

УПРАВЛЕНИЕ СОСТОЯНИЕМ ЗАКЛАДОЧНОГО МАССИВА ПОСРЕДСТВОМ ПРИМЕНЕНИЯ ПРОДУКТОВ ПЕРЕРАБОТКИ ОТРАБОТАННЫХ ПОКРЫШЕК

Е.А. Ермолович, Н.М. Качурин, О.В. Ермолович

Исследуется влияние использования резинового порошка из отработанных покрышек на состояние закладочного массива. Относительные изменения прочностных характеристик и трещиностойкости от содержания резиновых частиц носят экстремальный характер и хорошо аппроксимируются полиномиальными функциями четвертого и третьего порядков. Достоверность аппроксимации составляет 0,89-0,9995. Анализ полученных данных показывает, что увеличение прочности массива на растяжение (31 – 33 %) и трещиностойкости (18 – 30 %) наблюдается при введении в него 7 – 9 % от массы вяжущего резинового порошка, при этом уменьшая относительную деформацию усадки примерно до 40 %. Однако исследованиями установлено, что содержание резинового порошка более 7 % не рекомендуется из-за снижения прочности на сжатие.

Ключевые слова: твердеющий закладочный массив, резиновый порошок, изношенные шины, прочностные свойства

Под управлением состоянием любого массива, в том числе искусственного, прежде всего, понимается управление геомеханическими процессами в нем. К управлению геомеханическими процессами относятся также мероприятия по целенаправленному изменению свойств массива с целью повышения его устойчивости. Заполнение очистного пространства твердеющей закладкой позволяет в 2 – 2,5 раза уменьшить интенсивность проявления горного давления, сохранить, а в ряде случаев и увеличить размеры камер, а размеры рудных целиков уменьшить с глубиной [1]. В случае применения твердеющей закладки управление геомеханическими процессами кроется в определении оптимальных параметров закладочных массивов (прочностных и деформативных свойств, трещиностойкости, а также состава, в том числе с точки зрения снижения вредных воздействий на окружающую среду).

Существенное улучшение упомянутых характеристик закладочных композиционных материалов, формирующих искусственный массив, может быть достигнуто применением в качестве структурообразующих фаз промышленных отходов – продуктов переработки автомобильных шин, которые являются наиболее крупными и многотонажными отходами резины. Более 1,5 миллиарда шин производятся во всем мире в год. Это приводит к загрязнению окружающей среды [2].

Вопрос утилизации отработанных покрышек от карьерных автосамосвалов и другой пневмоколесной техники весьма актуален для горного производства. Как правило, отработанные покрышки складываются под

открытым небом, занимая огромные территории. В других случаях их складывают совместно с вмещающими породами или с хвостами обогащения фабрик в отвалы. Иногда отработанные покрышки просто сжигают. При горении в атмосферу и почву выбрасывается огромное количество вредных и токсичных веществ [3].

Хорошим альтернативным способом утилизации отработанных покрышек является использование резиновой крошки в бетонах. Большинство исследователей вводили этот продукт в качестве крупного заполнителя [4 – 6]. Также некоторые авторы отметили, что предел прочности на сжатие прорезиненного бетона уменьшается с увеличением содержания в нем резиновых отходов [7 – 11]. Из-за значительного снижения прочности содержание резины более 25 % не рекомендовано [11 – 12].

Все упомянутые исследования проводились на классическом бетоне. Закладочные композиции отличаются от таковых общего строительного назначения следующими основными особенностями: они должны транспортироваться по трубам на максимальные расстояния (несколько км), быть максимально дешевыми, обеспечивать при этом устойчивость под действием знакопеременных нагрузок и минимальные относительные деформации усадки. Так как закладочный массив формируется из тощего бетона с большим водотвердым отношением, оптимальное количество резиновых добавок и связанные с этим изменения свойств могут не соответствовать параметрам, установленным для классического бетона.

Исследованиями, связанными с утилизацией резинокордовых отходов непосредственно в закладку выработанного пространства путем измельчения полученной резинокордовой крошки и последующего добавления в качестве частичного заполнителя в закладочную смесь, успешно занимались российские ученые [3, 13]. Однако основной акцент был сделан на технологию получения резинокордовой крошки с размером частиц около 4 мм, а не на управление свойствами закладочного массива, кроме изучения динамики снижения прочности закладки на составах с 20, 25, 30 и 35 % содержанием резинокордовой крошки и песком в качестве заполнителя.

