

# ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА НЕСУЩУЮ СПОСОБНОСТЬ РАЗДРОБЛЕННЫХ ГОРНЫХ ПОРОД ОСАДОЧНОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ

Сергей Николаевич Шабаетв  
shabaev81@rambler.ru

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

**Актуальность работы** обусловлена тем, что качество автомобильных дорог открытых горных разработок оказывает значительное влияние на эффективность работы карьерного автотранспорта, при этом использование вскрышных и вмещающих горных пород может снизить капитальные и эксплуатационные затраты на устройство и содержание путей сообщения.

**Цель работы:** определить факторы, оказывающие значительное влияние на несущую способность раздробленных горных пород.

**Методология исследования.** На основе анализа ранее выполненных исследований дедуктивными методами выявляются факторы, влияющие на модуль упругости раздробленных горных пород осадочного происхождения, и определяются те из них, которые играют наибольшую роль в формировании несущей способности. Лабораторными экспериментами определяются зависимости объемной массы и статического модуля упругости раздробленных горных пород различного гранулометрического состава в зависимости от их влажности.

**Результаты.** Определено, что наибольшее влияние на несущую способность оказывают размер и плотность упаковки частиц раздробленной горной породы, ее влажность, а также содержание в ней пылевидных и глинистых частиц, при этом значительная роль последних трех факторов доказана экспериментальным путем. Факторами, которыми можно пренебречь, являются форма, шероховатость, прочность и сжимаемость частиц.

**Выводы.** При использовании раздробленных горных пород осадочного происхождения для устройства конструктивных слоев дорожной одежды технологических автомобильных дорог для правильного прогнозирования несущей способности необходимо учитывать не только степень (коэффициент) уплотнения и (или) остаточную пустотность, но также и их физические параметры, а именно гранулометрический состав и влажность, в том числе оптимальную. В противном случае получаемые результаты характеризуют лишь частные случаи достижения того или иного модуля упругости и могут дать совершенно иные результаты в случае изменения любого из оказывающих значительное влияние факторов.

**Ключевые слова:** горные породы; модуль упругости; несущая способность; факторы; дороги; открытые горные разработки.

## Введение

В современных условиях на эффективность работы карьерного автотранспорта значительное влияние оказывает качество автомобильных дорог открытых горных разработок [1]. При этом для сокращения капитальных и эксплуатационных затрат на строительство и содержание путей сообщения целесообразно использовать вскрышные и (или) вмещающие раздробленные горные породы карьеров (разрезов) для строительства земляного полотна и дорожных одежд [2].

Для устройства автомобильных дорог открытых горных разработок различные авторы предлагают использовать раздробленные горные породы, фракционированный щебень, асфальтобетонные и цементобетонные смеси [3–9]. Однако в проектной документации наибольшее распространение получил однофракционный (сортовой) щебень. В то же время дорожные одежды из щебня быстро разрушаются [1], поэтому целесообразно определить параметры раздробленных горных пород, определяющие возможность и эффективность их применения для устройства карьерных дорог.

### Постановка цели и задач

Для повышения надежности прогнозирования несущей способности раздробленных горных пород, от которой зависит срок службы и качество технологических дорог, необходимо учесть максимальное количество факторов, влияющих на нее. В то же время, в соответствии с теорией планирования эксперимента, учет большого количества факторов, в том числе мало влияющих на параметр оптимизации (отклик), чрезмерно увеличивает трудоемкость эксперимента (число опытов). Следовательно, необходимо определить тот минимальный набор факторов, который позволит всесторонне охарактеризовать объект исследования без уточнения его некоторых менее значимых или не всегда проявляющихся особенностей.

### Определение факторов

Для определения факторов, влияющих на несущую способность раздробленных горных пород, целесообразно обратиться к основам структурообразования зернистых сред, рассматриваемых в механике грунтов. Так, в работе [10] грунт рассматривается как совокупность зерен (частиц), связей (контактов), пор (пустот) и отношений. При этом под контактами понимается множество точек, которыми одна частица соприкасается с другими, а отношение – это возможность следования от одной частицы к другой через контакты. В соответствии с приложенной схемой свойства частиц характеризуются их размером, формой, площадью поверхности, шероховатостью, плотностью, сжимаемостью и прочностью.

Размер частиц – величина, обуславливающая несущую способность раздробленных горных пород, так как известно, что прочностные и деформационные характеристики грунта зависят от содержания частиц того или иного размера [11].

Форма частиц так же, как и их размер, оказывает влияние на физико-механические свойства грунтов, особенно на их прочностные показатели [10, 12]. Это особенно проявляется, когда одни частицы имеют четкую угловатую форму (например, щебенистые), а другие – максимально окатанную (например, гравийные). Так как в дальнейшем будут рассматриваться только частицы, полученные путем дробления (измельчения) вскрышных и вмещающих скальных и полускальных горных пород, то форма частиц во внимание принята не будет.

Площадь поверхности частиц, несмотря на выделение данного показателя в качестве отдельного свойства, зависит от размера частиц и их формы [10, 13]. Таким образом, правильнее рассматривать площадь поверхности частиц как производную от их формы и размера, а значит, данный фактор должен быть исключен при дальнейшем анализе.

При рассмотрении шероховатости поверхности частиц различные типы шероховатости обычно относят к двум группам – стекловидной с малым значением коэффициента трения и шероховатой с коэффициентом трения, значительно отличающимся от нуля [10]. Действительно, имеются горные породы, например кварцит, дробление которой

позволяет получить обломочный материал, который чрезвычайно сложно уплотнить, так как в ходе уплотняющего воздействия из-за малой шероховатости частиц они легко выдавливаются из-под уплотняющего органа. Подобное поведение характерно и для частиц, имеющих окатанную форму. Так как рассматриваются раздробленные горные породы преимущественно осадочного происхождения, состоящие из угловатых частиц с шероховатой поверхностью, то показатель шероховатости рассмотрен не будет.

Прочность осадочных горных пород может колебаться в очень широких пределах – от 1–2 до 250 МПа и более [11]. Данный фактор, с одной стороны, необходимо учитывать, так как накопленный практический опыт показывает, что обломочные материалы делят на легкоуплотняемые и трудноуплотняемые [14]. Деление выполнено с учетом прочности исходной горной породы, из которой получен обломочный материал в соответствии с ОДН 218.046-01, однако необходимо понимать, что прочность горной породы определяет и прочность частиц. Прочность частиц, оцениваемая, как правило, через марку по прочности по ГОСТ 8267–93\*, обуславливает их измельчаемость в процессе уплотнения и многократных нагружениях в ходе эксплуатации, что, конечно, важно учитывать при устройстве земляного полотна и дорожных одежд технологических дорог в соответствии с СП 37.13330-2012 и СП 34.13330-2012. Однако при построении математической модели формирования несущей способности на этапе конструирования принимать во внимание это свойство очень затруднительно, так как интенсивность процесса измельчения зависит как от прочности частиц, так и от соотношения частиц различных размеров, числа приложений и величины расчетной нагрузки [14, 15]. В то же время именно через данный показатель можно отнести раздробленную горную породу к легкоуплотняемой или трудноуплотняемой. При этом к трудноуплотняемым раздробленным горным породам относят те, которые получены из изверженных и метаморфических горных пород марки по прочности на раздавливание в цилиндре в водонасыщенном состоянии (марки по прочности) 1000 и более, а к легкоуплотняемым – полученные из изверженных и метаморфических горных пород марки по прочности менее 1000 и осадочных горных пород независимо от марки по прочности [16]. Так как вскрышные и вмещающие горные породы преимущественно либо осадочного происхождения, либо изверженного или метаморфического, но с низкой маркой по прочности, то прочность частиц принята во внимание не будет.

