

## Механические свойства базальтового щебеночного балласта

А. Ф. Колос<sup>1</sup>, С. А. Клищ<sup>1</sup>, Д. Н. Соболев<sup>2</sup>, Э. Д. Загитов<sup>2</sup>, И. В. Колос<sup>1</sup>, В. Г. Гладий<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Российская Федерация, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

<sup>2</sup>АО «Инжиниринговый центр железнодорожного транспорта», Российская Федерация, 121205, г. Москва, территория Инновационного центра "Сколково", ул. Большой б-р, 5

<sup>3</sup>АО «Институт «Стройпроект», Российская Федерация, 196158, Санкт-Петербург, Дунайский пр., д. 13, корп. 2, Литера А

**Для цитирования:** Колос А. Ф. Механические свойства базальтового щебеночного балласта / А. Ф. Колос, С. А. Клищ, Д. Н. Соболев, Э. Д. Загитов, И. В. Колос, В. Г. Гладий // Бюллетень результатов научных исследований. — 2022. — Вып. 3. — С. 53–72. DOI: 10.20295/2223-9987-2022-3-53-72

### Аннотация

**Цель:** Исследование прочностных и деформативных свойств базальтового щебеночного балласта в зависимости от его зернового состава необходимых для последующей оценки несущей способности и деформативности балластного слоя железнодорожного пути. **Методы:** Определение механических свойств щебеночного балласта из базальтовой горной породы осуществлялось в камере трехосного сжатия в которой моделировалось напряженное состояние, приближенное к реальным условиям эксплуатации. В процессе испытаний определялись зависимости осевой и объемной деформаций от девиатора напряжений. В работе использованы методы статистической обработки результатов испытаний и регрессионного анализа. **Результаты:** По данным статистической обработки результатов лабораторных испытаний определены основные характеристики прочности базальтового щебеночного балласта, а также модуль деформации и коэффициент Пуассона в зависимости от его зернового состава. **Практическая значимость:** Результаты исследования позволяют сформулировать рекомендации в части зернового состава щебеночного балласта из базальта, применяемого на участках особогрузонапряженного движения поездов.

**Ключевые слова:** Железнодорожный путь, базальтовый щебень, щебеночный балласт, балластная призма, прочностные свойства щебня, деформативные свойства щебня, зерновой состав щебеночного балласта.

### Введение

Увеличение грузонапряженности на отдельных участках железных дорог Российской Федерации свыше 150 млн тонн брутто в год приводит к тому, что срок службы щебеночного балласта существенно сокращается. Так, в среднем нормативный срок службы в соответствии с [1] колеблется от 300 до 350 млн тонн брутто пропущенного груза и при грузонапряженности 150 млн тонн брутто составляет около 2–2,5 лет, после чего должна быть назначена очистка балласта либо его замена. Такая периодичность путевых работ, связанная с обслуживанием балластного слоя, вызывает рост затрат на техническое обслуживание железнодорожного

пути, а отсутствие в необходимом объеме технологических «окон» на проведение промежуточных ремонтов и работ по текущему содержанию увеличивает общую протяженность участков пути со сверхнормативной наработкой тоннажа. Таким образом, выходом из сложившейся ситуации является увеличение ресурса работы балластного слоя.

Для решения этой задачи требуется совершенствование существующих конструкций верхнего строения пути, чтобы обеспечить максимально возможную наработку тоннажа. На совещании в Министерстве промышленности и торговли РФ 30 августа 2018 г. принято решение [2] о разработке конструкции железнодорожного пути, обеспечивающего наработку тоннажа 2,5 млрд тонн брутто, в связи с чем в ОАО «РЖД» утверждена дорожная карта, в которой определена задача разработки технических требований к конструкции пути с ресурсом 2,5 млрд тонн брутто.

Стабильность балластной призмы в период между работами капитального характера зависит от ее прочности и деформативности. Эти два важнейших параметра определяются множеством факторов, важнейшими из которых являются: минеральный состав щебеночного балласта, который определяет сопротивление щебня удару и истиранию, его зерновой состав, морозостойкость, загрязненность, засоренность и др.

На железных дорогах Российской Федерации преимущественно применяется гранитный щебень II категории по ГОСТ 7392—2014 [3], а на особогрузонапряженных линиях щебень I категории. Однако даже гранитный щебень I категории [3] по показателям сопротивления удару и истирания уступает щебню, который изготовлен из базальтового минерала. Базальт существенно прочнее гранита и является по прочности на одноосное сжатие лидером среди существующих горных пород. Вследствие этого базальтовый щебень менее подвержен механическому износу (дроблению зерен, истиранию) в процессе эксплуатации железнодорожного пути. В этой связи для увеличения срока службы щебеночного балласта для участков особогрузонапряженного движения целесообразно рассмотреть применение базальтового щебня. Месторождения базальта на территории России весьма обширны и охватывают практически все регионы страны [4], что позволяет обеспечить потребность практически всех предприятий путевого хозяйства в базальтовом щебне.

На несущую способность и на ограничение темпа накопления остаточных деформаций балластного слоя существенным образом оказывают влияние такие свойства балласта, как удельное зацепление, угол внутреннего трения, модуль деформации и коэффициент Пуассона. Эти характеристики зависят от многих факторов, первым из которых является зерновой состав. В то же время анализ норм и стандартов, применяемых в различных странах [5–7], включая Российскую

Федерацию [3], показывает, что имеются существенные различия в требованиях к зерновому составу щебня. При этом на выбор зернового состава влияют условия эксплуатации железнодорожного пути. Таким образом, для решения задачи об увеличении срока службы щебеночного балласта требуется проведение исследований прочностных и деформативных свойств базальтового щебня при различных зерновых составах. Как показывает практика, наиболее достоверно эти характеристики определяются в приборах трехосного нагружения с моделированием напряженного состояния испытываемых образцов, максимально приближенного к фактическим условиям эксплуатации балластного слоя.

## Материалы для исследования

Для проведения исследований прочностных и деформативных свойств базальтового щебеночного балласта использовались специально подготовленные пробы щебня различного зернового состава.

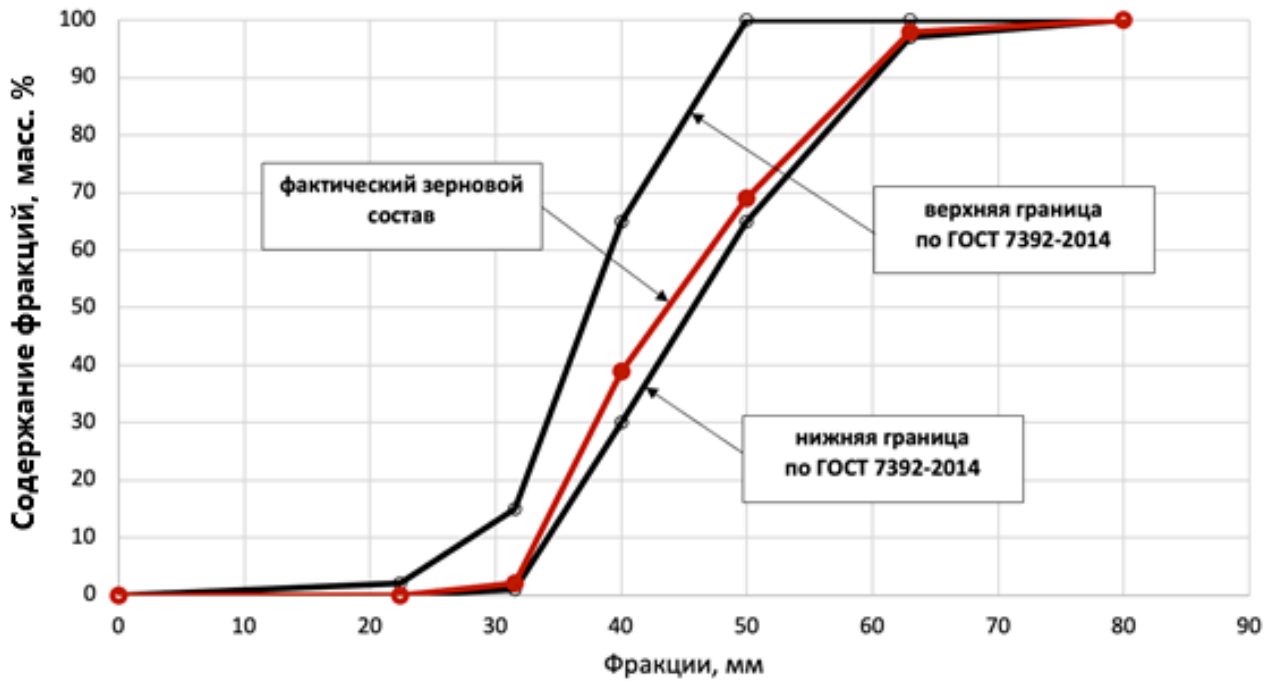
Первый зерновой состав соответствует щебню категории «В» по ГОСТ 7392—2014 [3], второй — зерновой состав № 4 по стандарту AREMA 2020 [8], третий подбирался на основании анализа первых двух зерновых (рис. 1). Как видно из рис. 1, в, зерновой состав щебня категории «В» по ГОСТ 7392—2014 [3] более закруглен, содержание фракций размером менее 22,4 мм не превышает 2 масс.%, а в щебне по стандарту AREMA 2020 [8] количество таких фракций не превышает порядка 40 масс.% и фракций размером менее 10 мм — не более 5 масс.%.

