными способами деформационные характеристики одного и того же грунта могут различаться в несколько раз, т.к. проводятся при различных граничных условиях [21].

В работе [11], например, приводятся результаты анализа методов испытаний в разных странах. В Китае и в Европе используется медленная повторяющаяся нагрузка для имитации транспортной нагрузки. При этом условия нагружения отличаются от фактической транспортной нагрузки, и, соответственно, модуль упругости может необъективно отражать соотношение деформаций и напряжений материалов при воздействии нагрузки транспортного средства [11].

В Америке и Австралии применяют повторное нагружение при трехосном испытании для определения упругости необработанного грунта или материалов основания. Метод основан на воздействии импульса нагрузки на образец

<sup>1</sup> Бунтова О.С. Обработка результатов эксперимента. Физико-математические науки и информационные технологии: проблемы и тенденции развития: сб. ст. по матер. II Междунар. науч.-практ. конф. Новосибирск: СибАК, 2012. Обработка результатов эксперимента.

длительностью 0,1 с, с последующей разгрузкой в течение 0,9 с. Такой режим больше похож на нагрузку от движения транспортного средства, но требует использования габаритного оборудования [11].

Также стоит отметить, что трехосное испытание под нагрузкой проводится в условиях ограничивающего давления, тогда как влияние ограничивающего давления на модуль грунта, укрепленного неорганическими вяжущими, незначительно по сравнению с неукрепленными или стабилизированными грунтами земляного полотна, т.к. поперечные деформации укрепленных грунтов, как и других строительных материалов с жесткими структурными связями, незначительны.

Определение модуля упругости в лабораторных условиях является сложным и трудоемким. Существуют эмпирические модели, которые описывают взаимосвязь модуля упругости от других прочностных характеристик.

В исследовании [22] отмечается, что с наибольшей точностью прогнозировать значение модуля упругости для стабилизированных грунтов земляного полотна позволяют следующие уравнения:

$$M_r = UCS^{a+b\sigma_d}, \quad (4)$$

где  $a$  и  $b$  – параметры регрессии;  
 $UCS$  – прочность на сжатие.

$$M_r = UCS \left[ a \cdot \left( \frac{\theta}{\sigma_{atm}} \right)^b \cdot \left( \frac{\tau_{oct}}{\sigma_{atm}} \right)^c \right], \quad (5)$$

где  $\theta$  – объемное напряжение  $\sigma_1 + 2\sigma_3$ ;  
 $\tau_{oct}$  – напряжение сдвига в октаэдре ( $\sqrt{2/3}(\sigma_1 - \sigma_3)$ );  
 $\sigma_{atm}$  – атмосферное давление, 101 кПа;  
 $a$ ,  $b$  и  $c$  – параметры регрессии.

Модуль упругости для грунтов, стабилизированных известью:

$$M_{Rt} = 0,124UCS + 9,8, \quad (6)$$

где  $UCS$  – прочность на сжатие.

Для определения возрастающих пластических деформаций в зависимости от изменения модуля упругости, которое можно ожидать сезонно и в течение всего срока службы дорожного покрытия, используют формулу

$$\sum_{t=1}^m \varepsilon_p = a \cdot \left( \frac{\sigma_{dt}}{M_{Rt}} \right) \cdot N_t^b, \quad (7)$$

$$\sum_1^m t = T, \quad (8)$$

где  $\varepsilon_p$  – накопленная постоянная деформация в микродеформациях;

$T$  – расчетный срок службы дорожного покрытия;

$\sigma_{dt}$  – отклоняющее напряжение в кПа за период времени  $t$ ;

$N$  – это количество повторений нагрузки за период времени  $t$ ;

$a$  и  $b$  – параметры регрессии.

В исследовании [23] указано, что модуль упругости щебня, укрепленного портландцементом, в любое время твердения,  $M_{Rt}$ , можно оценить исходя из прочности на сжатие при том же времени твердения ( $UCS_t$ ):

$$M_{Rt} = m_0 UCS_t, \quad (9)$$

где  $M_{Rt}$  – модуль упругости после  $t$  дней времени отвержения;

$m_0$  – наклон линии тренда регрессионной модели;

$UCS$  – прочность на сжатие;

$t$  – время твердения.

$$m_0 = m_1 \frac{1}{F} + m_2 \cdot I_p + m_3 \cdot AC + m_4 \frac{R_{сж1}}{p_a} + b, \quad (10)$$

где  $F$  – содержание частиц, проходящих через сито № 200, %;

$AC$  – количество вяжущего, % от веса сухого грунта;

$I_p$  – число пластичности;

$R_{сж1}$  – прочность на сжатие после 1 дня твердения;

$p_a$  – атмосферное давление;

$m_1, m_2, m_3, m_4$  – параметры регрессии.

Рассмотренные модели в основном разработаны для стабилизированных грунтов, формулы (9), (10) подготовлены для щебня, укрепленного портландцементом. Отсутствуют исследования модуля упругости укрепленных грунтов. И, как следствие, отсутствуют исследования зависимости модуля упругости грунтов, укрепленных неорганическими вяжущими, от прочностных характеристик.

Учитывая изложенное выше в работе, поставлена цель – определить закономерности изменения модуля упругости грунтов, укрепленных неорганическими вяжущими материалами, от прочности на сжатие.

Задачи:

1. Определить прочность на сжатие грунтов, укрепленных неорганическими вяжущими материалами.

2. Определить модуль упругости образцов грунтов, укрепленных неорганическими вяжущими, путем предварительного нагружения и последующей разгрузки образцов.

Таблица 1  
Гранулометрический состав грунтов  
Источник: составлено авторами.

Table 1  
Granulometric composition of soils  
Source: compiled by the authors.

