

УДК 624.131.52

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-5-738-751>

EDN: UBUNTO

Научная статья



ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ГЛАВНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ОТ ВНЕШНЕЙ НАГРУЗКИ В НАСЫПНОМ МАССИВЕ ИЗ ПЕСКА С УЧЁТОМ ЕГО МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК

А. А. Лунёв*, Р. С. Кацарский

Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет
г. Омск, Россияlunev.al.al@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-5857-1891>katsarroman@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1540-1160>

*ответственный автор

АННОТАЦИЯ

Введение. Часть методов проектирования земляных сооружений и оснований базируется на решениях по прогнозированию напряжённого состояния грунтов под действием внешней нагрузки, которые не учитывают особенности структуры материала. Это входит в противоречие с существующими исследованиями, которые указывают на то, что изменение влажности, плотности и формы частиц материала влекут изменения в механизме формирования напряжённого состояния. Согласно исследованиям при изменении вида грунта, влажности и плотности массива изменяются как его механические характеристики, так и напряжённое состояние, что требует учета при проектировании земляных сооружений и оснований зданий.

Материалы и методы. Для изучения напряжённого состояния, возникающего в песчаном грунте с различными механическими характеристиками, были проведены экспериментальные исследования по определению давлений в песке различной плотности и влажности под действием внешней нагрузки от круглого штампа площадью 500 см². Для этого на глубине 5, 15, 25, 40 см по оси круглого штампа в массиве песка средней крупности устанавливали месдозы, после чего измеряли давления при приложении нагрузки. Для каждого значения плотности и влажности, созданного в процессе эксперимента, определяли механические характеристики песчаного грунта.

Результаты. Анализ существующих зависимостей для прогнозирования максимальных главных напряжений показал, что решения Кандаурова и Фрелиха, единственные дающие связь формирования напряжённого состояния с механическими характеристиками и позволяющие прогнозировать минимальные главные напряжения. Было установлено влияние механических характеристик песчаного грунта (угла внутреннего трения и модуля упругости при разной плотности и влажности) на параметр Фрелиха и коэффициент распределительной способности среды решения Кандаурова.

Обсуждение и заключение. Анализ результатов экспериментальных исследований позволил вывести зависимости для прогнозирования максимальных главных напряжений песчаного грунта в точках, расположенных на разной глубине, по оси нагруженного круглого штампа. Предложенные зависимости являются модификацией решений Кандаурова и Фрелиха, в которых учтена связь между механическими характеристиками песчаного грунта и параметрами распределяющей способности среды.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: строительство, грунты, механика грунтов, главные напряжения.

БЛАГОДАРНОСТИ: работа выполнена при финансовой поддержке Совета по грантам президента РФ (грант для государственной поддержки молодых российских ученых – кандидатов наук МК-4285.2022.4). Отдельную благодарность авторы выражают анонимным рецензентам, чья работа позволила существенно повысить качество статьи.

Статья поступила в редакцию 06.09.2022; одобрена после рецензирования 11.10.2022; принята к публикации 14.10.2022.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

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

© Лунёв А. А., Кацарский Р. С., 2022



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Для цитирования: Лунёв А. А., Кацарский Р. С. Прогнозирование главных напряжений от внешней нагрузки в насыпном массиве из песка с учётом его механических характеристик // Вестник СибАДИ. 2022. Т.19, № 5 (87). С. 738-751. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-5-738-751>

Original article

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-5-738-751>

EDN: UBYHTO

PREDICTION OF PRINCIPAL STRESSES FROM EXTERNAL LOAD IN A SAND MASS CONSIDERING ITS MECHANICAL CHARACTERISTICS

Aleksandr A. Lunev*, **Roman S. Katsarsky**

Siberian State Automobile and Highway University (SibADI),
Omsk, Russia

lunev.al.al@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-5857-1891>

katsarroman@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1540-1160>

*corresponding author

ABSTRACT

Introduction. A part of the methods for designing earthworks and foundations is based on solutions for predicting the stress state of soils under the action of an external load, which do not take into account the structural features of the material. This is in conflict with current studies, which indicate that changes in the moisture content, density, and shape of material particles entail changes in the mechanism of stress state formation. According to some research, when the type of soil, moisture content and density of the mass change, both its mechanical characteristics and the stress state change, which requires consideration in the design of earthworks and building foundations.

The method of research. To study the stress state arising in sandy soil with different mechanical characteristics, experimental studies were carried out to determine the pressures in sand of different density and moisture under the action of an external load from a round stamp with an area of 500 cm². To do this, at a depth of 5, 15, 25, 40 cm along the axis of a round stamp in an array of sand of medium size, mesdoses were set, after which the pressures were measured when the load was applied. For each value of density and moisture created during the experiment, the mechanical characteristics of the sandy soil were determined.

Results. The analysis of the existing dependencies for predicting the maximum principal stresses showed that the Kandaurov and Frohlich's solutions are the only ones that give a connection between the formation of the stress state and mechanical characteristics and allow predicting the minimum principal stresses. The influence of the mechanical characteristics of sandy soil (the angle of internal friction and the modulus of elasticity at different density and humidity) on the Frohlich's parameter and the distribution capacity coefficient of the medium of the Kandaurov's solution was established.

Conclusion. The analysis of the results of experimental studies made it possible to derive dependencies for predicting the maximum principal stresses of sandy soil at points located at different depths along the axis of a loaded round stamp. The proposed dependencies are a modification of Kandaurov and Frohlich's solutions, which take into account the relationship between the mechanical characteristics of sandy soil and the parameters of the distribution capacity of the medium.

KEYWORDS: construction, highways, soil stabilisation, soils, principal stress.

ACKNOWLEDGMENTS: The work was supported financially by the Council for Grants of the President of the Russian Federation (grant for state support of young Russian scientists - candidates of sciences MK-4285.2022.4). The authors are especially grateful to the anonymous reviewers, whose work has significantly improved the quality of the article.

The article was submitted 06.09.2022; approved after reviewing 11.10.2022; accepted for publication 14.10.2022.

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.

© Lunev A. A., Katsarsky R. S., 2022



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

For citation: Lunev A. A., Katsarsky R. S. Prediction of principal stresses due to external load in sans mass considering its mechanical characteristics. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2022; 19 (5): 738-751. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-5-738-751>

ВВЕДЕНИЕ

Прогнозирование напряжённого состояния требуется для решения множества задач проектирования, таких как проектирование рабочих органов сельскохозяйственной и строительной техники [1, 2], оценка устойчивости насыпей земляного полотна [3], прогноз осадок оснований и фундаментов, учёт трафика [4], анализ воздействия шин на рыхлые грунты [5, 6], проверка сдвигустойчивости дорожных одежд [7, 8] и др. При этом учитываются напряжения, возникающие за счёт нагрузки от собственного веса насыпи (статические нагрузки) и от подвижного состава (динамические нагрузки).

Часть методов проектирования базируется на классических решениях по прогнозированию напряжённого состояния грунтов под действием внешней нагрузки (Буссинеск, Фламан, Митчелл, Das и др.). Однако современные представления о формировании напряжённого состояния учитывают различия в структуре грунтов и состоянии массива на распределение напряжений. Исследования по нагружению фотоупругих элементов (Santamarina [9], Behringer [10], Clark [11], Takahashi [12]) показывают, что распределение напряжений зависит от формы частиц, степени упорядоченно-

сти элементов (аналог плотности) и характера приложения нагрузок (рисунок 1).

