

DOI: 10.26730/1999-4125-2018-5-35-42

УДК 622.2

## ВЛИЯНИЕ КРУПНОСТИ ЧАСТИЦ РАЗДРОБЛЕННОЙ ГОРНОЙ ПОРОДЫ НА ВЕЛИЧИНУ МОДУЛЯ УПРУГОСТИ

### INFLUENCE OF CRUSHED ROCK PARTICLE SIZE ON ELASTIC MODULUS VALUE

Шабаев Сергей Николаевич,

кандидат технических наук, доцент, e-mail: shabaev81@rambler.ru

Sergey N. Shabaev, C.Sc., Associate Professor

Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, 650000, Россия,  
г. Кемерово, ул. Весенняя, 28

T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, 28 street Vesennyaya, Kemerovo, 650000, Russian Federation

**Аннотация:** При расчете дорожных одежд технологических автомобильных дорог в основном используются решения теории упругости, при этом для определения фактических деформаций от воздействия внешней нагрузки необходимо знать модули упругости сред. Конструктивные слои дорожной одежды дорог открытых горных разработок достаточно часто устраивают из вскрышных или вмещающих раздробленных горных пород, нормативные расчетные значения модуля упругости которых отсутствуют, что приводит к ошибкам в принимаемых решениях. Анализ результатов ранее выполненных исследований показал, что при оценке деформационной характеристики недоучет влияющих факторов дает частные значения модуля упругости с отличающимися регрессионными зависимостями и не может использоваться во всех случаях. В статье на основе выполненных лабораторных исследований получена зависимость статического модуля упругости раздробленных горных пород от их среднего размера частиц и путем сравнения с нормативными расчетными значениями для различных материалов доказана ее адекватность. Установлено, что учет влияния крупности частиц можно осуществлять при помощи коэффициента влияния крупности частиц, представляющего собой кумуляту отношений доли частиц  $i$ -ой фракции к степенной функции от десятичного логарифма ее среднего размера частиц.

**Ключевые слова:** раздробленные горные породы, модуль упругости, частицы, открытые горные разработки, дорога.

**Abstract:** When calculating the haul road pavement, the elasticity theory solutions are mainly used. To determine the actual deformations caused by an external load, it is necessary to know the elasticity moduli of the media. Pavement layers of open-pit mine roads are often constructed with overburden or surrounding crushed rock, while the elastic modulus standard design values of which are not available, which leads to errors in the decisions made. The analysis of the earlier studies has shown that in assessment of the deformation parameters, undercounting of the influencing factors gives particular values of the elastic modulus with different regression dependencies and cannot be used in all cases. The dependence of the static elasticity modulus of crushed rock on their average particle size was obtained on the basis of the laboratory investigations described in the article, and its adequacy was proved by comparison with the standard design values for various materials. It is established that the influence of the particle size can be taken into account by using the particle size coefficient, which is the cumulative ratio of the fraction of particles of the  $i$ -th fraction to the power function of the decimal logarithm of its average particle size.

**Key words:** crushed rock, elasticity modulus, particles, open-pit mining, road

Качество карьерных автомобильных дорог в значительной степени определяет себестоимость транспортировки горной массы и технологические параметры разработки горной массы [1-9]. На сегодняшний день при расчете дорожных одежд

автомобильных дорог, в том числе технологических, используются решения теории упругости. Однако, как отмечается в работе [10], решения теории упругости не позволяют достоверно охарактеризовать напряженно-деформированное со-