Размер сит, мм								Классификация (ГОСТ 25100)
10	5	2	1	0,5	0,25	0,1	< 0,1	
4,64	12,53	21,29	30,20	42,70	56,26	70,71	100,00	Суглинок
0,00	0,00	3,25	5,87	11,51	50,05	82,78	100,00	Супесь
0,00	0,00	8,49	12,86	21,77	64,29	90,64	100,00	Песок средней крупности
40,35	50,49	54,88	57,17	64,08	85,34	94,00	100,00	Крупнообломочный гравийный, заполнитель песок гравелистый грунт
5,52	13,96	25,38	50,64	65,83	71,34	77,55	90,51	Золошлаковая смесь

Таблица 2  
Физико-механические характеристики грунтов  
Источник: составлено авторами.

Table 2.  
Physical and mechanical characteristics of soils  
Source: compiled by the authors.

Наименование показателя	Един. изм.	Требования к испытываемому материалу		Результаты испытаний				
		Нормативно- техническая документация	Норма- тивное значение	Суглинок	Супесь	Песок средней крупнос- ти	Гравий- ный	Золош- лаковая смесь
Содержание частиц более 2 мм, по массе	%	ГОСТ 25100– 2020	-	21,29	3,25	8,49	54,88	30,28
Влажность на границе текучести	%	ГОСТ 5180– 2015	-	25,78	19,75	-	-	-
Влажность на границе раскатывания	%	ГОСТ 5180– 2015	-	16,43	14,32	не раскаты- вается в жгут диамет- ром 3 мм	не раскаты- вается в жгут диамет- ром 3 мм	не раскаты- вается в жгут диамет- ром 3 мм
Число пластичности	%	ГОСТ 25100– 2020	$7 < I_p \leq 12$	9,35	5,43	-	-	-
Показатель текучести	д.е.	ГОСТ 25100– 2020	$IL < 0$	-1,4	-2,40	-	-	-

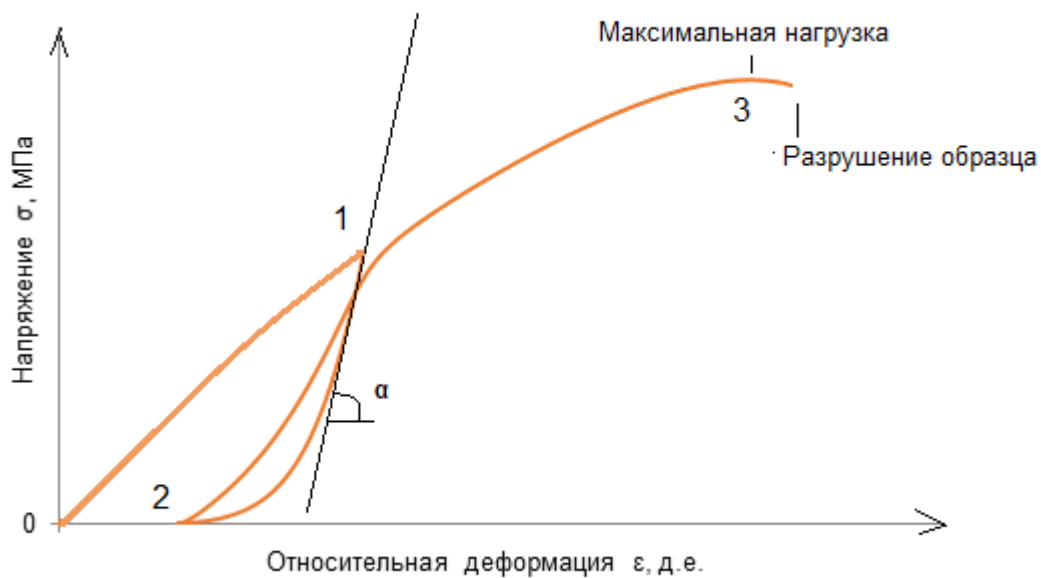


Рисунок 1 – Диаграмма деформирования образца укрепленного грунта:  
0-1 – нагружение; 1-2 – разгрузка; 2-3 – нагружение  
Источник: составлено авторами.

Figure 1 – Deformation diagram of a reinforced soil sample:  
0-1 – loading; 1-2 – unloading; 2-3 – loading  
Source: compiled by the authors

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для проведения исследования использованы следующие материалы и грунты:

- крупнообломочный гравийный грунт;
- песок средней крупности;
- супесь легкая песчанистая;
- суглинок легкий песчанистый;
- золошлаковая смесь;
- портландцемент;
- известь.

Вычисление физико-механических характеристик грунтов и материалов осуществлено в лаборатории стандартными методами ГОСТ. Результаты определения гранулометрического состава приведены в таблице 1.

Физико-механические характеристики грунтов приведены в таблице 2.

Определение модуля упругости грунтов, укрепленных неорганическими вяжущими, осуществляется в следующей последовательности:

1. Изготовление образцов грунта, укрепленного портландцементом и известью, с предварительно определенными значениями максимальной плотности и оптимальной влажности.

2. Твердение образцов в нормальных условиях (при температуре  $20 \pm 2$  °С и относительной влажности воздуха  $95 \pm 5\%$ ) до достижения ими проектного возраста.

3. Водонасыщение образцов стандартным методом ГОСТ Р 70452.

4. Определение прочности на сжатие стандартным методом ГОСТ Р 70452.

5. Нагружение лабораторных образцов на прессе.

Поперечные деформации материалов с жесткими структурными связями незначительны, поэтому нагружение образца создается без ограничивающего давления.

Нагружение образцов укрепленного грунта производят на прессе статической нагрузкой. При достижении нагрузкой значения на уровне 50% от разрушающей нагрузки производится разгрузка образца и повторное нагружение (циклирование) до разрушающей нагрузки. Деформации образцов контролируются по датчику перемещения плиты пресса (рисунок 1).