Грунты имеют разную форму частиц, следовательно, создают различную структуру при уплотнении [13, 14]. Исходя из этого положения, можно выдвинуть гипотезу о наличии особенностей в формировании напряжённого состояния каждого из видов грунтов и решающем влиянии степени уплотнения на этот механизм. Эта гипотеза частично подтверждена в результате исследований [15, 16].

Влияние влажности грунта на напряжённое состояние было отмечено в работе [17]. Этот факт был установлен авторами [17] во время эксперимента по нагружению массива из суглинка с 43,5% глинистых, 22,2% пылеватых и 34,3% песчаных частиц. Исследование [18] также показало влияние влажности и прочности покрытия на уровень контактных напряжений. Подтверждает влияние механических характеристик грунтов на распределение напряжений и работа [19], в которой на основе формулы В. А. Флорина проведено моделирование влияния угла внутреннего трения, сцепления, коэффициента бокового давления и пр. на вертикальные напряжения.

В связи с этим очевидно требуется модификация традиционно используемых в прак-

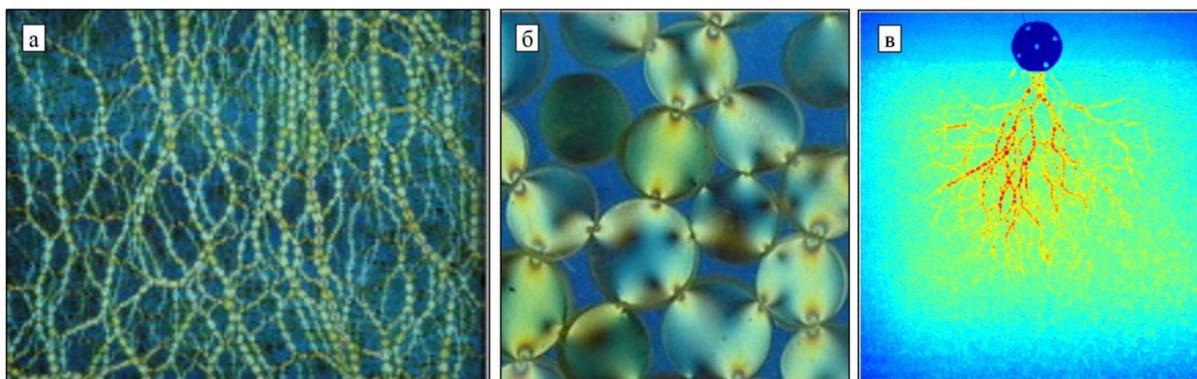


Рисунок 1 – Распределение напряжений в двумерном массиве из упорядоченных фотоупругих элементов: а – цепочки напряжений, просматриваемые при равномерном нагружении массива; б – свечение фотоупругих элементов в зоне концентрации напряжений; в – цепочки напряжений, возникающие от действия колесной нагрузки
Источник: Электронный ресурс: <https://webhome.phy.duke.edu/~bob/>.

Figure 1 – Stress distribution in a two-dimensional array of differently ordered round elements: a - stress chains viewed under uniform loading of the array; b - glow of photoelastic elements in the particle contact zone (stress concentration); c - stress distribution under the action of the load emitting the wheel
Source: Available at: <https://webhome.phy.duke.edu/~bob/>.

тике проектирования зависимостей, не учитывающих происхождение грунтов, их состояние и особенности приложения нагрузки. Поэтому целью исследования является подбор зависимости для прогнозирования напряжённого состояния в насыпном массиве песка средней крупности, учитывающей его механические характеристики.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

2.1. Теоретическая основа

Для достижения поставленной цели нами были проанализированы потенциально пригодные зависимости для прогнозирования напряженного состояния (максимальных главных напряжений) в грунтах с разным генезисом, формой частиц и крупностью (таблица 1).

Таблица 1
Формулы для прогнозирования максимальных главных напряжений в кПа
Источник: составлено авторами.

Table 1
Formulas for predicting maximum principal stresses in kPa
Source: compiled by the authors.

Авторы	Зависимость	Авторы	Зависимость
L. V. Boussinesq [16, 20]	$\sigma_z = p \cdot \left[1 - \left(1 + \left(\frac{R}{z} \right)^2 \right)^{-1.5} \right] \quad (1)$	G. L. Klein [20]	$\sigma_z = p \cdot \left(1 + \frac{2 \cdot z}{D_o} \cdot \operatorname{tg} f(\varphi) \right)^{-2} \quad (2)$
M. Nagг [20]	$\sigma_z = p \cdot \left[1 - \exp \left(\frac{-4R^2 \nu_p}{z^2} \right) \right] \quad (3)$	И. И. Кандауров [16]	$\sigma_z = p \cdot \left[1 - \exp \left(\frac{-R^2}{2z^2 \lambda} \right) \right] \quad (4)$
В. Г. Пискунов, Н. Н. Иванов С. А. Матвеев, Н. Н. Литвинов, Р. Е. Петров [16]	$\sigma_z = B \cdot \exp(-\gamma z) \quad (5)$ $\sigma_z = 2p \cdot \left[\exp(\lambda \{1 - \gamma' z\}) \right]^{(1-\lambda)} \quad (6)$	О. К. Фрелих [7,21]	$\sigma_z = p \cdot \left[1 - \frac{1}{\left(\sqrt{1 + \left(\frac{R}{z} \right)^2} \right)^n} \right] \quad (7)$
М. И. Якунин [22]	$\sigma_z = p \cdot \left[1 + a \cdot \left(\frac{z}{D} \cdot \sqrt{\frac{E_{сл}}{E_{осн}}} \right)^2 \right]^{-1} \quad (8)$	А. С. Александров [22]	$\sigma_z = p \cdot \left(1 + \frac{2 \cdot z}{D_o} \cdot \operatorname{tg}(\beta_\phi \cdot \varphi) \right)^{-2} \quad (9)$
Формулы для определения коэффициентов бокового давления в решении Кандаурова и коэффициента, характеризующего распределение напряжений в среде по решению М. Нагг [20]:		Формулы С. R. Gonzalez [21, 23] Air Force and Navy для определения параметра Фрелиха, характеризующего распределительную способность среды:	
$\lambda = \frac{\mu}{1 - \mu}; \quad (10) \quad ; \quad \nu_p = \frac{1}{8 \cdot \lambda}; \quad (11)$		$n = 2 \cdot \left(\frac{CBR}{6} \right)^{0.337} \quad ; \quad (12); \quad n = 2 \cdot \left(\frac{CBR}{6} \right)^{0.1912} \quad (13)$	
Примечание: p – среднее давление по поверхности круглого нагруженного штампа, МПа; z – глубина точки, в которой определяются напряжения относительно середины штампа, м; R – радиус штампа, м; λ – коэффициент бокового давления; ν _p – коэффициент распределительной способности среды для решения Нагг; γ – коэффициент затухания напряжений; n – параметр Фрелиха; D _o – диаметр штампа, м; f(φ) – неизвестная функция угла внутреннего трения, °, μ – коэффициент Пуассона, CBR – калифорнийское число несущей способности, %; a – коэффициент концентрации напряжений, принимаемый 1,0 для нежестких дорожных одежд и 2,5 для упругих изотропных тел; показатель степени радикала, принимаемый 2,5 или 3,0; E _{сл} и E _{осн} – модули упругости материала слоя и основания, МПа; βφ – параметр, определяющий долю угла рассеивания от угла внутреннего трения.			