В зернистых системах при воздействии внешней нагрузки сжиматься (деформироваться) будут как сами частицы, так и деформация будет происходить за счет сближения отдельных частиц. Но если модуль упругости осадочных горных пород составляет около 15 000–36 000 МПа [17, 18], то для зернистых сред этот показатель приблизительно в 100 раз меньше [14, 19]. В связи с этим сжимаемость частиц настолько мала по сравнению со сжимаемостью, обусловленной сближением частиц, что ею можно пренебречь.

Плотность частиц – показатель, обуславливающий объемную массу раздробленной горной породы, и его, безусловно, важно учитывать при прогнозировании и оценке плотности упаковки частиц, как известно, влияющей на несущую способность [20, 21].

Поры (пустоты) характеризуются видом их заполнения [10]. И если в наиболее общем варианте поры могут быть заполнены воздухом, жидкостью, а также быть свободными от всего этого, в условиях земной атмосферы они заполнены воздухом, водой (не принимая во внимание примеси, содержащиеся в воде), либо и тем и другим. При этом необходимо учитывать, что воздух и вода могут быть как защемленными (не сообщающимися с атмосферой), так и нет [21]. Для учета данных особенностей в качестве факторов логично использовать показатели влажности и пористости раздробленных горных пород, при этом существует оптимальная влажность, обуславливающая достижение максимальной объемной массы при заданном режиме уплотняющего воздействия, и предельная (минимальная) пористость, достигаемая при уплотнении при оптимальной влажности. Учет данных факторов должен быть обязателен, так как многочисленные исследования показывают, что именно от них в большей степени зависит несущая способность грунтов и дорожно-строительных материалов [20, 21 и др.].

Все образующиеся контакты между частицами условно делят на те, которые могут воспринимать растягивающие усилия, и те, которые их не воспринимают [10]. Из основ механики грунтов известно, что способностью воспринимать растягивающие усилия обладают пылевато-глинистые грунты, и она определяется преимущественно частицами, имеющими размер менее 0,05 мм (пылевидными) и особенно менее 0,005 (0,002) мм (глинистыми) [11]. Таким образом, если в раздробленной горной породе содержатся пылевидные и глинистые частицы, то необходимо это учитывать при прогнозировании ее несущей способности. Несмотря на то, что размер частиц рассматривается в качестве фактора и на первый взгляд формируется его дубликат, все же необходимо данный показатель рассмотреть в качестве независимого фактора, так как механика поведения таких мелких частиц отлична от механики поведения частиц большего размера.

Все факторы, а также их роль в формировании несущей способности раздробленных горных пород осадочного происхождения сведены в табл. 1.

**Таблица 1. Факторы, влияющие на несущую способность раздробленных горных пород осадочного происхождения.**  
**Table 1. Factors affecting the bearing capacity of crushed rocks of sedimentary origin.**

Фактор	Степень влияния фактора
Размер частиц $D$ .....	Значительная
Форма частиц $\Phi$ .....	Незначительная
Шероховатость частиц $\Psi$ .....	Незначительная
Прочность частиц $R$ .....	Незначительная
Сжимаемость частиц $\psi$ .....	Незначительная
Плотность частиц $\rho$ .....	Значительная
Пористость $n$ .....	Значительная
Влажность $W$ .....	Значительная
Содержание пылевидных и глинистых частиц $\eta$ .....	Значительная

Для сокращения числа факторов два из них, а именно, плотность частиц и пористость раздробленной горной породы, заменим одним – плотность упаковки частиц. Данную замену можно сделать, так как плотность упаковки частиц является той величиной, которая одновременно учитывает и плотность частиц, и пористость раздробленной горной породы.

Таким образом, зависимость модуля упругости раздробленных горных пород осадочного происхождения от влияющих факторов можно записать в общем виде:

$$E = f(D, v, W, \eta).$$

### Исследования

Для проверки данных, полученных по результатам выполненного обзора, был поставлен лабораторный эксперимент, заключающийся в определении объемной массы и статического модуля упругости раздробленных горных пород осадочного происхождения (прочный мелкозернистый песчаник, преимущественно на кварцевом цементе) различного гранулометрического состава в зависимости от их влажности и метода уплотняющего воздействия. При статическом методе уплотняющего воздействия раздробленные горные породы уплотнялись на прессе под давлением 2,5 МПа, а при вибрационном – путем уплотнения на виброплощадке при амплитуде колебаний  $0,40 \pm 0,05$  мм и частоте колебаний  $48 \pm 3$  Гц с постоянным пригрузом, обеспечивающим давление 4 кПа. Гранулометрические составы раздробленных горных пород приведены в табл. 2, их параметры – в табл. 3, результаты эксперимента – в табл. 4–6 и на рис. 1–6.

**Таблица 2. Гранулометрические составы раздробленных горных пород.**  
**Table 2. Granulometric compositions of crushed rocks.**

Показатели, %	Размер отверстий (ячеек) сит, мм								
	10	5	2,5	1,25	0,63	0,315	0,14	0,05	Поддон
<i>Гранулометрический состав № 1</i>									
Частный остаток	35,8	11,2	11,0	11,0	7,0	5,0	5,0	6,0	8,0
Полный остаток	35,8	47,0	58,0	69,0	76,0	81,0	86,0	92,0	100,0
Полный проход	64,2	53,0	42,0	31,0	24,0	19,0	14,0	8,0	0,0
<i>Гранулометрический состав № 2</i>									
Частный остаток	55,8	6,9	6,1	5,9	5,1	3,2	3,0	5,2	8,8
Полный остаток	55,8	62,7	68,8	74,7	79,8	83,0	86,0	91,2	100,0
Полный проход	44,2	37,3	31,2	25,3	20,2	17,0	14,0	8,8	0,0
<i>Гранулометрический состав № 3</i>									
Частный остаток	35,8	7,9	7,1	6,9	6,1	3,9	4,1	7,4	20,8
Полный остаток	35,8	43,7	50,8	57,7	63,8	67,7	71,8	79,2	100,0
Полный проход	64,2	56,3	49,2	42,3	36,2	32,3	28,2	20,8	0

**Таблица 3. Параметры раздробленных горных пород.**  
**Table 3. Parameters of crushed rocks.**

Параметры	Значение параметра для раздробленной горной породы гранулометрического состава		
	1	2	3
Средневзвешенное значение размера частиц, мм .....	6,937	9,304	6,455
Удельная поверхность частиц, м <sup>2</sup> /кг .....	2,329	2,359	5,085
Плотность частиц, кг/м <sup>3</sup> .....	2620		
Оптимальная влажность, %, при статическом методе уплотняющего воздействия, % .....	7,10	7,13	9,69
Оптимальная влажность, %, при вибрационном методе уплотняющего воздействия, % .....	5,46	5,48	7,14