6. Обработка результатов.

Значение модуля упругости определяется по формулам (1)–(3). За конечный результат принимают среднее арифметическое значение серии лабораторных образцов

Таблица 3  
Уровни надежности и коэффициент Стьюдента  
Источник: составлено авторами.

Table 3  
Reliability levels and Student's coefficient  
Source: compiled by the authors.

Тип дорожных одежд	Уровень надежности Кн	Коэффициент Стьюдента t
Капитальный	0,98	3,4
	0,95	2,6
	0,92	2,2
	0,90	2,0
Облегченный	0,90	2,0
	0,85	1,7
Переходный	0,82	1,6

$$m_0 = m_1 \frac{1}{F} + m_2 \cdot I_p + m_3 \cdot AC + m_4 \frac{R_{сж1}}{pa} + b, \quad (11)$$

где  $E_1, E_2, \dots, E_n$  – значения модуля упругости образцов 1, 2, ... n;

n – количество образцов.

Для оценки точности полученных результатов при малом количестве измерений ( $2 \leq n \leq 10$ ) используют методы математической статистики, разработанной для малого числа измерений. При этом полученные результаты рассматривают как случайную выборку из некоторой генеральной совокупности.

Оценку точности измерений и правильности производят с помощью следующих критериев<sup>2</sup>.

Единичные отклонения (отклонения отдельных измерений от среднего арифметического):

$$E_i = \bar{E} - E_i. \quad (12)$$

Средняя квадратическая ошибка отдельного измерения

$$S = \sqrt{\frac{\sum(\bar{E} - E_i)^2}{n-1}}. \quad (13)$$

Коэффициент вариации

$$v = \frac{S}{\bar{E}}. \quad (14)$$

Итоговое значение модуля упругости

$$E = \bar{E}(1 - t \cdot v), \quad (15)$$

где t – коэффициент Стьюдента при допустимом уровне надежности.

Уровень надежности принимается по ПНСТ 542–2021 (таблица 3).

Для отбраковки выпадающих результатов необходимо сравнить отдельные значения модуля упругости со средним значением. Отклонение отдельных значений от среднего не должно превышать 15–20%.

### РЕЗУЛЬТАТЫ

По результатам проведенных исследований подобраны составы грунтов, укрепленных неорганическими вяжущими материалами, и определены их физико-механические характеристики (таблица 4, рисунки 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9).

<sup>2</sup> Бунтова О.С. Обработка результатов эксперимента. Физико-математические науки и информационные технологии: проблемы и тенденции развития: сб. ст. по матер. II Междунар. науч.-практ. конф. Новосибирск: СибАК, 2012. Обработка результатов эксперимента.

Таблица 4  
 Результаты определения модуля упругости золошлаковой смеси,  
 укрепленной неорганическими вяжущими  
 Источник: составлено авторами.

Table 4.  
 Results of determining the elastic modulus  
 of an ash-slag mixture reinforced with inorganic binders  
 Source: compiled by the authors.

Наименование грунта	Вяжущее	Содержание вяжущего, %	Прочность на сжатие, МПа	Модуль упругости, МПа
Гравийный грунт с добавлением золошлаковой смеси	Портландцемент	6	5,58	1466
			7,6	1500
			5,64	1555
			7,57	1416
			6,35	1461
			6,14	1625
			6,65	1400
			6,81	1600
Золошлаковая смесь	Портландцемент	6	6,58	1400
			0,99	666
			0,81	500
			0,77	500
			0,62	500
Суглинок	Портландцемент	4	0,96	666
			1,29	1000
			1,21	1000
			2	1000
Супесь	Портландцемент	6	1,42	1000
			2,1	1000
Песок средней крупности	Портландцемент	6	2,4	743
			4,27	1200
			3,85	1200
			4,57	1327
			4,17	1429
			3,92	1473
Супесь	Известь	7	3,77	1473
			0,11	100
Супесь	Известь	6	0,27	100
			0,11	100
Суглинок	Известь	10	0,21	100
			3,86	1333
			3,37	1200



Наименование грунта	Вязущее	Содержание вяжущего, %	Прочность на сжатие, МПа	Модуль упругости, МПа
Суглинок	Известь	6	3,28	775
			4,26	1300
			4,12	1175
			4,79	1233
			4,03	1360
			4,38	1429
			4,03	1529
			4,11	1617
			3,72	1289
			4,76	1167
Золошлаковая смесь	Известь	7	4,01	1428
			4,39	1400
			4,28	1428
			5,69	1480
			5,56	2000
			5,07	1778
Золошлаковая смесь	Известь	6	5,39	1684
			4,22	1000
			3,1	1200
			3,82	1168
			3,71	1122

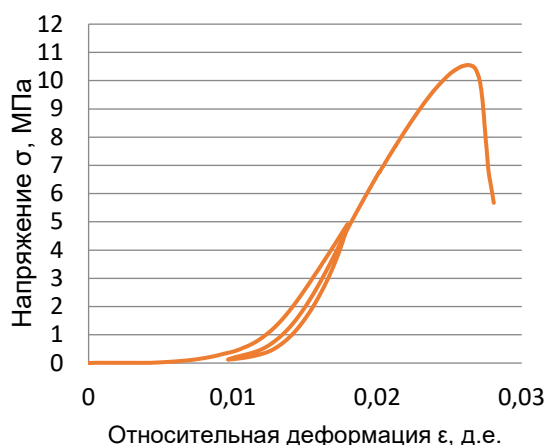


Рисунок 2 – Определение модуля упругости суглинка, укрепленного портландцементом  
Источник: составлено авторами.

Figure 2 – Determination of the elastic modulus of the loam reinforced with Portland cement  
Source: compiled by the authors.