В табл. 1 приведены основные характеристики испытываемых образцов.

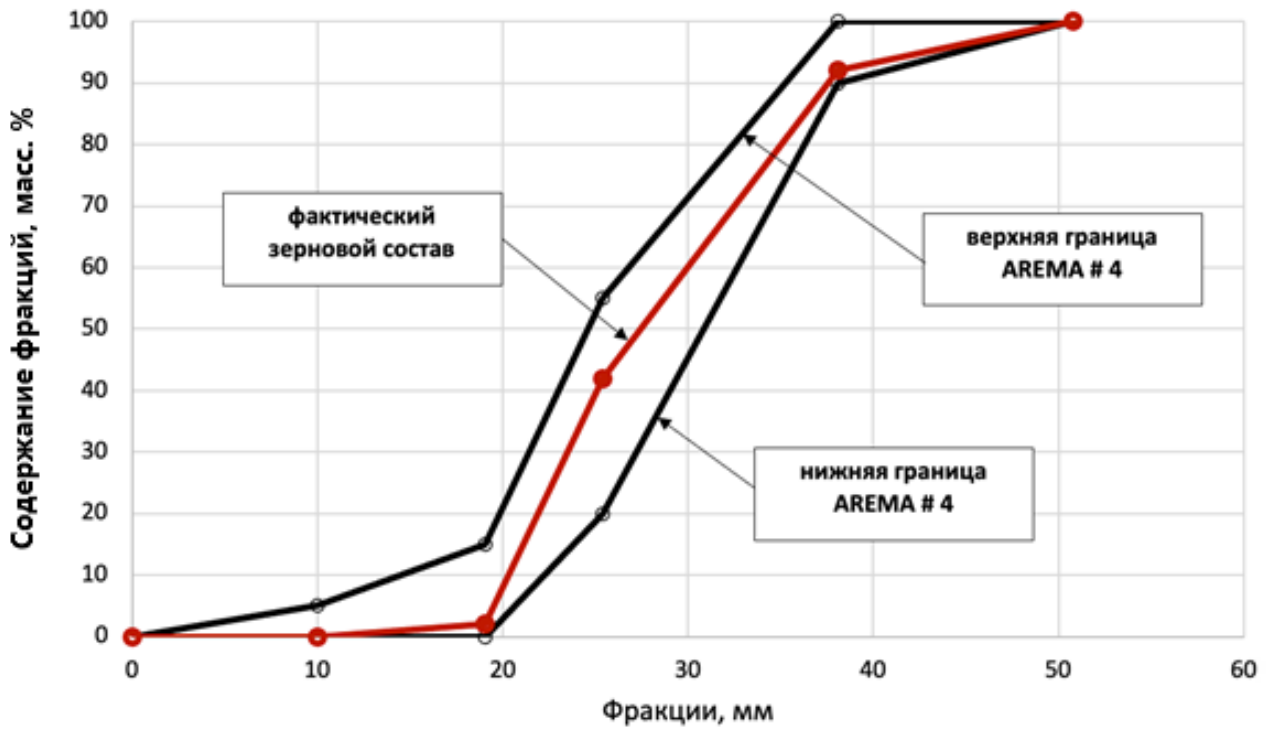
ТАБЛИЦА 1. Характеристика проб щебеночного балласта, используемых при проведении испытаний

Серия испытаний	Характеристика пробы	Порода щебня	Плотность щебня, $\rho$ , г/см <sup>3</sup>	Количество изготовленных образцов для проведения испытаний
STX-1	Щебень категории «В» по ГОСТ 7392—2014 [3]	базальт	1,62–1,63	9
STX-2	Щебень с зерновым составом № 4 по AREMA 2020 [3]	базальт	1,78–1,80	9
STX-3	Щебень с зерновым составом по рис. 1, в	базальт	1,73–1,78	9

*a*



*б*



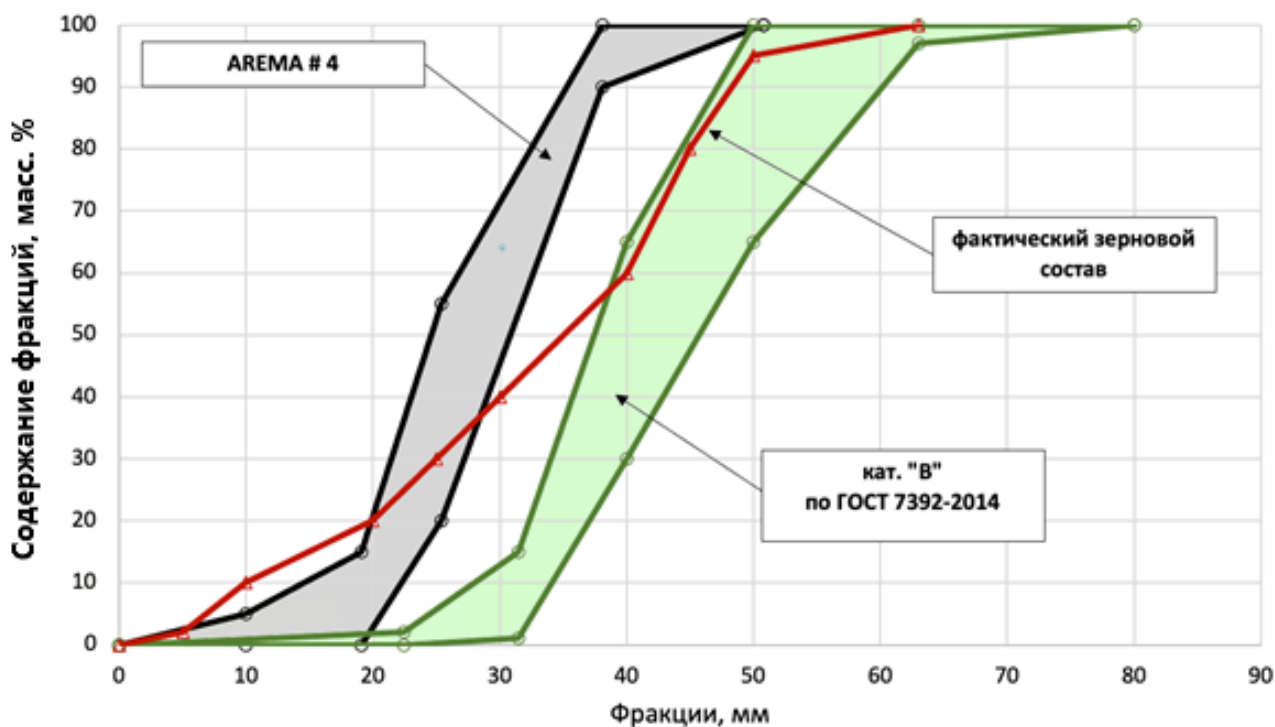


Рис. 1. Зерновые составы базальтового щебня, используемые в испытаниях:  
*а* — щебень категории «В» по ГОСТ 7392—2014;  
*б* — щебень с зерновым составом № 4 по стандарту AREMA 2020 [8];  
*в* — альтернативный зерновой состав

## Методы испытаний, применяемое оборудование

Многочисленные исследования убедительно свидетельствуют о принципиальной возможности определения прочностных и деформативных свойств щебня в различных приборах, например сдвиговых. Однако максимальное приближение напряженного состояния балласта под действием поездной нагрузки в лабораторных условиях к напряженному состоянию, характерному для конструкции балластной призмы железнодорожного пути, наиболее точно достигается в приборах трехосного сжатия, в которых допускается боковое расширение грунта.