**Таблица 4. Результаты эксперимента по определению объемной массы и статического модуля упругости раздробленной горной породы гранулометрического состава 1.**  
**Table 4. The results of the experiment to determine the volume mass and static modulus of elasticity fractured rock particle-size composition 1.**

Метод уплотняющего воздействия	Определяемый параметр	Значение параметра при влажности раздробленной горной породы, %															
		3,50	4,00	4,50	4,75	5,25	5,50	5,75	6,00	6,25	6,50	6,75	7,00	7,25	7,50	7,75	8,00
Вибрационный	Объемная масса, кг/м <sup>3</sup>	2120	2130	2120	2180	2260	2330	2330	2350	2320	–	–	–	–	–	–	–
	Статический модуль упругости, МПа	266	250	235	235	258	262	251	238	263	–	–	–	–	–	–	–
	Объемная масса, кг/м <sup>3</sup>	–	–	–	–	–	–	–	2100	2110	2100	2140	2130	2170	2160	2180	2170
Статический	Статический модуль упругости, МПа	–	–	–	–	–	–	168	150	167	150	142	156	143	141	140	

Таблица 5. Результаты эксперимента по определению объемной массы и статического модуля упругости раздробленной горной породы гранулометрического состава 2.

Table 5. The results of the experiment to determine the volume mass and static modulus of elasticity crushed rock of granulometric composition 2.

Метод уплотняющего воздействия	Определяемый параметр	Значение параметра при влажности раздробленной горной породы, %															
		3,50	4,00	4,25	4,50	5,00	5,25	5,50	5,75	6,00	6,25	6,50	6,75	7,00	7,50	8,00	
Вибрационный	Объемная масса, кг/м <sup>3</sup>	2090	2080	2090	2100	2140	2180	2230	2240	2230	-	-	-	-	-	-	
	Статический модуль упругости, МПа	310	250	251	209	212	235	206	210	205	-	-	-	-	-	-	
Статический	Объемная масса, кг/м <sup>3</sup>	-	-	-	-	-	-	2060	2060	2100	2140	2200	2230	2250	2230	2240	
	Статический модуль упругости, МПа	-	-	-	-	-	-	195	167	185	170	157	177	160	167	152	

Таблица 6. Результаты эксперимента по определению объемной массы и статического модуля упругости раздробленной горной породы гранулометрического состава 3.

Table 6. The results of the experiment to determine the volume mass and static modulus of elasticity crushed rock of granulometric composition 3.

Метод уплотняющего воздействия	Определяемый параметр	Значение параметра при влажности раздробленной горной породы, %															
		4,75	5,25	5,75	6,25	6,75	7,25	7,75	8,25	8,50	8,75	9,25	9,50	9,75	10,00	10,25	
Вибрационный	Объемная масса, кг/м <sup>3</sup>	2130	2130	2130	2140	2150	2260	2310	2320	2320	-	-	-	-	-	-	
	Статический модуль упругости, МПа	282	303	282	264	270	277	270	271	271	-	-	-	-	-	-	
Статический	Объемная масса, кг/м <sup>3</sup>	-	-	-	-	-	2110	2120	2160	-	2150	2180	2200	2210	2220	2210	
	Статический модуль упругости, МПа	-	-	-	-	-	165	163	148	-	129	108	124	120	130	125	

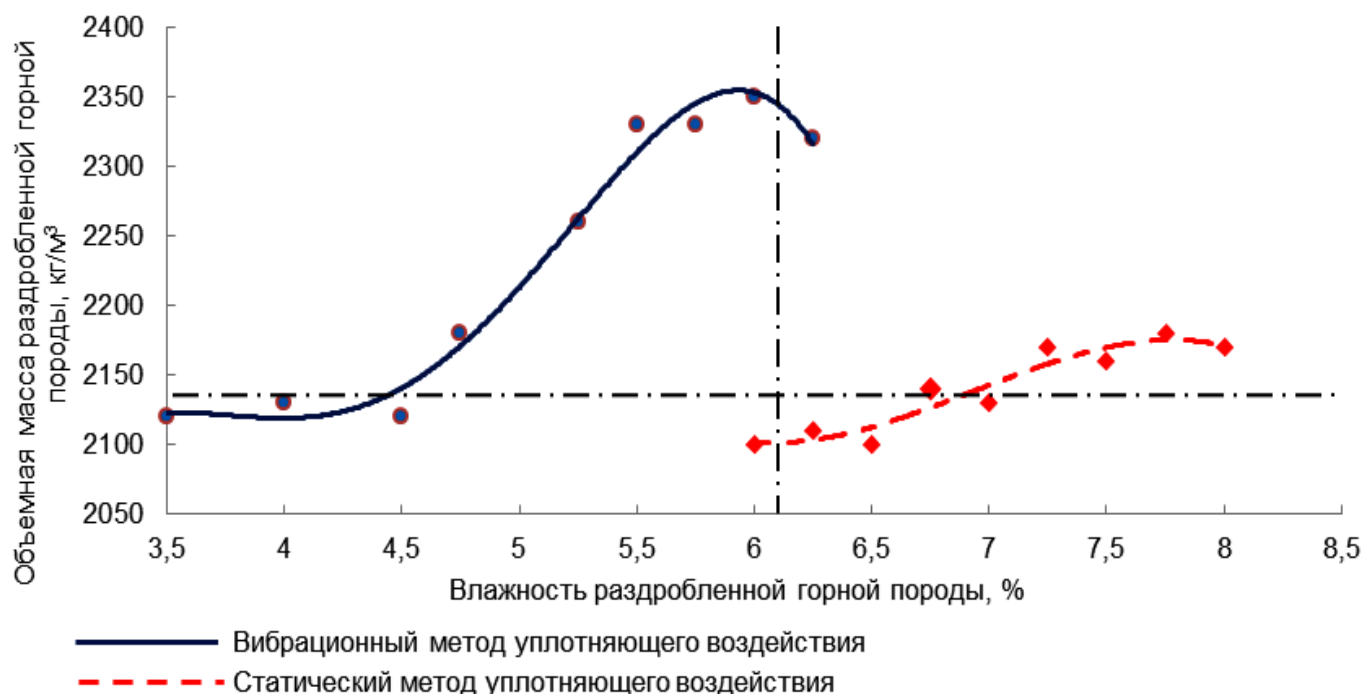


Рисунок 1. Зависимость объемной массы раздробленной горной породы гранулометрического состава 1 от ее влажности и метода уплотняющего воздействия.

Figure 1. The dependence of the volume mass of the crushed rock of granulometric composition 1 on its moisture content and the method of compaction.