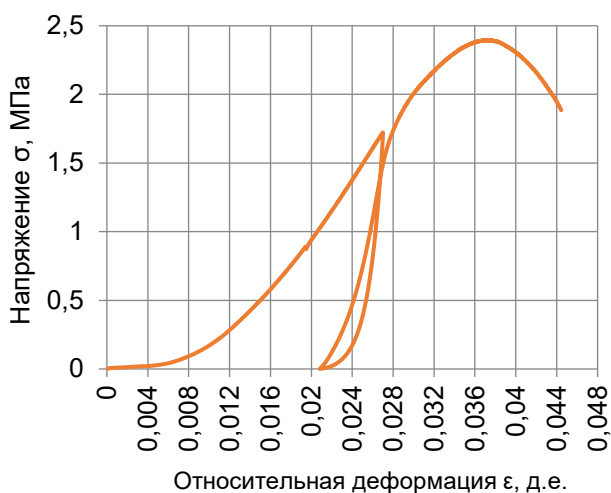


Рисунок 3 – Определение модуля упругости супеси, укрепленной портландцементом 6%  
Источник: составлено авторами.

Figure 3 – Determination of the elastic modulus of sandy loam reinforced with Portland cement 6%  
Source: compiled by the authors.

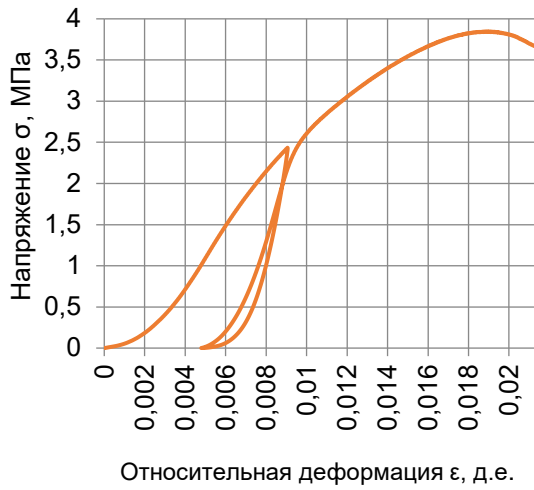


Рисунок 4 – Определение модуля упругости песка средней крупности, укрепленного портландцементом 6%  
 Источник: составлено авторами.

Figure 4 – Determination of the elastic modulus of medium-sized sand reinforced with Portland cement 6%  
 Source: compiled by the authors.

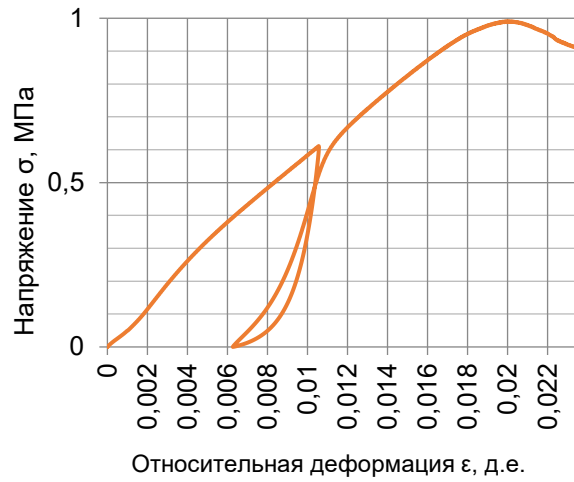


Рисунок 5 – Определение модуля упругости золошлаковой смеси, укрепленной портландцементом 6%  
 Источник: составлено авторами.

Figure 5 – Determination of the elastic modulus of an ash-slag mixture reinforced with Portland cement 6%  
 Source: compiled by the authors.

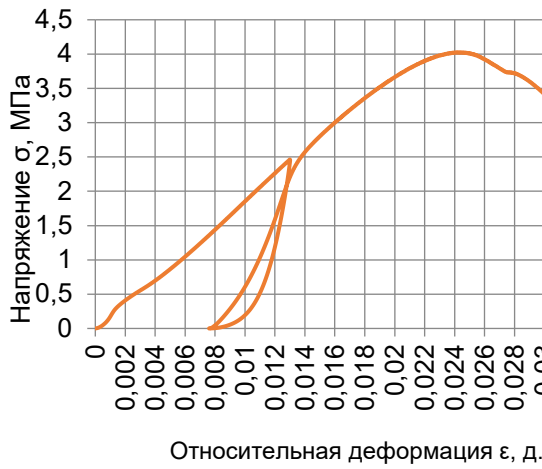


Рисунок 6 – Определение модуля упругости суглинка, укрепленного известью 6%  
 Источник: составлено авторами.

Figure 6 – Determination of the elastic modulus of the loam reinforced with lime 6%  
 Source: compiled by the authors.

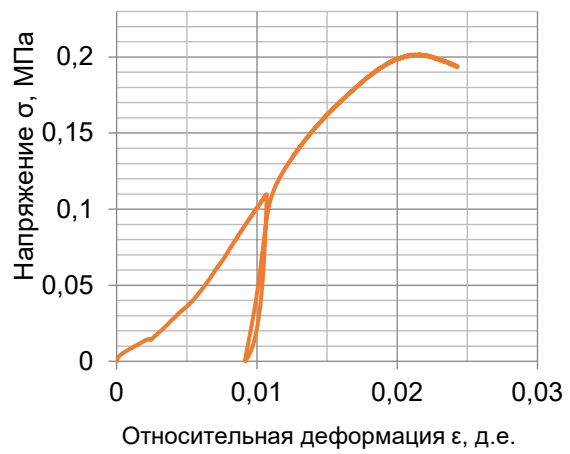


Рисунок 7 – Определение модуля упругости супеси, укрепленного известью 7%  
 Источник: составлено авторами.