Работы по проведению трехосных испытаний проводились в июне — июле 2022 г. в лаборатории «Геотехнического научно-исследовательского испытательного центра» при кафедре «Строительство дорог транспортного комплекса» ПГУПС с использованием установки трехосного сжатия D300 ´ 600 ГТ 1.3.7 (рис. 2) для определения характеристик прочности и деформируемости щебня по ГОСТ 12248.3—2020 [9].



Рис. 2. Установка трехосного сжатия D300' 600 ГТ 1.3.7 для испытания крупнообломочных грунтов

Система реализует:

- моделирование напряженно-деформированного состояния образца из щебеночного балласта, приближенное к реальному;
- возможность испытания образцов высотой 600 мм и диаметром 300 мм;
- испытания с фиксацией осевой силы, всестороннего бокового давления, хода поршня гидроцилиндра, объемной и осевой деформации образца.

Так как щебеночный балласт воспринимает постоянную нагрузку от веса рельсошпальной решетки, а также учитывая непродолжительный период действия временной вибродинамической нагрузки, определение прочностных характеристик щебня производилось по методике неконсолидированно-недренированных испытаний.

Общий подход к проведению испытаний сводился к следующему. Предварительно в камере стабилометра создавалось всестороннее боковое давление, которое обеспечивалось за счет обжатия образца давлением жидкости. После всестороннего обжатия образца происходила его консолидация, окончание которой определялось полным затуханием деформаций образца. После окончания процесса консолидации на образец непрерывно передавалось избыточное вертикальное

давление до его полного разрушения. Таким образом, в любой период времени имелась возможность получить следующие данные: действующую нагрузку на любой ступени нагружения; соответствующую ей величину истинной деформации; время действия нагрузки, а следовательно, и время развития деформации.

На основании этих данных по ГОСТ 12248.3 [9] рассчитывались следующие показатели: относительная осевая деформация грунта  $\varepsilon_1$ ; относительная объемная деформация  $\varepsilon_V$ ; величина вертикальных избыточных напряжений (девиатор напряжений  $q$ ). По полученным значениям традиционным способом строились графические зависимости:  $\varepsilon_1 = f(q)$  – развития относительной осевой деформации  $\varepsilon_1$  от девиатора напряжений  $q$ ;  $\varepsilon_V = f(\varepsilon_1)$  – развития объемной деформации  $\varepsilon_V$  от относительной осевой деформации  $\varepsilon_1$ . На рис. 3 и 4 приведены примеры построения таких графиков при проведении испытаний с зерновым составом щебня категории «В» по ГОСТ 7392—2014 [3].

Предельное напряженное состояние образца щебня определялось по графику (рис. 3), следуя рекомендациям, приведенным в ГОСТ 12248.3 [9].

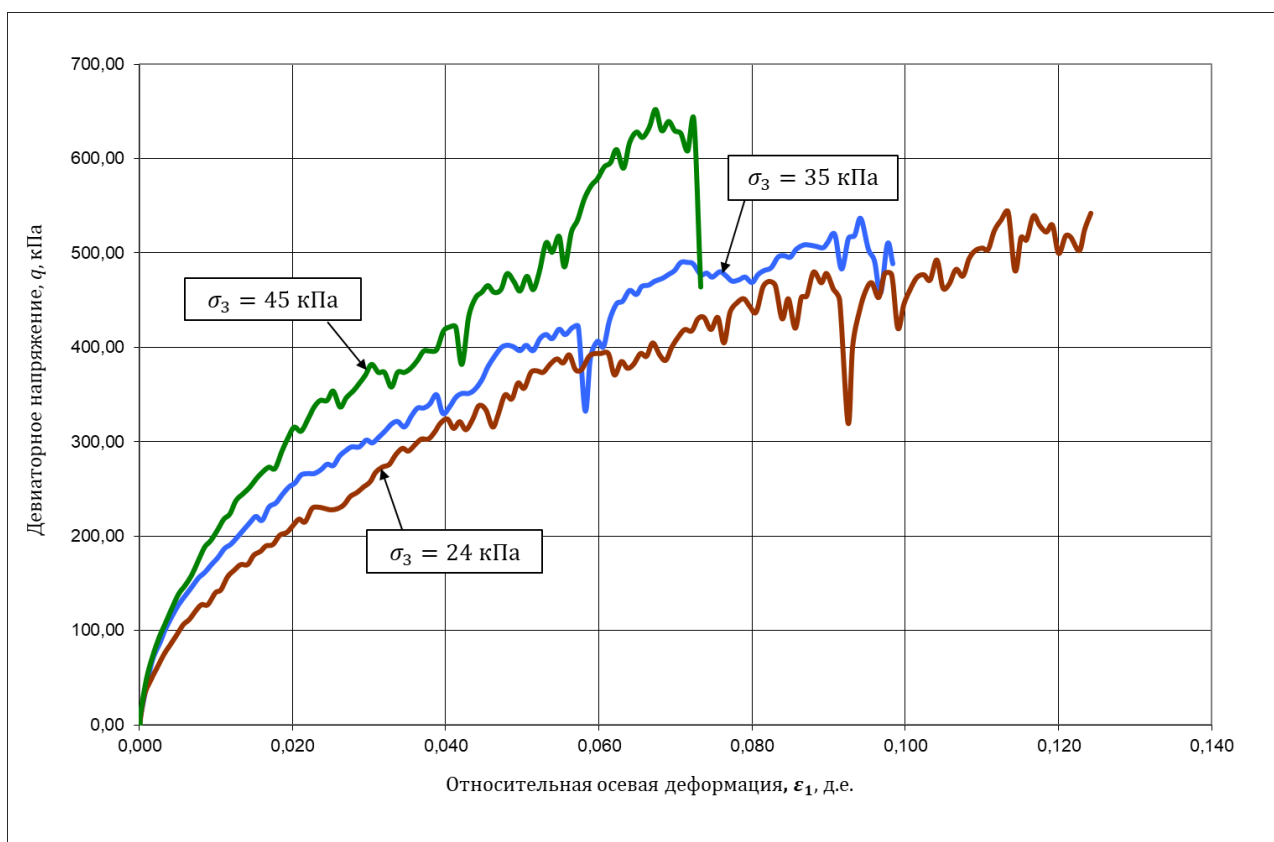


Рис. 3. Зависимость относительной осевой деформации от девиатора напряжений  $\varepsilon_1 = f(q)$  для образцов щебеночного балласта категории «В» [3] при трехосном нагружении при разном всестороннем боковом давлении  $\sigma_3$