Из таблицы 1 видно, что прогнозирование напряжённого состояния, возникающего в грунтах под действием внешних нагрузок, обычно основывается на решениях механики сплошной или зернистой среды, а также инженерных аппроксимациях. Во всех случаях, кроме решения Буссинеска, учитываются особенности структуры материала. Для этой цели используются параметры материала: коэффициент распределительной способности среды [16], параметр Фрелиха [21, 23, 24], угол внутреннего трения [24], модуль упругости, коэффициент бокового давления [25, 26] и др.

Коэффициент бокового давления рядом авторов предлагается вычислять через угол внутреннего трения φ или коэффициент Пуассона. Зависимости для определения коэффициента бокового давления через угол внутреннего трения представлены в таблице 2. А при известном коэффициенте Пуассона можно получить коэффициент бокового давления через зависимость (10). Кроме того, известны и собственные решения по определению коэффициента распределительной среды, так решение Баданина и соавторов приведено в таблице 2 [27, 28, 29, 30, 31, 31].

Представленные формулы позволяют определить коэффициент распределительной способности среды исходя из параметров материала, но в источниках нет данных о применимости того или иного решения для всего

разнообразия грунтов (например, для золошлаковой смеси).

2.2. Определение давлений по глубине массива

Для изучения формирования напряжённого состояния в песчаном грунте с различными механическими характеристиками (при разной плотности и влажности) были проведены экспериментальные исследования по определению давлений, возникающих в песчаном грунте под действием внешней нагрузки.

Для определения давлений были использованы мездозы ТДДГ-0,5, установленные внутри массива песчаного грунта на глубине 5, 15, 25, 40 см от поверхности. Контроль положения датчиков в плане велся с помощью системы отвесов, а высотное положение велось с помощью нивелира (рисунок 2, а), а горизонтальность положения обеспечивалась двухосевым уровнем. Нагружение осуществлялось посредством круглого жесткого штампа площадью 500 см² с помощью гидравлического цилиндра до возникновения среднего давления по подошве штампа 50 кПа. Контроль силового воздействия велся с использованием электронного динамометра ДЭП/3-1Д-50С-2. Проведение испытаний показано на рисунке 2, б. В рамках серии экспериментов планировалось устраивать массив сухого песка, который дважды последовательно увлажнялся водопроводной водой.

Таблица 2
Формулы для определения коэффициентов распределительной способности среды, связанные с углом внутреннего трения
Источник: составлено авторами.

Table 2
Formulas for determining the coefficients of the distribution capacity of the medium associated with the angle of internal friction
Source: compiled by the authors.

Авторы	Формула для определения коэффициента бокового давления (распределительной способности среды Кандаурова)		
Ж. Биарез и соавт.	$\lambda = \frac{1 - \sin \varphi}{1 + \sin \varphi}$ (14)	Р. Я. Попильский и соавт.	$\lambda = \operatorname{tg}^2 \left[\frac{\pi - \varphi}{4} - \frac{\varphi}{2} \right]$ (17)
M.D. Bolton	$\lambda = \frac{1 - \sin(\varphi - 11,5)}{1 + \sin(\varphi - 11,5)}$ (15)	Mayne-Kulhaway	$\lambda = 1 - 0,998 \sin \varphi$ (18)
Brooker-Ireland	$\lambda = 0,95 - \sin \varphi$ (16)	Г. И. Покровский	$\lambda = 1 - 0,74 \operatorname{tg} \varphi$ (19)
Формула для определения коэффициента распределительной способности среды Haгг			
Баданин и соавт.		$\nu_p = \operatorname{ctg}(\varphi + 45^\circ)$ (20)	



Рисунок 2 – Проведение экспериментальных исследований:
а – контроль положения датчиков; б – загрузка массива в ходе эксперимента
Источник: составлено авторами.

Figure 2 – Conducting experimental studies:
a - control of the position of sensors; b – array loading during the experiment
Source: compiled by the authors.

Следует отметить, что при увлажнении массива отмечалось его уплотнение за счёт фильтрации воды с мелкими частицами, что не позволило подготовить массив равной плотности с изменяемой влажностью (плотность массива контролировалась методом режущего кольца, а влажность методом высушивания проб до постоянной массы согласно ГОСТ 5180–2015).

Анализ пригодности решений, приведенных в таблице 1, для описания результатов проведенных исследований выполнялся в электронном виде с использованием программного комплекса Mathcad.

2.3. Определение механических характеристик песка

Отбор проб песка для исследований был выполнен в Омском речном порту в месте погрузки составов. Сушка песка производилась при температуре 105 °С, в сушильном шкафу с циркуляцией воздуха. Хранение проб выполнялось в герметичных контейнерах из полипропилена, при комнатной температуре и влажности не выше 80%.

Для изучения степени изменения свойств исследуемых грунтов были проведены эксперименты по определению зернового состава по ГОСТ 12536–2014, максимальной плотности сухого грунта и оптимальной влажности при стандартном уплотнении по ГОСТ 22733–2016, а также истинной плотности по ГОСТ 5180–2015.

Для значений плотности и влажности, получаемых в ходе экспериментальных исследова-

ний, описанных в п. 2.2, определялось удельное сцепление и угол внутреннего трения по ГОСТ 12248.1–2020 и модуль деформации по ГОСТ 12248.4–2020.

РЕЗУЛЬТАТЫ

3.1. Анализ представленных решений

Анализ решений, приведенных в таблице 1, показывает, что все предложенные зависимости (кроме решений Буассинеска) учитывают особенности механизма формирования напряжённого состояния в грунтах различной структуры. Решение Клейна (2) связано с углом внутреннего трения неизвестной функцией, что говорит о влиянии влажности и плотности грунта на механизм распределения напряжений под действием внешней нагрузки. Однако это влияние было исследовано в работе [15] и не нашло подтверждения. Решение (9), предложенное А. С. Александровым в работе [22], является модификацией предложенного Клейном (2) и также не описывает экспериментальное распределение давлений при статическом значении параметра (β_ϕ).

Решение Пискунова и пр. (5), а также их модификация Матвеевым и пр. (6) является инженерной аппроксимацией, которая теоретически пригодна для прогнозирования напряженного состояния в грунтовых средах. Однако эти решения требуют определения специфических параметров γ и γ_c с применением опытных установок и не могут быть использованы для прогнозирования напряженного состояния

без связи с механическими характеристиками грунтов. Кроме того, затухание напряжений в этих решениях является слишком интенсивным и не учитывает особенностей концентрации напряжений под штампом.

