

РАЗРУШЕНИЕ УГЛЯ И ГОРНЫХ ПОРОД ВЫСОКОСКОРОСТНЫМИ СТРУЯМИ ВОДЫ

В.Г. Мерзляков¹, И.В. Деревяшкин¹, И.Е. Бойкова¹, А.И. Толмачев²

¹ Московский политехнический университет, Москва, Россия, e-mail: vgm458@mail.ru

² Губкинский филиал НИТУ «МИСиС», Губкин, Россия

Аннотация: Приведены результаты экспериментальных исследований процессов гидравлического и гидроабразивного резания угля, горных пород и других твердых материалов. Наиболее распространенным способом разрушения горных пород тонкими струями воды высокого давления является щелевой. Основным критерием интенсивности резания горных пород тонкой струей воды является глубина щели. За критерий сопротивляемости угля и горных пород гидравлическому резанию приняты коэффициент крепости и временное сопротивление на раздавливание соответственно. Повышение разрушающей способности водяных струй высокого давления возможно за счет добавок абразивных материалов. Установлены основные закономерности и рациональные параметры процессов гидравлического и гидроабразивного резания горных пород. Разработаны математические модели процессов резания. Предложена конструкция гидроабразивного инструмента с переменной геометрией проточной части для достижения максимальной разрушающей способности формируемых гидроабразивных струй, способного адаптироваться к выполнению различных вспомогательных операций на горнодобывающих предприятиях и в строительстве. Гидроабразивный инструмент прошел успешные испытания в стендовых и промышленных условиях.

Ключевые слова: высокоскоростная струя воды, резание твердых материалов, критерий сопротивляемости горных пород, основные закономерности, рациональные параметры, математические модели процессов резания, гидроабразивный инструмент, струеформирующие насадки, переменная геометрия проточной части.

Для цитирования: Мерзляков В. Г., Деревяшкин И. В., Бойкова И. Е., Толмачев А. И. Разрушение угля и горных пород высокоскоростными струями воды // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2023. – № 4. – С. 140–156. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_4_0_140.

Coal and rock fracturing by high-velocity water jets

V.G. Merzlyakov¹, I.V. Derevyashkin¹, I.E. Boykova¹, A.I. Tolmachev²

¹ Moscow Polytechnic University, Moscow, Russia, e-mail: vgm458@mail.ru

² Gubkin branch of National University of Science and Technology «MISIS», Gubkin, Russia

Abstract: This article describes the studies into hydraulic and hydroabrasive cutting of coal, rocks and other solid materials. The most wide-spread technique in this regard is the high-pressure water jet slotting. Efficiency of rock cutting by a thin water jet is governed by the factor of slot depth. The hydraulic cuttability is represented by the hardness ratio and the temporal crushing strain of coal and rocks. It is possible to enhance the damaging capability of the

high-pressure water jets by adding them with abrasive materials. The basic patterns and rational parameters of hydraulic and hydroabrasive rock cutting are found. The mathematical models of the cutting processes are constructed. The proposed design of a hydroabrasive cutting tool has a water channel of variable geometry to ensure the maximal damaging capability of hydroabrasive water jets and to make the tool adaptable to different secondary operations eventual in mining and construction. The hydroabrasive water jet cutting tool has successfully passed the lab-scale and full-scale testing.

Key words: high-velocity water jet, solid material cutting, rock cuttability criterion, basic patterns, rational parameters, mathematical models of cutting processes, hydroabrasive tool, jet-forming nozzles, variable water channel geometry.

For citation: Merzlyakov V. G., Derevyashkin I. V., Boykova I. E., Tolmachev A. I. Coal and rock fracturing by high-velocity water jets. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2023;(4):140-156. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_4_0_140.

Введение

При разрушении горного массива его предварительное ослабление возможно с помощью тонких струй воды высокого давления (35...70 МПа и выше) [1 – 4]. При этом возможны следующие способы:

- нарезка в массиве щелей с образованием межщелевых целиков с последующим их разрушением механическим, гидравлическим и другими способами [5];

- нарезка щелей несколькими струями с помощью многоструйных погружных резаков и образованием межщелевых целиков. При определенном расстоянии между щелями образующие угольные целики скалываются без дополнительных средств. Обрушенный уголь смывается гидромонитором или транспортируется механическим способом.