Целью данной работы было изучение изменения прочностных и деформативных свойств, а также трещиностойкости закладочного массива на основе отходов обогащения железистых кварцитов от содержания резинового порошка (средний размер частиц 225 мкм) из продуктов переработки отработанных шин для управления его состоянием.

При проведении экспериментов были изготовлены 7 серий модели искусственного массива по 9 – 18 образцов в каждой серии с содержанием от 0 до 10 % (от массы вяжущего вещества) резинового порошка.

Прочности на сжатие и растяжение определялись с использованием электронной испытательной машины Инстрон 5882. Прочность на растяжение устанавливалась методом раскалывания и при изгибе. Значения прочности при растяжении, полученные методом раскалывания очень близко совпадают со значениями прочности при осевом растяжении [14].

Относительная деформация усадки определялась на образцах размером 40x40x160 мм, которые твердели 90 суток в нормальных условиях согласно ГОСТ 10180-2012. После суток твердения на торцевые поверхности всех образцов, предназначенных для определения усадки, наклеивались металлические пластины толщиной 2,3 мм с помощью клея в соответствии с ГОСТ 24544-81 «Бетоны. Методы определения деформации усадки и ползучести». Проведение испытаний проводили на устройстве по п.2.2. в соответствии с ГОСТ 24544-81. Усадка определялась индикатором часового типа ИЧ-0,1.

На основе регрессионных математических моделей были установлены закономерности влияния промышленных отходов на изменения разрушающих усилий для прогнозирования и управления свойствами закладочного массива. Исследования показали, что относительные изменения прочностных характеристик от содержания резинового порошка носят экстремальный характер (рис. 1, 2) и хорошо аппроксимируются полиномиальными функциями третьего и четвертого порядков:

$$\begin{aligned}\sigma_{сж0} &= -0,164C^3 + 1,8017C^2 - 6,0215C + 99,705, \\ \sigma_{ро} &= -0,1009C^4 + 0,6293C^3 - 7,1696C^2 + 9,61C + 100,02,\end{aligned}$$

где $\sigma_{сж0}$ – относительные изменения предела прочности на сжатие, %; $\sigma_{ро}$ – относительные изменения предела прочности на растяжение, %; C – содержание резинового порошка, % от вяжущего.

Каждая точка на графиках данных и последующих зависимостей получена, как среднее из 3 – 6 измерений. Достоверность аппроксимации $R^2 = 0,8905$ и $R^2 = 0,9995$ соответственно.

Исследованию физико-механических свойств закладочных композитов в научной литературе уделяется достаточно внимания. Однако, как правило, в работах отсутствуют данные определения трещиностойкости искусственного массива, характеризующей сопротивление закладки разрушению при совместном воздействии знакопеременных растягивающих и сжимающих усилий.

Косвенно о трещиностойкости материалов можно судить по коэффициенту трещиностойкости $K_{тр}$ из соотношения [15]:

$$K_{тр} = \frac{\sigma_{изг}}{\sigma_{сж}},$$

где $\sigma_{сж}$ – предел прочности на сжатие, МПа; $\sigma_{изг}$ – предел прочности на растяжение при изгибе, МПа.