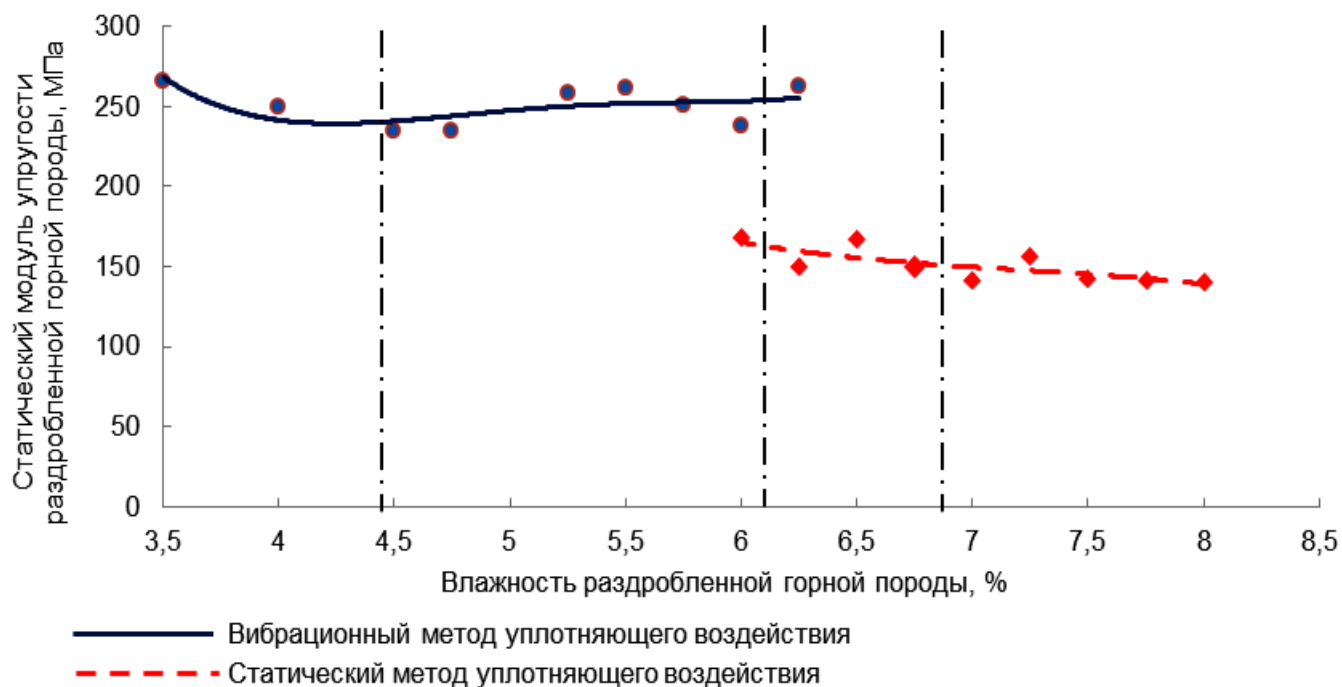


Рисунок 2. Зависимость статического модуля упругости раздробленной горной породы гранулометрического состава 1 от ее влажности и метода уплотняющего воздействия.  
 Figure 2. Dependence of the static modulus of elasticity of the fractured rock granulometric composition 1 of its moisture and the method of sealing action.

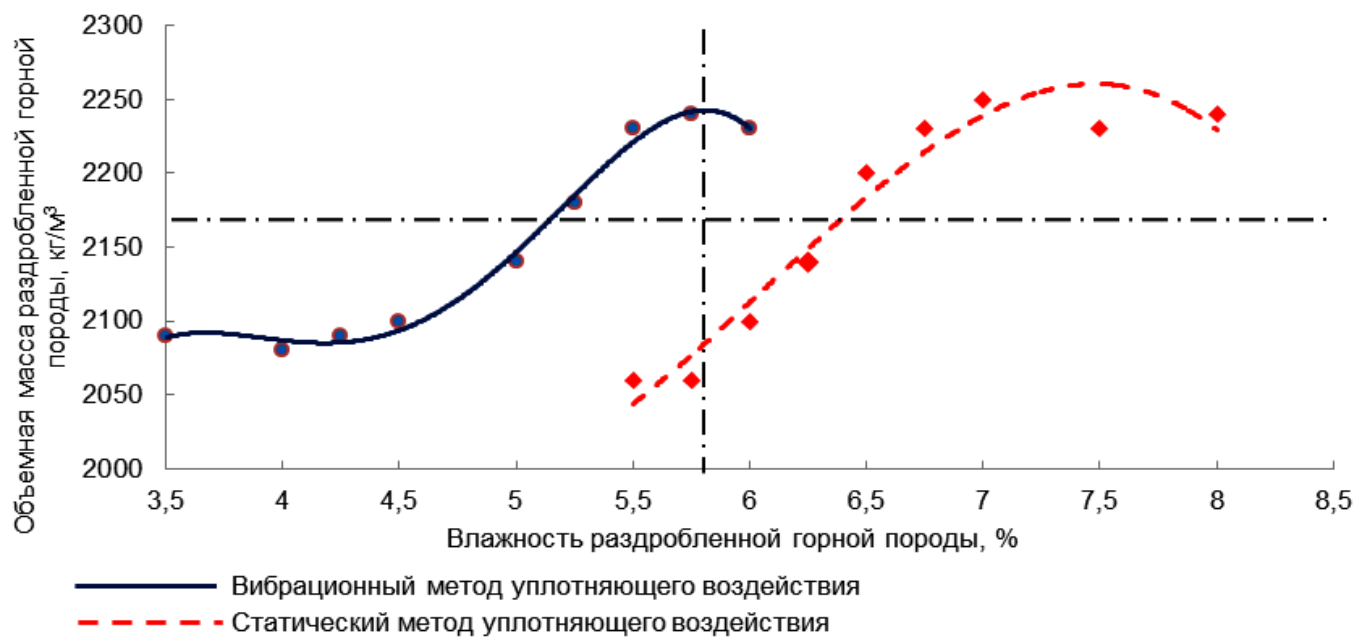


Рисунок 3. Зависимость объемной массы раздробленной горной породы гранулометрического состава 2 от ее влажности и метода уплотняющего воздействия.  
 Figure 3. The dependence of the volume mass of crushed rock of granulometric composition 2 on its moisture content and the method of compaction.