Решение Фрелиха, приведенное в (7), является более поздней модификацией решения Буссинеска и имеет в себе параметр, зависящий от распределяющей способности среды. Как и в решение Пискунова и пр., Матвеева и пр. его определение требует сложных геотехнических экспериментальных исследований. Однако имеются зависимости, предложенные Gonzalez, позволяющие определить значения параметра Фрелиха через калифорнийское число несущей способности. Учитывая тот факт, что CBR связан с модулем упругости прямыми зависимостями [32, 33, 34], необходимо изучить связь параметра Фрелиха и модуля упругости (модуль деформации по второй ступени нагружения).

В механике зернистой среды изначально учитывалась разница во взаимодействии частиц посредством коэффициента распределительной среды (Кандауров). Априори мы считаем, что закономерности механики зернистых сред могут быть применимы к золошлаковой смеси (ЗШС) и пескам, поскольку форма и особенности контактной передачи давлений между частицами в ЗШС и в песках сходны. Применимость их к глинистым грунтам может быть сомнительна. Кроме того, как и в случае с теорией сплошных сред нет чёткого представления о значениях коэффициента распре-

делительной среды различных видов грунтов.

Учитывая тот факт, что решение Кандаурова и Haug напрямую связаны между собой, в дальнейшем их следует рассматривать как единое решение. Решение Буссинеска (1) очевидно не удовлетворяет настоящему механизму формирования напряженного состояния, как и решение Клейна, которое является упрощенной аппроксимацией наряду с решениями Пискунова и Матвеева и непригодны для прогнозирования минимальных главных напряжений. Решение, предложенное Якуниным (8), при рассмотрении изотропного массива без подстилающего слоя в зоне распределения напряжений упрощается и также не может быть использовано для расчетов.

По этим причинам для оценки результатов прогнозирования стоит рассматривать только решения Фрелиха и Кандаурова, как единственные дающие связь формирования напряженного состояния с механическими характеристиками и позволяющие прогнозировать минимальные главные напряжения.

3.2. Результаты экспериментов по оценке давлений в массиве песка

Определение давлений по глубине массива песчаного грунта показало существенное изменение напряженного состояния под действием внешней нагрузки при различной влажности и плотности массива. Увеличение влажности и плотности насыпного массива в условиях эксперимента вело к существенному снижению уровня напряжений в точках по оси штампа (рисунок 3).

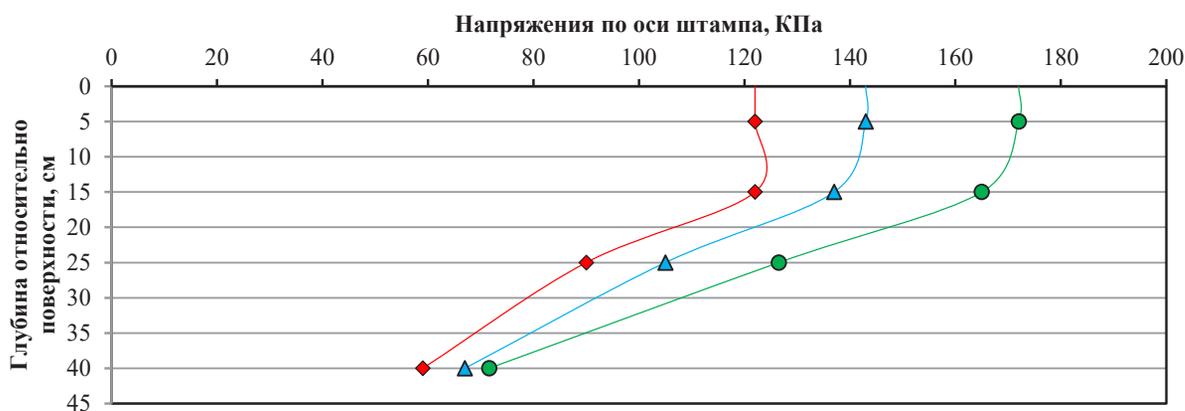


Рисунок 3 – Распределение давлений в массиве песка различной влажности под действием внешней нагрузки от круглого штампа в рамках первой серии испытаний: ● – сухой массив песка; ▲ – массив песка влажностью 2,5%; ◆ – массив песка влажностью 3,2%
Источник: составлено авторами.

Figure 3 – Distribution of pressures in a sand mass of different moisture content under the action of an external load from a round stamp in the first series of tests: ● – an array of sand with a moisture content of 2.5%; ◆ – an array of sand with a moisture content of 3.2%
Source: compiled by the authors.

Таблица 3
Характеристики исследуемого материала в различных условиях
Источник: составлено авторами.

Table 3
Characteristics of the test material under different conditions
Source: compiled by the authors.

№	Характеристики состояния массива	Параметры распределения давлений			Механические характеристики материала слоя		
		n	v	P0	φ	c	E
1	$K_y=0,90; w=0,3\%$	6,91	0,091	172	33,0	0	18,0
2	$K_y=0,94; w=2,5\%$	6,65	0,078	143	41,4	9	22,7
3	$K_y=0,99; w=3,2\%$	6,41	0,074	122	44,0	11	28,6
R^2		0,99	0,99	-	-	-	-

Кроме того, состояние массива оказало существенное влияние на контактные напряжения под подошвой штампа, которые для более сухого грунта с низкой плотностью показывают давления на 40% больше, что вероятно связано с большей концентрацией напряжений.

Структура массива оказывает влияние на интенсивность затухания давлений по глубине (распределительную способность среды). В таблице 3 приведены характеристики массива и результаты вычисления коэффициента распределительной способности среды по решению Кандаурова и параметра Фрелиха, а также уровень напряжений в зоне под штампом при нагружении, соответствующем распределенному давлению на штамп в 50 кПа.

3.3. Результаты определения характеристик песчаного грунта

Для исследований использовался песок средней крупности с модулем крупности 2,43. Оптимальная влажность, полученная в ходе испытаний, составила 7,5%, а максимальная плотность сухого грунта $1,87 \text{ г/см}^3$ при плотности частиц грунта $2,61 \text{ г/см}^3$.

Механические характеристики песчаного грунта, полученные в лаборатории, приведены в таблице 3.

Статистическая оценка и подбор параметров распределения давлений велся в программном комплексе Mathcad.

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разница в напряжениях в зоне непосредственно под осью штампа сопоставима с представленной в [38] и вероятно вызвана концен-

трацией напряжений. Следует отметить, что, учитывая различия в контактных напряжениях, в дальнейшем требуется подробный анализ работ [35, 36], которые описывают особенности формирования давлений по поверхности штампа.

На данном этапе исследований рассматривалась только связь механических характеристик с затуханием напряжений по глубине массива. Поэтому для обработки данных значения давлений на глубине 5 см приравнивались к максимальным давлениям по поверхности штампа (на основе анализа зависимостей на рисунке 2).

Поскольку для прогнозирования напряжённого состояния решено рассматривать только решения Фрелиха и Кандаурова, сравнение было между равномерным распределением давлений и параболической схемой, предложенной Фарбером. Это связано с тем, что получаемая в работах [2, 5, 37] форма эпюр напряжений под штампом в целом соответствует предложенной параболической схеме, а в работе [15] соответствовала равномерной нагрузке. Для равномерной нагрузки результаты сопоставлялись с прогнозируемыми по формулам (4) и (7), в то время как для схемы Фарбера, приведённый ниже (21), использовались решения Радовского и Олсона, приведённые в таблице 4.

$$p(r) = 2 \cdot p \cdot \left(1 - \frac{r^2}{R^2}\right), \quad (21)$$

где r – расстояние от оси до края штампа.