Figure 7 – Determination of the elastic modulus of sandy loam reinforced with lime 7%  
 Source: compiled by the authors.

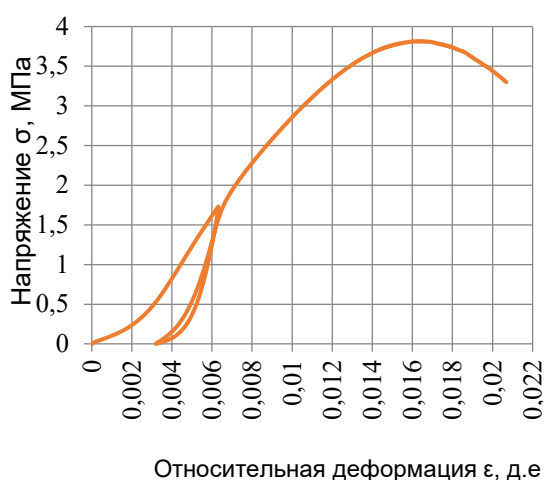


Рисунок 8 – Определение модуля упругости золошлаковой смеси, укрепленной известью 6%  
Источник: составлено авторами.

Figure 8 – Determination of the elastic modulus of an ash-slag mixture reinforced with lime 6%  
Source: compiled by the authors.



Рисунок 9 – Определение модуля упругости золошлаковой смеси, укрепленной известью 7%  
Источник: составлено авторами.

Figure 9 – Determination of the elastic modulus of an ash-slag mixture reinforced with lime 7%  
Source: compiled by the authors.

На основе полученных результатов (см. таблицу 4, рисунки 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9) построен график зависимости модуля упругости от прочности на сжатие для грунтов, укрепленных портландцементом (рисунок 10).

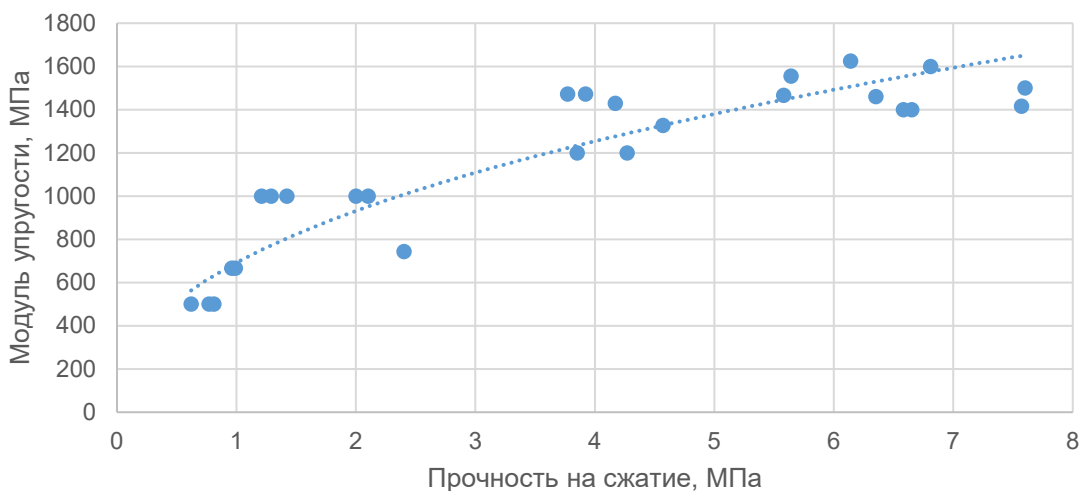


Рисунок 10 – График зависимости модуля упругости от прочности на сжатие грунтов, укрепленных портландцементом  
Источник: составлено авторами.

Figure 10 – Graph of elastic modulus dependence on the compressive strength of soils reinforced with Portland cement  
Source: compiled by the authors.

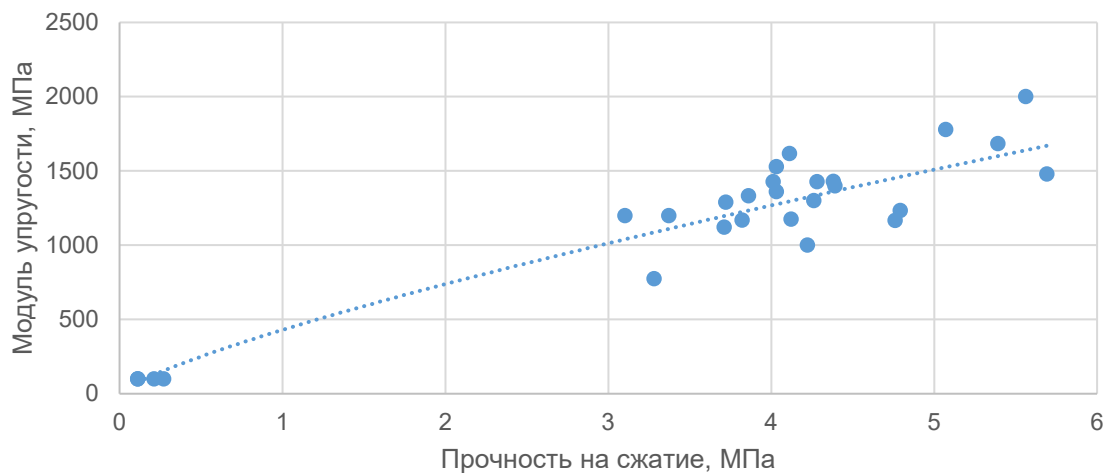


Рисунок 11 – График зависимости модуля упругости от прочности на сжатие грунтов, укрепленных известью  
Источник: составлено авторами.

