

DOI: 10.26730/1999-4125-2019-4-23-28

УДК 622.012.3:625.072

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РАЗДРОБЛЕННЫХ ГОРНЫХ ПОРОД ДЛЯ СТРОИТЕЛЬСТВА ПОКРЫТИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ДОРОГ

THE USE OF FRAGMENTED ROCKS FOR THE CONSTRUCTION OF ROAD SURFACES

Шаламанов Виктор Александрович,

доктор техн. наук, профессор, email: sva@kuzstu.ru

Victor A. Shalamanov, Dr. Sc. in Engineering, professor

Шабаев Сергей Николаевич,

канд. техн. наук, доцент, e-mail: shabaev81@rambler.ru

Sergey N. Shabaev, C.Sc. in Engineering, 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, Vesennyaya St., Kemerovo, 650000, Russian Federation

Аннотация:

Открытым способом в Кузбассе в 2019 году будет добыто более 150 млн. т. угля и попутно разрушено более 1млрд. т. углевещающих горных пород, которые вывезут в отвалы и частично складировуют на землях сельскохозяйственного назначения. Для перемещения горной массы используется автомобильный транспорт (65% перевозок) , в общих затратах на добычу угля транспортные расходы доходят до 70%. Традиционно применяемые цементобетоны и асфальтобетоны для строительства временных технологических дорог использовать нецелесообразно с экономической точки зрения, а применение раздробленных горных пород позволит снизить затраты на добычу угля и улучшить экологическую ситуацию в регионе. Вопрос использования раздробленных пород, получаемых при добыче угля, для строительства покрытий технологических дорог еще недостаточно изучен.

В работе на основе теоретических исследований оптимальной структуры зернистых материалов с учетом теории вероятности упаковки частиц обоснован оптимальный гранулометрический состав раздробленных пород в случае использования их для устройства покрытий технологических автомобильных дорог.

Для обеспечения работоспособности дорожных одежд технологических дорог, сооружаемых из раздробленных горных пород в течение заданного срока службы, помимо гранулометрического состава обоснованы и другие физико-механические характеристики, основные из которых – марки по дробимости и морозостойкости.

Установлено, что показатели дробимости в водонасыщенном состоянии нелинейно возрастают с увеличением скорости распространения продольных ультразвуковых волн. Доказано, что крупнозернистые песчаники могут использоваться для устройства оснований технологических дорог без ограничений, а для покрытий – при скорости распространения продольных ультразвуковых волн не менее 3600 м/с. Среднезернистые и мелкозернистые песчаники, а также мелкозернистые алеволиты могут применяться для устройства оснований технологических дорог, если скорость распространения продольных ультразвуковых волн в них составляет не менее 3500 м/с. Установлено, что требуемая марка по морозостойкости песчаников и алеволитов линейно возрастает с увеличением срока службы технологических дорог и составляет для условий Кузбасса F15 при сроке службы до 2 лет, F25 – от 2 до 3 лет, F50 – от 3 до 7 лет и F100 – более 7 лет.

Ключевые слова: Раздробленная порода; технологическая дорога; покрытие; основание; гранулометрический состав; дробимость; морозостойкость.

Abstract:

In 2019, in Kuzbass more than 150 million tons of coal will be extracted by the open-pit mining and more than 1 billion tons of carboniferous rock will be disturbed and transported to dumps and partially stored on agricultural lands. Motor vehicles are used to move the rock mass (65% of transportation), in the total cost of coal mining transportation costs amount to 70%. The cement concrete and asphalt concrete traditionally used for the construction of temporary technological roads are not economically feasible to use, and the use of fragmented overburden rocks will reduce the cost of coal mining and improve the ecological situation in the region. The issue of using crushed rocks from coal mining for the construction of coatings on technological roads has not yet been studied sufficiently. Based on theoretical studies of the optimal structure of granular materials and taking into account the theory of the probability of particle packing, the optimal particle size distribution of fragmented rocks is substantiated for the use in the construction of technological roads.

To ensure the performance of technological road pavements constructed from crushed rocks during the specified service life, in addition to particle size distribution, other physical and mechanical characteristics are justified, the main of which are grades of crushing and frost resistance. It has been established that crushability indices in a water-saturated state increase non-linearly with an increase in the propagation velocity of longitudinal ultrasonic waves. It has been proved that coarse-grained sandstones can be used to lay the foundations of technological roads without restrictions, and for coatings - with the propagation velocity of longitudinal ultrasonic waves of at least 3600 m/s. Medium-grained and fine-grained sandstones, as well as fine-grained siltstones can be used to lay the foundations of technological roads, if the propagation velocity of longitudinal ultrasonic waves in them is at least 3500 m/s. It has been established that the required grade for frost resistance of sandstones and siltstones increases linearly with increasing service life of technological roads and for the conditions of Kuzbass F15 with a service life of up to 2, F25 - from 2 to 3, F50 - from 3 to 7 and F100 - more than 7 years.