Таблица 4
 Формулы для прогнозирования главных напряжений в кПа
 Источник: составлено авторами.

Table 4
 Formulas for predicting principal stresses in kPa
 Source: compiled by the authors.

Авторы	Зависимость
Решение Б. С. Радовского для параболической нагрузки по схеме Фарбера на основе (4) [16]	$\sigma_z = 2p \cdot \left[1 - \frac{2\lambda z^2}{R^2} \left(1 - \exp\left(\frac{-R^2}{2z^2\lambda}\right) \right) \right] \quad (22)$
Решение Р. Олсона для параболической нагрузки по схеме Фарбера на основе (7)	$\sigma_z = 2p \cdot \left[1 + \frac{2}{2-n} \cdot \left(\frac{z}{R}\right)^2 - \frac{2}{2-n} \cdot \left(\frac{z}{R}\right)^n \cdot \left(1 + \left(\frac{z}{R}\right)^2\right)^{\frac{2-n}{n}} \right] \quad (23)$

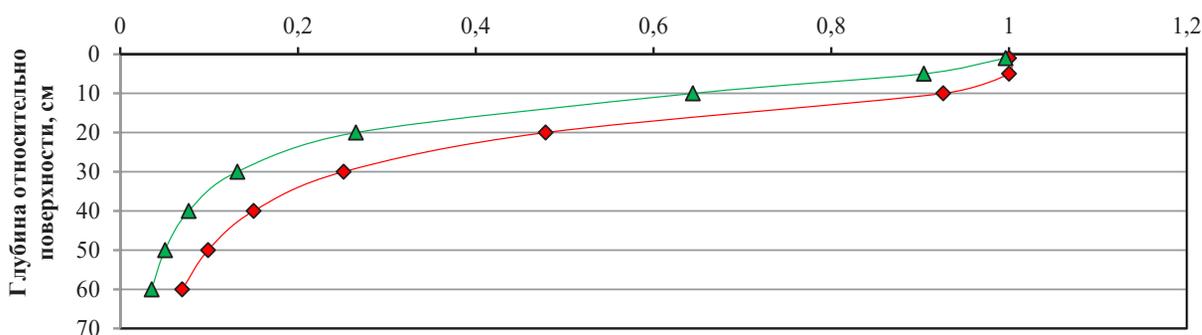


Рисунок 4 – Распределение давлений по решениям Кандаурова и Радовского при коэффициенте бокового давления, равного 0,3: ◆ – решение Кандаурова; ▲ – решение Радовского
 Источник: составлено авторами.

Figure 4 – Pressure distribution in according to Kandaurov and Radovsky's solutions with a lateral pressure coefficient equal to 0.3: ◆ – Kandaurov's solution; ▲ – Radovsky's solution
 Source: compiled by the authors.

Расчеты показали, что параболическое распределение недостаточно точно описывает результаты экспериментальных исследований (значение R² варьировалось от 0,63 до 0,65). Поэтому предлагаемые Радовским и Олсоном зависимости для прогнозирования напряженного состояния (см. таблицу 4) оказались непригодны для описания напряженного состояния.

Полученные экспериментальные данные лучше описываются решениями, предложенными для равномерного распределения контактных давлений (без учета значений контактных напряжений), поскольку ближе аппроксимируют опытные данные, чем решения Радовского (22) и Олсона (23). Для примера на рисунке 4 приведены графики, характеризующие затухание напряжений по глубине по решению Радовского для параболической

эпюры нагрузки и решению Кандаурова для круглого штампа с равномерно распределенной нагрузкой.

Хотя решение Кандаурова оказалось пригодным для описания экспериментальных данных, ни одна из формул, приведенных в таблице 2, непригодна для прогнозирования коэффициента бокового давления в песчаном грунте. Поскольку параметр распределительной способности среды имеет сильную корреляцию с углом внутреннего трения, была предложена собственная эмпирическая зависимость, позволяющая связать коэффициент распределительной способности среды и угол внутреннего трения. В результате чего была предложена зависимость для прогнозирования максимальных главных напряжений в песчаном грунте, которая приведена в таблице 5.

Таблица 5
Формулы для прогнозирования главных напряжений в кПа
Источник: составлено авторами.

Table 5
Formulas for predicting principal stresses in kPa
Source: compiled by the authors.

Наименование полученного решения	Зависимость
Решение с эмпирическими зависимостями на основе решения (4) механики зернистой среды	$\sigma_z = p \cdot \left[1 - \exp\left(\frac{-R^2}{2z^2 (1,084 \cdot \varphi^{-0,708})}\right) \right] \quad (24)$
Решение с эмпирическими зависимостями на основе решения (7) механики сплошной среды	$\sigma_z = p \cdot \left[1 - \left(\sqrt{1 + \left(\frac{R}{z}\right)^2} \right)^{-(34,91 \cdot E^{-0,621})} \right] \quad (25)$

Влажность и плотность массива оказывают влияние на контактные напряжения под штампом, что требует учета несущей способности материала слоя посредством модуля упругости (модуль деформации в компрессионном приборе по второй ветви нагружения) и дополнительных исследований. Причем установлено, что решение Радовского и Олсона при использовании параболической схемы приложения давлений, предложенной Фарбером, хуже описывает результаты экспериментов.

Наличие корреляции между параметром модуля упругости и параметром Фрелиха показывает, что для прогнозирования напряжений подходит решение Фрелиха, модифицированное корреляцией между n и E , что приведено в таблице 5.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Определение давлений по глубине массива песчаного грунта показало, что увеличение влажности и плотности насыпного массива в условиях эксперимента вело к существенному снижению уровня напряжений в точках по оси штампа.

Было установлено, что влажность и плотность массива оказывают влияние на контактные напряжения под штампом, что требует учета несущей способности материала слоя посредством модуля упругости (модуль деформации в компрессионном приборе по второй ветви нагружения) и дополнительных исследований.

Расчеты показали, что параболическое распределение недостаточно точно описывает результаты экспериментальных иссле-

дований (значение R^2 варьировалось от 0,63 до 0,65). Было установлено, что полученные экспериментальные данные лучше описываются решениями, предложенными для равномерного распределения контактных давлений (без учета значений контактных напряжений), поскольку ближе аппроксимируют опытные данные (значение R^2 варьировалось от 0,98 до 0,99), чем решения, выведенные Радовским и Олсоном.

Было установлено влияние механических характеристик песчаного грунта (угла внутреннего трения и модуля упругости при разной плотности и влажности) на параметр Фрелиха и коэффициент распределительной способности среды решения Кандаурова. На основе полученных корреляций, решений Фрелиха и Кандаурова были выведены зависимости для прогнозирования максимальных главных напряжений песчаного грунта в точках, расположенных на разной глубине, по оси нагруженного круглого штампа.