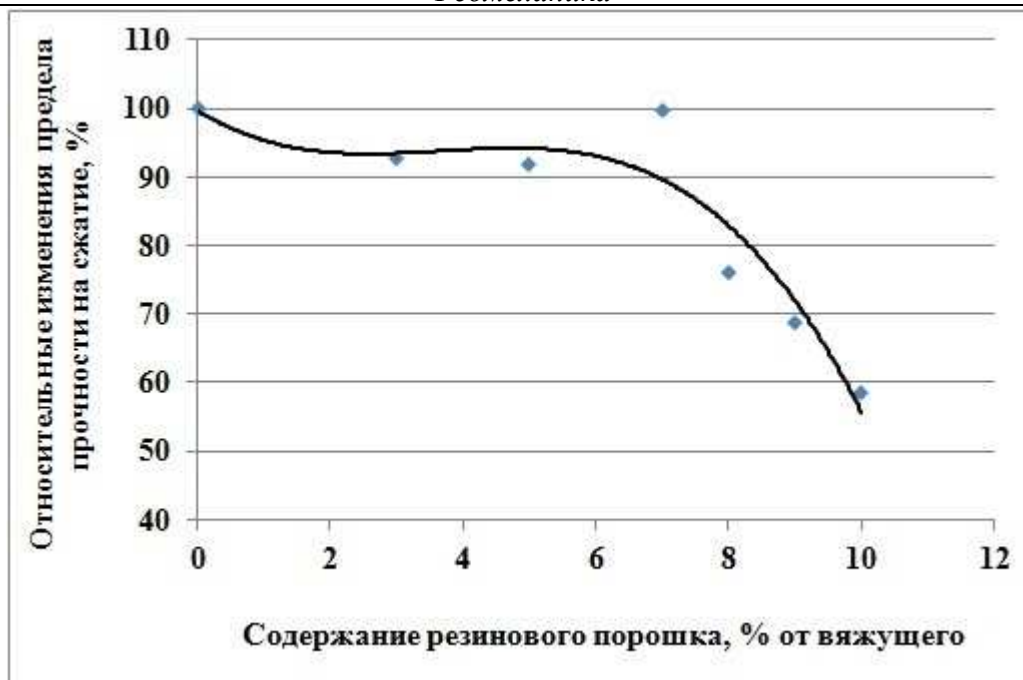


Рис. 1. График зависимости относительных изменений предела прочности закладочного массива на сжатие от содержания резинового порошка

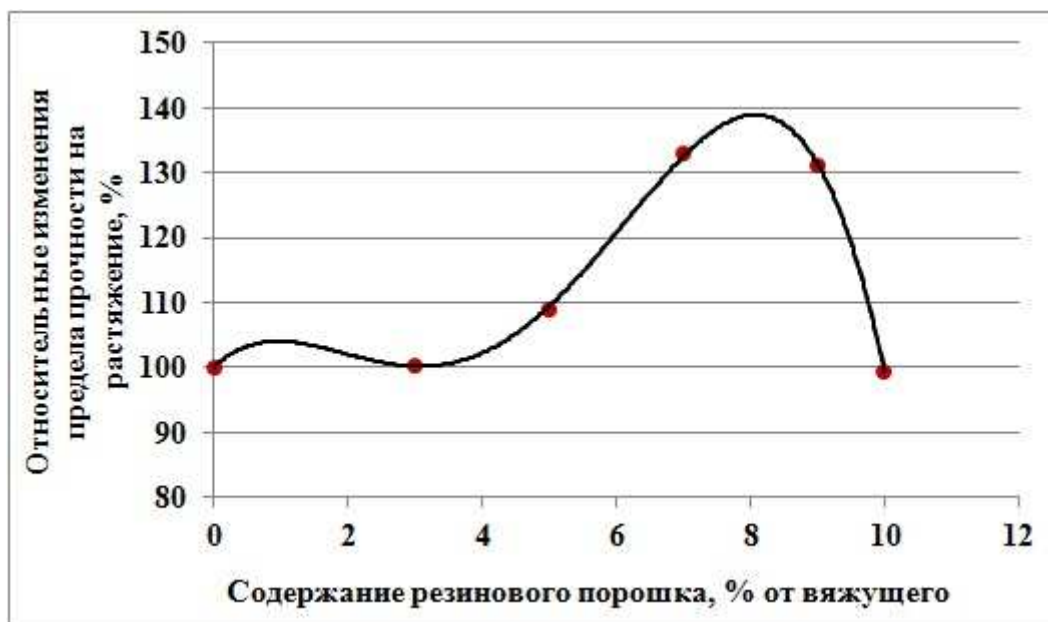


Рис. 2. График зависимости относительных изменений предела прочности закладочного массива на растяжение от содержания резинового порошка

Относительные изменения трещиностойкости закладочного массива от содержания резинового порошка (рис. 3) хорошо аппроксимируются полиномиальной функцией третьего порядка:

$$K_{\text{тро}} = -0,2561C^3 + 3,0319C^2 - 4,14C + 99,02.$$

где $K_{\text{тро}}$ – относительные изменения коэффициента трещиностойкости, %;

C – содержание резинового порошка, % от вяжущего.