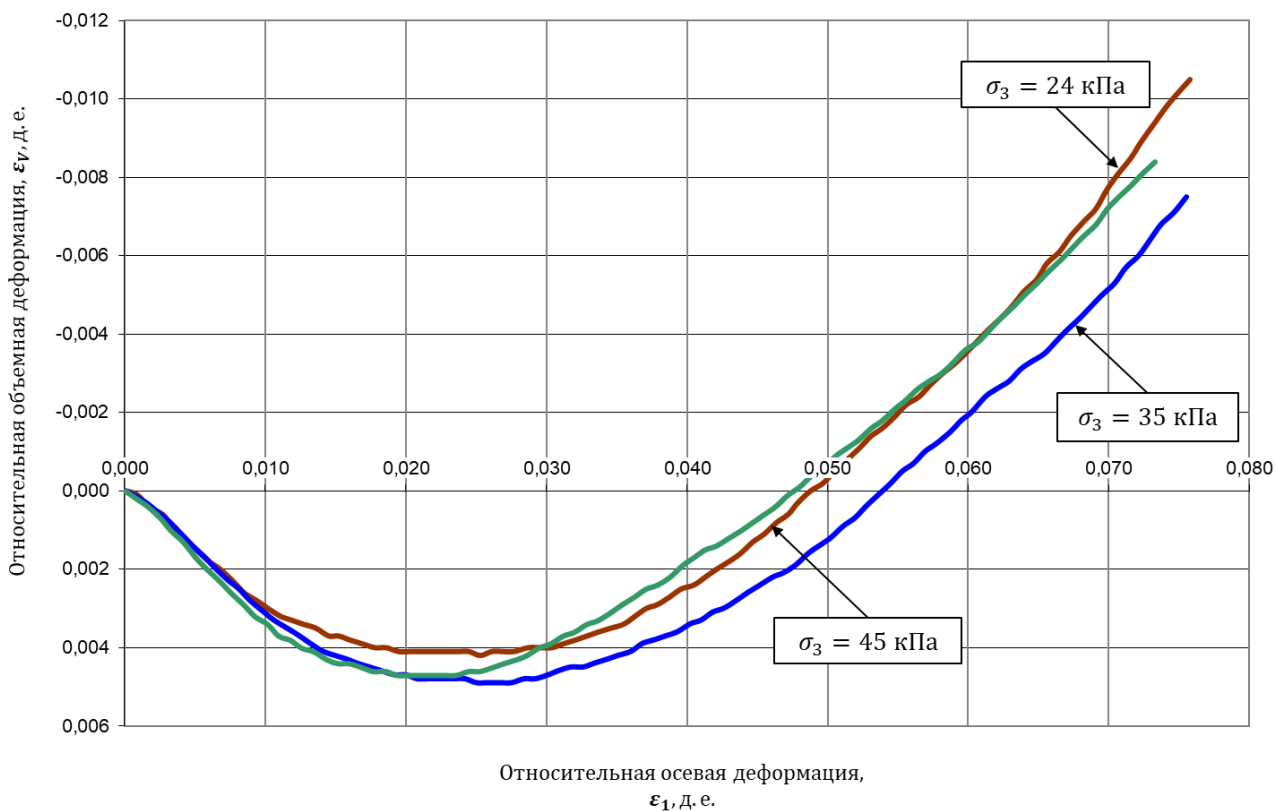


Рис. 4. Зависимость относительной объемной деформации от относительной осевой деформации  $\varepsilon_V = f(\varepsilon_1)$  для образцов щебеночного балласта категории «В» [3] при трехосном нагружении при разном всестороннем боковом давлении  $\sigma_3$

Основные положения методики определения естественной прочности грунта на сдвиговых установках разработаны И. П. Ивановым [10] и переработаны И. В. Прокудиным [11] для экспериментов в условиях трехосного сжатия. Минимальное значение гидростатического давления в стабилометрических испытаниях практически не ограничено, но по техническим причинам в наших экспериментах оно составляло не менее 0,01 МПа. Для создания в камере стабилометров напряженного состояния щебня, приближающегося к напряженному состоянию, имеющему место в конструкции балластной призмы железнодорожного пути, максимальное значение всестороннего давления должно составлять некоторую часть от главного напряжения  $\sigma_1$ . В связи с этим боковое гидростатическое давление в наших экспериментах при испытаниях образцов для определения прочностных свойств щебня задавалось в диапазоне 20–40 кПа. В ходе испытаний было установлено, что ни в одном эксперименте величина бокового давления  $\sigma_3$  не оказалась выше  $0,4 \cdot \sigma_1$ , что обеспечивало получение достоверных результатов исследования.



## Обоснование модели прочности щебня

Условие предельного равновесия грунта в компонентах нормальных  $\sigma_n$  и касательных напряжений  $\tau_n$ , действующих на произвольной площадке с нормалью  $n$ , проведенной через некую точку в грунтовой среде [12], можно записать в виде:

$$[\tau_n] = f(\sigma_n), \quad (1)$$

где  $[\tau_n]$  — сопротивление грунта сдвигу, возникающему на площадке с нормалью  $n$ , проведенную через произвольную точку в грунтовой среде;  $f$  — произвольная функция указанного аргумента, определяемая экспериментальным путем.

В качестве функции  $f$  принимают некую огибающую функцию кругов Мора, уравнение которой устанавливается экспериментально. Таким образом, применительно к щебеночному балласту основной задачей исследования являлось определение математического выражения для функции  $f$ , связывающей сопротивление грунта сдвигу на произвольной площадке с нормалью  $n$ , с нормальными напряжениями, действующими на той же произвольной площадке, и параметрами прочности щебеночного балласта. Это дает основу для вывода дифференциальных уравнений, описывающих предельное напряженное состояние балластного слоя железнодорожного пути, решение которых позволяет вычислить его прочность (несущую способность).

Для установления вида функции  $f$  в уравнении (1) проведены методические эксперименты, заключающиеся в определении разрушающей нагрузки, действующей на образцы щебеночного балласта в условиях трехосного сжатия, при разных величинах бокового всестороннего давления в камере стабилометра с дальнейшим построением кругов Мора.

Для исследования использовался новый гранитный щебень II категории по ГОСТ 7392 [3]. Для достоверного установления вида функции  $f$  в камере стабилометра создавалось всестороннее боковое давление, равное 10, 20, 30, 40, 60 и 80 кПа. Результаты таких экспериментов приведены на рис. 5.

Анализ результатов исследований, представленных в виде кругов Мора на рис. 5, а также результатов других авторов [11–15] показывает, что применительно к щебеночному балласту имеется два принципиальных подхода в определении вида функции  $f$ , в выражении (1):

описание в виде закона Кулона вида:

$$[\tau_n] = \sigma_n \cdot \operatorname{tg} \varphi + c, \quad (2)$$

где  $c$  — удельное зацепление щебня, кПа;  $\varphi$  — угол внутреннего трения, град.;