Key words: *Fragmented rock; technological road; coating; base; grading; crushability; frost resistance.*

Покрытие – один из важнейших элементов дорожной одежды автомобильных дорог, от состояния которого во многом зависят средняя скорость движения автотранспорта и, соответственно, его производительность. Учитывая, что транспортные затраты составляют от 40 до 70% от общих затрат, повышение качества покрытия – один из основных способов снижения себестоимости добычи полезных ископаемых открытым способом [1]. Анализ опыта работы разрезов в Кузбассе и информация, полученная из опубликованных научных исследований [2 – 3], показали, что при строительстве технологических дорог асфальтобетон и цементобетон применять экономически нецелесообразно, лучшим материалом при строительстве таких дорог являются раздробленные горные породы, которые получены в процессе добычи угля. Несмотря на то, что в качестве раздробленных горных пород для устройства покрытий дорожных одежд могут применяться только плотные щебеночно-гравийно-песчаные смеси (раздробленные горные породы заданного гранулометрического состава), на практике проектные организации продолжают закладывать в проектной документации в качестве материала покрытия как однофракционный щебень, так и щебень, устроенный по методу заклинки, однако это приводит к быстрому разрушению подобных конструктивных слоев и, следовательно, к низкой эффективности эксплуатации автотранспорта, что требует более глубокого изучения вопроса по эффективному применению раздробленных горных пород для строительства покрытий технологических автомобильных дорог. Одним из основных нерешенных вопросов эффективного их применения остается подбор

оптимального гранулометрического состава.

Проведенный нами обзор ранее выполненных исследований [2 – 3] позволил установить, что для создания оптимального гранулометрического состава раздробленная горная порода должна состоять из различных по крупности частиц, обладать повышенной объемной массой и незначительной интенсивностью раздробления. Данные условия могут быть достигнуты при максимально возможном количестве крупных частиц и минимально необходимом для создания высокой объемной массы и обеспечении связности крупных частиц содержании мелких и пылеватых частиц. Данные выводы с учетом основных теоретических положений, изложенных в работах [2 – 3], были положены в основу теоретической модели оптимальной упаковки разноразмерных частиц. Суть ее состоит в том, что самый крупный компонент и прилегающее к нему пространство рассматриваются как элементарная область (ограниченная дискретная структура), из совокупности которой состоит макроструктура. В пределах дискретной структуры формируем свободное пространство, состоящее из пустых ячеек, имеющих размер достаточный для дискретизации самых мелких компонентов, входящих в состав раздробленной горной породы. В центральную часть области вписываем самый крупный компонент и далее путем неоднократного случайного выбора местоположения центра тяжести компонента, имеющего средний диаметр частиц $D_{max}/2$, пытаемся вписать данный компонент до наибольшего возможного заполнения дискретной структуры и процесс повторяется. Таким образом,

Таблица 1. Подобранные гранулометрические составы раздробленных горных пород
 Table 1. Selected particle size distribution of crushed rocks

№ смеси	Полный остаток, %, на ситах размером, мм:					
	10	5	2.5	0.63	0.16	0.05
1	9.70	24.09	33.08	48.91	56.64	71.83
2	12.93	28.91	46.90	55.70	66.86	77.47
3	33.95	48.33	61.82	61.82	81.14	85.48
4	48.50	58.09	62.58	66.54	69.63	80.92
5	29.10	43.48	61.47	69.39	77.11	83.63
6	19.40	38.58	52.07	67.90	79.49	83.83
7	38.80	57.98	66.97	66.97	86.29	88.46
8	58.19	72.58	81.57	89.49	93.35	93.35
9	48.50	58.09	67.08	75.00	78.86	85.37
10	58.19	67.79	76.78	80.74	83.06	88.26

Таблица 2. Результаты теоретических исследований оптимального гранулометрического состава раздробленных горных пород
 Table 2. The results of theoretical studies of the optimal particle size distribution of fragmented rocks

Диаметр компонента, мм	D_{max}	$D_{max}/2$	$D_{max}/4$	$D_{max}/8$	$D_{max}/16$	$D_{max}/32$	$D_{max}/64$	$D_{max}/128$	$D_{max}/256$	$D_{max}/512$	$D_{max}/1024$	$D_{max}/2048$	$D_{max}/4096$	$D_{max}/8192$
Суммарное содержание компонентов (полный остаток), % по объему	52.4	58.95	64.68	71.12	74.97	77.71	80.66	83.43	85.76	87.87	89.61	91.03	92.31	93.07

в дискретную структуру сначала вписываем компонент, имеющий средний диаметр частиц D_{max} , затем пытаемся все оставшееся свободно пространство заполнить компонентом, имеющим средний размер частиц $D_{max}/2$, далее аналогичные операции производим с компонентом, имеющим средний диаметр частиц $D_{max}/4$, и так далее.