Figure 11 – Graph of elastic modulus dependence on the compressive strength of soils reinforced with lime  
Source: compiled by the authors.

$$E = 691,57R_{сж}^{0,4292}, \quad (16)$$

где 691,57 и 4292 – параметры регрессии;

$R_{сж}$  – прочность на сжатие, МПа.

Коэффициент детерминации  $R^2$  составил 0,85.

Зависимость модуля упругости от прочности на сжатие для грунтов, укрепленных известью, приведена на рисунке 11.

На основе полученных результатов построен график зависимости модуля упругости от прочности на сжатие грунтов, укрепленных портландцементом.

$$E = 429,7R_{сж}^{0,7805}, \quad (17)$$

где 429,7 и 0,7805 – параметры регрессии;

$R_{сж}$  – прочность на сжатие, МПа.

Коэффициент детерминации  $R^2$  составил 0,96.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Так же как и прочность на сжатие, модуль упругости является важнейшей характеристикой грунтов, укрепленных неорганическими вяжущими, применяемых в дорожном строительстве.

В практике лабораторных испытаний укрепленных грунтов применяют одноосное, трехосное сжатие и штамповые испытания. При

этом методы лабораторных испытаний модуля упругости продолжительны во времени и трудоемки. Для снижения трудоемкости возможно использование математических формул, определяющих значение модуля упругости от различных параметров (прочности на сжатие, содержания вяжущего и т.д.).

На основе выполненных исследований получены эмпирические зависимости значений модуля упругости от значений прочности на сжатие грунтов, укрепленных портландцементом и известью.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Vakili A.H., Salimi M., Keskin İ., Jamalimoghadam M. A systematic review of strategies for identifying and stabilizing dispersive clay soils for sustainable infrastructure. *Soil and Tillage Research*. 2024. P. 239. <https://doi.org/10.1016/j.still.2024.106036>.
2. Слободчикова Н.А., Лофлер М., Плюта К.В. Получение неорганического вяжущего на основе отходов промышленного производства // *Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость: научный журнал*. 2017. Том 7, № 2. С. 62–67.
3. Слободчикова Н.А., Лофлер М. Методики подбора составов грунтов, укрепленных известью, для дорожного строительства // *Известия вузов инвестиций. Строительство. Недвижимость*. 2018. Том 8, № 2. С.141–147.
4. Tanyıldızı M., Uz V.E., Gökalp İ. Utilization of waste materials in the stabilization of expansive pavement subgrade: An extensive review. *Construc-*

tion and Building Materials. 2023. P. 398. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132435>.

5. Ahmad S., Ghazi M.S.A., Syed M., Al-Osta M.A. Utilization of fly ash with and without secondary additives for stabilizing expansive soils: A review. Results in Engineering 2024. P. 22. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.102079>.

6. Laguna-Torres, C.A., González-López, J.R., Guerra-Cossío, M.Á., Guerrero-Baca, L.F., Chávez-Guerrero, L., Figueroa-Torres, M.Z., Zaldívar-Cadena, A.A. Effect of physical, chemical, and mineralogical properties for selection of soils stabilized by alkaline activation of a natural pozzolan for earth construction techniques such as compressed earth blocks. Construction and Building Materials. – 2024. P. 419.

7. Safi W., Singh S. Efficient & effective improvement and stabilization of clay soil with waste materials. Materials Today: Proceedings. 2022. Part 1. Pp. 947–955.

8. Mishra A., Dixit A., Singh A.K., Das S.K. Strength, deformation, and environmental impact assessment of cement stabilized mine overburden soil. Journal of Cleaner Production. 2024. P. 447. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.141475>.

9. Espinosa A.B., López-Ausín V., Fiol F., Serrano-López R., Ortega-López V. Analysis of the deformational behavior of a clayey foundation soil stabilized with ladle furnace slag (LFS) using a finite element software. Materials Today: Proceedings. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.03.721>.

10. Balagosa J., Navea I.J., Lee M.J., Choo Y.W., Kim H.-S., Kim J.-M. Dynamic property growth of weathered granite soils stabilized with wood pellet fly ash based binders. Soil Dynamics and Earthquake Engineering. 2024. P. 180. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2024.108627>.

11. Zhang J., Wang S., Cui J., Chu H. Simultaneous determination of cement stabilized macadam's dynamic resilient modulus in compression and tension by bending beam test. Case Studies in Construction Materials. 2024. P. 20. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2024.e03008>.

12. Puppala A.J., Hoyos L.R., Potturi A.K. Resilient moduli response of moderately cement-treated reclaimed asphalt pavement aggregates. J. Mater. Civ. Eng., 23 (2011), pp. 990–998

13. George A. M., Banerjee A., Puppala A.J., Saladhi M. Performance evaluation of geocell-reinforced reclaimed asphalt pavement (RAP) bases in flexible pavements. Int. J. Pavement Eng. 2021. 22 (2), Pp. 181–191.

14. Deng C., Jiang Y., Tian T. Resilient modulus and influencing factors of vertical vibration compacted cement-stabilized macadam. Int. J. Pavement Eng. 2021. 22 (11). pp. 1435–1445

15. Gajewska B., Kraszewski C., Rafalski L. Significance of cement-stabilized soil grain size distribution in determining the relationship between strength and resilient modulus. Road. Mater. Pavement Des. 2018. 19 (7). pp. 1692–1701

16. Mahmood A., Hassan R., Fouad A. An assessment of lime-cement stabilization on the elastic and resilient moduli of a clayey soil.

Int. J. Pavement Eng. 2021. 23 (6). P. 1–14. DOI: 10.1080/10298436.2021.1921772.

17. Fedrigo W., Núñez W.P., López M.A.C. A study on the resilient modulus of cement-treated mixtures of RAP and aggregates using indirect tensile, triaxial and flexural tests. Constr. Build. Mater. 2018. 171. pp. 161–169

18. Kavussi A., Modarres A. A model for resilient modulus determination of recycled mixes with bitumen emulsion and cement from ITS testing results. Constr. Build. Mater. 2010. 24. pp. 2252–2259.