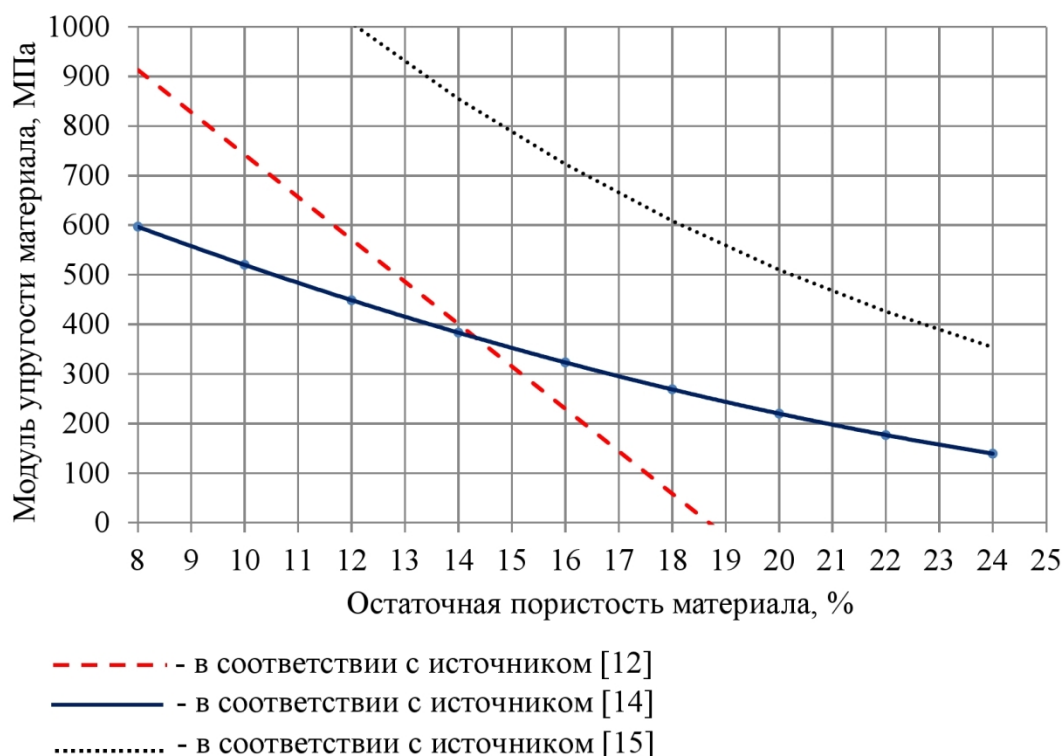


Рис. 1. Зависимости модуля упругости материала по различным источникам  
Fig. 1. Dependences of the elasticity modulus of material from various sources

стояние дискретных (сыпучих) грунтов, в связи с чем, предлагается использовать решения механики зернистых сред [11]. В то же время, при определении деформаций, возникающих в среде от воздействия внешней нагрузки, как в решениях теории упругости, так и в решениях механики зернистых сред в качестве одного из базовых параметров используется модуль упругости материала или грунта, значения которого, как правило, нормированы или приведены в справочниках. Тем не менее, нормированные значения модуля упругости имеют осредненные значения только для достаточно широко распространенных материалов и грунтов и совершенно не учитывают особенностей раздробленных горных пород. Так, например, для щебеночно-песчаной смеси С4 по ГОСТ 25607-94 из осадочной горной породы нормативное значение расчетного модуля упругости по ОДН 218.046-01 составляет 275 МПа, а фактически может достигать 500 МПа [12], то есть отличаться более чем на 80 %. Для крупнообломочных грунтов (раздробленных горных пород) данных по модулю упругости для формирования нормативной базы явно не достаточно, а в связи с тем, что эти среды в основной своей массе используются для устройства слоев дорожной одежды автомобильных дорог открытых горных разработок, актуальной задачей является формирование модели, позволяющей адекватно прогнозировать их деформационную характеристику.

На несущую способность, а также модуль упругости раздробленных горных пород, оказывает влияние достаточно большое количество факторов [13]. Проведенные ранее результаты исследований позволили установить частные зависимости модуля упругости материалов от их остаточной пористости [12, 14], количества проходов груженных автосамосвалов по одному следу [15], содержания частиц размером менее 0,63 мм и числа пластичности с учетом размера основной фракции щебня [16]. Так, например, общий вид зависимостей модуля упругости щебня от остаточной пористости по результатам исследований [12, 14, 15] имеет хотя и общее направление, но различный характер (рисунок 1), что связано, вероятнее всего, с недоучетом влияющих на данный показатель факторов (по источнику [15] значения приняты ориентировочно, так как отсутствовали значения средней плотности зерен материала). Таким образом, для более адекватного прогнозирования модуля упругости раздробленной горной породы необходимо учесть большее количество факторов, одним из которых является крупность частиц.

К сожалению, при рассмотрении поведения массива грунта под нагрузкой практически во всех случаях исходят из того, что модули упругости (или деформации) совокупности частиц приблизительно одинакового размера хотя и отличаются по значению, но либо нормированы, либо должны определяться отдельно для каждой раздробленной

Таблица 1. Параметры раздробленной горной породы  
 Table 1. Crushed rock parameters

№ пробы	1	2	3	4
Размеры частиц (фракция), мм	10-20	5-10	2,5-5	1,25-2,5
Принятый средний размер частиц фракции, мм	15	7,5	3,75	1,825
Оптимальная влажность при статическом методе уплотняющего воздействия, %	5			
Оптимальная влажность при вибрационном методе уплотняющего воздействия, %	4			
Марка по дробимости	1200			
Истинная плотность, г/см <sup>3</sup>	2,88			
Средняя плотность зерен, г/см <sup>3</sup>	2,76			
Водопоглощение, %	1,00			

Таблица 2. Результаты эксперимента по определению статического модуля упругости и плотности скелета раздробленной горной породы