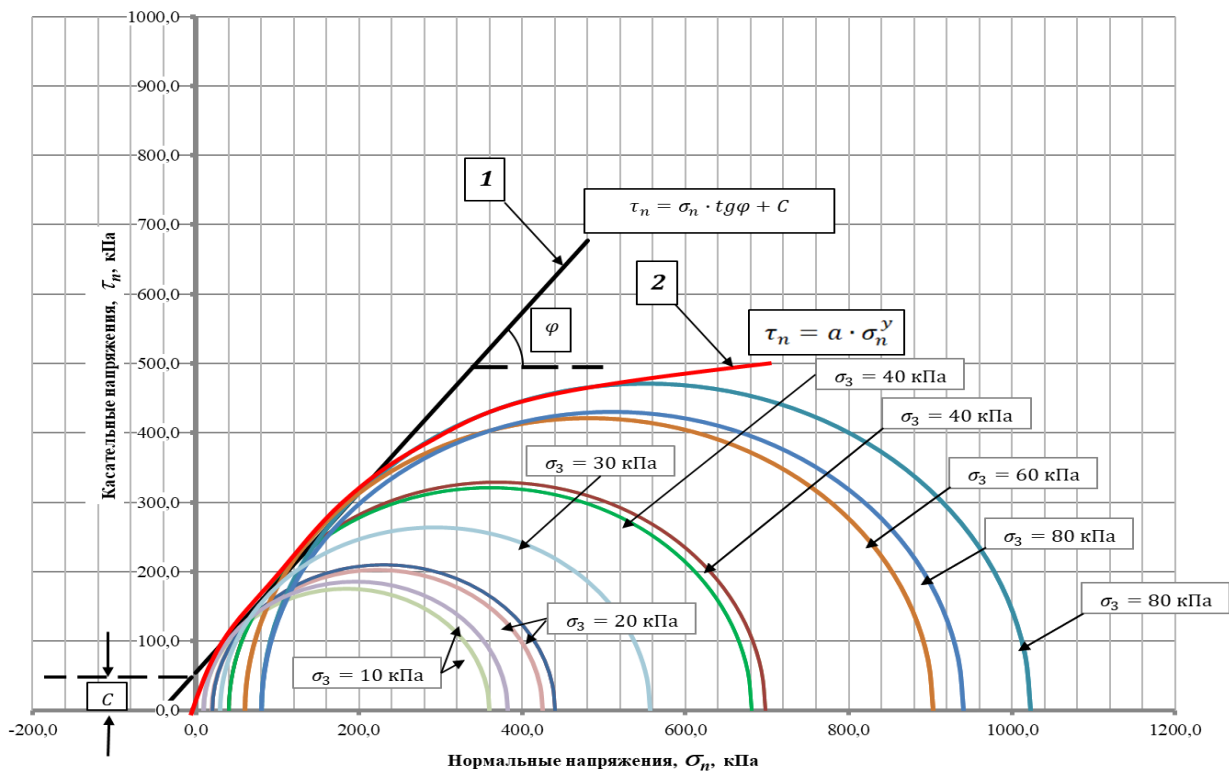


Рис. 5. Круги Мора, построенные по результатам статических трехосных испытаний образцов чистого щебня II категории по ГОСТ 7392—2014:

1 — условие прочности Кулона; 2 — степенное;

$c$  — удельное зацепление щебня;  $\varphi$  — угол внутреннего трения

и описание в виде степенной функции:

$$[\tau_n] = a \cdot \sigma_n^y, \quad (3)$$

где  $a$  и  $y$  — параметры упрочнения щебня, определяемые экспериментально.

С одной стороны, использование закона прочности Кулона исходит из предположения, что щебень обладает сцеплением, поскольку прямая отсекает на вертикальной оси величину сопротивления сдвигу, равную  $c$ . С другой стороны, следуя физике явления, сцеплением обладают только связные грунты, коим щебень не является, следовательно, величина сцепления должна принципиально для щебеночного балласта равняться нулю. В этом случае прямая должна исходить из начала координат на рис. 4, однако провести огибающую ко всем кругам Мора в виде прямой линии и проходящей через начало координат не представляется возможным в силу появления значительных погрешностей.

Такого недостатка лишена функция  $f$ , представляемая в виде степенной зависимости (формула 3). Как видно из формулы (3) и из графика на рис. 4, при  $\sigma_n = 0$

сопротивление сдвигу равно нулю, т. е. щебень в этом случае не обладает сцеплением. Однако применение на практике этой функции сопряжено со сложностями, связанными с необходимостью подбора показателей упрочнения щебня в каждом конкретном случае, а в отдельных экспериментах возникает необходимость и корректировки самого выражения функции  $f$ .

Так, в ряде случаев, например, при исследовании прочностных свойств загрязненного щебня для описания условия прочности грунта приходится использовать выражение экспоненциального вида [14]:

$$[\tau_n] = k \left[ 1 - e^{-\lambda \left( \frac{\sigma_n}{k} \right)} \right], \quad (4)$$

где  $k$  и  $\lambda$  — параметры упрочнения щебня,  $e$  — основание натурального логарифма.

Все это существенно затрудняет использование условий прочности (3) и (4) и вносит дополнительные математические трудности для вывода уравнений теории предельного равновесия для решения задачи о несущей способности балластной призмы железнодорожного пути.

Анализ исследований, выполненных в России и за рубежом, показал, что с приемлемой для инженерных целей точностью для описания условия прочности щебеночного балласта и дальнейшего решения прикладных задач можно использовать условие Кулона. Действительно, как показывают опыты, выполненные в ДИИТе на сдвиговой установке, при  $\sigma_n = 0$  у щебня появляется некоторая величина сопротивления сдвигу, которая в зависимости от формы зерен, зернового состава варьируется в пределах 5–11 кПа. Так, в работе [16] это явление объясняется наличием у щебня острых граней, которые при сдвиге зацепляются друг о друга, вызывая появление в щебне некоторого сопротивления сдвигу. Чем более гладкие ребра у зерен щебня, тем меньше  $[\tau_n]$ , а при галечниковом грунте и вовсе  $[\tau_n] \rightarrow 0$ . Следовательно, для щебеночного балласта вместо показателя удельного сцепления лучше использовать термин «удельное зацепление щебня», что отражает физическую суть явления прочности.

Таким образом, в целях настоящего исследования, а также опираясь на выводы, изложенные выше, условие прочности щебеночного балласта будем описывать уравнением Кулона вида (2), а на основании трехосных испытаний базальтового щебня появляется необходимость установления его удельного зацепления и угла внутреннего трения, которые устанавливались на основании статистической обработки результатов испытаний.

## Обработка результатов испытаний

Статистическая обработка результатов определения удельного зацепления и угла внутреннего трения производилась в соответствии с рекомендациями ГОСТ 20522 [17] и состояла в следующем.

Средние значения удельного зацепления и угла внутреннего трения щебня определялись по формулам:

$$\operatorname{tg}\varphi_j = \frac{N_j - 1}{2\sqrt{N_j}}; \quad (5)$$

$$C_j = \frac{M_j}{2\sqrt{N_j}}. \quad (6)$$

Значения коэффициентов  $N_j$  и  $M_j$  вычислялись по формулам (7) — (8). При этом их определение производилось по методу наименьших квадратов по результатам не менее девяти определений разрушающих давлений  $\sigma_1$  в камере стабилометра при разных значениях бокового всестороннего давления,  $\sigma_3$ .

$$N_j = \frac{k \cdot \sum_{i=1}^k \sigma_{1,i} \cdot \sigma_{3,i} - \sum_{i=1}^k \sigma_{1,i} \cdot \sum_{i=1}^k \sigma_{3,i}}{k \cdot \sum_{i=1}^k (\sigma_{3,i})^2 - \left(\sum_{i=1}^k \sigma_{3,i}\right)^2}; \quad (7)$$

$$M_j = \frac{1}{k} \left( \sum_{i=1}^k \sigma_{1,i} - N_j \cdot \sum_{i=1}^k \sigma_{3,i} \right), \quad (8)$$

где  $k$  — число определений, принятое в ходе экспериментов не менее 9 (при разных величинах бокового давления).

При проведении стабилометрических испытаний при разных боковых давлениях в камере трехосного сжатия проводилось определение модуля деформации щебня  $E$  и коэффициента поперечной деформации  $\vartheta$  (коэффициент Пуассона).

$$E = \frac{\Delta q}{\Delta \varepsilon_1}; \quad (9)$$

$$\vartheta = \frac{(\Delta \varepsilon_V - \Delta \varepsilon_1)}{2 \cdot \Delta \varepsilon_1}, \quad (10)$$

где  $\Delta q$  — приращение девиатора напряжений в заданном диапазоне, МПа;  $\Delta \varepsilon_1$  и  $\Delta \varepsilon_V$  — приращение относительной осевой и объемной деформаций образцов щебня, д. е.

