

# СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И СТРОИТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В МЕТАЛЛУРГИИ

## CONSTRUCTION MATERIALS AND CONSTRUCTION ENGINEERING IN METALLURGY

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)

УДК 622.2

DOI: 10.18503/1995-2732-2020-18-2-62-70



### ВЛИЯНИЕ КРУПНОСТИ ЧАСТИЦ ОДНОРАЗМЕРНОЙ СЫПУЧЕЙ ЗЕРНИСТОЙ СРЕДЫ НА ПРОЧНОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Шабаев С.Н.

Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, Кемерово, Россия

**Аннотация.** Постановка задачи (актуальность работы): в статье описаны особенности и результаты определения прочностных характеристик (угла внутреннего трения и удельного сцепления) сыпучих одноразмерных крупнозернистых сред, используемых для устройства карьерных автомобильных дорог. Цель работы: определение влияния размера частиц на угол внутреннего трения и удельное сцепление одноразмерных сыпучих зернистых сред. Используемые методы: применялись лабораторные методы определения прочностных характеристик с использованием сдвигового прибора однонаплоскостного среза и усовершенствованной клиновой установки, реализующей метод косого среза. Новизна: к элементам новизны относится методика определения прочностных характеристик крупнозернистых сред с использованием усовершенствованной клиновой установки, что позволило установить наличие и зависимость удельного сцепления от крупности частиц. Результат: выявлено, что принципиальных отличий механических показателей, полученных как на сдвиговом приборе, так и на клиновой установке, нет, а значит, последняя может использоваться для определения прочностных характеристик сыпучих крупнозернистых сред. Установлено, что увеличение в два раза размера частиц однофракционной зернистой среды приводит не только к увеличению угла внутреннего трения приблизительно на два градуса, но также и удельного сцепления до 8 кПа. Однако рост удельного сцепления при размере частиц до 3 мм протекает по иному закону, чем при размере зерен свыше 3 мм. Практическая значимость: полученные данные позволяют более обоснованно подходить к проектированию дорожных одежд со слоями из одноразмерных крупнозернистых сыпучих сред путем дополнительной оценки их сдвигостойчивости, а также являются основой для разработки математической модели прогнозирования прочностных характеристик полифракционных зернистых материалов.

**Ключевые слова:** карьерные автомобильные дороги, угол внутреннего трения, удельное сцепление, зернистая среда, раздробленные горные породы, прочность.

© Шабаев С.Н., 2020

#### Для цитирования

Шабаев С.Н. Влияние крупности частиц одноразмерной сыпучей зернистой среды на прочностные характеристики // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2020. Т.18. №2. С. 62–70. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2020-18-2-62-70>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.  
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

# INFLUENCE OF THE SIZE OF UNIFORMLY GRADED BULK MEDIA PARTICLES ON STRENGTH CHARACTERISTICS

Sergey N. Shabaev

T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, Kemerovo, Russia

**Abstract. Problem Statement (Relevance):** The paper describes the features and results of determining the strength characteristics (angle of internal friction and specific cohesion) of uniformly graded bulk coarse-grained media used to construct open pit truck haul roads. **Objectives:** To determine the effect of a particle size on the angle of internal friction and the specific cohesion of uniformly graded bulk coarse-grained media. **Methods Applied:** Laboratory methods were applied to determine the strength characteristics using a direct shear apparatus and an improved oblique shear apparatus that implements the oblique cutting method. **Originality:** The novelty elements include a method for determining the strength characteristics of coarse-grained media using the improved oblique shear apparatus, which made it possible to establish the presence and dependence of specific cohesion on the particle size. **Findings:** It was revealed that there are no fundamental differences in mechanical performance obtained both with the direct shear device and the oblique shear apparatus, and, therefore, the latter can be used to determine the strength characteristics of bulk coarse-grained media. It was found that a twofold increase in the particle size of uniformly graded granular medium leads not only to an increase in the angle of internal friction by approximately two degrees, but also in specific cohesion up to 8 kPa. However, the increase in specific cohesion with a particle size of 3 mm or less proceeds according to a different law than with a grain size of over 3 mm. **Practical Relevance:** The data obtained will contribute to apply a more justified approach to the design of pavements with layers of uniformly graded bulk coarse-grained media by an additional assessment of their shear resistance, and serve as a basis for the development of a mathematical model for predicting the strength characteristics of polyfractional bulk materials.