19. Pericleous M.I., Metcalf J.B. Resilient modulus of cement-stabilized phosphogypsum. J. Mater. Civ. Eng. 1996, 8(1). pp. 7–10

20. Chindaprasirt P., Sriyorch A., Arngbunta A., Chetchotisak P., Jitsangiam P., Kampala A. Estimation of modulus of elasticity of compacted loess soil and lateritic-loess soil from laboratory plate bearing test. Case Studies in Construction Materials. 2022. P. 16. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00837>

21. Виноградов А.Ю., Каширский В.И., Лободенко И.Ю., Зубова О.В., Виноградов И.А., Парфенов Е.А., Кучмин А.В., & Платонов А.П. Модуль деформации как основная характеристика деформационной способности грунтов при проектировании сооружений лесного комплекса // Гидросфера. Опасные процессы и явления. № 4(1). С. 52–67. <https://doi.org/10.34753/HS.2022.4.1.52>

22. Jabar M. Rasul, Michael P.N. Burrow, Gurmel S. Ghataora. Consideration of the deterioration of stabilised subgrade soils in analytical road pavement design. Transportation Geotechnics. 2016. Pp. 96–109. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2016.08.002>

23. Gerald A. Miller, Amy B. Cerato, Donald R. Snethen, Eric Holderby, Parnaz Boodagh. Empirical method for predicting time-dependent strength and resilient modulus of chemically treated soil. Transportation Geotechnics. 2021. P. 29. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2021.100551>.

24. Лазарев Ю.Г., Слободчикова Н.А., Плюта К.В., Кузнецова И.О., Гасанов Д.Х., Дудурич Б.Б. Прогнозирование прочностных характеристик укрепленных золошлаковых смесей ТЭЦ неорганическими вяжущими материалами // Путь Навигатор. 2024. № 59 (85). С.52–57.

25. Ермошин Н.А., Романчиков С.А., Аверьянов Д.А. Имитационное моделирование риска разрушения дорожных конструкций в межремонтный период // Путь Навигатор. 2022. № 50 (76). С.30–42.

26. Башкарев А.А. Развитие транспортной инфраструктуры как одна из приоритетных задач многонационального государства // Путь Навигатор. 2022. № 52 (78). С.52–61.

## REFERENCES

1. Vakili A.H., Salimi M., Keskin İ., Jamalimoghadam M. A systematic review of strategies for identifying and stabilizing dispersive clay soils for sustainable infrastructure. *Soil and Tillage Research*. 2024. P. 239. <https://doi.org/10.1016/j.still.2024.106036>.

2. Slobodchikova N.A., Lofler M., Pluta K.V. Obtaining an inorganic binder based on industrial waste.

*Izvestiya vuzov. Investitsii. Stroitelstvo. Nedvizhimost.* 2017; Volume 7. No. 2: 62–67. (In Russ.)

3. Slobodchikova N.A., Lafleur M. Methods of selecting compositions of soils reinforced with lime for road construction. *Izvestiya vuzov. Investitsii. Stroitelstvo. Nedvizhimost.* 2018. Volume 8. No. 2: 141–147. (In Russ.)

4. Tanyıldızı M., Uz V.E., Gökalp İ. Utilization of waste materials in the stabilization of expansive pavement subgrade: An extensive review. *Construction and Building Materials.* 2023: 398. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132435>.

5. Ahmad S., Ghazi M.S.A., Syed M., Al-Osata M.A. Utilization of fly ash with and without secondary additives for stabilizing expansive soils: A review. *Results in Engineering* 2024: 22. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.102079>.

6. Laguna-Torres, C.A., González-López, J.R., Guerra-Cossío, M.Á., Guerrero-Baca, L.F., Chávez-Guerrero, L., Figueroa-Torres, M.Z., Zaldívar-Cadena, A.A. Effect of physical, chemical, and mineralogical properties for selection of soils stabilized by alkaline activation of a natural pozzolan for earth construction techniques such as compressed earth blocks. *Construction and Building Materials.* 2024: 419.

7. Safi W., Singh S. Efficient & effective improvement and stabilization of clay soil with waste materials. *Materials Today: Proceedings.* 2022. Part 1: 947-955.

8. Mishra A., Dixit A., Singh A.K., Das S.K. Strength, deformation, and environmental impact assessment of cement stabilized mine overburden soil. *Journal of Cleaner Production.* 2024: 447. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.141475>.

9. Espinosa A.B., López-Ausín V., Fiol F., Serano-López R., Ortega-López V. Analysis of the deformational behavior of a clayey foundation soil stabilized with ladle furnace slag (LFS) using a finite element software. *Materials Today: Proceedings.* 2023. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.03.721>.

10. Balagosa J., Navea I.J., Lee M.J., Choo Y.W., Kim H.-S., Kim J.-M. Dynamic property growth of weathered granite soils stabilized with wood pellet fly ash based binders. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering.* 2024: 180. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2024.108627>.

11. Zhang J., Wang S., Cui J., Chu H. Simultaneous determination of cement stabilized macadam's dynamic resilient modulus in compression and tension by bending beam test. *Case Studies in Construction Materials.* 2024: 20. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2024.e03008>.

12. Puppala A.J., Hoyos L.R., Potturi A.K. Resilient moduli response of moderately cement-treated reclaimed asphalt pavement aggregates. *J. Mater. Civ. Eng.*, 23 (2011): 990-998.

13. George A. M., Banerjee A., Puppala A.J., Saladhi M. Performance evaluation of geocell-reinforced reclaimed asphalt pavement (RAP) bases in flexible pavements. *Int. J. Pavement Eng.* 2021; 22 (2): 181-191.