Возможен способ гидравлического разрушения горной породы с применением комбайна, исполнительный орган которого представляет собой устройство с необходимым числом насадок (струй), перемещающихся от почвы к кровле с периодической подачей на забой, либо гидромеханический способ, при котором разрушение массива происходит механическим инструментом совместно с тонкой струей воды [6].

Гидравлическое разрушение угля одиночными струями

Наиболее распространенным способом разрушения горных пород тонкими струями воды высокого давления является щелевой. Основным его принципом является нарезка щелей определенной глубины на некотором расстоянии друг от друга с последующим скалыванием межщелевых целиков.

Глубину щели, нарезаемой в массиве, принимаем за основной критерий эффективности резания горных пород тонкой струей воды.

На рис. 1 приведена схема нарезания врубовой щели одиночной струей воды высокого давления. Объем разрушения V в единицу времени определяется глубиной $h_{щ}$, шириной $B_{щ}$ щели и скоростью перемещения струи V_n [6].

Глубина щели является функцией трех групп переменных величин [1, 2, 7 – 9]:

- физико-механические свойства материала, которые определяются коэффициентом крепости f , трещиноватостью и другими факторами;

- гидравлические параметры (диаметр насадки d_0 и давление воды P_0);

- режимные параметры, такие как скорость перемещения струи V_n , первоначальное расстояние между насадкой

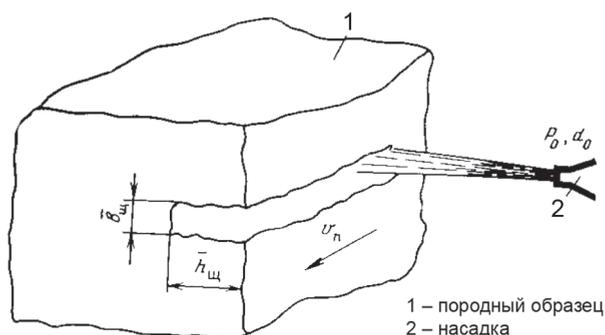


Рис. 1. Принципиальная схема нарезания врубовой щели одиночной струей воды высокого давления
Fig. 1. Schematic diagram of cutting a cutin slot with a single high-pressure water jet

и забоем l_0 , угол встречи струи с массивом β и число проходов струи по щели N [10].

Зависимость глубины щели $h_{щ}$ от перечисленных факторов можно записать в следующем общем виде:

$$h_{щ} = f(f, P_0, d_0, V_n, l_0, \beta, N). \quad (1)$$

Для установления влияния расстояния между насадкой и забоем на характер изменения глубины щели были проведены специальные шахтные исследования с параметрами: давление P_0 18–23 МПа; диаметр d_0 2,1–3,5 мм; скорость V_n 0,3–2 м/с.

Результаты экспериментов показали, что наиболее эффективно разрушение происходит при незначительных расстояниях от насадки до забоя при всех давлениях и скоростях перемещения струй [10], имевших место при эксперименте. При увеличении расстояния между насадкой и забоем щели происходит уменьшение относительной глубины щели, и, наконец, при весьма значительных расстояниях разрушение прекращается совсем.

Диаметр насадки оказывает весьма существенное влияние на эффективность разрушения. Анализ данных экспериментов показывает, что эффективность разрушения с удалением насадки от забоя падает менее интенсивно для больших диаметров насадок. Отмеченное

положение хорошо согласуется с исследованиями по динамике струй, в результате которых установлено, что компактная часть струи (начальный участок) [10] возрастает с увеличением диаметра насадки. Это, в свою очередь, приводит к весьма эффективному разрушению угла на более дальних расстояниях l_0 .

Влияние гидравлических параметров тонких струй на эффективность разрушения исследовалось экспериментальным путем на угольных образцах различного марочного состава с различным коэффициентом крепости. Величину давления струи, при которой начинается процесс разрушения, принято считать критической. При воздействии на угольный образец струй давлением ниже критического процесс щелеобразования практически отсутствует. На рис. 2 приведены некоторые результаты экспериментов, характеризующие зависимость глубины щели от гидравлических параметров тонких струй [1, 10].