**Keywords:** open pit truck haul roads, angle of internal friction, specific cohesion, bulk media, crushed rock, strength.

## For citation

Shabaev S.N. Influence of the Size of Uniformly Graded Bulk Media Particles on Strength Characteristics. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2020, vol. 18, no. 2, pp. 62–70. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2020-18-2-62-70>

## Введение

При строительстве карьерных автомобильных дорог одними из самых распространенных материалов для покрытий и оснований являются нерудные, к которым относят щебень, гравий, щебеночно-песчаные, гравийно-песчаные смеси, а также другие подобные крупнозернистые сыпучие среды, в том числе местные раздробленные горные породы. Для того чтобы дорожная одежда не разрушалась под действием кратковременных или длительных нагрузок из-за накапливания недопустимых остаточных деформаций формоизменения, производят расчет конструктивных слоев по условию сдвигостойчивости. Однако в существующей методике расчета дорожных одежд расчет по сдвигостойчивости производят только по подстилающему грунту и мало связанным конструктивным слоям, к которым относят песок. При этом понятно, что сыпучие крупнозернистые среды тоже относятся к мало связанным, и, следовательно, нужно обеспечивать их сдвигостойчивость. Тем не менее, расчет по сдвигостойчивости подобных сред не производится из-за необоснованного, на наш взгляд, утверждения о том, что они являются

жесткими и сдвигостойчивыми материалами (средами).

Если проанализировать работы в области устройства технологических дорог, то можно прийти к выводу о том, что в качестве основного критерия оценки несущей способности дорожной одежды выступает ее требуемый общий модуль упругости [1–5]. В связи с этим и требования, предъявляемые к подобным материалам, а также методы их контроля качества направлены, преимущественно, на оценку степени их уплотнения [4, 6–9], что, безусловно, является важным критерием, но явно недостаточным. При этом научных исследований, посвященных оценке прочностных свойств сыпучих крупнозернистых сред, явно не достаточно для того, чтобы можно было их прогнозировать или нормировать. Наиболее значимые результаты получены при исследовании применения крупнобломочных грунтов для решения задач, преимущественно, гидротехнического строительства, однако и они сильно различаются и часто противоречивы. Так, например, сведения, представленные в [10 и др.], свидетельствуют о том, что сопротивляемость сдвигу несвязанных грунтов возрастает с увеличением размеров зерен, а в [11 и др.],

наоборот, говорится о том, что угол внутреннего трения от круизности частиц не зависит или даже несколько снижается. Кроме того, в приведенных результатах акцент был сделан именно на

угол внутреннего трения, а удельное сцепление детально не рассматривалось. Данные по некоторым ранее опубликованным результатам исследований сведены в табл. 1.

Таблица 1. Результаты проведенных ранее исследований по определению прочностных характеристик сыпучих крупнозернистых сред / Table 1. Earlier studies on determining strength parameters of bulk coarse-grained media

Наименование зернистой среды	Средний (общий) размер частиц, мм	Угол внутреннего трения, град	Сцепление <sup>1</sup> , кПа	Авторы
Гравий	6 (2–10)	37–45 <sup>2</sup>	1–26	Васильева А.А. Михеев В.В. Лобанова Т.Л.
Щебень	0,75 (0,5–1)	37	50	Сунь Юй-ци
	2 (1–3)	49		
	4 (3–5)	60		
Щебень	70 (60–80)	48	-	Гордиенко Г.А. Фам-Ван-Винь
	35 (10–60)	40		
Щебень	2 (1–3)	37–44 <sup>2</sup>	100	Рассказов Л.Н.
	4 (3–5)	40–46 <sup>2</sup>		
	6 (5–7)	43–48 <sup>2</sup>		
	8,5 (7–10)	46–50 <sup>2</sup>		
Гравий	2 (1–3)	31–41 <sup>2</sup>		
	4 (3–5)	34–43 <sup>2</sup>		
	6 (5–7)	36–44 <sup>2</sup>		
	8,5 (7–10)	39–46 <sup>2</sup>		
Щебень	4 (3–5)	27	100	Пахомов О.А.
	7,5 (5–10)	29		
	15 (10–20)	32		
	30 (20–40)	34		
	50 (40–60)	36		
	70 (60–80)	38		
Щебень	26 (2–50)	47	Около 0	Петров Г.Н. Радченко В.Г. Рейфан Л.С.
	51 (2–100)	49		
	101 (2–200)	51		
Щебень	Любой	50–54 <sup>2</sup>	-	Гордиенко П.И.
Щебень	Любой	35–46 <sup>2</sup>	-	Roscol K.H., Schofield A.N., Wroth C.R.
Щебень	Любой	51–53 <sup>2</sup>	-	Алтайя С.М.