Достоверность аппроксимации $R^2 = 0,8941$.



Рис. 3. График зависимости относительных изменений трещиностойкости закладочного массива от содержания резинового порошка

По результатам исследований деформативных свойств закладочного массива была установлена линейная зависимость изменения относительной деформации его усадки от содержания в нем резинового порошка (рис. 4):

$$\Delta = -0,0176C + 0,3871,$$

где Δ – относительная деформация усадки, %; C – содержание резинового порошка, % от вяжущего.

Достоверность аппроксимации $R^2 = 0,9778$.

Анализ полученных экспериментальных данных показывает, что действительно при введении резинового порошка наблюдается тенденция потери прочности искусственного массива на сжатие. Незначительное уменьшение прочности до 7 % при содержании порошка до 7 % от вяжу-

щего (1 % по массе) увеличивается до 40 % при содержании порошка 10 %. Одновременно увеличивается прочность на растяжение при содержании порошка до 9 % от вяжущего. Снижение прочности на сжатие объясняется более слабым сцеплением частиц резинового порошка с цементной матрицей и наличием пористой межфазной зоной, чем, например, при минеральных заполнителях. Увеличение предела прочности на растяжение связано с тем, что частицы резины предотвращают раскрытие трещин, что хорошо демонстрирует рис. 5 [16].

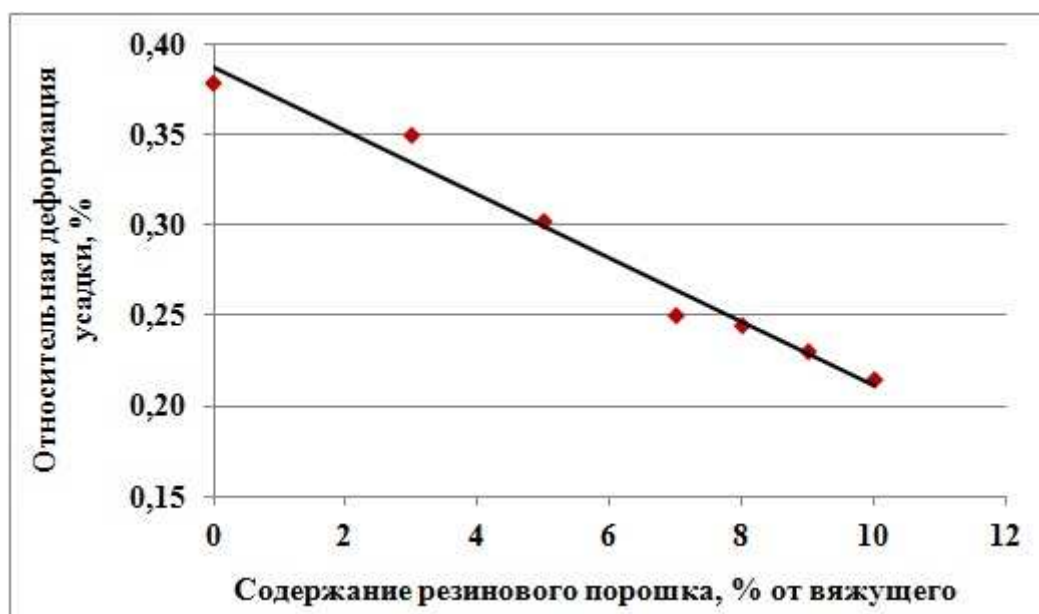


Рис. 4. График зависимости изменений относительной деформации усадки закладочного массива от содержания резинового порошка

Относительная деформация усадки с увеличением содержания резинового порошка уменьшается на 43 %. Трещиностойкость массива увеличивается на 30 % при его содержании 6...8 %.