Table 2. The results of the experiment for determining static elasticity modulus and matrix density of crushed rock

Показатели	Результаты эксперимента											
	№ испытания для пробы № 1			№ испытания для пробы № 2			№ испытания для пробы № 3			№ испытания для пробы № 4		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Статический модуль упругости, МПа, при вибрационном методе уплотняющего воздействия	171	182	188	148	155	146	130	124	132	113	104	110
Статический модуль упругости, МПа, при статическом методе уплотняющего воздействия	180	156	168	142	145	155	128	117	120	102	107	105
Плотность скелета, г/см <sup>3</sup> при вибрационном методе уплотняющего воздействия	1,64	1,62	1,64	1,72	1,71	1,73	1,68	1,67	1,67	1,72	1,71	1,73
Плотность скелета, г/см <sup>3</sup> при статическом методе уплотняющего воздействия	1,62	1,62	1,61	1,68	1,67	1,65	1,64	1,64	1,64	1,64	1,66	1,65

горной породы (грунта). Так, например, в работе [17] при теоретическом прогнозировании физико-механических свойств оснований, сложенных неоднородными грунтами исходят из того, что модули деформации неоднородного грунта есть функция, зависящая от модулей деформации его составных элементов. При этом в ходе экспериментальных исследований [17, 18] определялись частные случаи (в сухом состоянии) значения модуля деформации песчаного грунта различной крупности. Ожидаемо модули деформации более крупных частиц оказались выше, чем более мелких частиц, хотя при их смешивании в определенных соотношениях наблюдалась несколько иная тенденция. В работе [19] модуль Юнга (упругости) принимается как базовая справочная величина, а в статье [20] выявление зависимости деформационной характеристики грунта от размера частиц целью не ставилось, хотя анализ приведенных результатов показал, что увеличение размера частиц приводит к нелинейному росту модуля деформации.

В соответствии с результатами ранее выпол-

ненных исследований можно сделать вывод, что при одинаковой толщине слоя уменьшение размера зерен приводит к снижению контактных напряжений из-за увеличения общего числа точек контакта. Если сделать допущение, что деформация самих зерен настолько мала по сравнению с деформацией, обусловленной сближением частиц, что ей можно пренебречь, то общая деформация слоя в результате приложения внешней нагрузки будет складываться из частных деформаций, возникающих из-за контактных напряжений. С одной стороны уменьшение величины контактных напряжений способствует уменьшению частных деформаций, однако с другой стороны, уменьшение размера частиц приводит к росту общего числа точек контактов, а, значит, и увеличению количества частных деформаций.

Для установления влияния крупности частиц раздробленной горной породы на ее модуль упругости был проведен лабораторный эксперимент, заключающийся в определении упругой деформации образцов раздробленной горной породы различной крупности при заданном статическом дав-