Деформационные характеристики щебня определялись в соответствии с рекомендациями [9]. На основании полученных нормативных значений модуля деформации и коэффициента Пуассона по формулам (11) и (12) производилось определение модуля сдвига  $G$  и модуля объемной деформации  $K$ :

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)}. \quad (11)$$

$$K = \frac{E}{3(1 - 2 \cdot \nu)}. \quad (12)$$

## Результаты испытаний

Разрушение образцов базальтового щебня во всех испытаниях имеет практически идентичный характер, увеличение избыточного давления на первом этапе нагружения до достижения относительной осевой деформации образца около 2,0–2,5 % приводит к его осадке по нелинейному закону. При этом, как показывают результаты экспериментов, объем образца уменьшается, т. е. в этом диапазоне давлений наблюдается контракция (отрицательная дилатансия) [18], связанная с доуплотнением щебня, о чем свидетельствует зависимость относительной объемной деформации от относительной осевой деформации  $\varepsilon_V = f(\varepsilon_1)$  (рис. 4). Явление контракции наблюдалось во всех испытаниях, при этом исходная плотность образцов в среднем колебалась от 1,61 до 1,63 г/см<sup>3</sup>, что соответствует плотности щебеночного балласта, уложенного в путь после выполнения путевых работ капитального характера [19, 20]. Таким образом, в первый период работы балластного слоя будет наблюдаться его стабилизация за счет доуплотнения под внешней нагрузкой от движущихся поездов, известный как период «приработки» [21].

При относительной деформации образца 2,0–2,5 % процесс доуплотнения прекращается, щебень приобретает критическую плотность, а дальнейшее увеличение избыточного давления на образец характеризуется изменением знака дилатансии, щебень приобретает максимальное сопротивление сдвигу.

Диапазон давлений, при котором относительная осевая деформация образцов колеблется от 2,0 до 6,0 %, можно охарактеризовать практически линейной зависимостью между девиатором напряжений и относительной осевой деформацией. В среднем он колеблется от 200 до 600 кПа в зависимости от величины всестороннего бокового давления  $\sigma_3$ .

Дальнейший рост девиатора напряжений приводит к возникновению в образце предельного напряженного состояния, и при некоторой величине  $q_{\text{пред}}$  наблюдается процесс его разрушения. По результатам всех проведенных экспериментов отмечается увеличение  $q_{\text{пред}}$  с ростом бокового давления для каждого вида зернового состава щебня, используемого в испытаниях, что подтверждается многими исследованиями [12–16]. По результатам проведенных испытаний определены значения удельного зацепления и угла внутреннего трения базальтового щебеночного балласта при разных зерновых составах путем построения кругов Мора, как показано на рис. 5. Результаты опытных данных представлены в табл. 2.

ТАБЛИЦА 2. Прочностные и деформационные свойства базальтового щебеночного балласта

Серия испытаний	Характеристика пробы	Плотность щебня, $\rho$ , г/см <sup>3</sup>	Прочностные характеристики		Деформационные характеристики при боковом давлении $\sigma_3 = 20\text{--}25$ кПа			
			$c$ , кПа	$\varphi$ , град.	$E$ , МПа	$\vartheta$	$G$ , МПа	$K$ , МПа
STX-1	Щебень категории «В» по ГОСТ 7392—2014 [3]	1,62–1,63	47,8	50	71	0,32	27	66
STX-2	Щебень с зерновым составом № 4 по AREMA 2020 [8]	1,78–1,80	25,4	54	77	0,27	30	56
STX-3	Щебень с зерновым составом по рис. 1, в	1,73–1,78	90,1	37	71	0,30	27	59

Результаты испытаний свидетельствуют о влиянии зернового состава базальтового щебеночного балласта на его прочностные свойства. Так, можно отметить, что удельное зацепление, определенное в сериях из 9 испытаний для каждого зернового состава, находится в широком диапазоне от 25,4 до 90,1 кПа, в то время как угол внутреннего трения изменяется от 37 до 54 градусов. При этом для первых двух зерновых составов изменение угла внутреннего трения не столь велико и не превышает 8 %, в отличие от удельного зацепления. В то же время такое различие в значениях прочностных свойств в целом соответствует аналогичным результатам, полученным другими авторами, например в работе [22].

Как видно из табл. 2, рост удельного зацепления до 90,1 кПа сопровождается падением угла внутреннего трения до 37 градусов. Таким образом, для оценки сопротивления щебня сдвигу целесообразно использовать обобщенную характеристику прочности, которую можно установить по формуле (2) при величинах нормальных давлений, соответствующих вертикальным давлениям, реализуемым в балластном слое железнодорожного пути. Анализ работ, посвященных

исследованию напряженного состояния балластного слоя под поездной вибродинамической нагрузкой [20, 23], показывает, что под подошвой железобетонной шпалы реализуются вертикальные напряжения 250–350 кПа, а на глубине 40–50 см под ее подошвой эти напряжения составляют 50–100 кПа в зависимости от типа подвижного состава и скорости его движения [24]. В этой связи на рис. 6 приведены результаты определения сопротивления базальтового щебня сдвигу при разных значениях нормальных напряжений.

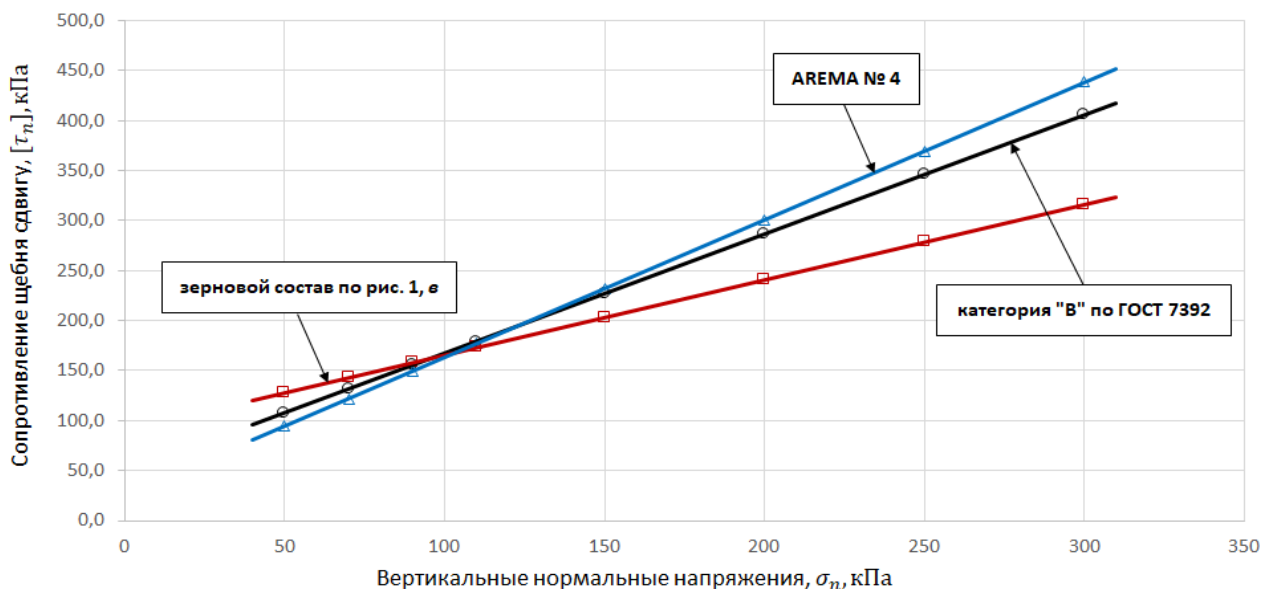


Рис. 6. Зависимость сопротивления щебня сдвигу  $[\tau_n]$  от нормальных давлений  $\sigma_n$

Анализ зависимостей, приведенных на рис. 6, показывает, что наибольшее сопротивление сдвигу при нормальных давлениях 100–350 кПа присуще базальтовому щебню с зерновым составом AREMA № 4 [8] и щебню категории «В» по ГОСТ 7392 [3], у которых разница в не превышает 7,5 %. При меньших давлениях, наоборот, наибольшим сопротивлением сдвигу обладает щебень с зерновым составом, соответствующим рис. 1, в, хотя разница в величинах в этом диапазоне давлений у щебня разных зерновых составов незначительна.