С увеличением давления струи и диаметра насадки глубина щели прямо пропорционально увеличивается.

Характер зависимости нарезаемой в горных породах глубины щели от числа ее проходов одинаков. Прирост глубины щели за первые три прохода струи происходит примерно прямо пропорционально числу проходов. При дальнейшем увеличении числа проходов прирост глу-

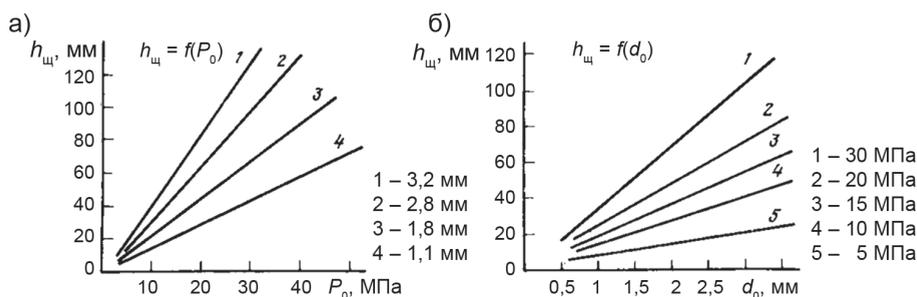


Рис. 2. Зависимость глубины щели от давления струи (а) и диаметра насадки (б)
 Fig. 2. Dependence of the slit depth on the jet pressure (a) and nozzle diameter (b)

бины щели уменьшается и, наконец, при достижении определенного числа проходов струи для определенных гидравлических параметров струи прекращается совсем.

Анализ опытных данных показал, что величина критических давлений, при которых начинается процесс щелеобразования, для углей разных марок неодинакова и количественно определяется следующим выражением [1]:

$$P_{кр} = k'f, \quad (2)$$

где k' — коэффициент пропорциональности (для углей марок ОС, К, Т средний k' может быть принят равным 35, а для углей марок А, Г, Д — 50).

В качестве показателя интенсивности процесса щелеобразования, наряду со средней глубиной щели, была принята средняя скорость приращения боковой поверхности щели F_0 , m^2/c , определяемая как произведение глубины щели на относительную скорость перемещения струи, т. е.

$$F_0 = 3,6 h_{щ} v_n, \quad (3)$$

где $h_{щ}$ — средняя глубина щели за один проход струи по разрушаемому массиву, мм; v_n — относительная скорость перемещения, м/с.

В свою очередь удельная энергоёмкость процесса щелеобразования определяется как отношение гидравлической мощности струи к F_0 :

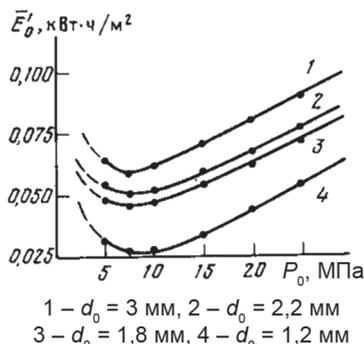


Рис. 3. Зависимость энергоёмкости разрушения от давления струй

Fig. 3. Dependence of energy intensity of destruction on the pressure of jets

$$E_0 = N_{стр} / F_0 \quad (4)$$

где

$$N_{стр} = 31,6 P_0^{1,5} d_0^2. \quad (5)$$

На графике (рис. 3) приведены кривые изменения удельной энергоёмкости процесса щелеобразования в зависимости от давления струи, которые свидетельствуют о наличии экстремальных значений зависимости $E_0 = f(P_0)$. Минимальное значение для этой функции, характеризующей изменение удельной энергоёмкости при разрушении угля с коэффициентом крепости 0,37 — 0,48, соответствует 6 — 7 МПа.

Проведенный анализ полученных экспериментальных данных по гидравлическому разрушению углей разных марок и физико-механических свойств позволил определить рациональное давление струи $P_{рац} = (150 \div 160)f$.