14. Deng C., Jiang Y., Tian T. Resilient modulus and influencing factors of vertical vibration compacted

cement-stabilized macadam. *Int. J. Pavement Eng.* 2021; 22 (11): 1435–1445.

15. Gajewska B., Kraszewski C., Rafalski L. Significance of cement-stabilized soil grain size distribution in determining the relationship between strength and resilient modulus. *Road. Mater. Pavement Des.* 2018; 19 (7): 1692–1701

16. Mahmood A., Hassan R., Fouad A. An assessment of lime-cement stabilization on the elastic and resilient moduli of a clayey soil. *Int. J. Pavement Eng.* 2021; 23 (6): 1–14. DOI: 10.1080/10298436.2021.1921772.

17. Fedrigo W., Núñez W.P., López M.A.C. A study on the resilient modulus of cement-treated mixtures of RAP and aggregates using indirect tensile, triaxial and flexural tests. *Constr. Build. Mater.* 2018; 171: 161–169

18. Kavussi A., Modarres A. A model for resilient modulus determination of recycled mixes with bitumen emulsion and cement from ITS testing results. *Constr. Build. Mater.* 2010; 24: 2252-2259.

19. Pericleous M.I., Metcalf J.B. Resilient modulus of cement-stabilized phosphogypsum. *J. Mater. Civ. Eng.* 1996; 8(1): 7–10

20. Chindaprasirt P., Sriyorch A., Arngbunta A., Chetchotisak P., Jitsangiam P., Kampala A. Estimation of modulus of elasticity of compacted loess soil and lateritic-loess soil from laboratory plate bearing test. *Case Studies in Construction Materials.* 2022: 16. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00837>

21. Vinogradov A.Yu., Kashirsky V.I., Lobodenko I.Yu., Zubova O.V., Vinogradov I.A., Parfenov E.A., Kuchmin A.V., & Platonov A.P. Deformation modulus as the main characteristic of the deformation ability of soils in the design of structures of the forest complex. *The hydrosphere. Dangerous processes and phenomena.* 2022; 4(1): 52-67. <https://doi.org/10.34753/HS.2022.4.1.52>. (In Russ.)

22. Jabar M. Rasul, Michael P.N. Burrow, Gurmehel S. Ghataora. Consideration of the deterioration of stabilised subgrade soils in analytical road pavement design. *Transportation Geotechnics.* 2016: 96–109. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2016.08.002>

23. Gerald A. Miller, Amy B. Cerato, Donald R. Snethen, Eric Holderby, Parnaz Boodagh. Empirical method for predicting time-dependent strength and resilient modulus of chemically treated soil. *Transportation Geotechnics.* 2021: 29. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2021.100551>.

24. Lazarev Yu.G., Slobodchikova N.A., Plyuta K.V., Kuznetsova I.O., Gasanov D.Kh., Dudurich B.B., Forecasting the strength characteristics of reinforced ash and slag mixtures of thermal power plants with inorganic binders. *Travel Navigator.* 2024; 59 (85): 52–57. (in Russ.)

25. Ermoshin N.A., Romanchikov S.A., Averyanov D.A. Simulation modeling of the risk of destruction of road structures during the inter-repair period. *Travel Navigator.* 2022; 50 (76): 30–42. (in Russ.)

26. Bashkarev A. A. Development of transport infrastructure as one of the priority tasks of a multinational state. *Travel Navigator.* 2022; 52 (78): 52–61. (in Russ.)

**ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ**

Слободчикова Н.А. Статистическая обработка данных, разработка регрессионных моделей, подготовка текста статьи.

Клюев С.В. Общая организация работы, подготовка текста статьи.

Плюта К.В. Определение физико-механических характеристик материалов и грунтов, статистическая обработка данных, подготовка текста статьи.

**COAUTHORS' CONTRIBUTION**

Slobodchikova N.A. Statistical data processing, development of regression models, text preparation.

Klyuev S.V. General work organization, text writing.

Plyuta K.V. Determination of the physical and mechanical characteristics of materials and soils, statistical data processing, work with the text material.

**ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ**

Слободчикова Надежда Анатольевна – канд. техн. наук, доц. кафедры «Автомобильные дороги» Иркутского национального исследовательского технического университета (664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83), **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-7845-2969>, **SPIN-code:** 5582-8750, e-mail: NSlobodchikova@rambler.ru

Клюев Сергей Васильевич – д-р техн. наук, проф. ФГБОУ ВО «Белгородский государственный

технологический университет им. В.Г. Шухова (308012, г. Белгород, ул. Костюкова, 46), **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-1995-6139>, **SPIN-code:** 5944-3648, e-mail: klyuyev@yandex.ru

Плюта Ксения Викторовна – эксперт ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет» (664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83), **ORCID:** <https://orcid.org/0009-0005-7028-7427>, **SPIN-code:** 4769-9063, e-mail: kv\_plyuta@mail.ru

**INFORMATION ABOUT THE AUTHORS**

Slobodchikova Nadezhda A. – Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor of the Highway Department, Irkutsk National Research Technical University (83, Lermontov str., Irkutsk, 664074), **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-7845-2969>, **SPIN-code:** 5582-8750, e-mail: NSlobodchikova@rambler.ru

Klyuyev Sergey V. – Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov (46, Kostyukova str., Belgorod), **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-1995-6139>, **SPIN-code:** 5944-3648, e-mail: klyuyev@yandex.ru

Plyuta Kseniya V. – Expert of the Irkutsk National Research Technical University (83, Lermontov str., Irkutsk, 664074), **ORCID:** <https://orcid.org/0009-0005-7028-7427>, **SPIN-code:** 4769-9063, e-mail: kv\_plyuta@mail.ru