Примечания:

1. По мнению авторов, проводивших исследования: величина, подобная сцеплению в связных грунтах; кажущееся сцепление.
2. Диапазон значений обуславливает учет других факторов (пористости, коэффициента пористости), не обозначенных в таблице.

Таким образом, отсутствие достоверных сведений по прочностным характеристикам зернистых материалов не позволяет оценивать сдвигостойчивость конструктивных слоев дорожной одежды карьерных автомобильных дорог, в связи с чем цель исследования заключается в определении влияния размера частиц на угол внутреннего трения и удельное сцепление однораз-

мерных сыпучих зернистых сред.

#### Материалы и методы исследования

Для уточнения влияния круизности частиц сыпучей зернистой среды на прочностные характеристики был поставлен соответствующий лабораторный эксперимент. Испытания зернистой среды с размером фракций 0,315–0,63,

0,63–1,25, 1,25–2,5 и 2,5–5 мм проводили на сдвиговом приборе одноплоскостного среза ПСГ-3М (метод одноплоскостного среза) с внутренним диаметром обойм 71,4 мм, а с размером фракций 1,25–2,5, 2,5–5, 5–10, 10–20 мм также на усовершенствованной клиновой установке типа КУ-54, реализующий метод косого среза и имеющей внутренний диаметр обойм 149 мм для уменьшения влияния пристенного эффекта [12]. Характеристики испытываемых зернистых сред, состоящих из частиц угловатой формы, приведены в табл. 2. Для того чтобы уменьшить трение между отдельными частицами и достичь наибольшей плотности упаковки, сыпучая зернистая среда предварительно (за 2 ч до проведения испытания) увлажнялась до оптимального значения. За оптимальную влажность принималась та, при которой начинался процесс отжатия воды из слоя под действием уплотняющей нагрузки. С целью уменьшения влияния пористости (коэффициента пористости) на прочностные характеристики все образцы предварительно уплотнялись в одинаковых условиях для каждой установки. В ходе предварительных экспериментов было установлено, что во избежание возникновения шпоночного эффекта и получения стабильных результатов зазор между верхней и нижней обоймой должен составлять 0,3 от максимального размера частиц, входящих в состав сыпучей зернистой среды.

Таблица 2. Характеристики испытываемых зернистых сред / Table 2. Parameters of bulk media under test

Размер частиц, мм	Средний размер частиц, мм	Средняя плотность частиц, $\text{г}/\text{см}^3$	Расчетная оптимальная влажность, %
0,315–0,63	0,473		5,25
0,63–1,25	0,94		5,00
1,25–2,5	1,875		4,75
2,5–5	3,75		4,50
5–10	7,5		4,25
10–20	15		4,00

При проведении эксперимента на приборе одноплоскостного среза использовалась методика по ГОСТ 12248-2010 для условия консолидировано-дренированного среза со следующими изменениями. Сыпучая зернистая среда не зависимо от величины расчетного нормального давления в ходе отдельного испытания предварительно уплотнялась под давлением 333 кПа, при этом нагружение осуществлялось ступенями по 111 кПа с выдерживанием первых двух ступеней в течение 10 мин, а последней ступени – в течение 40 мин. Ступени горизонтальной нагрузки

составляли 0,5–5% значения нормальной нагрузки (большие значения соответствуют первым ступеням нагружения, меньшие – последним ступеням нагружения).