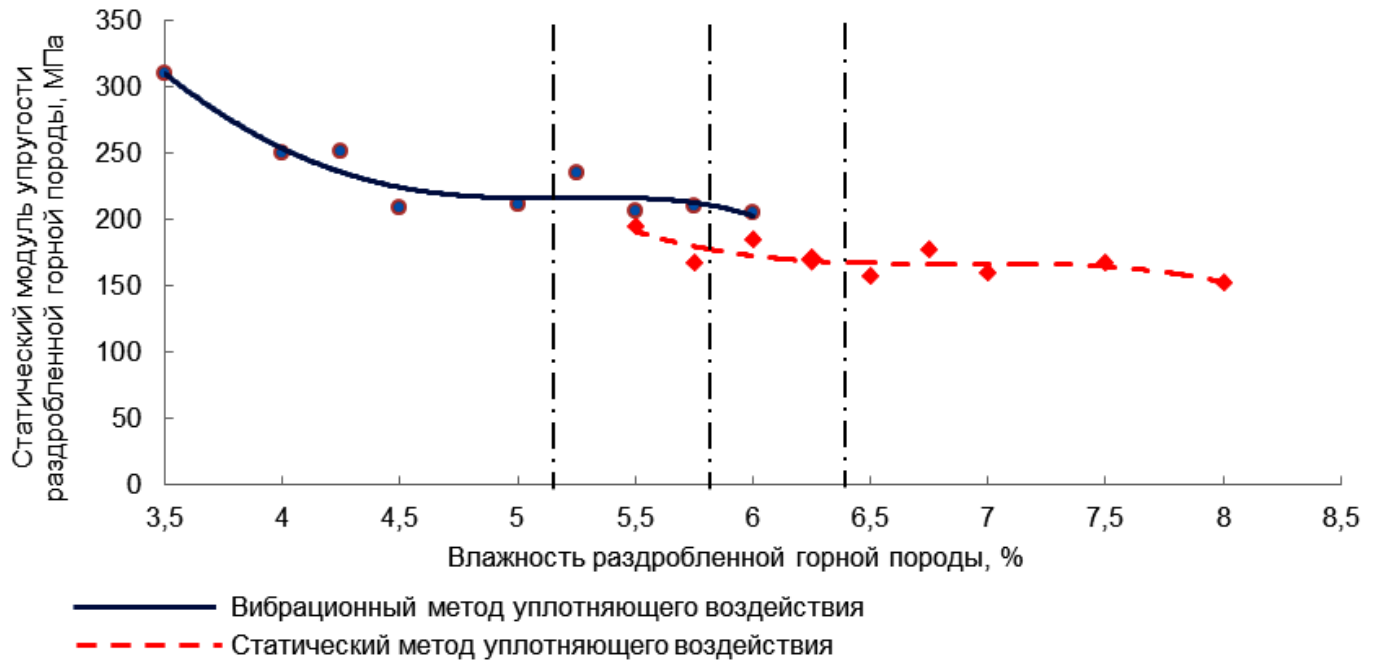


Рисунок 4. Зависимость статического модуля упругости раздробленной горной породы гранулометрического состава 2 от ее влажности и метода уплотняющего воздействия.

Figure 4. Dependence of the static modulus of elasticity of the fractured rock granulometric composition 2 from its moisture and the method of sealing action.

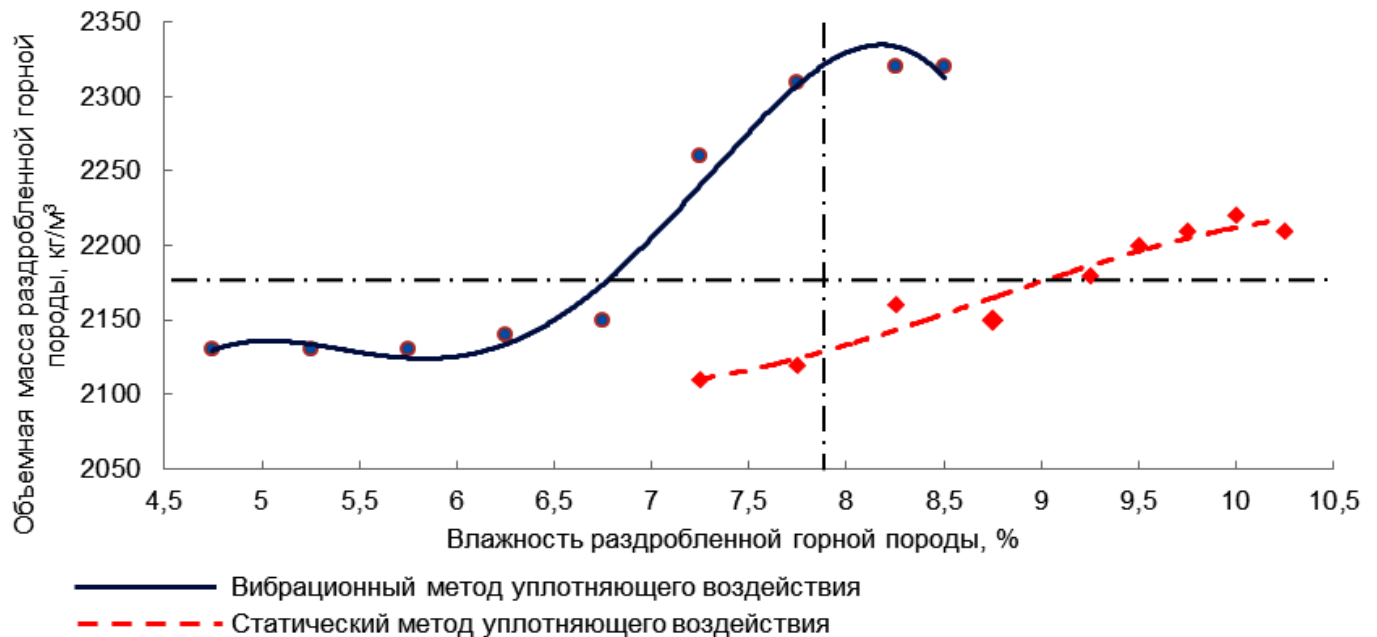


Рисунок 5. Зависимость объемной массы раздробленной горной породы гранулометрического состава 3 от ее влажности и метода уплотняющего воздействия.

Figure 5. The dependence of the volume mass of the crushed rock of granulometric composition 3 on its moisture content and the method of compaction.