Полученные зависимости для прогнозирования максимальных главных напряжений требуют проведения дополнительных исследований на грунтах различного происхождения для проверки их пригодности для других разновидностей грунтов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Kešner A. et al. Stress distribution on a soil tillage machine frame segment with a chisel shank simulated using discrete element and finite element methods and validate by experiment // Biosyst. Eng. 2021. Vol. 209. Pp. 125–138. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2021.06.012>

2. Lamandé M., Schjønning P. Transmission of vertical stress in a real soil profile. Part II: Effect of tyre size, inflation pressure and wheel load // *Soil Tillage Res.* 2011. Vol. 114, Issue. 2. Pp. 71–77. DOI:10.1016/j.still.2010.10.001
3. Sinha A. K. et al. Investigation and design of a fly ash road embankment in India by CPT // 2nd International Symposium on Cone Penetration Testing. 2009. P. Paper No. 3-49.
4. Augustin K. et al. FiTraM: A model for automated spatial analyses of wheel load, soil stress and wheel pass frequency at field scale // *Biosyst. Eng.* Elsevier Ltd, 2019. Vol. 180. Pp. 108–120. DOI:https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2019.01.019
5. Higa S. et al. Measurement and modeling for two-dimensional normal stress distribution of wheel on loose soil // *J. Terramechanics. ISTVS*, 2015. Vol. 62. Pp. 63–73. DOI:https://doi.org/10.1016/j.jterra.2015.04.001
6. Higa S., Nagaoka K., Yoshida K. Stress distributions of a grouser wheel on loose soil // *J. Terramechanics. ISTVS*, 2019. Vol. 85. Pp. 15–26. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jterra.2019.07.001
7. Aleksandrov A. S., Dolgikh G. V., Kalinin A. L. Improvement of shear strength design of a road structure. Part 2. Modified models to calculate the principal and shear stresses // *Mag. Civ. Eng. St-Petersburg State Polytechnical University*, 2016. Vol. 62, № 2. Pp. 51–68. DOI: 10.5862/MCE.62.6
8. Александров А. С. Анализ методов расчета дорожных конструкций по сопротивлению сдвигу в грунте // *Вестник СибАДИ*. 2021. № 5. С. 576–613. DOI: https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-5-576-613
9. Santamarina J. C. Soil Behavior at the Microscale: Particle Forces // *Proc. Symp. Soil Behavior and Soft Ground Construction*, in honor of Charles C. Ladd. MIT, 2001. Pp. 1–32. DOI: https://doi.org/10.1061/40659(2003)2
10. Behringer R. P. Jamming in granular materials // *Comptes Rendus Phys.* Elsevier Masson SAS, 2015. Vol. 16, № 1. P. 10–25. DOI: https://doi.org/10.1016/j.crhy.2015.02.001
11. Clark A. H., Petersen A.J., Kondic L., Behringer R.P. Nonlinear Force Propagation During Granular Impact // *Phys. Rev. Lett.* 2015. Vol. 114 No. 144502. DOI:https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.114.144502
12. Takahashi T. et al. Granular response to impact: Topology of the force networks // *Phys. Rev. E. American Physical Society*, 2018. Vol. 97, № 1. Pp. 012906. DOI:https://doi.org/10.1103/PhysRevE.97.012906
13. Pal S., Ghosh A. Shear strength behaviour of indian fly ashes // *Indian Geotechnical Conference Geotechnics in Infrastructure Development (GEOTIDE)*. 2009. Pp. 763–778.
14. Kim B., Prezzi M., Salgado R. Geotechnical properties of fly and bottom ash mixtures for use in highway embankments // *J. Geotech. Geoenvironmental Eng.* 2005. Vol. 131, № 7. Pp. 914–924. https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2005)131:7(914)
15. Lunev A.A., Sirotiyuk V. V. Stress distribution in ash and slag mixtures // *Mag. Civ. Eng.* 2019. Vol. 86, № 2. Pp. 72–82. DOI: 10.18720/MCE.86.7
16. Матвеев С. А., Литвинов Н. Н., Петров Р. Закономерности распределения напряжений в грунтовых основаниях внутрихозяйственных автомобильных дорог // *Вестник Омского ГАУ*. 2017. № 4(28). С. 233–239.
17. Gheshlaghi F., Mardani A. Prediction of soil vertical stress under off-road tire using smoothed-particle hydrodynamics // *J. Terramechanics. ISTVS*, 2021. Vol. 95. Pp. 7–14. https://doi.org/10.1016/j.jterra.2021.02.004
18. Nguyen V.N. et al. Experimental analysis of vertical soil reaction and soil stress distribution under off-road tires // *J. Terramechanics. ISTVS*, 2008. Vol. 45, № 1–2. Pp. 25–44. https://doi.org/10.1016/j.jterra.2008.03.005
19. Kondratieva L. N., Popov V. M., Medvedsky P. Y. Methods of calculation of soil stress-strain distribution in sheet pile corset // *Procedia Struct. Integr. Elsevier B.V.*, 2017. Vol. 6. Pp. 101–108. DOI: 10.1016/j.prostr.2017.11.016
20. Александров А. С. Совершенствование расчета дорожных конструкций по сопротивлению сдвигу. Ч 1. Состояние вопроса: монография. 2015. Ч. 1. 292 с.
21. Bianchini A. Fröhlich theory-based approach for analysis of stress distribution in a layered system: Case study // *Transp. Res. Rec. National Research Council*, 2014. Vol. 2462. Pp. 61–67. DOI:10.3141/2462-08
22. Александров А. С., Александрова Н. П., Долгих Г. В. Модифицированные модели для расчета главных напряжений в дорожных конструкциях из дискретных материалов // *Строительные материалы*. ООО Рекламно-издательская фирма «Стройматериалы», 2012. № 10. С. 14–17.
23. Gonzalez C. R., Barker W. R. Implementation of a New Flexible Pavement Design Procedure for U.S. Military Airports // *Fourth LACCEI International Latin American and Caribbean Conference for Engineering*. 2006. Pp. 1–10.
24. Aleksandrov A. S., Kalinin A. L., Tsyguleva M. V. Distribution capacity of sandy soils reinforced with geosynthetics // *Mag. Civ. Eng. St-Petersburg State Polytechnical University*, 2016. Vol. 66, № 6. Pp. 35–48. DOI: 10.5862/MCE.66.4
25. Beakawi Al-Hashemi H.M., Baghabra Al-Amoudi O.S. A review on the angle of repose of granular materials // *Powder Technology. Elsevier B. V.*, 2018. Vol. 330. Pp. 397–417. https://doi.org/10.1016/j.powtec.2018.02.003
26. Moshenzhal A. V. Account of Irregularity in the Stress Distribution along Wood and Concrete Sleepers from a Perspective of Granular Media Mechanics // *Procedia Engineering. Elsevier Ltd*, 2017. Vol. 189. Pp. 637–642. https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.05.101
27. Lee J. et al. Assessment of K₀ correlation to strength for granular materials // *Soils Found. Japanese Geotechnical Society*, 2013. Vol. 53, № 4. Pp. 584–595. https://doi.org/10.1016/j.sandf.2013.06.009