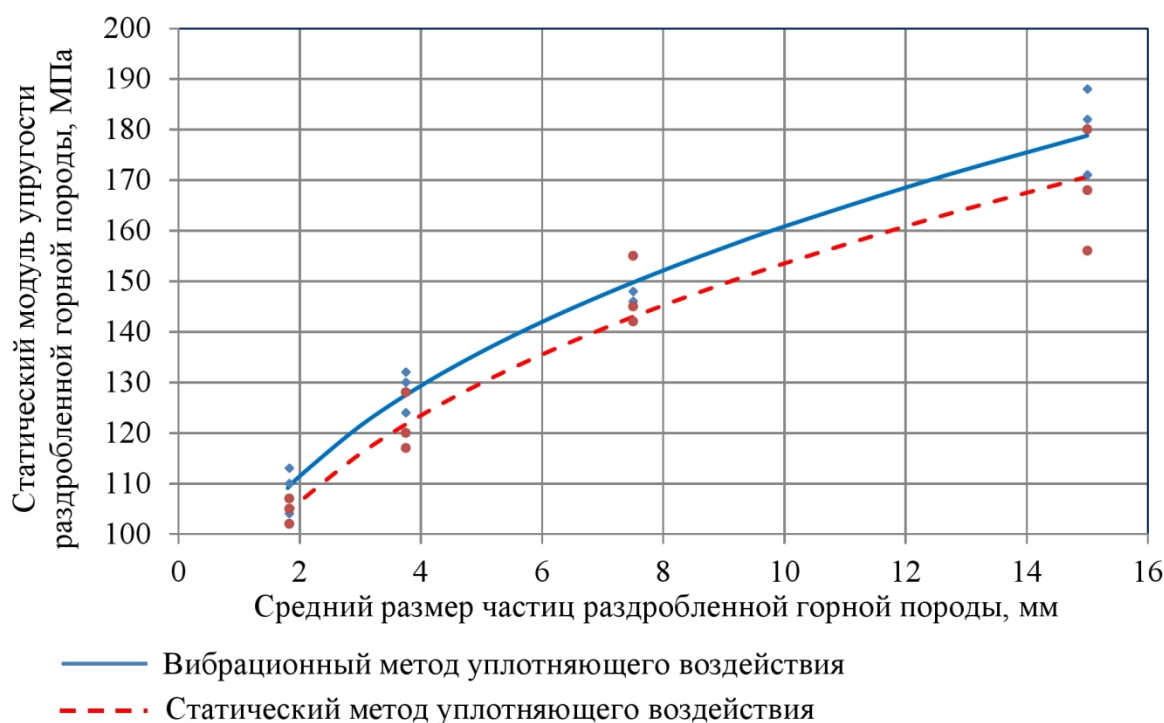


Рис. 2. Зависимость статического модуля упругости раздробленной горной породы от ее среднего размера частиц

Fig. 2 Dependence of the static elasticity modulus of crushed rock on its average particle size

лении после их уплотнения статическим и вибрационным методом в цилиндрической форме диаметром 139,3 мм. Для снижения влияния пристенного эффекта [21-24] максимальная крупность частиц принималась 20 мм. Параметры раздробленной горной породы представлены в таблице 1, результаты эксперимента – в таблице 2 и на рисунке 2. Модуль упругости определялся по известной зависимости:

$$E_y = \frac{(1-\mu) \cdot p \cdot h}{(1-\mu) \cdot l_y},$$

где  $\mu$  – коэффициент Пуассона, принятый равным 0,3;

$p$  – давление, оказываемое на раздробленную горную породу при определении упругой деформации;

$h$  – высота испытываемого образца, м;

$l_y$  – величина упругой деформации, м.

Анализ результатов эксперимента показал, что математически отклик статического модуля упругости раздробленной горной породы от ее среднего размера частиц можно описать зависимостями:

$$E_{\text{вибр}} = \frac{1100}{[-\lg(\frac{D_y}{10000})]^{1,75}}, \quad (1)$$

$$E_{\text{стат}} = \frac{1050}{[-\lg(\frac{D_y}{10000})]^{1,75}}, \quad (2)$$

где  $E_{\text{вибр}}$  – статический модуль упругости раздробленной горной породы при вибрационном методе уплотняющего воздействия, МПа;

$E_{\text{стат}}$  – статический модуль упругости раздробленной горной породы при статическом методе уплотняющего воздействия, МПа;

$D_y$  – средний размер частиц раздробленной горной породы, мм.

Оценка адекватности предложенных математических моделей производилась через корреляционное отношение и критерий согласия Фишера. При вибрационном методе уплотняющего воздействия корреляционное отношение составило  $\mu=0,984$ , фактическое значение критерия согласия Фишера –  $F=128,4$ , критическое значение критерия согласия Фишера при уровне значимости 0,05 –  $F_{0,05}=2,71$ , а при статическом методе уплотняющего воздействия  $\mu=0,964$ ,  $F=59,1$ ,  $F_{0,05}=2,71$ , то есть предложенные уравнения являются адекватными.

Результаты эксперимента показали отличия статического модуля упругости, полученного при различных методах уплотняющего воздействия, что вполне объяснимо, так как плотность скелета раздробленной горной породы при вибрационном методе уплотняющего воздействия выше, чем при статическом, а как отмечалось в ранее проведенных исследованиях, на деформационную характеристику оказывает влияние множество других факторов, в том числе плотность скелета или остаточная пористость и чем выше плотность скелета (ниже остаточная пористость), тем более высокие значения модуля упругости можно достичь.

На практике раздробленные горные породы (крупнообломочные грунты) в основной своей массе представляют собой смесь частиц различной крупности, поэтому для того, чтобы учесть этот факт зависимости (1) и (2) правильнее запи-