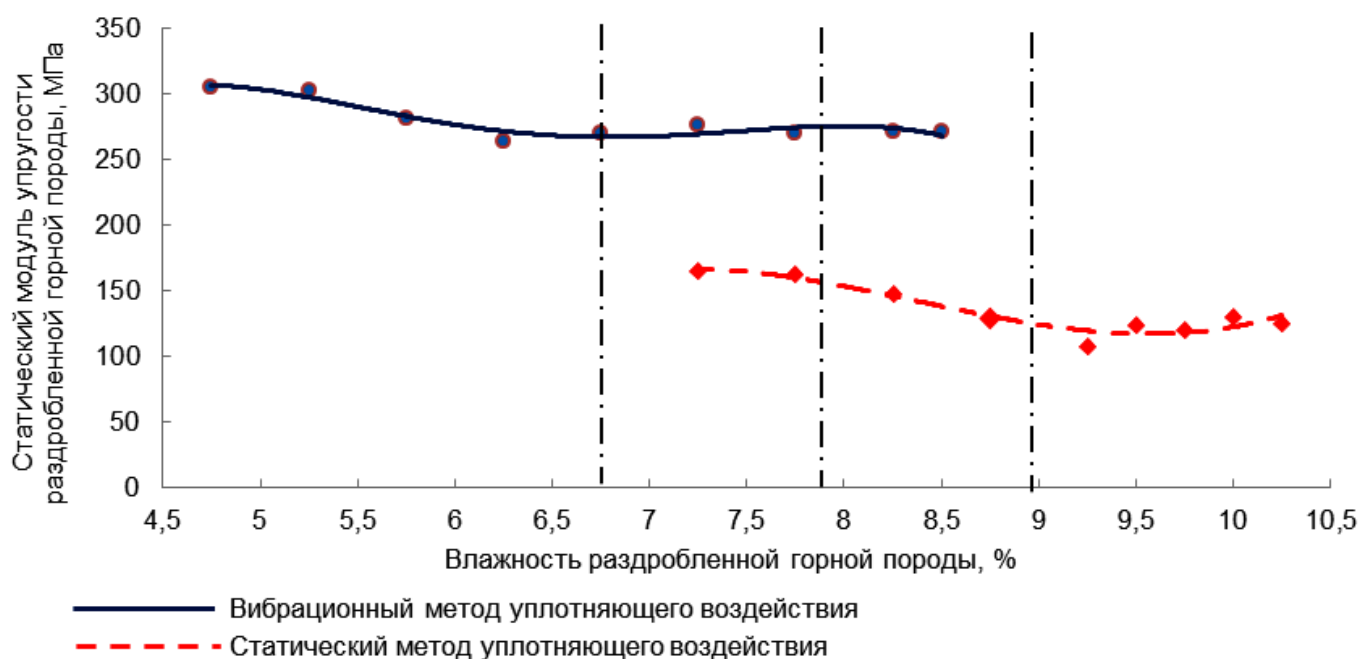


Рисунок 6. Зависимость статического модуля упругости раздробленной горной породы гранулометрического состава 3 от ее влажности и метода уплотняющего воздействия.

Figure 6. Dependence of the static modulus of elasticity of the fractured rock granulometric composition 3 from its moisture and the method of sealing action.

### Результаты

При анализе полученных результатов установлено следующее.

1. Во всех случаях при одной и той же влажности раздробленной горной породы одного гранулометрического состава (например, для состава 1 – 6,1 %, состава 2 – 5,8 %, состава 3 – 7,9 %) объемная масса и статический модуль упругости выше при вибрационном методе уплотнения, чем при статическом. Так как средневзвешенный размер частиц, влажность и содержание пылевидных и глинистых частиц в пределах раздробленной горной породы одного состава являются константами, то отличие статического модуля упругости объясняется различием в плотности упаковок частиц, причем чем больше плотность упаковки частиц, тем больше статический модуль упругости, что подтверждается результатами всех предыдущих исследований. В то же время для раздробленной горной породы состава 1 увеличение плотности упаковки частиц на 11–12 % привело к росту статического модуля упругости на 50–60 %, для раздробленной горной породы состава № 2 плотность упаковки возросла на 7–8 %, при этом статический модуль упругости увеличился на 15–20 %, для раздробленной горной породы состава 3 увеличение плотности упаковки на 8,5–9,5 % привело к увеличению статического модуля упругости на 75–80 %. Это свидетельствует о том, что рост модуля упругости с увеличением плотности упаковки для раздробленных горных пород отличающихся составов имеет различную тенденцию, что обусловлено одновременным влиянием других факторов, о чем в ранее опубликованных работах не отмечалось. Так, например, по данным С. А. Арефьева и Ю. И. Леля, модуль упругости слоя из щебня фракции 40–80 мм, устроенного по способу заклинка после уплотнения карьерными автосамосвалами при увеличении объемной массы приблизительно на 30 %, возрастает от 150 до 270 МПа, а результаты исследований А. Ю. Дедюхина, В. Н. Дмитриева, И. Н. Кручинина, Д. Г. Неволлина и других показывают, что такое же увеличение объемной массы ведет к росту модуля упругости от 120 до 500 МПа и более.

2. Для каждой из рассмотренных раздробленных горных пород характерно при одной и той же объемной массе снижение статического модуля упругости с увеличением влажности. В этом случае средневзвешенный размер частиц, плотность упаковки частиц и содержание пылевидных и глинистых частиц в пределах раздробленной горной породы одного состава есть величины постоянные, следовательно, чем больше влажность раздробленной горной породы, тем меньше статический модуль упругости. Для раздробленной горной породы состава 1 увеличение влажности на 2,4 % (по абсолютной величине) снизило статический модуль упругости на 35–40 %, для раздробленной горной породы состава 2 увеличение влажности на 1,2 % дало снижение на 20–25 %, а для раздробленной горной породы состава 3 возросшая на 2,2 % влажность привела к падению статического модуля упругости приблизительно в два раза. К сожалению, в проведенных ранее С. А. Арефьевым, С. В. Богомоловым, И. В. Зыряновым, А. Г. Колчановым, Ю. И. Лелем, Ю. В. Стениным и другими исследованиях в области проектирования и строительства карьерных автомобильных дорог отсутствует информация об оптимальной влажности применяемых зернистых сред, а также фактической влажности, при которой определялись физико-механические характеристики. При этом известно, что оптимальная влажность зависит от вида и интенсивности уплотняющего воздействия, а значит, является переменной величиной, т. е. фактором. Таким образом, данный фактор не принимался во внимание, что является существенным упущением.

3. Раздробленная горная порода гранулометрического состава 1 имеет средневзвешенное значение размера частиц 6,937 мм, а раздробленная горная порода гранулометрического состава 2 – 9,304 мм, т. е. состав 2 является более круп-

ным по сравнению с составом 1. При этом содержание пылевидных и глинистых частиц в обоих случаях приблизительно одинаковое и составляет 8,0 % и 8,8 %. Следовательно, раздробленная горная порода состава 2 в соответствии с проведенным обзором должна иметь более высокое значение статического модуля упругости по сравнению с раздробленной горной породой состава 1. Однако, как видно из результатов эксперимента, это не так. Объяснить данное противоречие можно, если дополнительно проанализировать плотность упаковки частиц раздробленных горных пород обоих составов. Максимальная плотность упаковки частиц раздробленной горной породы гранулометрического состава 1 равна 0,90, а состава 2 – 0,86. Таким образом, плотность упаковки частиц раздробленной горной породы состава 1 приблизительно на 5 % больше, чем состава 2, а из первого вывода понятно, что такое увеличение плотности упаковки частиц приводит к значительному росту статического модуля упругости. Если рассмотреть одну и ту же плотность упаковки частиц в раздробленных горных породах обоих составов, то объемная масса при вибрационном методе уплотнения раздробленной горной породы гранулометрического состава 2, равная 2200 кг/м<sup>3</sup>, достигается при влажности приблизительно 5,4 %, а для раздробленной горной породы состава 1 – при влажности приблизительно 4,9 %. Значит, раздробленная горная порода состава 2 имеет по абсолютной величине влажность на 0,5 % большую, чем раздробленная горная порода состава 1. В этом случае логично, что статический модуль упругости при составе 2 приблизительно на 15 % ниже, чем при составе 1, что в целом соответствует выводу 2. Можно сказать, что данными экспериментами подтвердить влияние крупности частиц раздробленной горной породы на ее статический модуль упругости не удалось, так как на несущую способность кроме крупности частиц также оказывали влияние плотность упаковки частиц и влажность, а другие результаты исследований, посвященных изучению этого вопроса, отсутствуют.