Выполненные исследования доказывают, что продукты переработки отработанных покрышек могут быть использованы при управлении массивом с закладкой пустот твердеющими смесями и позволяют с высокой вероятностью прогнозировать положительный эффект от размещения в формируемом массиве резинового порошка в оптимальном количестве 7 % от массы вяжущего вещества одновременно с твердеющей смесью. Это будет способствовать сохранению массивом достаточной несущей способности, исключая опасные динамические проявления в выработках и опасные деформации на подработанных территориях.

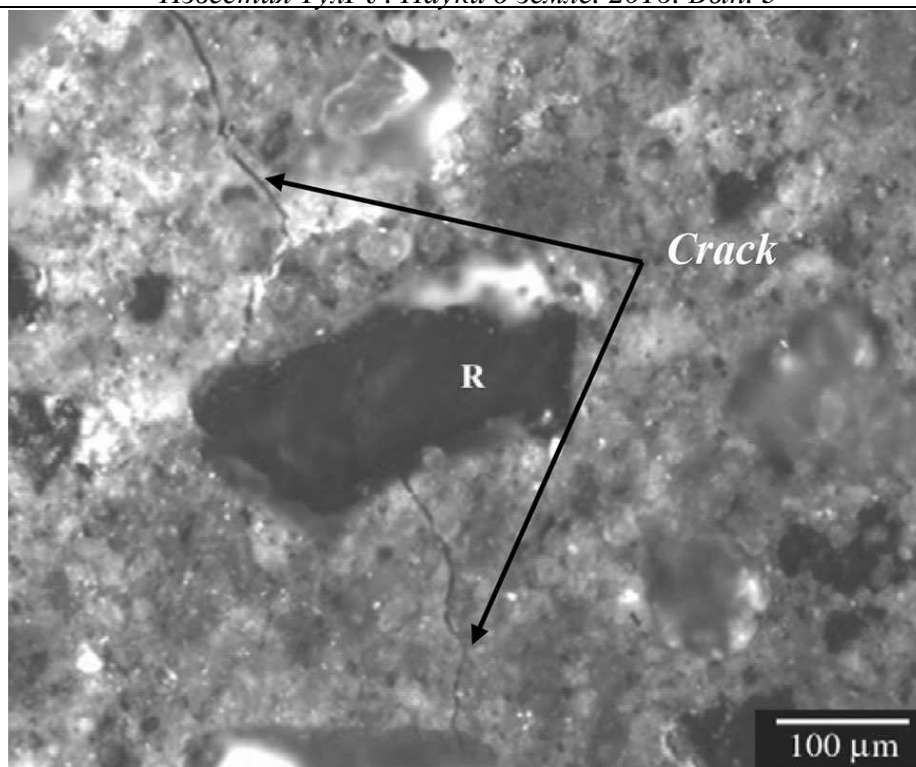


Рис. 5. Предотвращение раскрытия трещины частицей резиновой крошки [16]

Исследования выполнены с применением оборудования Центра коллективного пользования научным оборудованием НИУ «БелГУ» «Диагностика структуры и свойств наноматериалов» при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-05-00044.

Список литературы

1. Волощенко В.П. Перспективы управления горным давлением на глубоких горизонтах: сб. науч. тр. /НИГРИ. Кривой Рог: Изд-во НИГРИ, 1990. С. 67 – 71.
2. Karakurt C. Microstructure properties of waste tire rubber composites: an overview // Journal of Material Cycles and Waste Management. 2015. Vol. 17. P. 422 – 433.
3. Тишков М.В. Утилизация резинокордовых материалов в закладку // ГИАБ. 2006. № 6. С. 296 – 303.
4. Herná́ndez-Olivares F., Barluenga G. Fire performance of recycled rubber-filled high-strength concrete // Cement and Concrete Research. 2004. Volume 34. P. 109-117. doi:10.1016/S0008-8846(03)00253-9
5. Ganjian E., Khorami M., Maghsoudi A. Scrap-tire-rubber replacement for aggregate and filler in concrete // Construction And Building Materials. 2009. Vol. 23. P. 1828 – 1836.