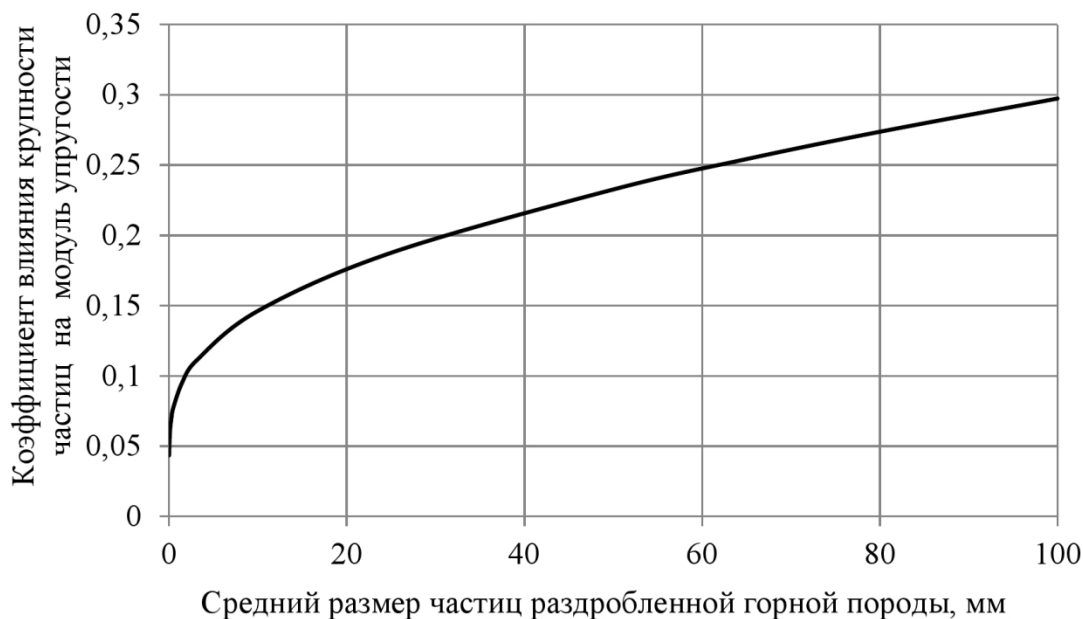


Рис. 3. Зависимость коэффициента влияния крупности частиц на модуль упругости раздробленной горной породы от их среднего размера

Fig. 3. Dependence of coefficient of particle size influence on crushed rock elasticity modulus on their average size

сать в виде:

$$E_{\text{выбр}} = 1100 \cdot \sum_{i=1}^n \frac{\eta_i}{\left[-\lg\left(\frac{D_i}{10000}\right)\right]^{1,75}}, \quad (3)$$

$$E_{\text{стат}} = 1050 \cdot \sum_{i=1}^n \frac{\eta_i}{\left[-\lg\left(\frac{D_i}{10000}\right)\right]^{1,75}}, \quad (4)$$

где  $\eta_i$  – доля частиц  $i$ -ой фракции в составе раздробленной горной породы;

$D_i$  – средневзвешенный размер частиц в пределах  $i$ -ой фракции, мм;

$n$  – количество фракций.

Сами по себе эмпирические зависимости (3) и (4) характеризуют частный случай достижения статического модуля упругости раздробленных горных пород при неизменных прочих факторов и, конечно, большого практического интереса не представляют. Однако если рассматривать мультипликативную модель зависимости модуля упругости раздробленных горных пород от множества факторов, то из полученных уравнений можно извлечь коэффициент влияния крупности частиц (рисунок 3):

$$k_D = \sum_{i=1}^n \frac{\eta_i}{\left[-\lg\left(\frac{D_i}{10000}\right)\right]^{1,75}}. \quad (5)$$

Для оценки адекватности предложенной математической модели (5) в интервале средних размеров частиц от 0,1 до 100 мм было осуществлено сравнение полученных по формуле (3) модулей упругости с нормативными значениями для различных зернистых материалов, регламентируемых ОДН 218.046-01. Так как в нормативном документе представлены не статические, а динамические модули упругости, то для перехода от статического модуля упругости к динамическому

использовалась зависимость [25]:

$$E_o = E_{\text{ст}} \cdot k_o, \quad (6)$$

где  $E_o$  – динамический модуль упругости, МПа;

$E_{\text{ст}}$  – статический модуль упругости, МПа;

$k_o$  – коэффициент перехода от статического модуля упругости к динамическому, принимаемый равным 1,20 для песков и 1,15 для щебеночно-песчаных смесей.

Гранулометрические составы зернистых материалов приведены в таблице 3. Результаты произведенной оценки представлены в таблице 4.

Результаты выполненного сравнения показали, что относительное отклонение расчетного динамического модуля упругости от нормативного значения не превышает 10,5 %, следовательно, математическая модель (5) адекватна в интервале от 0,1 до 100 мм и позволяет достоверно прогнозировать изменения модуля упругости раздробленных горных пород, вызванных изменением их гранулометрического состава. В случае дополнительной проверки интервал может быть расширен до 1000 мм, что обеспечит зону охвата практически всех раздробленных горных пород (крупнообломочных грунтов) и позволит прогнозировать модуль упругости в интервале между хорошо изученными пылевато-глинистыми грунтами (с размером частиц менее 0,05 мм) и скальными горными породами различной трещиноватости.

На основе выполненных исследований можно сделать вывод, что учет влияния крупности частиц раздробленных горных пород на их модуль упругости можно осуществлять при помощи коэффициента влияния крупности частиц, представляю-

шего собой кумуляту отношения доли частиц  $i$ -ой фракции к степенной функции от десятичного логарифма ее среднего размера частиц.