28. Federico A., Elia G., Murianni A. The at-rest earth pressure coefficient prediction using simple elasto-plastic constitutive models // *Comput. Geotech.* 2009. Vol. 36, No. 1–2. Pp. 187–198. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2008.01.006>
29. Brooker E. W., Ireland H. O. Earth Pressures at Rest Related to Stress History // *Can. Geotech. J.* NRC Research Press Ottawa, Canada, 1965. Vol. 2, № 1. Pp. 1–15. <https://doi.org/10.1139/t65-001>
30. Mayne P. W., Kulhawy F.H. K-OCR relationships in soil // *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr.* 1983. Vol. 20, № 1. Pp. A2. DOI:10.1061/AJGEB6.0001306
31. Badanin A. N., Bugrov A.K., Krotov A.V. The determination of the first critical load on particulate medium of sandy loam foundation // *Mag. Civ. Eng. Saint Petersburg State Polytechnical University*, 2012. Vol. 35, № 9. Pp. 29–34. DOI: 10.5862/MCE.35.4
32. Семенова Т. В., Долгих Г. В., Полугородник Б. Н. Применение калифорнийского числа несущей способности и динамического конусного пенетрометра для оценки качества уплотнения грунта // *Вестник СибАДИ*. 2013. № 1. С. 59–66.
33. Putri E. E., Kameswara Rao V. N.S., Manan M. A. Evaluation of Modulus of Elasticity and Modulus of Subgrade Reaction of Soils Using CBR Test // *J. Civ. Eng. Res. Scientific and Academic Publishing*, 2012. Vol. 2, № 1. Pp. 34–40. doi:10.5923/j.jce.20120201.05
34. Guide for Mechanistic-Empirical Design OF NEW AND REHABILITATED PAVEMENT STRUCTURES FINAL DOCUMENT APPENDIX CC-1: CORRELATION OF CBR VALUES WITH SOIL INDEX PROPERTIES NCHRP. Illinois, 2001.
35. Schjøning P. et al. Modelling effects of tyre inflation pressure on the stress distribution near the soil-tyre interface // *Biosyst. Eng.* 2008. Vol. 99, № 1. Pp. 119–133. DOI:10.1016/j.biosystemseng.2007.08.005
36. Schjøning P. et al. Predicted tyre-soil interface area and vertical stress distribution based on loading characteristics // *Soil Tillage Res.* Elsevier B.V., 2015. Vol. 152. Pp. 52–66. <https://doi.org/10.1016/j.still.2015.03.002>
37. Arvidsson J., Keller T. Soil stress as affected by wheel load and tyre inflation pressure // *Soil Tillage Res.* 2007. Vol. 96, № 1–2. Pp. 284–291. <https://doi.org/10.1016/j.still.2007.06.012>
38. Abu-Hamdeh N. H., Reeder R.C. Measuring and predicting Stress Distribution under Tractive Devices in Undisturbed Soils // *Biosyst. Eng. Academic Press*, 2003. Vol. 85, № 4. Pp. 493–502. [https://doi.org/10.1016/S1537-5110\(03\)00069-2](https://doi.org/10.1016/S1537-5110(03)00069-2)
1. Kešner A. et al. Stress distribution on a soil tillage machine frame segment with a chisel shank simulated using discrete element and finite element methods and validate by experiment. *Biosyst. Eng.* 2021. Vol. 209. Pp. 125–138. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2021.06.012>
2. Lamandé M., Schjøning P. Transmission of vertical stress in a real soil profile. Part II: Effect of tyre size, inflation pressure and wheel load. *Soil Tillage Res.* 2011. Vol. 114, № 2. Pp. 71–77. DOI:10.1016/j.still.2010.10.001
3. Sinha A.K. et al. Investigation and design of a fly ash road embankment in India by CPT. 2nd International Symposium on Cone Penetration Testing. 2009. P. Paper No. 3-49.
4. Augustin K. et al. FiTraM: A model for automated spatial analyses of wheel load, soil stress and wheel pass frequency at field scale. *Biosyst. Eng.* Elsevier Ltd, 2019. Vol. 180. Pp. 108–120. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2019.01.019>
5. Higa S. et al. Measurement and modeling for two-dimensional normal stress distribution of wheel on loose soil. *J. Terramechanics.* ISTVS, 2015. Vol. 62. Pp. 63–73. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.jterra.2015.04.001>
6. Higa S., Nagaoka K., Yoshida K. Stress distributions of a grouser wheel on loose soil. *J. Terramechanics.* ISTVS, 2019. Vol. 85. Pp. 15–26. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jterra.2019.07.001>
7. Aleksandrov A. S., Dolgikh G. V., Kalinin A.L. Improvement of shear strength design of a road structure. Part 2. *Modified models to calculate the principal and shear stresses.* *Mag. Civ. Eng. St-Petersburg State Polytechnical University*, 2016. Vol. 62, № 2. Pp. 51–68. DOI: 10.5862/MCE.62.6
8. Aleksandrov A. S. Analiz metodov rascheta dorozhnykh konstrukcij po soprotivleniyu sdvigu v grunte [Analysis of methods of calculating road structures based by shear resistance in the soil]. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal.* 2021. Vol. 18. Pp. 576-613. DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-5-576-613> (In Russ.)
9. Santamarina J. C. Soil Behavior at the Microscale: Particle Forces. *Proc. Symp. Soil Behavior and Soft Ground Construction, in honor of Charles C. Ladd.* MIT, 2001. Pp. 1–32. DOI: [https://doi.org/10.1061/40659\(2003\)2](https://doi.org/10.1061/40659(2003)2)
10. Behringer R. P. Jamming in granular materials. *Comptes Rendus Phys. Elsevier Masson SAS*, 2015. Vol. 16, № 1. Pp. 10–25. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.crhy.2015.02.001>
11. Clark A. H., Petersen A. J., Kondic L., Behringer R. P. Nonlinear Force Propagation During Granular Impact. *Phys. Rev. Lett.* 2015. Vol. 114 No. 144502. DOI:<https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.114.144502>
12. Takahashi T. et al. Granular response to impact: Topology of the force networks. *Phys. Rev. E. American Physical Society.* 2018. Vol. 97, № 1. Pp. 012906. DOI:<https://doi.org/10.1103/PhysRevE.97.012906>
13. Pal S., Ghosh A. Shear strength behaviour of indian fly ashes. Indian Geotechnical Conference Geotechnics in Infrastructure Development (GEOTIDE). 2009. Pp. 763–778.
14. Kim B., Prezzi M., Salgado R. Geotechnical properties of fly and bottom ash mixtures for use in highway embankments. *J. Geotech. Geoenvironmental Eng.* 2005. Vol. 131, № 7. P. 914–924. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2005\)131:7\(914\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2005)131:7(914))
15. Lunev A. A., Sirotyuk V. V. Stress distribution in ash and slag mixtures. *Mag. Civ. Eng.* 2019. Vol. 86, № 2. Pp. 72–82. DOI: 10.18720/MCE.86.7