Для проведения эксперимента с использованием клиновой установки, последняя была усовершенствована (рис. 1). Усовершенствованная клиновая установка состоит из винта осевого давления 1, кронштейна 4, динамометра или тензометрического датчика сжатия 15, переходника 7, пригруза 9, верхней обоймы 5, нижней обоймы 6, обжимного устройства 8, состоящего из двух полых полуцилиндров с ребрами жесткости и соединительными пластинами, днища 2 и каретки основания 3. Кронштейн 4 жестко связан с рамой 10, полуцилиндры обжимного устройства 8 соединены между собой посредством болтов 11, 13, 16, для обеспечения требуемого зазора между верхней и нижней обоймами предусмотрены регулировочные винты 12, 14. При проведении эксперимента нижнюю обойму устанавливали на днище, после чего поверх нее накладывали два полых полуцилиндра обжимного устройства, которые закрепляли болтовыми соединениями без затяжки. В дальнейшем устанавливали верхнюю обойму и за счет регулировочных винтов выставляли требуемый зазор между верхней и нижней обоймами. Далее болтовые соединения затягивали, в обоймы засыпали испытываемую зернистую среду приблизительно тремя равными слоями со штыкованием каждого слоя металлическим стержнем диаметром 12 мм за 20–30 нажимов, после чего на нее устанавливали пригруз, обеспечивающий давление 4 кПа, и весь собранный элемент перемещали на виброплощадку. Зернистую среду уплотняли на стандартной виброплощадке, обеспечивающей амплитуду колебаний 0,40±0,05 мм и частоту колебаний 48±3 Гц, в течение трех минут, после чего весь собранный элемент помещали на каретку, расположенную в основании рамы, под винт осевого давления. Полуцилиндры обжимного устройства снимали, на пригруз устанавливали тензометрический датчик сжатия, и винт осевого давления путем вращения доводили до соприкосновения с ним. В ходе проведения испытания винтом осевого давления передавалось усилие на зернистую среду не фиксируемыми ступенями, но с выдержкой каждой ступени до условной стабилизации, что больше соответствовало условию консолидировано-дренированного среза, при этом определялась остаточная прочность, а не пиковая. Момент сдвига фиксировался по максимальной массе, которую показывал тензометрический датчик

жатия 5HR052, подключенный к системе мониторинга «ТЕРЕМ 4.0», после условной стабилизации. При этом масса пригруза и тензометрического датчика учитывали путем добавления к массе, фиксируемой тензометрическим датчи-

ком, их собственных масс. Предварительную калибровку тензометрического датчика осуществляли с использованием прошлой поверкой аттестованной машины для испытания на сжатие «ИП-1А-1000».

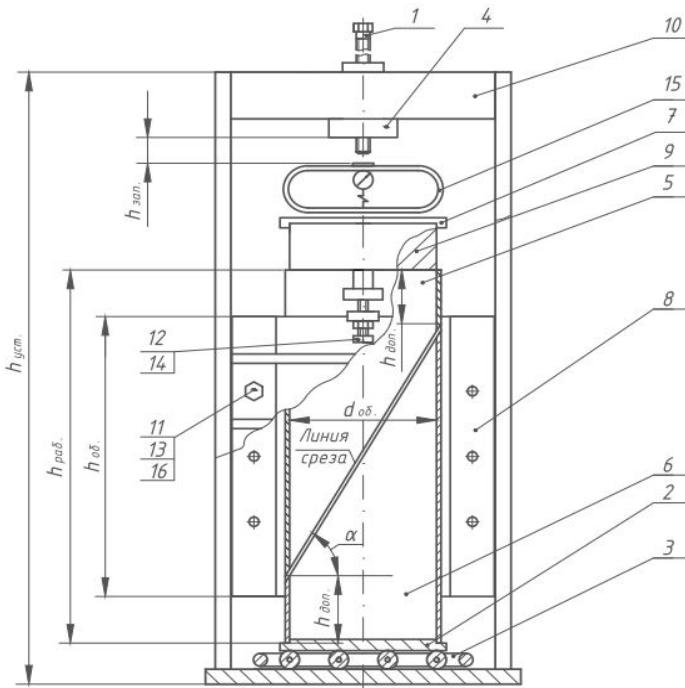


Рис. 1. Схема усовершенствованной клиновой установки / Fig. 1. Diagram of the improved oblique shear apparatus