Таблица 3. Гранулометрические составы зернистых материалов  
 Table 3. Granulometric composition of granular materials

Наименование материала	Содержание частиц, %, фракций (мм):											
	80-120	40-80	20-40	10-20	5-10	2,5-5	1,25-2,5	0,63-1,25	0,315-0,63	0,16-0,315	0,05-0,16	0-0,05
Песок крупный	-	-	-	-	2,5	26,8	34,2	18,3	14,5	2,6	1,0	0,1
Песок средней крупности	-	-	-	-	1,5	8,9	15,3	18,8	16,7	19,3	14,9	4,6
Песок мелкий	-	-	-	-	-	1,3	7,9	12,4	24,2	29,4	18,7	6,1
ЩПС (С3)	22,0	13,0	17,0	11,0	12,0	8,0	2,0	2,0	3,0	6,0	2,0	2,0
ЩПС (С4)	-	40,0	20,0	10,0	5,0	8,0	2,0	2,0	5,0	4,0	2,0	2,0
ЩПС (С6)	-	-	50,0	20,0	7,0	3,0	5,0	5,0	3,0	2,0	3,0	2,0
ЩПС (С8)	-	-	-	55,0	18,0	10,0	2,0	2,0	3,0	4,0	3,0	3,0

Примечание: ЩПС (С3) – щебеночно-песчаная смесь номера С3 по ГОСТ 25607-94.

Таблица 4. Сравнение модулей упругости зернистых материалов, рассчитанных по формуле (6) с учетом зависимости (3) с нормативными значениями

Table 4. Comparison of elastic moduli of granular materials calculated by formula (6), taking into account the dependence (3) with standard values

Наименование материала	Коэффициент влияния крупности частиц	Расчетный динамический модуль упругости, МПа	Нормативный динамический модуль упругости, МПа	Относительное отклонение расчетного динамического модуля упругости от нормативного значения, %
Песок крупный	0,0983	129,7	130	0,23
Песок средней крупности	0,0814	107,5	120	10,4
Песок мелкий	0,0733	96,8	100	3,2
ЩПС (С3)	0,1871	236,6	240	1,4
ЩПС (С4)	0,1834	232,0	230	0,9
ЩПС (С6)	0,1604	202,9	200	1,5
ЩПС (С8)	0,1376	174,0	180	3,3

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Chernobai, V. I. Development and characterization of formulation of dust-suppressant used for stope road in open-pit mines // Journal of Coal Science and Engineering (China). 2013 (June), vol. 19, is. 2, pp. 219-225.
2. Moldovan, D. V. The rock pile quality control during the blasting operations at the construction materials open-cast mines // Journal of Industrial Pollution Control. 2017, vol. 33, is. 1, pp. 1007-1012.
3. Solovyev, G. V. Improving of Performance Characteristics During Mechanical Stabilization of Quarry Haul Roads with Stiff Polymeric Tensar Triax Hexagonal Geogrid / G. V.Solovyev K. I.Vatchnadze // Procedia Engineering. 2017, vol. 189, pp. 666-672.
4. Sara, L. Jackson. Dusty roads and disconnections: Perceptions of dust from unpaved mining roads in Mongolia's South Gobi province // Geoforum. 2015, vol. 66, pp. 94-105.
5. К вопросу оценки качества карьерных автодорог / Ю. И. Лель, С. А. Арефьев, А. В. Глебов, Д. Х. Ильбульдин // Известия Уральского государственного горного университета. 2016. № 3 (43). С. 70-73.
6. Стенин, Ю. В., Арефьев, С. А., Ганиев, Р. С. Взаимосвязь карьерных автодорог с технологическими параметрами открытой разработки // Новые огнеупоры. 2014. № 3 (спец. вып.). С. 24-25.
7. Проблемы совершенствования параметров и транспортно-эксплуатационных качеств карьерных автодорог / Лель, Ю. И., Стенин, Ю. В., Колчанов, А. Г., Арефьев, С. А. // Нерудная промышленность. 2012. № 2(9). С. 18-25.
8. Стенин, Ю. В., Лель, Ю. И., Колчанов, А. Г. Карьерные автодороги – значение и проблемы совершенствования // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2009. № 11. С. 393-400.
9. Богомолов С. В. Обоснование параметров временных технологических автодорог на угольных разрезах: дис. ... канд. техн. наук. М.: МГИ, 1992. 237 с.
10. Мошенжал А. В. Совершенствование проектирования дорожных одежд с конструктивными слоями из малосвязных грунтов, армированных геосинтетическими материалами: дис. ... канд. техн. наук.

Хабаровск: ДВГУПС, 2016. 173 с.