16. Matveev S. A., Litvinov, N. N., Petrov, R. E. Zakonomernosti raspredeleniya napryazhenij v gruntovyh osnovaniyah vnutrihozyajstvennyh avtomobil'nyh dorog [Regularities of tension distribution in the intereconomic highways soil base]. *Vestnik Omskogo GAU*. Vol. 28. No. 4. 2017. Pp. 233-239. (In Russ.)
17. Gheshlaghi F., Mardani A. Prediction of soil vertical stress under off-road tire using smoothed-particle hydrodynamics. *J. Terramechanics. ISTVS*, 2021. Vol. 95. Pp. 7-14. <https://doi.org/10.1016/j.jterra.2021.02.004>
18. Nguyen V. N. et al. Experimental analysis of vertical soil reaction and soil stress distribution under off-road tires. *J. Terramechanics. ISTVS*, 2008. Vol. 45, № 1-2. Pp. 25-44. <https://doi.org/10.1016/j.jterra.2008.03.005>
19. Kondratieva L. N., Popov V. M., Medvedsky P. Y. Methods of calculation of soil stress-strain distribution in sheet pile corset. *Procedia Struct. Integr. Elsevier B.V.*, 2017. Vol. 6. Pp. 101-108. DOI: 10.1016/j.prostr.2017.11.016
20. Aleksandrov A. S. *Sovershenstvovanie rasscheta dorozhnyh konstrukcij po soprotivleniyu sdvigu. CH 1. Sostoyanie voprosa* [Improving the calculation of road structures for shear resistance. P 1. State of issue]: Monograph. 2015. Vol. 1. 291 p. (In Russ.)
21. Bianchini A. Fröhlich theory-based approach for analysis of stress distribution in a layered system: *Case study*. *Transp. Res. Rec. National Research Council*, 2014. Vol. 2462. Pp. 61-67. DOI:10.3141/2462-08
22. Aleksandrov A. S., Aleksandrova N.P., Dolgih G.V. Modificirovannye modeli dlya rasscheta glavnyh napryazhenij v dorozhnyh konstrukciyah iz diskretnyh materialov [Modified models for calculation of principal stresses in road structures made of discrete materials]. *Construction Materials. LLC Advertising and publishing company "Stroymaterialy"*. 2012. Vol. 10. Pp. 14-17. (In Russ.)
23. Gonzalez C.R., Barker W.R. Implementation of a New Flexible Pavement Design Procedure for U.S. Military Airports. Fourth LACCEI International Latin American and Caribbean Conference for Engineering. 2006. Pp. 1-10.
24. Aleksandrov A.S., Kalinin A.L., Tsyguleva M. V. Distribution capacity of sandy soils reinforced with geosynthetics. *Mag. Civ. Eng. St-Petersburg State Polytechnical University*, 2016. Vol. 66, № 6. Pp. 35-48. DOI: 10.5862/MCE.66.4
25. Beakawi Al-Hashemi H.M., Baghabra Al-Amoudi O.S. A review on the angle of repose of granular materials. *Powder Technology. Elsevier B.V.*, 2018. Vol. 330. Pp. 397-417. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2018.02.003>
26. Moshenzhal A. V. Account of Irregularity in the Stress Distribution along Wood and Concrete Sleepers from a Perspective of Granular Media Mechanics. *Procedia Engineering. Elsevier Ltd*, 2017. Vol. 189. Pp. 637-642. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.05.101>
27. Lee J. et al. Assessment of K0 correlation to strength for granular materials. *Soils Found. Japanese Geotechnical Society*. 2013. Vol. 53, № 4. Pp. 584-595. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2013.06.009>
28. Federico A., Elia G., Murianni A. The at-rest earth pressure coefficient prediction using simple elastoplastic constitutive models. *Comput. Geotech.* 2009. Vol. 36, № 1-2. Pp. 187-198. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2008.01.006>
29. Brooker E. W., Ireland H. O. Earth Pressures at Rest Related to Stress History. *Can. Geotech. J. NRC Research Press Ottawa, Canada*. 1965. Vol. 2, № 1. Pp. 1-15. <https://doi.org/10.1139/t65-001>
30. Mayne P. W., Kulhawy F. H. K-OCR relationships in soil. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr.* 1983. Vol. 20, № 1. Pp. A2. DOI:10.1061/AJGEB6.0001306
31. Badanin A. N., Bugrov A. K., Krotov A. V. The determination of the first critical load on particulate medium of sandy loam foundation. *Mag. Civ. Eng. Saint Petersburg State Polytechnical University*. 2012. Vol. 35, № 9. Pp. 29-34. DOI: 10.5862/MCE.35.4
32. Semenova T. V., Dolgih G. V., Polugorodnik B. N. Primenenie kalifornijskogo chisla nesushchej sposobnosti i dinamicheskogo konusnogo penetrometra dlya ocenki kachestva uplotneniya grunta [California application number of carrying capacity and dynamic cone penetrometry to assess the quality of compacted soil]. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2013. Vol. 1. Pp. 59-66. (In Russ.)
33. Putri E. E., Kameswara Rao V. N. S., Manman M. A. Evaluation of Modulus of Elasticity and Modulus of Subgrade Reaction of Soils Using CBR Test. *J. Civ. Eng. Res. Scientific and Academic Publishing*, 2012. Vol. 2, № 1. Pp. 34-40. doi:10.5923/j.jce.20120201.05
34. Guide for Mechanistic-Empirical Design of new and rehabilitated pavement structures final document appendix CC-1: correlation of cbr values with soil index properties NCHRP. Illinois, 2001.
35. Schjønning P. et al. Modelling effects of tyre inflation pressure on the stress distribution near the soil-tyre interface. *Biosyst. Eng.* 2008. Vol. 99, № 1. Pp. 119-133. DOI:10.1016/j.biosystemseng.2007.08.005
36. Schjønning P. et al. Predicted tyre-soil interface area and vertical stress distribution based on loading characteristics. *Soil Tillage Res. Elsevier B.V.*, 2015. Vol. 152. Pp. 52-66. <https://doi.org/10.1016/j.still.2015.03.002>
37. Arvidsson J., Keller T. Soil stress as affected by wheel load and tyre inflation pressure. *Soil Tillage Res.* 2007. Vol. 96, № 1-2. Pp. 284-291. <https://doi.org/10.1016/j.still.2007.06.012>
38. Abu-Hamdeh N.H., Reeder R.C. Measuring and predicting Stress Distribution under Tractive Devices in Undisturbed Soils. *Biosyst. Eng. Academic Press*, 2003. Vol. 85. № 4. Pp. 493-502. [https://doi.org/10.1016/S1537-5110\(03\)00069-2](https://doi.org/10.1016/S1537-5110(03)00069-2)

ВКЛАД СОАВТОРОВ

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

COAUTHOR' CONTRIBUTION

All authors have made an equivalent contribution to the preparation of the publication.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Лунёв Александр Александрович – канд. техн. наук; директор центра компетенций в сфере использования вторичных материальных ресурсов в строительной отрасли.

Кацарский Роман Сергеевич – магистрант; заведующий лабораторией центра компетенций

в сфере использования вторичных материальных ресурсов в строительной отрасли.

INFORMATION ABOUT AUTHORS

Aleksandr A. Lunev — Cand. of Sci., the Head of the Competence centre for the use of recycled material resources in construction industry.

Roman S. Katsarskiy – Master's student, the Head of the laboratory in the Competence centre for the use of recycled material resources in construction industry.