В ходе предварительных экспериментов с использованием усовершенствованной клиновой установки было отмечено, что при повторении одного и того же опыта результаты могут иметь достаточно большое отклонение от средневзвешенного значения или даже являться грубой ошибкой. В связи с этим все предварительные результаты были обработаны с использованием критерия согласия Стьюдента и Диксона, на основании которых было установлено, что для обеспечения доверительного интервала измеряемой величины  $\pm 10\%$  от средневзвешенного значения при доверительной вероятности 90% с учетом возможных промахов необходимо было провести не менее 5 повторений.

При обработке результатов испытаний, полученных с использованием усовершенствованной клиновой установки, величины действующего нормального давления ( $\sigma$ ) и предельного сопротивления зернистой среды сдвигу ( $\tau$ ) определялись по зависимостям:

$$\sigma = \frac{4 \cdot F \cdot \cos^2 \alpha}{\pi \cdot d^2};$$

$$\tau = \frac{4 \cdot F \cdot \sin \alpha \cdot \cos \alpha}{\pi \cdot d^2},$$

где  $F$  – предельная разрушающая нагрузка, Н;  
 $\alpha$  – угол наклона поверхности сдвига;  
 $d$  – внутренний диаметр обойм, м.

## Результаты исследований и их обсуждение

Результаты проведенных экспериментов представлены в **табл. 3**. Графики зависимости предельного сопротивления сдвигу зернистых сред различной крупности, полученных по результатам испытаний на сдвиговом приборе одноплоскостного среза и усовершенствованной

клиновой установке, представлены на **рис. 2**. Коэффициент детерминации зависимостей составляет от 0,9937 до 0,9999, что свидетельствует о наличии функциональной связи между рассматриваемыми величинами и подтверждает обоснованность применения теории прочности Кулона для обработки результатов исследований.

Таблица 3. Результаты эксперимента по определению предельного сдвигающего усилия / предельной разрушающей нагрузки для различных по крупности зернистых сред на приборе одноплоскостного среза / усовершенствованной клиновой установке

Table 3. Experiment on determining ultimate shear force/ ultimate breaking load for bulk media varying in the grain size by applying the direct shear apparatus / improved oblique shear apparatus

Размер частиц, мм	Нормальное давление, кПа / угол наклона поверхности сдвига, град	Площадь поверхности сдвига, м <sup>2</sup> : прибор одноплоскостного среза / клиновая установка	Значение предельного сдвигающего усилия / предельной разрушающей нагрузки, кН
0,63–0,315	226 / -	0,004	0,647 / -
	119 / -		0,343 / -
	65 / -		0,196 / -
	33 / -		0,099 / -
0,63–1,25	226 / -	0,004	0,706 / -
	119 / -		0,363 / -
	65 / -		0,226 / -
	33 / -		0,113 / -
1,25–2,5	226 / 40,23	0,004 / 0,0228	0,785 / 10,44
	119 / 42,53	0,004 / 0,0236	0,441 / 3,65
	65 / 45,27	0,004 / 0,0247	0,235 / 0,83
	33 / -	0,004 / -	0,137 / -
2,5–5	226 / 42,53	0,004 / 0,0236	0,863 / 12,33
	119 / 45,27	0,004 / 0,0247	0,490 / 5,47
	65 / 47,58	0,004 / 0,0258	0,255 / 1,47
	33 / -	0,004 / -	0,196 / -
5–10	- / 45,27	- / 0,0247	- / 16,26
	- / 47,58	- / 0,0258	- / 9,62
	- / 50,22	- / 0,0272	- / 3,08
10–20	- / 47,58	- / 0,0258	- / 16,21
	- / 50,22	- / 0,0272	- / 8,63
	- / 52,60	- / 0,0286	- / 4,27