11. Кандауров, И. И. Механика зернистых сред и ее применение в строительстве. 2-е изд., испр. и перераб. Л.: Стройиздат, Ленингр. отд-ние. 1988. 280 с.

12. Инновационные технологии проектирования и строительства автомобильных дорог: монография / Д. Г. Неволин, В. Н. Дмитриев, Е. В. Кошкарров и др.; под ред. Д. Г. Неволлина, В. Н. Дмитриева. Екатеринбург: УрГУПС, 2015. 291 с.

13. Шабаев С. Н. Факторы, влияющие на несущую способность раздробленных горных пород осадочного происхождения // Известия Уральского государственного горного университета. 2018. Выпуск 2 (50). С. 85-93.

14. Кручинин И. Н., Дедюхин А. Ю. Исследование применения местных материалов для создания щебеночных оснований автомобильных дорог // Транспорт Урала. 2011. № 1 (28). С. 39-41.

15. Арефьев С. А. Экспериментальная оценка зависимости качества дорожных одежд от уплотнения их карьерными автосамосвалами // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г. И. Носова. 2015. № 2 (50). С. 5-11.

16. Методические рекомендации по повышению качества дорожных оснований из щебня различных пород. М., 1980.

17. Мирный А. Ю. Механические свойства неоднородных грунтов как оснований и материала земляных сооружений: дис. ... канд. техн. наук. М., 2013. 175 с.

18. Тер-Мартirosян З. Г., Мирный А. Ю. Распределение напряжений и деформаций в неоднородном грунте с учетом размеров, формы и жесткости включений // ГеоТехника. 2010. № 3. С. 22-29.

19. Row P. W. Theoretical meaning and observed values of deformation parameters for soil // Proceeding of the Roscoe Memorial Symposium. Cambridge University, 1972. Pp. 143-192.

20. Das B. M., Sivakugan N., Atalar C. Maximum and minimum void ratios and median grain size of granular soils: their importance and correlations with material properties // 3<sup>rd</sup> International Conference on New Developments in Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. Near East University, Nicosia, North Cyprus, 2012.

21. Mueller, G. E. Radial porosity in packed beds of spheres // Powder Technology. 2010, no. 203, pp. 626-633.

22. Roozbahani, M. M. Effect of rectangular container's sides on porosity for equal-sized sphere packing / M. M. Roozbahani, B. B. K. Huat, A. Asadi // Powder Technology. 2012, no. 224, pp. 46-50.

23. Wensrich, C. M. Boundary structure in dense random packing of monosize spherical particles // Powder Technology. 2012, no. 219, pp. 118-127.

24. Бондарев, В. Г. Математическое моделирование пристенного эффекта в случайных упаковках систем частиц // Современные тенденции развития науки и технологий. 2015. № 2-1. С. 12-15.

25. Проектирование дорожных одежд для движения большегрузных автомобилей / Б. С. Радовский, А. С. Супрун, И. И. Козаков. Киев, 1989. 168 с.

## REFERENCES

1. Chernobai, V. I. Development and characterization of formulation of dust-suppressant used for stope road in open-pit mines // Journal of Coal Science and Engineering (China). 2013 (June), vol. 19, is. 2, pp. 219-225.

2. Moldovan, D. V. The rock pile quality control during the blasting operations at the construction materials open-cast mines // Journal of Industrial Pollution Control. 2017, vol. 33, is. 1, pp. 1007-1012.

3. Solovyev, G. V. Improving of Performance Characteristics During Mechanical Stabilization of Quarry Haul Roads with Stiff Polymeric Tensar Triax Hexagonal Geogrid / G. V. Solovyev K. I. Vatchnadze // Procedia Engineering. 2017, vol. 189, pp. 666-672.

4. Sara, L. Jackson. Dusty roads and disconnections: Perceptions of dust from unpaved mining roads in Mongolia's South Gobi province // Geoforum. 2015, vol. 66, pp. 94-105.

5. YU. I. Lel', S. A. Arefyev, A. V. Glebov, D. KH. Il'bul'din K voprosu otsenki kachestva kar'ernykh avtodorog // Izvestiya Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. 2016. № 3 (43). pp. 70-73. (rus)

6. Stenin YU. V., Arefyev S. A., Ganiev R.S. Vzaimosvyaz' kar'ernykh avtodorog s tekhnologicheskimi parametrami otkrytoy razrabotki // Novye ognepory. 2014. № 3 (special issue). pp. 24-25. (rus)

7. YU. I. Lel', YU. V. Stenin, A. G. Kolchanov, S. A. Arefyev. Problemy sovershenstvovaniya parametrov i transportno-ekspluatatsionnykh kachestv kar'ernykh avtodorog // Nerudnaya promyshlennost'. 2012. №2(9). pp. 18-25. (rus)