6. Bravo M., De Brito J. Concrete made with used tyre aggregate: durability-related performance // *Journal of Cleaner Production*. 2012. Vol. 25. P. 42 – 50.
7. Khatib Z.K., Bayomy F.M. Rubberized Portland cement concrete // *ASCE Journal of Materials in Civil Engineering*. 1999. Volume 11. P. 206 – 213.
8. Eldin N.N., Senouci A.B. Rubber-tire particles as concrete aggregates // *ASCE Journal of Materials in Civil Engineering*. Vol. 5. P. 478 – 496.
9. Topçu I.B. The properties of rubberized concrete // *Cement and Concrete Research*. 1995. Vol. 25. P. 304 – 310.
10. Ho A.C., Turatsinze A., Hameed R., Vu D.C. Effects of rubber aggregates from grinded used tyres on the concrete resistance to cracking // *Journal of Cleaner Production*. 2012. Vol. 23. P. 209 – 215.
11. Khaloo A.R., Dehestani M., Rahmatabadi P. Mechanical properties of concrete containing a high volume of tire-rubber particles // *Waste Management*. 2008. Vol. 28. P. 2472 – 2482.
12. Issa C.A., Salem G. (2013) Utilization of recycled crumb rubber as fine aggregates in concrete mix design // *Construction And Building Materials*. 2013. Vol. 42. P. 48 – 52.
13. Савич И.Н., Тишков М.В. Формирование закладочных массивов и утилизация резинокордовых отходов // *ГИАБ*. 2007. № 5. С. 146 – 152.
14. Стольников В.В., Литвинова Р.Е. Трещиностойкость бетона. М.: Энергия, 1972. 113 с.
15. Комохов П.Г. Бетон: классика и современность [Электронный ресурс] // Популярное бетоноведение: [сайт]. [2008]. URL: <http://www.allbeton.ru/article/47/13.html> (дата обращения: 20.09.2013).
16. Segre N., Ostertag C., Monteiro P. Effect of tire rubber particles on crack propagation in cement paste // *Journal of Materials Research*. 2006. Vol. 9. P. 311 – 320.

Ермолович Елена Ахмедовна, д-р техн. наук, доц., проф., elena.ermolovich@mail.ru, Россия, Белгород, Белгородский государственный национальный исследовательский университет,

Качурин Николай Михайлович, д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой, ecology_tsu_tula@mail.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Ермолович Олег Вячеславович, председатель наблюдательного совета, oleg.ermolovich@mail.ru, Россия, Белгород, ООО «Торговый дом «Карина»

MANAGEMENT OF HARDENING FILLING MASS CONDITION THROUGH THE APPLICATION OF PRODUCTS FROM RECYCLED TIRES

E.A. Ermolovich, N.M. Kachurin, O.V. Ermolovich

This article investigates the effect of using rubber powder from recycled tires on hardening filling mass condition. Relative changes in the strength characteristics and crack resistance from rubber particles contents are extreme in nature and are well approximated by polynomial functions of the fourth and third orders. Reliability of approximation is 0,89-0,9995. Analysis of the data shows that an increase in the tensile strength of the mass (31 – 33 %) and crack resistance (18-30 %) is observed when a 7 – 9 % by weight of the binder of rubber powder is introduced, while reducing the relative deformation of shrinkage of about 40 %. However, it is founded that the content of rubber powder over 7 % is not recommended because of reduction in the compressive strength.

Key words: hardening filling mass, rubber powder, recycled tires, mechanical properties.

Ermolovich Elena Akhmedovna, doctor of technical sciences, docent, professor, elena.ermolovich@mail.ru, Russia, Belgorod, Belgorod National Research University,

Kachurin Nikolai Mikhailovich, doctor of technical sciences, professor, head of chair, ecology_tsu_tula@mail.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Ermolovich Oleg Vjacheslavovich, vice chairman of the supervisory board, oleg.ermolovich@mail.ru, Russia, Belgorod, LLC "Trading House "Karina"