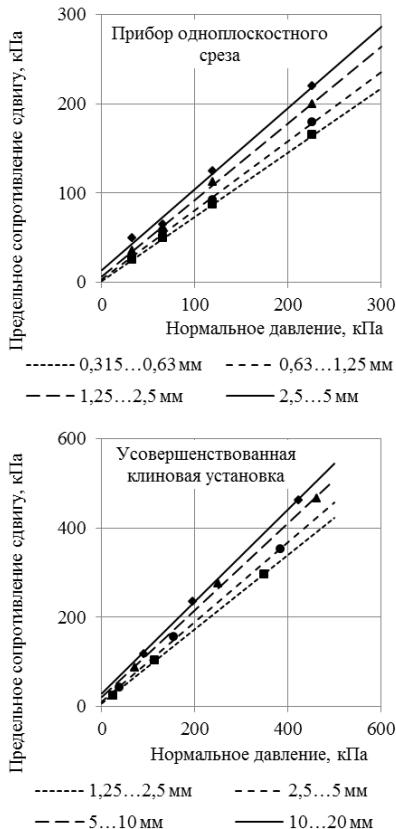


Рис. 2. Зависимости предельного сопротивления сдвигу зернистых сред от крупности частиц, полученных по результатам испытаний на приборе одноплоскостного среза и усовершенствованной клиновой установке

Fig. 2. Relations between ultimate shear resistance and a particle size based on the tests using the direct shear apparatus and the improved oblique shear apparatus

Полученные зависимости позволили определить влияние крупности частиц зернистой среды на угол внутреннего трения и удельное сцепление (рис. 3). Уравнения зависимостей имеют вид:

$$\phi = 2,93 \cdot \ln(D) + 38; \quad (1)$$

$$C = \begin{cases} 3,933 \cdot D^{0,933}, & \text{при } D \leq 3 \text{ мм,} \\ 10,81 \cdot \ln(D) - 0,9, & \text{при } D > 3 \text{ мм,} \end{cases} \quad (2)$$

где  $\phi$  – угол внутреннего трения, град;  $C$  – удельное сцепление, кПа;  $D$  – размер частиц зернистой среды, мм.

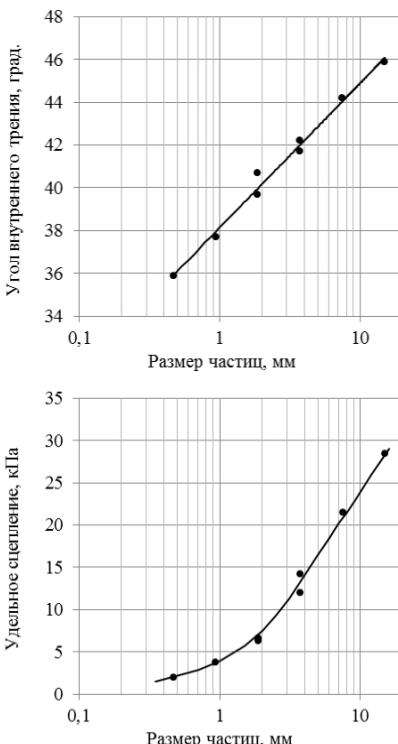


Рис. 3. Зависимости угла внутреннего трения и удельного сцепления зернистых сред от крупности частиц

Fig. 3. Relations between the angle of internal friction and the particle size

Коэффициент детерминации зависимости (1) составляет 0,9886, а зависимости (2) – 0,9904, что свидетельствует об очень тесной связи между рассматриваемыми величинами. Сопоставляя значения угла внутреннего трения по полученной математической модели (1) с результатами ранее проведенных исследований (см. табл. 1),

можно сказать, что общая тенденция, заключающаяся в увеличении угла внутреннего трения на 2–3 град при увеличении среднего размера частиц в 2 раза, сохраняется. По абсолютным значениям результаты значительно выше, чем по Пахомову О.А., немного ниже, чем по Рассказову Л.Н., и немного выше, чем по Радченко Г.А. и Фам-Ван-Винь, а также практически полностью совпадли с Петровым Г.Н., Радченко В.Г. и Рейфен Л.С. Что касается удельного сцепления, то уравнение (2), на наш взгляд, вполне обосновано отражает связь данного параметра с крупностью частиц, так как с увеличением размера зерен возрастает величина превышений (препятствий), которые необходимо преодолеть отдельными обломками, чтобы произошел их сдвиг.