4. Если оценить несущую способность раздробленной горной породы состава 3 по сравнению с составом 1, то можно отметить, что при вибрационном методе уплотняющего воздействия статический модуль упругости раздробленной горной породы состава 3 несколько выше, а при статическом методе уплотняющего воздействия несколько ниже, чем раздробленной горной породы состава 1. При этом с учетом приблизительно одинакового средневзвешенного размера частиц при вибрационном методе уплотняющего воздействия плотность упаковки частиц при составе 1 несколько выше, чем при составе 3, а при статическом методе уплотняющего воздействия, наоборот, несколько ниже. В то же время влажность раздробленной горной породы состава 3 значительно выше, чем состава 1, следовательно, несущая способность должна быть значительно ниже. Однако этого не наблюдается, так как содержание пылевидных и глинистых частиц в составе 3 на 12,8 % (по абсолютной величине) больше, чем в составе 1, т. е. проявился фактор содержания пылевидных и глинистых частиц, который и увеличил статический модуль упругости, даже несмотря на негативное влияние других факторов. Из обзора литературных источников ясно, что специальных исследований, посвященных этому вопросу, нет, однако, как показывают приведенные результаты, данный фактор необходимо учитывать при оценке модуля упругости раздробленных горных пород.

#### Выводы

Результаты проведенного эксперимента подтвердили влияние трех факторов на несущую способность раздробленных горных пород – плотности упаковки частиц, влажности и содержания пылевидных и глинистых частиц. Влияние крупности частиц выявить не удалось из-за совместного влияния других факторов, в связи с чем требуются дополнительные исследования.

Таким образом, при использовании раздробленных горных пород осадочного происхождения для устройства конструктивных слоев дорожной одежды технологических автомобильных дорог для правильного прогнозирования несущей способности необходимо учитывать не только степень (коэффициент) уплотнения и (или) остаточную пустотность, но также и их физические параметры, а именно гранулометрический состав и влажность, в том числе оптимальную. В противном случае получаемые результаты характеризуют лишь частные случаи достижения того или иного модуля упругости и могут дать совершенно иные результаты в случае изменения любого из оказывающих значительное влияние факторов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Арефьев С. А. Оценка и обоснование рациональных дорожных условий эксплуатации карьерных автосамосвалов большой грузоподъемности: дис. ... канд. техн. наук. Екатеринбург, 2015. 179 с.
2. Афиногенов О. П., Шаламанов В. А., Шабаев С. Н. и др. Карьерные автомобильные дороги: совершенствование методов проектирования земляного полотна и дорожных одежд. Кемерово: ООО «Офсет», 2015. 222 с.
3. Du C.-F., Li L. Development and characterization of formulation of dust-suppressant used for stope road in open-pit mines // Journal of Coal Science and Engineering. 2013. Vol. 19, issue 2. P. 219–225.
4. Moldovan D. V., Chernobai V. I. The rock pile quality control during the blasting operations at the construction materials open-cast mines // Journal of Industrial Pollution Control. 2017. Vol. 33, issue 1. P. 1007–1012.
5. Khristoforova A. A., Sokolova M. D., Filippov S. E., Semenova S. M., Gogolev I. N. Perspectives of technogenic raw stuff and nanomodifiers at career roads building // Chemical technologies and nanomaterials: the materials of the international conference (Yakutsk, February 11–12, 2014). Ставрополь: Изд-во «Центр научного знания «Логос», 2014. P. 41–46.
6. Khristoforova A. A., Sokolova M. D., Zarovnyayev B. N., Akishev A. N. Prospects for modified bitumen in construction of semi-steep pit roads // Mining Journal. 2016, issue 3. P. 47–50.
7. Solovyev G. V., Vatchnadze K. I. Improving of Performance Characteristics During Mechanical Stabilization of Quarry Haul Roads with Stiff Polymeric Tensor Triax Hexagonal Geogrid // Procedia Engineering. 2017. Vol. 189. P. 666–672.
8. Jackson S. L. Dusty roads and disconnections: Perceptions of dust from unpaved mining roads in Mongolia's South Gobi province // Geoforum. 2015. Vol. 66. P. 94–105.
9. King B., Goycoolea M., Newman A. Optimizing the open pit-to-underground mining transition // European Journal of Operational Research. 2017. Vol. 257. P. 297–309.
10. Кандауров И. И. Механика зернистых сред и ее применение в строительстве. 2-е изд., испр. и перераб. Л.: Стройиздат, Ленингр. отделение, 1988. 280 с.
11. Лысенко М. П. Состав и физико-механические свойства грунтов. Изд. 2-е, перераб. и доп. М.: Недра, 1980. 272 с.



12. Иванов П. Л., Шульц Л. В. Влияние формы частиц на свойства песков намывных сооружений // Гидротехническое строительство. 1972. № 11. С. 47–49.
13. Королев И. В. Пути экономии битума в дорожном строительстве. М.: Транспорт, 1986. 149 с.
14. Применение местных каменных материалов и отходов промышленности для строительства оснований дорожных одежд: сб. науч. тр. / под ред. В. М. Юмашева. М.: Союздорнии, 1987. 320 с.
15. Юмашев В. М., Туренк К. Применение малопрочных каменных материалов // Автомобильные дороги. 1990. № 7. С. 17–18.
16. Васильев, А. П., Марышев Б. С., Силкин В. В. и др. Строительство и реконструкция автомобильных дорог: справ. энциклопедия дорожника (СЭД). М.: Информавтодор, 2005. Т. I. 646 с.
17. Физико-технические свойства горных пород и углей Кузнецкого бассейна: справочник / Г. Г. Штумпф [и др.]. М.: Недра, 1994. 447 с.
18. Особенности открытой добычи и переработки углей сложноструктурных месторождений Кузбасса / И. А. Паначев [и др.]. Кемерово: Кузбассвуиздат, 1997. 220 с.
19. Добров Э. М., Каменецкая Л. Б., Иванова Т. М. Влияние состава крупнообломочных грунтов на их физико-механические свойства // Тр. Союздорнии. 1972. Вып. 80. С. 107–128.
20. Калужский Л. А., Батраков О. П. Уплотнение земляного полотна и дорожных одежд. М.: Транспорт, 1971. 158 с.
21. Авакян Л. А. Уплотнение крупнообломочных грунтов трамбованием и вибрацией // Изв. ТНИСГЭИ. 1966. Т. 16 (50). С. 409–413.

*Статья поступила в редакцию 2 апреля 2018 г.*

# The factors which influence the bearing capacity of the fractured rocks of sedimentary origin

Sergey Nikolaevich Shabaev  
shabaev81@rambler.ru

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

**The relevance of the work** is conditioned by the fact that the quality of open-pit mining roads has a significant impact on the efficiency of quarry vehicles. At the same time, the use of overburden and host rocks can reduce capital costs as well as operating costs for the arrangement and the maintenance of communication routes.

**The purpose of the work** is to determine the factors that have a significant impact on the bearing capacity of crushed rocks.