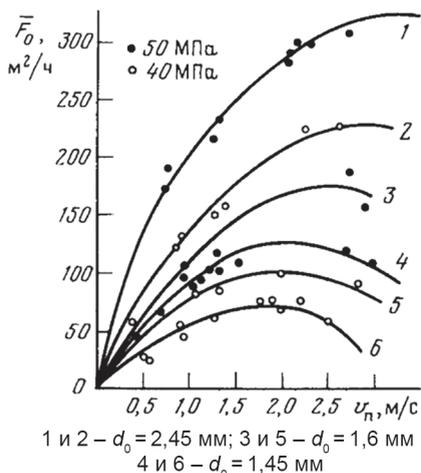


Рис. 4. Зависимость эффективности гидравлического разрушения от относительной скорости перемещения струй

Fig. 4. Dependence of efficiency of hydraulic fracture on the relative velocity of jets

Изучение влияния скорости перемещения струи на интенсивность процесса щелеобразования выполнено с целью установления наиболее рационального режима резания угля и связи его с гидравлическими параметрами струи. Параметры разрушения при исследованиях изменялись в следующих пределах: давление воды у насадки 15–50 МПа; диаметр насадок 1,4–3,2 мм; скорость перемещения 0,2–3 м/с.

Характер изменения площади реза в зависимости от изменения скорости перемещения при разрушении струями разных начальных параметров представлен на рис. 4.

Анализ кривых зависимости $F_0 = f(v_n)$ показывает, что с увеличением относительной скорости перемещения площадь реза изменяется в широких пределах ($F_0 = 0 - 340 \text{ м}^2/\text{ч}$). С увеличением скорости перемещения площадь реза увеличивается, достигая максимального значения F_{max} , которое соответствует оптимальной скорости перемещения. При скоростях перемещения $v_n > v_{\text{опт}}$ для исследуемых параметров струи площадь

реза уменьшается. Из графика видно, что с увеличением в исследуемых пределах начальных параметров струи наблюдается снижение оптимальных значений скорости перемещения в сторону увеличения их значений.

После соответствующих преобразований рекомендуется следующая формула для расчета рациональной скорости перемещения:

$$V_{\text{рац}} = 0,07 \sqrt{P_0} (d_0 + 2,7). \quad (6)$$

Наибольшее практическое значение имеют обобщенные зависимости, позволяющие с определенной степенью точности рассчитывать глубину щели и энергоемкость процесса.

Обобщенную зависимость для расчета средней глубины щели можно представить в следующем безразмерном виде [11, 12]:

$$h_{\text{щ}} = d_0 \left(\frac{P_0}{20f} - 0,1 \right) \left(\frac{v_0}{v_n} \right)^{0,5}. \quad (7)$$

Проведенное обобщение результатов экспериментальных исследований и анализ точности обобщающей зависимости (6) дают основание считать, что разработанный аналитический метод расчета глубины щели может быть использован с надежностью 99% и точностью 25%. Такое значение точности в соответствии со шкалой стабильности (точности) относится к 3-му классу. Это дает основание рекомендовать разработанный аналитический метод для расчетов глубины щели при разрушении углей тонкими одиночными струями высокого давления по щелевой схеме.

Одним из основных показателей процесса разрушения является его удельная энергоемкость, которая для процесса щелеобразования определяется по следующей формуле:

$$E'_0 = 1,35 \cdot 10^{-3} \frac{P_0^{1,25} d_0}{(P_0 / (20f) - 0,1) V_n^{0,5}}. \quad (8)$$

Резание горных пород одиночными тонкими струями воды высокого давления

Технология резания породы тонкой струей воды высокого давления в принципе подобна резанию тонкими струями угля [12–14]. Одной из схем разрушения является щелевая, характеризующаяся меньшими, по сравнению с углем, расстояниями между щелями для обеспечения самообрушения породных целиков.