### Заключение

По результатам выполненных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Несмотря на то, что клиновая установка, при помощи которой реализуется метод косого среза, не внесена в нормативную базу испытательного оборудования для определения прочностных характеристик крупнозернистых сред, при ее доработке, позволяющей уплотнить испытываемую среду, она дает результаты, сопоставимые с результатами, получаемыми на приборе одноплоскостного среза.

2. Зернистые среды имеют тем больший угол внутреннего трения, чем они крупнее. При этом трудно согласиться с мнениями отдельных учёных о том, что увеличение размера частиц сывище 20–30 мм практически не влияет на рост сопротивления сдвигу, а тем более с выводами тех исследователей, которые утверждают, что размер частиц зернистой среды вообще не оказывает никакого влияния на данную прочностную характеристику. Высказывания первых, скорее всего, основаны на визуальном восприятии гра-

фиков зависимости угла внутреннего трения (или предельного сопротивления сдвигу) от размера частиц, построенных в обычных декартовых координатах, где действительно данные зависимости с ростом крупности обломков постепенно переходят в слабонаклонную относительно оси абсцисс кривую. Заключения вторых, возможно, ошибочны из-за недоучета некоторых факторов, влияющих на прочностные характеристики.

3. Зернистые среды не просто обладают неким кажущимся сцеплением, а вполне реальным удельным сцеплением, вызванным структурным зацеплением частиц, при этом оно увеличивается приблизительно на 8 кПа с повышением их размера в два раза в случае, если размер частиц крупнее 2 мм. Если зерна мельче 2 мм, то удельное сцепление относительно низкое, не превышает 10 кПа и достаточно трудно определяется в связи со значительным влиянием погрешности эксперимента на его значение.

Полученные результаты позволяют при проектировании дорожных одежд карьерных автомобильных дорог оценивать сдвигустойчивость конструктивных слоев из одноразмерных крупнозернистых сыпучих сред, имеющих коэффициент неоднородности меньше 2. Это обусловлено и тем, что достигнутая в ходе эксперимента плотность упаковки частиц, составляющая в среднем около 0,59, несколько ниже максимальной [13], а значит, реально достигается в построенных условиях в ходе уплотнения материала. Если крупнозернистые материалы будут представлять собой полифракционную среду, то их прочностные характеристики не могут быть определены по найденным законам, однако они являются необходимым условием для дальнейшей разработки математических моделей, прогнозирующих угол внутреннего трения и удельное сцепление разнозернистых сред.

### Список литературы

1. Колчанов А.Г. О требуемой прочности дорожных конструкций для карьерных автосамосвалов // Горный журнал. 1987. № 6. С. 16–18.
2. Богомолов С.В. Выбор оптимальных параметров карьерных автомобильных дорог // Повышение эффективности дорожного строительства в условиях Сибири. Кемерово: КузПИ, 1991. С. 127–132.
3. Колчанов А.Г. Проектирование карьерных дорог // Горная промышленность. 2010. № 6. С. 56–59.
4. 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. С. 5–11.
5. Арефьев С.А. Обоснование конструкции дорожных одежд, предназначенных для автосамосвалов большой грузоподъёмности // Естественные и технические науки. 2015. № 1. С. 38–39.
6. Solovyev G.V., Vatchnadze K.I. Improving of Performance Characteristics During Mechanical Stabilization of Quarry Haul Roads with Stiff Polymeric Tensar Triax Hexagonal Geogrid // Procedia Engineering. 2017, vol. 189, pp. 666–672.