Чтобы проверить адекватность теоретической модели для раздробленных горных пород различного гранулометрического состава, были проведены лабораторные определения зависимости объемной массы и статического модуля упругости, расчетным путем были определены предельные сопротивления сдвигу этих же горных пород. Все лабораторные исследования производились на пробах раздробленных горных пород различного гранулометрического состава, представленного в таблице 1.

Предложенная теоретическая модель была реализована методом компьютерного моделирования. Полученные суммарные компоненты в % по объему мы привели в таблице 2.

Полученные результаты позволили установить теоретическую зависимость, характеризующую оптимальный гранулометрический состав раздробленных горных пород:

$$V_D = 52.4 + \int_D^{0.5D_{max}} f \left(\frac{30}{(D_{max}+25)^{0.5} + 1.84} \right) dD,$$

где V_D – суммарное содержание по объему i -го компонента и всех предыдущих более крупных компонентов, %;

D – средний диаметр частиц i -го компонента, мм;

D_{max} – средний диаметр частиц самого крупного компонента, мм.

Для обеспечения работоспособности покрытий дорожных одежд технологических дорог, сооружаемых из раздробленных горных пород в течение заданного срока службы помимо гранулометрического состава, также должны быть обоснованы и другие физико-механические характеристики, основные из которых – марки по дробимости, истираемости, водостойкости и морозостойкости [11-13].

Марка по дробимости на раздавливание в цилиндре – основная прочностная характеристика раздробленных горных пород, характеризующая интенсивность процесса измельчения зерен в процессе эксплуатации карьерных автомобильных дорог. По опыту эксплуатации автомобильных дорог общего пользования определены минимально допустимые марки по дробимости раздробленных горных пород, составляющие не ниже М600 для

Таблица 3. Безразмерные коэффициенты функции отклика
Table 3. Dimensionless response function coefficients

Краткая характеристика пород	<i>x</i>	<i>y</i>	<i>z</i>
Песчаники среднезернистые массивной текстуры	48.08	-0.0376	0.00000987
Песчаники крупнозернистые массивной текстуры	-13.71	0.00214	0.0000052
Алевролиты мелкозернистые массивной текстуры	106.81	-0.072	0.000015

покрытий и М400 для оснований.

В нашем университете были проведены многочисленные исследования физико-технических характеристик горных пород Кузнецкого угольного бассейна [14-15], статистическая и математическая обработка которых позволила установить зависимость между маркой по дробимости раздробленных горных пород в водонасыщенном состоянии и скоростью распространения в них продольных ультразвуковых волн :

$$M = 9.81 \cdot (x + y \cdot V_p + z \cdot V_p^2),$$

где *M* – марка по дробимости раздробленной горной породы в водонасыщенном состоянии;

x, *y*, *z* – безразмерные коэффициенты функции отклика, зависящие от типа и разновидности горной породы (таблица 3);

V_p – скорость распространения продольной ультразвуковой волны, м/с.

Анализ полученной зависимости показывает, что крупнозернистый песчаник может применяться без ограничений для устройства оснований, а для устройства покрытий – при скорости распространения продольных ультразвуковых волн более 3600 м/с. Среднезернистый песчаник и мелкозернистые алевролиты практически не пригодны для устройства покрытий и могут применяться только для устройства оснований при скорости распространения продольных ультразвуковых волн более 3500 м/с.

Марка по истираемости – дополнительная характеристика раздробленных горных пород, характеризующая их изнашиваемость (истираемость) под действием нагрузок от карьерного автотранспорта. Важность данного показателя определяется падением несущей способности конструктивного слоя с увеличением содержания мелких пылевидных частиц и ростом запыленности воздуха рабочей зоны. Нормативным документом [13] установлены требования к минимальной марке по истираемости раздробленных горных пород, составляющей не ниже И3 для покрытий и И4 для оснований.