8. Stenin YU. V., Lel' YU. I., Kolchanov A. G. Kar'ernye avtodorogi - znachenie i problemy

- sovershenstvovaniya // Gornyy inphormatsionno-analitichesky byulleten'. 2009. № 11. pp. 393-400. (rus)
9. Bogomolov S. V. Obosnovanie parametrov vremennykh tekhnologicheskikh avtodorog na ugol'nykh razrezakh // Dissertatsiya kandidata tekhnicheskikh nauk. M.: M.G.I. 1992. p. 237. (rus)
10. A. V. Moshenzhal. Sovershenstvovanie proektirovaniya dorozhnykh odezhd s konstruktivnymi sloyami iz malosvyaznykh gruntov, admirovannykh geosinteticheskimi materialami // Dissertatsiya kandidata tekhnicheskikh nauk. Khabarovsk: DVGUPS, 2016. p. 173. (rus)
11. Kandaurov, I. I. Mekhanika zernistyykh sred I ee primeneniye v-stroitel'stve. 2-e izd., ispr. I pererab. L.: Strojizdat, Leningr otd-nie, 1988. 280 p. (rus)
12. D. G. Nevolin, V. N. Dmitriev, E. V. Kashkarov and others: pod rukovodstvom D. G. Nevolin, V. N. Dmitriev Innovatsionnye tekhnologii proektirovaniya i stroitel'stva avtomobil'nykh dorog: monografiya. Ekaterinburg: YURGUPS, 2015. p. 291. (rus)
13. Shabaev S. N. Faktory, vliyayushchie na nesushchuyu sposobnost' razdroblennykh gornyykh porod osadochnogo proiskhozhdeniya // Izvestiya Ural'skogo gosudarstvennogo gornogo universiteta. 2018. № 2 (50). pp. 85-93. (rus)
14. Kruchinin I. N., Dedyukhin A. YU. Issledovanie primeneniya mestnykh materialov dlya sozdaniya shchebenochnyykh osnovaniy avtomobil'nykh dorog // Transport Urala. 2011. № 1 (28). pp. 39-41. (rus)
15. Aref'ev S. A. Eksperimental'naya otsenka zavisimosti kachestva dorozhnykh odezhd ot uplotneniya ikh kar'ernymi avtosamosvalami // Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta imeni G.I. Nosova. 2015. № 2 (50). pp. 5-11. (rus)
16. Metodicheskie rekomendatsii po povysheniyu kachestva dorozhnykh osnovaniy iz shchebnya razlichnykh porod. M., 1980. (rus)
17. Mirny A. YU. Mekhanicheskie svoystva neodnorodnykh gruntov kak osnovaniy i materiala zemlyanykh sooruzheniy // Dissertatsiya kandidata tekhnicheskikh nauk. M., 2013. p. 175. (rus)
18. Ter-Martirosyan Z. G., Mirny A. YU. Raspreделение napryazheniy i dephormatsiy v neodnorodnom grunte s uchetoм razmerov, formy i zhestkosti vklyucheniy // GeoTekhnika. 2010. №3. pp. 22-29. (rus)
19. Row P. W. Theoretical meaning and observed values of deformation parameters for soil // Proceeding of the Roscoe Memorial Symposium. Cambridge University, 1972, pp. 143-192.
20. Das B. M., Sivakugan N., Atalar C. Maximum and minimum void ratios and median grain size of granular soils: their importance and correlations with material properties // 3<sup>rd</sup> International Conference on New Developments in Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. Near East Universaty, Nicosia, North Cyprus, 2012.
21. Mueller, G. E. Radial porosity in packed beds of spheres // Powder Technology. 2010, no. 203, pp. 626-633.
22. Roozbahani, M. M. Effect of rectangular container's sides on porosity for equal-sized sphere packing / M. M. Roozbahani, B. B. K. Huat, A. Asadi // Powder Technology. 2012, no. 224, pp. 46-50.
23. Wensrich, C. M. Boundary structure in dense random packing of monosize spherical particles // Powder Technology. 2012, no. 219, pp. 118-127.
24. Bondarev, V. G. Matematicheskoe modelirovaniye pristennoy ehffekta v slu-chajnykh upakovkah sistem chastits // Sovremennyye tendentsii razvitiya nauki i tekhnologij. – 2015, no. 2-1, pp. 12-15. (rus)
25. B. S. Radovsky, A. S. Suprun, I. I. Kosakov Proektirovaniye dorozhnykh odezhd dlya dvizheniya bol'shegruznykh avtomobiley // Kiev. 1989, p. 168. (rus)

Поступило в редакцию 08.10.2018  
Received 08 October 2018