**Research methodology** is based on the analysis of previously performed studies by deductive methods. The factors which affect the modulus of elasticity of fractured rocks of sedimentary origin are identified. Those, which play the greatest role in the formation of the bearing capacity, are determined. Laboratory experiments determine the dependence between the volume mass and static modulus of elasticity of crushed rocks of different particle size distribution. This depends on their humidity.

**Results.** It is determined that the greatest influence on the bearing capacity is the size and density of the packaging of the crushed rock particles. Its moisture content, as well as the content of dust and clay particles in it are also important. The significant role of the last three factors was proved experimentally. Factors that can be neglected are shape, roughness, strength and compressibility of the particles.

**Summary.** When using crushed rocks of sedimentary origin for the device of structural layers of road pavement technological roads for the correct prediction of the bearing capacity we must not only take into account the degree (coefficient) of compaction and (or) residual voidness. We should also consider their physical parameters, namely the grain size distribution and humidity, including the optimal one. Otherwise, the results obtained characterize only particular cases of achieving a particular elastic modulus. They will give completely different results in case of changes in any of the factors which have a significant impact.

**Keywords:** rocks; modulus of elasticity; bearing capacity; factors; roads; open mining.

## REFERENCES

1. Arefyev S. A. 2015, *Otsenka i obosnovaniye ratsional'nykh dorozhnykh usloviy ekspluatatsii kar'yernykh avtosamosvalov bol'shoy grupopod'yomnosti: dis. ... kand. tekhn. nauk* [Estimation and substantiation of rational road conditions of exploitation of quarry dump trucks with large carrying capacity: dissertation of the Candidate of technical Sciences]. Ekaterinburg, 179 p.
2. Afinogenov O. P., Shalamanov V. A., Shabayev S. N. and others. 2015, *Kar'yernyye avtomobil'nyye dorogi: sovershenstvovaniye metodov proyektirovaniya zemlyanogo polotna i dorozhnykh odezhd* [Pit roads: improvement of methods of designing the roadbed and road clothes]. Kemerovo, 222 p.
3. Du C.-F., Li L. 2013, Development and characterization of formulation of dust-suppressant used for stop road in open-pit mines. *Journal of Coal Science and Engineering*, vol. 19, issue 2, pp. 219–225.
4. Moldovan D. V., Chernobai V. I. 2017, The rock pile quality control during the blasting operations at the construction materials open-cast mines. *Journal of Industrial Pollution Control*, vol. 33, issue 1, pp. 1007–1012.
5. Khristoforova A. A., Sokolova M. D., Filippov S. E., Semenova S. M., Gogolev I. N. 2014, Perspectives of technical raw stuff and nanomodifiers at career roads building. *Chemical technologies and nanomaterials: the materials of the international conference* (Yakutsk, February 11–12, 2014). Stavropol, pp. 41–46.
6. Khristoforova A. A., Sokolova M. D., Zarovnyayev B. N., Akishev A. N. 2016, Prospects for modified bitumen in construction of semi-steep roads pit. *Mining Journal*, issue 3, pp. 47–50.
7. Solovyev G. V., Vatchnadze K. I. 2017, Improving of Performance Characteristics During Mechanical Stabilization of Quarry Haul Roads with Stiff Polymeric Tensar Triax Hexagonal Geogrid. *Procedia Engineering*, vol. 189, pp. 666–672.
8. Jackson S. L. 2015, Dusty roads and disconnections: Perceptions of dust from unpaved mining roads in Mongolia's South Gobi province. *Geoforum*, vol. 66, pp. 94–105.
9. King B., Goycoolea M., Newman A. 2017, Optimizing the open pit-to-underground mining transition. *European Journal of Operational Research*, vol. 257, pp. 297–309.
10. Kandaurov I. I. *Mekhanika zernistykh sred i yeye primeneniye v stroitel'stve. Izd. 2-e. ispr. i dop.* [Mechanics of granular media and its application in construction]. Ed. 2nd, corr. and rev. Leningrad, 1988. 280 p.
11. Lysenko M. P. 1980, *Sostav i fiziko-mekhanicheskiye svoystva gruntov. Izd. 2-e. pererab. i dop.* [Composition and physical and mechanical properties of soils. Ed. 2nd, rev. and add.]. Moscow, 272 p.
12. Ivanov P. L., Shultz L. V. 1972, *Vliyaniye formy chastits na svoystva peskov namyvnykh sooruzheniy* [The influence of particle shape on the properties of the sand alluvial structures]. *Gidrotekhnicheskoye stroitel'stvo* [Power Technology and Engineering], no. 11, pp. 47–49.
13. Korolev I. V. 1986, *Puti ekonomii bituma v dorozhnom stroitel'stve* [Ways to save bitumen in road construction]. Moscow, 149 p.
14. 1987, *Primeneniye mestnykh kamennykh materialov i otkhodov promyshlennosti dlya stroitel'stva osnovaniy dorozhnykh odezhd: sb. nauch. tr.* [The use of local stone materials and industrial waste for the construction of foundations of road clothes], edited by V. M. Yumashev. Moscow, 320 p.
15. Yumashev V. M., Turek K. 1990, *Primeneniye maloprochnykh kamennykh materialov* [Applying the low-strength masonry materials] *Avtomobil'nyye dorogi* [Highways], no. 7, pp. 17–18.
16. Vasil'yev, A. P., Maryshev B. S., Silkin V. V. and others. 2005, *Stroitel'stvo i rekonstruktsiya avtomobil'nykh dorog: sprav. entsiklopediya dorozhnika (SED)* [Construction and reconstruction of roads: reference. Encyclopedia of road builders]. Moscow, vol. 1, 646 p.
17. 1994, *Fiziko-tekhnicheskiye svoystva gornykh porod i ugley Kuznetskogo basseyna: spravochnik. G. G. Stumpf [i dr.]* [Physical and technical properties of rocks and coals of the Kuznetsk basin: reference. G. G. Stumpf [and others]]. Moscow, 447 p.
18. Panachev I. A. and others. 1997, *Osobennosti otkrytoy dobychi i pererabotki ugley slozhnostrukturnykh mestorozhdeniy Kuzbassa* [Features of open mining and processing of coal deposits of complex structure Kuzbass]. Kemerovo, 220 p.
19. Dobrov E. M., Kamenetsky L. B., Ivanova T. M. 1972, *Vliyaniye sostava krupnooblomochnykh gruntov na ikh fiziko-mekhanicheskiye svoystva.* [The influence of the composition of coarse-grained soils in their physical and mechanical properties]. *Trudy Soyuzdornii* [Proceedings of the Soyuzdornii], issue 80, pp. 107–128.
20. Kaluzhsky L. A., Batrakov O. P. 1971, *Uplotneniye zemlyanogo polotna i dorozhnykh odezhd* [Compaction of subgrade and road pavement], Moscow, 158 p.
21. Avakyan L. A. 1966, *Uplotneniye krupnooblomochnykh gruntov trambovaniyem i vibratsiyey* [Compaction of coarse-grained soils compaction and vibration]. *Izv. TNISGEI* [Bulletin of Tbilisi Research Institute of buildings and hydropower], vol. 16 (50), pp. 409–413.

The article was received on April 2, 2018