Одной из нормируемых физических характеристик является марка по морозостойкости, характеризующая число циклов попеременного замораживания и оттаивания, которое может выдержать раздробленная горная порода при потере массы не более 5 (10)%. Важность данного показателя определяется необходимостью ограничения образования каменной мелочи в течение срока службы дорожной одежды, влияющей, как было отмечено выше, на снижение несущей способности

конструктивного слоя. Требования к данному показателю должны определяться прежде всего на основе анализа погодных-климатических условий района строительства. Так, по данным статистических наблюдений метеостанций Кемеровской области было установлено кумулятивное число циклов попеременного замораживания и оттаивания верхних слоев грунта на глубину 10 см в течение 16 лет наблюдений, что позволило выявить зависимость требуемой марки по морозостойкости раздробленных горных пород в зависимости от расчетного срока службы технологических автомобильных дорог:

$$F_{req} = f_{year} \cdot T_{empl}$$

где *F_{req}* – требуемая марка по морозостойкости;

f_{year} – коэффициент уравнения линейной регрессии, численно равный среднему арифметическому числу циклов замораживания и оттаивания слоев покрытия в течение одного года, полученного по результатам наблюдений за 10–15 лет (для Кемеровской области *f_{year}* = 7);

T_{empl} – срок службы технологических автомобильных дорог, лет.

Требуемая марка по морозостойкости песчаников и алевролитов линейно возрастает с увеличением срока службы технологических дорог и составляет для условий Кузбасса F15 при сроке службы до 2 лет, F25 – от 2 до 3 лет, F50 – от 3 до 7 лет и F100 – более 7 лет. Полученная зависимость позволяет обоснованно назначать требуемые марки по морозостойкости раздробленных горных пород, применяемых для устройства покрытий дорожных одежд технологических автомобильных дорог.

Еще одним важным физическим показателем является требуемая марка по водостойкости, характеризующая потерю массы раздробленной горной породы под действием воды [13]. Данный показатель так же, как и марка по морозостойкости, ограничивает возможное образование каменной мелочи, снижающей несущую способность конструктивных слоев дорожной одежды. По опыту эксплуатации автомобильных дорог общего пользования регламентированы требуемые значения марки по водостойкости [13], которые должны быть не ниже В1 для раздробленных горных пород, применяемых для устройства покрытий, и В2 – для оснований.

Выводы

1. Проведенные теоретические и лабораторные исследования позволили установить теоретическую зависимость, характеризующую оптимальный гранулометрический состав раздробленных горных пород:

2. Марка по дробимости раздробленных горных пород в водонасыщенном состоянии нелинейно возрастает с увеличением скорости распространения продольных ультразвуковых волн. Крупнозернистые песчаники могут использоваться для устройства оснований автомобильных дорог без ограничений, а для покрытий – при скорости распространения продольных ультразвуковых волн не менее 3600 м/с. Среднезернистые и

мелкозернистые песчаники, а также мелкозернистые алевриты могут применяться для устройства оснований технологических дорог, если скорость распространения продольных ультразвуковых волн в них составляет не менее 3500 м/с.

3. Требуемая марка по морозостойкости раздробленных горных пород линейно возрастает с увеличением срока службы технологических дорог и составляет для условий Кузбасса F15 при сроке службы до 2 лет, F25 – от 2 до 3 лет, F50 – от 3 до 7 лет и F100 – более 7 лет.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Арефьев, С.А. Оценка и обоснование рациональных дорожных условий эксплуатации карьерных автосамосвалов большой грузоподъемности : дисс. на соиск. уч. ст. канд. техн. наук. – Екатеринбург, 2015. – 179 с.
2. Афиногенов, О.П. Карьерные автомобильные дороги : совершенствование методов проектирования земляного полотна и дорожных одежд / О.П. Афиногенов, В.А. Шаламанов, С.Н. Шабаетв, А.О. Афиногенов. – Кемерово : ООО «Офсет», 2015. – 222 с.
3. Шабаетв, С.Н. Обоснование конструктивных параметров технологических дорог угольных разрезов из вскрышных пород на основе рационализации их гранулометрического состава : дисс. на соиск. уч. ст. канд. техн. наук. – Кемерово, 2009. – 132 с.
4. Chernobai V.I. Development and characterization of formulation of dust-suppressant used for stoqe road in open-pit mines // Journal of Coal Science and Engineering (China). – 2013 (June). - Volume 19. - Issue 2. - pp 219-225.
5. 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. - Volume 33. - Issue 1. - Pages 1007-1012.
6. Perspectives of technogenic raw stuff and nanomodifiers at career roads building / A.A. Khristoforova, M.D. Sokolova, S.E. Filippov, S.M. Semenova, I.N. Gogolev // Chemical technologies and nanomaterials. The materials of the international conference ; North-Eastern Federal University named after M.K. Ammosov. - 2014. - С. 41-46.
7. Prospects for modified bitumen in construction of semi-steep pit roads / A.A. Khristoforova, M.D. Sokolova, B. N. Zarovnyaev, A. N. Akishev // Mining Journal. - 2016. - Т. 3. - С. 47.
8. 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. - Volume 189. - Pages 666-672.
9. Sara L. Jackson. Dusty roads and disconnections: Perceptions of dust from unpaved mining roads in Mongolia's South Gobi province // Geoforum. – 2015. - Volume 66. - Pages 94-105.
10. Barry Kinga, Marcos Goycoolea, A. Newman. Optimizing the open pit-to-underground mining transition // European Journal of Operational Research. – 2017. - Volume 257. - Pages 297-309.
11. ГОСТ 8267-93*. Щебень и гравий из плотных горных пород для строительных работ. Технические условия. – М.: Изд-во стандартов, 1995. – 18 с.
12. СП 37.13330.2012. Промышленный транспорт. Актуализированная редакция СНиП 2.05.07-91* (с Изменением № 1). – М., 2012.
13. СП 34.13330.2012. Автомобильные дороги. Актуализированная редакция СНиП 2.5.02-85*. – М., 2012.
14. Штумпф, Г.Г. Физико-технические свойства горных пород и углей Кузнецкого бассейна : Справочник. / Г.Г. Штумпф [и др.]. – М. : Недра, 1994. – 447 с.