Анализ изменений деформационных свойств щебеночного балласта показывает незначительное изменение модуля общей деформации щебня от 71 до 77 МПа в зависимости от рассматриваемых зерновых составов. Такой же вывод можно сделать и в отношении коэффициента Пуассона, который во всех испытаниях в среднем составил 0,30, что хорошо согласуется с данными других авторов [13, 14, 23] и др.

## Заключение

Обобщая результаты испытаний, можно прийти к следующим выводам.

При прочих равных условиях щебеночный балласт с зерновыми составами AREMA № 4 и соответствующий категории «В» по ГОСТ 7392 обладают большей сопротивляемостью сдвигу, чем щебень с зерновым составом, приведенным на рис. 1, в. При этом деформационные свойства щебня трех зерновых составов практически не отличаются. Таким образом, учитывая необходимость обеспечения прочности и требуемой деформативности балластной призмы, для конструкции железнодорожного пути предпочтительными являются зерновые составы AREMA № 4 и категории «В» по ГОСТ 7392—2014, в особенности для участков с особогрузонапряженным движением.

## Библиографический список

1. Технические условия на работы по ремонту железнодорожного пути // Утверждены Распоряжением ОАО «РЖД» от 18 января 2013 г. № 75р. — М., 2013.
2. Протокол совещания в Министерстве промышленности и торговли Российской Федерации от 30.08.2018 г. № 56-МД/20.
3. ГОСТ 7392—2014. Щебень из плотных горных пород для балластного слоя железнодорожного пути. Технические условия. — М.: Стандартинформ, 2015. — 32 с.
4. Месторождения, базальтовые карьеры на территории России. Химический анализ горных пород. — URL: <http://matrix-composite.com/ru/basalt-insulation/raw-materials/>.
5. BS EN 13450:2013. Aggregates for railway ballast, The British Standards Institution, 2013. — 38 p.
6. PD 6682-8:2004. Aggregates. Aggregates for railway ballast. Guidance on the use of BS EN 13450, 2004. — 18 p.
7. DIN EN 13450—2013. Aggregates for railway ballast; German version EN 13450:2013, 2013. — 34 p.
8. AREMA 2020. Manual for Railway Engineering. — 2020. Vol. 1. Track.
9. ГОСТ 12248.3—2020. Грунты. Определение характеристик прочности и деформируемости методом трехосного сжатия. — М.: Стандартинформ, 2020. — 27 с.
10. Иванов П. Л. Грунты и основания гидротехнических сооружений / П. Л. Иванов // Уч. для гидротехн. спец. вузов. — М.: Высшая школа, 1985. — 352 с.
11. Прокудин И. В. Прочность и деформативность железнодорожного земляного полотна из глинистых грунтов, воспринимающих вибродинамическую нагрузку: дисс. ... д-ра техн. наук / И. В. Прокудин. — Л., 1982. — 455 с.
12. Цытович Н. А. Механика грунтов / Н. А. Цытович. — М.: Гос. изд-во лит-ры по стр-ву, архитектуре и строит. матер., 1963. — 4 изд., перераб. и доп. — 637 с.
13. Indraratna B. Implications of ballast breakage on ballasted railway track based on numerical modelling / B. Indraratna, S. Nimbalkar // 13th International Conference of the International Association for Computer Method and Advances in Geomechanics, Sydney, Centre for Infrastructure Engineering and Safety, 2011. — Pp. 1085–1092.



14. Ionescu D. Evaluation of the engineering behaviour of railway ballast / D. Ionescu // PhD thesis, Wollongong: University of Wollongong, 2004. — 440 p.
15. Neuhold J. Analysis of railway ballast pollution in regard to traffic load and mechanical impacts / J. Neuhold, M. Landgraf // ETR, International Edition. — 2020. Vol. 11. — Pp. 24–28.
16. Прочностные и деформационные характеристики балласта в процессе абразивного износа его частиц // Железные дороги мира. — 2008. — № 1. С. 72–77.
17. ГОСТ 20522—2012. Грунты. Методы статистической обработки результатов испытаний. — М.: Стандартиформ, 2012. — 16 с.
18. Мирный А. Ю. Исследования дилатансии в дисперсных грунтах и методы ее количественной оценки / А. Ю. Мирный // Инженерная геология. — 2019. Т. XIV. — № 2/2019. — С. 34–43.
19. Чему Ж. Исследование работы железнодорожного балластного слоя и разработка рекомендаций по увеличению срока его службы: автореф. дисс. ... канд. техн. наук / Ж. Чему. — СПб.: ПГУПС, 1997. — 30 с.
20. Попов С. Н. Балластный слой железнодорожного пути / С. Н. Попов. — М.: Транспорт, 1965. — 183 с.
21. Бельтюков В. П. Оптимизация системы содержания верхнего строения железнодорожного пути: дисс. ... д-ра техн. наук / В. П. Бельтюков. — СПб.: ПГУПС, 2018. — 318 с.
22. Araya A. A. Investigation of the resilient behavior of granular base materials with simple test apparatus / A. A. Araya, M. Huurman, A. A. Molenaar, L. J. M. Houben // Materials and Structures. — 2012. — Vol. 45. — Pp. 695–705.
23. Соловьев В. В. Размеры двухслойной балластной призмы на участках обращения поездов с осевыми нагрузками 250–270 кН: дисс. ... канд. техн. наук / В. В. Соловьев. — Л.: ЛИИЖТ, 1990. — 143 с.
24. Методика оценки воздействия подвижного состава на путь по условиям обеспечения надежности // Утв. распор. ОАО «РЖД» от 22.12.2017 № 2706/р. — М.: ОАО «РЖД», 2017. — 97 с.

Дата поступления: 25.07.2022

Решение о публикации: 18.08.2022

#### **Контактная информация:**

КОЛОС Алексей Федорович — канд. техн. наук, доц., заведующий кафедрой «Строительство дорог транспортного комплекса»; kolos2004@inbox.ru

КЛИЩ Сергей Андреевич — инженер; sergey-kli@mail.ru

СОБОЛЕВ Даниил Николаевич — инженер II категории; daniil.sobolev@ecrt.ru

ЗАГИТОВ Эльдар Данилович — канд. техн. наук, главный конструктор по инфраструктуре; eldar.zagitov@ecrt.ru

КОЛОС Ирина Владимировна — канд. техн. наук, доц. кафедры «Строительство дорог транспортного комплекса»; irina\_kolos70@bk.ru

ГЛАДИЙ Валентина Геннадьевна — ведущий инженер; tina.gladii@yandex.ru

# Mechanical Properties of Basalt Broken Stone Ballast

A. F. Kolos<sup>1</sup>, S. A. Klisch<sup>1</sup>, D. N. Sobolev<sup>2</sup>, E. D. Zagitov<sup>2</sup>, I. V. Kolos<sup>1</sup>, V. G. Gladiy<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Emperor Alexander I Saint Petersburg State Transport University, Russian Federation, 190031, St. Petersburg, Moskovsky pr., 9

<sup>2</sup>Engineering Center of Railway Transport”, Russian Federation, 121205, Moscow, territory of the Skolkovo Innovation Center, st. Bolshoi b-r, 5

<sup>3</sup>Institute Stroyproekt Ltd, Russian Federation, 196158, St. Petersburg, Danaiskypr., 13, bldg. 2, Letter A

**For citation:** Kolos A. F., Klisch S. A., Sobolev D. N., Zagitov E. D., Kolos I. V., Gladium V. G. Mechanical Properties of Basalt Broken Stone Ballast. *Bulletin of scientific research results*, 2022, iss. 3, pp. 53–72. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2022-3-53-72

## Summary

**Purpose:** Study of strength and deformation properties of basalt broken stone ballast depending on its grain composition, the properties are necessary for further assessment of bearing capacity and deformability of railway track ballast layer. **Methods:** Determination of mechanical properties of broken stone ballast from basalt rock was carried out in a triaxial compression chamber which intense state close to real operating conditions was simulated. In the trial process, the dependences of axial and volumetric deformations from tension deviator were being determined. The methods of trial result statistical processing and regression analysis were used in the work. **Results:** According to laboratory test result statistical processing, the key characteristics of broken stone ballast strength as well as deformation modulus and Poisson’s ratio depending on the ballast grain composition were determined. **Practical importance:** The study results make it possible to elaborate recommendations regarding broken stone ballast grain composition, the ballast is from the basalt used in the areas of especially heavy traffic of trains.