Reference

1. Voloshhenko V.P. Perspektivy upravlenija gornym davleniem na glubokih gorizontah: sb. nauch. tr. /NIGRI. Krivoj Rog: Izd-vo NIGRI, 1990. S. 67-71.
2. Karakurt S. Microstructure properties of waste tire rubber composites: an overview // Journal of Material Cycles and Waste Management. 2015. Volume 17. P. 422-433. doi: 10.1007/s10163-014-0263-9
3. Tishkov M.V. Utilizacija rezinokordovyh materialov v za-kladku // GIAB. 2006. № 6. S. 296-303.
4. Hernáandez-Olivares F., Barluenga G. Fire performance of recycled rubber-filled high-strength concrete // Cement and Concrete Research. 2004. Volume 34. P. 109-117. doi:10.1016/S0008-8846(03)00253-9
5. Ganjian E., Khorami M., Maghsoudi A. Scrap-tire-rubber re-placement for aggregate and filler in concrete // Construction And Building Materials. 2009. Volume 23. P. 1828-1836. doi:10.1016/j.conbuildmat.2008.09.020
6. Bravo M., De Brito J. Concrete made with used tyre aggregate: durability-related performance // Journal of Cleaner Production. 2012. Volume 25. P. 42-50. doi:10.1016/j.jclepro.2011.11.066
7. Khatib Z.K., Bayomy F.M. Rubberized Portland cement concrete // ASCE Journal of Materials in Civil Engineering. 1999. Volume 11. P. 206-213. doi:10.1061/(ASCE)0899-1561(1999)11:3(206)
8. Eldin N.N., Senouci A.B. Rubber-tire particles as concrete aggregates // ASCE Journal of Materials in Civil Engineering. Volume 5. P. 478-496. doi:10.1061/(ASCE)0899-1561(1993)5:4(478)
9. Topçu I.B. The properties of rubberized concrete // Cement and Concrete Research. 1995. Volume 25. P. 304-310. doi:10.1016/0008-846(95)00014-3
10. Ho A.C., Turatsinze A., Hameed R., Vu D.C. Effects of rubber aggregates from grinded used tyres on the concrete resistance to cracking // Journal of Cleaner Production. 2012. Volume 23. P. 209-215. doi:10.1016/j.jclepro.2011.09.016

11. Khaloo A.R., Dehestani M., Rahmatabadi P. Mechanical proper-ties of concrete containing a high volume of tire-rubber particles // Waste Management. 2008. Volume 28. P. 2472-2482. doi:10.1016/j. was-man.2008.01.015
12. Issa C.A., Salem G. (2013) Utilization of recycled crumb rubber as fine aggregates in concrete mix design // Construction And Building Mate-rials. 2013. Volume 42. P. 48-52. doi:10.1016/ j.conbuildmat.2012.12.054
13. Savich I.N., Tishkov M.V. Formirovanie zakladochnyh massi-vov i utilizacija rezinokordovyh othodov // GIAB. 2007. № 5. S. 146-152.
14. Stol'nikov V.V., Litvinova R.E. Treshhinostjkost' betona. M.: Jenergija, 1972. 113 s.
15. Komohov P.G. Beton: klassika i sovremennost' [Jelektronnyj resurs] // Populjar-noe betonovedenie: [sajt]. [2008]. URL: <http://www.allbeton.ru/article/47/13.html>. (data ob-rashhenija: 20.09.2013).
16. Segre N., Ostertag C., Monteiro P. Effect of tire rubber particles on crack propa-gation in cement paste // Journal of Materials Research. 2006. Volume 9. P. 311-320. doi:10.1590/S1516-14392006000300011

УДК 622.337.2

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ РАЗРУШЕНИЯ ГОРЮЧИХ СЛАНЦЕВ ВЫСОКОСКОРОСТНЫМИ СТРУЯМИ ВОДЫ

А.Б. Жабин, Ан.В. Поляков, В.Г. Хачатурян

Приведены результаты экспериментальных исследований процесса резания горючих сланцев струями воды. Описаны закономерности влияния скорости перемещения струи на основные показатели процесса щелеобразования. Приведены расчетные зависимости, позволяющие определять рациональную скорость перемещения струи, а также энергоемкость процесса и скорость приращенния боковой поверхности щели.

Ключевые слова: горючие сланцы, результаты экспериментальных исследований, глубина нарезаемой щели, скорость приращенния боковой поверхности щели, энергоемкость процесса щелеобразования.

По сравнению со стационарной (неподвижной) струей воды, которая образует в забое конусную воронку, перемещение струи относительно забоя может значительно повысить эффективность разрушения [1 – 3]. В этом случае в горном массиве будет образовываться щель, геометрические