15. Паначев, И.А. Особенности открытой добычи и переработки углей сложноструктурных месторождений Кузбасса / И.А. Паначев [и др.]. – Кемерово : Кузбассвуиздат, 1997. – 220 с.

REFERENCES

1. Arefiyev, S.A. Evaluation and justification of rational road conditions for the operation of heavy duty dump trucks: PhD diss. – Yekaterinburg, 2015. – 179 p.
2. Afinogenov, O.P. Career motorways: improving the methods of designing the roadbed and road surfacing / O.P. Afinogenov, V.A. Shalamanov, S.N. Shabaev, A.O. Afinogenov. – Kemerovo: ООО «Ofset», 2015. – 222 p.
3. Shabaev, S.N. Substantiation of constructive parameters of overburden haul roads of coal open-pit mines based on the rationalization of their granulometric composition: PhD diss. – Kemerovo, 2009. – 132 p.
4. 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). - Volume 19. - Issue 2. – pp. 219-225.
5. 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. - Volume 33. - Issue 1. – pp. 1007-1012.
6. Perspectives of technogenic raw stuff and nanomodifiers at career roads building / A.A. Khristoforova, M.D. Sokolova, S.E. Filippov, S.M. Semenova, I.N. Gogolev // Chemical technologies and nanomaterials. The materials of the international conference; North-Eastern Federal University named after M.K. Ammosov. - 2014. - pp. 41-46.
7. Prospects for modified bitumen in construction of semi-steep pit roads / A.A. Khristoforova, M.D. Sokolova, B. N. Zarovnyaev, A. N. Akishev // Mining Journal. - 2016. - Volume 3. - pp. 47.
8. 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. - Volume 189. – pp. 666-672.
9. Sara L. Jackson. Dusty roads and disconnections: Perceptions of dust from unpaved mining roads in Mongolia's South Gobi province // Geoforum. – 2015. - Volume 66. – pp. 94-105.
10. Barry Kinga, Marcos Goycoolea, A. Newman. Optimizing the open pit-to-underground mining transition // European Journal of Operational Research. – 2017. - Volume 257. – pp. 297-309
11. State Standard 8267-93*. Dense rock crushed stone and gravel for construction works. Technical specifications. – Moscow: Standard publisher's house, 1995. – 18 p.
12. Design and construction specifications 37.13330.2012. Industrial transport. Updated version of Construction codes and regulations 2.05.07-91* (amendment № 1 included). – Moscow, 2012.
13. Design and construction specifications 34.13330.2012. Motorways. Updated edition of Construction codes and regulations 2.5.02-85*. – Moscow, 2012.
14. Shtumpf, G.G. Physical and technical properties of rocks and coals of the Kuznetsk basin: Handbook. / G.G. Shtumpf et al. – Moscow: Nedra, 1994. – 447 p.
15. Panachev, I.A. Peculiarities of open-pit mining and processing of coals of complex-structural deposits of Kuzbass / I.A. Panachev et al. – Kemerovo: Kuzbassvuzizdat, 1997. – 220 p.

Поступило в редакцию 07.10.2019
Received 07 October 2019