**Keywords:** Railway track, basalt broken stone, broken stone ballast, ballast prism, broken stone strength properties, broken stone deformative properties, broken stone grain composition.

## References

1. Tekhnicheskie usloviya na raboty po remontu zheleznodorozhnogo puti [*Specifications for work on the repair of the railway track*]. *Utvverzheny Rasporyazheniem OAO “RZhD” ot 18 yanvarya 2013 g. № 75r* [Approved by the Order of Russian Railways OJSC dated January 18, 2013 No. 75r]. Moscow, 2013. (In Russian)

2. *Protokol soveshchaniya v Ministerstve promyshlennosti i trgovli Rossiyskoy Federatsii ot 30.08.2018 g. № 56-MD/20* [Minutes of the meeting at the Ministry of Industry and Trade of the Russian Federation dated August 30, 2018 No. 56-MD/20]. (In Russian)

3. *GOST 7392-2014 Shcheben’ iz plotnykh gornykh porod dlya ballastnogo sloya zheleznodorozhnogo puti. Tekhnicheskie usloviya* [GOST 7392-2014 Crushed stone from dense rocks for the ballast layer of the railway track. Specifications]. Moscow: Standartinform Publ., 2015. 32 p. (In Russian)

4. *Mestorozhdeniya, bazal'tovye kar'ery na territorii Rossii. Khimicheskiy analiz gornyykh porod* [Deposits, basalt quarries in Russia. Chemical analysis of rocks]. Available at: <http://matrix-composite.com/ru/basalt-insulation/raw-materials/>. (In Russian)
5. BS EN 13450:2013 Aggregates for railway ballast, The British Standards Institution, 2013. 38 p.
6. PD 6682-8:2004. Aggregates. Aggregates for railway ballast. Guidance on the use of BS EN 13450, 2004. 18 p.
7. DIN EN 13450-2013. Aggregates for railway ballast; German version EN 13450:2013, 2013. 34 p.
8. AREMA 2020, Manual for Railway Engineering. Vol. 1. Track, 2020.
9. *GOST 12248.3-2020 Grunty. Opredelenie kharakteristik prochnosti i deformiruemosti metodom trekhnosnogo szhatiya* [GOST 12248.3-2020 Soils. Determination of strength and deformability characteristics by the triaxial compression method]. Moscow: Standartinform Publ., 2020. 27 p. (In Russian)
10. Ivanov P. L. *Grunty i osnovaniya gidrotekhnicheskikh sooruzheniy* [Soils and foundations of hydraulic structures]. Moscow: Vysshaya shkola Publ., 1985. 352 p. (In Russian)
11. Prokudin I. V. *Prochnost' i deformativnost' zheleznodorozhnogo zemlyanogo polotna iz glinistykh gruntov, vosprinimayushchikh vibrodinamicheskuyu nagruzku. Doct. Diss* [Strength and deformability of a railway subgrade made of clay soils that perceive vibrodynamic load. Doct. Diss]. 1982. 455 p. (In Russian)
12. Tsytovich N. A. *Mekhanika gruntov* [Soil Mechanics]. Moscow: Gos. izd-vo lit-ry po str-vu, arkhitekture i stroit. mater. Publ., 1963. 637 p. (In Russian)
13. Indraratna V., Nimbalkar S. Implications of ballast breakage on ballasted railway track based on numerical modelling. 13th International Conference of the International Association for Computer Method and Advances in Geomechanics. Sydney, Centre for Infrastructure Engineering and Safety, 2011, pp. 1085–1092.
14. Ionescu D. Evaluation of the engineering behaviour of railway ballast. PhD thesis, Wollongong: University of Wollongong, 2004. 440 p.
15. Neuhold J., Landgraf M. Analysis of railway ballast pollution in regard to traffic load and mechanical impacts. ETR, International Edition, vol. 11, 2020, pp. 24–28.
16. Prochnostnye i deformatsionnye kharakteristiki ballasta v protsesse abrazivnogo iznosa ego chastits [Strength and deformation characteristics of ballast in the process of abrasive wear of its particles]. *Zheleznyye dorogi mira* [Railways of the world]. 2008, pp. 72–77. (In Russian)
17. *GOST 20522-2012 Grunty. Metody statisticheskoy obrabotki rezul'tatov ispytaniy* [GOST 20522-2012 Soils. Methods of statistical processing of test results]. Moscow: Standartinform Publ., 2012. 16 p. (In Russian)
18. Mirnyy A. Yu. Issledovaniya dilatantsii v dispersnykh gruntakh i metody ee kolichestvennoy otsenki [Studies of dilatancy in dispersed soils and methods for its quantitative assessment]. *Inzhenernaya geologiya* [Engineering Geology]. 2019, vol. XIV, I. 2/2019, pp. 34–43. (In Russian)

19. Chemu Zh. *Issledovanie raboty zheleznodorozhnogo ballastnogo sloya i razrabotka rekomendatsiy po uvelicheniyu sroka ego sluzhby. Kand. Diss* [Study of the operation of the railway ballast layer and the development of recommendations for increasing its service life. Cand. Diss]. St. Petersburg: PGUPS Publ., 1997. 30 p. (In Russian)

20. Popov S. N. *Ballastnyy sloy zheleznodorozhnogo puti* [Ballast layer of the railway track,]. Moscow: Transport Publ., 1965. 183 p. (In Russian)

21. Bel'tyukov V. P. *Optimizatsiya sistemy soderzhaniya verkhnego stroeniya zheleznodorozhnogo puti. Dokt. Diss* [Optimization of the maintenance system of the upper structure of the railway track: diss. for the competition uch. step. Doctor of Technical Sciences. Doct. Diss]. St. Petersburg: PGUPS Publ., 2018. 318 p. (In Russian)

22. Araya A. A., Huurman M., Molenaar A. A., Houben J. M. Investigation of the resilient behavior of granular base materials with simple test apparatus. *Materials and Structures*. 2012, vol. 45, pp. 695–705.

23. Solov'ev V. V. *Razmery dvukhsloynoy ballastnoy prizmy na uchastkakh obrashcheniya poezdov s osevyimi nagruzkami 250-270 kN. Kand. Diss* [Dimensions of a two-layer ballast prism in the sections of train circulation with axial loads of 250-270 kN. Cand. Diss]. L.: LIIZhT Publ., 1990. 143 p. (In Russian)

18. *Metodika otsenki vozdeystviya podvizhnogo sostava na put' po usloviyam obespecheniya nadezhnosti* [Methodology for assessing the impact of rolling stock on the track according to the conditions for ensuring reliability]. Moscow: OAO "RZhd" Publ., 2017. 97 p. (In Russian)

Received: July 25, 2022

Accepted: August 18, 2022

#### **Author's information:**

Aleksey F. KOLOS — PhD in Engineering, Associate Professor, Head of Transport System Road Construction Department; kolos2004@inbox.ru

Sergei A. KLISHCH — Engineer, Transport System Road Construction Department; sergey-kli@mail.ru

Daniil N. SOBOLEV — Engineer of 2<sup>nd</sup> Category, Infrastructure Development Center, Superstructure Group, Engineering Center of Railway Transport Ltd.; daniil.sobolev@ecrt.ru

Eldar D. ZAGITOV — PhD in Engineering, Chief Infrastructure Designer; eldar.zagitov@ecrt.ru

Irina V. KOLOS — PhD in Engineering, Associate Professor, Transportation System Road Construction Department; irina\_kolos70@bk.ru

Valentina G. GLADIY — Senior Engineer, Stroyproekt Institute Ltd.; tina.gladii@yandex.ru