7. 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.
8. 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, iss. 2, pp. 219–225.
9. 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, iss. 1, pp. 1007–1012.
10. Васильева А.А., Михеев В.В., Лобанова Т.Л. О зависимости прочностных свойств гравийных грунтов от вида и состояния песчаного заполнителя пор // Основания, фундаменты и механика грунтов. 1971. № 3. С. 9–11.
11. Гордиенко П.И. Некоторые вопросы проектирования высоких каменно-земляных плотин // Сб. трудов МИСИ им. В. В. Куйбышева. 1960. № 32. С. 32–34.
12. Бондарев В.Г. Математическое моделирование пристенного эффекта в случайных упаковках систем частиц // Современные тенденции развития науки и технологий. 2015. № 2-1. С. 12–15.
13. Shabaev S.N., Ivanov S.A., Martel N.A. The Development of Theoretical Basis of Mathematical Model of Crushed Rock Particle-Particle Packing // E3S Web of Conferences. IVth International Innovative Mining Symposium. Volume 105. 2019. Article 01028. doi: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201910501028>.

### References

1. Kolchanov A.G. On the required strength of road structures for mining dump trucks. *Gorny zhurnal* [Mining Journal], 1987, no. 6, pp. 16–18. (In Russ.)
2. Bogomolov S.V. Choice of optimal parameters for open pit truck haul roads. *Povyshenie effektivnosti dorozhno-gostroitelstva v usloviyah Sibiri* [Increasing efficiency of road construction in Siberia]. Kemerovo: KuzPI, 1991, pp. 127–132. (In Russ.)
3. Kolchanov A.G. Design of open pit truck haul roads. *Gornaya promyshlennost* [Mining Industry], 2010, no. 6, pp. 56–59. (In Russ.)
4. Arefiev S.A. Experimental evaluation of dependence of pavement characteristics in quarries on the compaction of roads with open pit dump trucks. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2015, no. 2, pp. 5–11. (In Russ.)
5. Arefiev S.A. Justification of the quarry road pavement structures designed for heavy-duty dump trucks. *Estestvennye i tekhnicheskie nauki* [Natural and Technical Sciences], 2015, no. 1, pp. 38–39. (In Russ.)
6. Solov'yev G.V., Vatchnadze K.I. Improving of performance characteristics during mechanical stabilization of quarry haul roads with stiff polymeric Tensar TriAx hexagonal geogrid. *Procedia Engineering*, 2017, vol. 189, pp. 666–672.
7. 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.
8. 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, iss. 2, pp. 219–225.
9. 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, iss. 1, pp. 1007–1012.
10. Vasilieva A.A., Mikhеev V.V., Lobanova T.L. On the dependence of the strength properties of gravel soils on the type and condition of sand pore aggregate. *Osnovaniya, fundamenty i mekhanika gruntov* [Soil Mechanics and Foundation Engineering], 1971, no. 3, pp. 9–11. (In Russ.)
11. Gordienko P.I. Some design issues of high earth and rock-fill dams. *Sbornik trudov MISI im. V. V. Kuibysheva* [Proceedings of Kuibyshev Moscow Civil Engineering Institute], 1960, no. 32, pp. 32–34. (In Russ.)
12. Bondarev V.G. Mathematical modeling of the wall effect in random packing of particle systems. *Sovremennyye tendentsii razvitiya nauki i tekhnologii* [Current trends in the development of science and technologies], 2015, no. 2-1, pp. 12–15. (In Russ.)
13. Shabaev S.N., Ivanov S.A., Martel N.A. The development of theoretical basis of mathematical model of crushed rock particle-particle packing. E3S Web of Conferences. 4th International Innovative Mining Symposium. Volume 105, 2019, Article 01028. doi: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201910501028>.

Поступила 13.04.2020; принята к публикации 21.05.2020; опубликована 25.06.2020  
Submitted 13/04/2020; revised 21/05/2020; published 25/06/2020

**Шабаев Сергей Николаевич** – канд. техн. наук, доц.,  
зав. кафедрой автомобильных дорог и городского кадастра,  
Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачева, Кемерово, Россия.  
Email: shsn-22@mail.ru. ORCID 0000-0002-2059-6169

**Sergey N. Shabaev** – PhD (Eng.), Associate Professor, Head of the Department of Motor Roads and City Cadaster, Gorbachev Kuzbass State Technical University, Kemerovo, Russia. Email: shsn-22@mail.ru