При разрушении пород, включая и гидравлическое резание, принципиальный интерес представляет вопрос влияния физико-механических свойств на эффективность процесса, решение которого крайне важно при установлении критерия сопротивляемости и выбора гидравлических параметров струи, а также при проектировании и конструировании тонкоструйных исполнительных органов разрушения. В качестве показателей физико-механических свойств были использованы следующие: временное сопротивление образцов полуправильной формы на сжатие $\sigma_{сж}$, МПа; предел прочности образцов на растяжение σ_p , МПа; коэффициент крепости, определенный по методу толчения, f_c ; контактная прочность, определяемая по методике ИГД им. А.А. Скочинского, P_k , МПа; твердость по штампу, определяемая на приборе УМГПЗ по методике Л.А. Шрейнера, $P_{ш}$, МПа; скорость прохождения продольной волны V_b , м/с; условный предел прочности R_y , МПа:

$$R_y = \sqrt{\frac{\sigma_{сж} \sigma_p}{3}}. \quad (9)$$

Степень отклонения опытных данных от аппроксимирующих кривых оценивалась коэффициентом вариации $K_{вар}$. Установлено, что наилучшую связь между глубиной щели обеспечивает коэффициент крепости ($K_{вар} = 27,8\%$) и временное сопротивление на раздавливание

($K_{вар} = 30,5\%$). Таким образом, эти два показателя физико-механических свойств горных пород могут быть рекомендованы в качестве критерия сопротивляемости породы при их разрушении тонкими струями по щелевой схеме.

Для определения качественных и количественных соотношений между гидравлическими параметрами тонких струй и интенсивностью разрушения пород по щелевой схеме было проведено несколько серий экспериментов. Кроме того, были использованы опытные данные других исследований, проведенных как в России, так и за рубежом.

Установлено наличие критических давлений струи $P_{кр}$, т.е. давлений, ниже которых разрушение породы по щелевой схеме не происходит совсем либо происходит весьма неэффективно с образованием отдельных выколов на незначительную (1–3 мм) глубину и не на всей длине резания. Величина критических давлений для разных типов пород различна и определяется величиной временного сопротивления на одноосное сжатие.

На основании анализа полученных опытных данных можно считать, что связь между критическим давлением и временным сопротивлением на раздавливание приблизительно линейная с уравнением связи следующего вида:

$$P_{кр} = K \sigma_{сж} \quad (10)$$

где K — коэффициент пропорциональности, принимающий следующие значения: для осадочных пород типа известняка, туфа, аргиллита $K = 0,1–0,2$; для горных пород типа гранита, базальта, песчаника, лабрадорита $K = 0,2–0,5$.

Исследования влияния скорости перемещения струи относительно разрушаемого массива на интенсивность щелеобразования проведены на породе с $\sigma_{сж} = 40–50$ МПа при изменении скорости от 1,5 до 200 см/с. Было установлено, что характер изменения зависи-

Таблица 1

Диапазоны изменения основных факторов и режимов разрушения
Ranges of changes in the main factors and modes of destruction

Начальное давление воды, МПа	13–1050
Диаметр насадки, мм	0,2–2,8
Скорость перемещения струи, см/с	1,4–313
Временное сопротивление образцов горных пород на раздавливание, МПа	9–200
Число проходов струи по щели [4]	1

мости интенсивности процесса щелеобразования от скорости перемещения струи может быть представлен параболами с наличием экстремальных значений. Эти экстремальные значения (зона максимума) и определяют рациональные значения скорости перемещения струи (V_n)_p, причем с увеличением давления [15] струй зона экстремальных значений (V_n)_p существенным образом смещается в сторону увеличения давления.

Получение обобщающих формул проводилось на основе анализа результатов экспериментальных исследований, которые имели диапазоны изменения основных факторов и режимов разрушения, указанные в табл. 1.

Полученная с использованием метода подобия и анализа размерностей обобщающая формула для расчета глубины щели за один проход струи может быть представлена в следующем виде [12, 13]:

$$h_{щ} = 0,11d_0 \left(\frac{P_0}{\sigma_{сж}} \right)^{0,75} \left(\frac{v_0}{v_n} \right)^{0,5}, \quad (11)$$

где v_0 — скорость истечения струи из насадки, соответствующая принятому давлению.

Для расчета энергоемкости нарезания щели получена следующая зависимость:

$$E'_0 = 0,125d_0P_0 \left(\frac{\sigma_{сж}}{v_n} \right)^{0,75}. \quad (12)$$

Анализ формулы показывает, что при выборе гидравлических параметров струй целесообразно увеличивать давление струи, так как при этом энергоемкость процесса возрастает менее интенсивно, чем при увеличении диаметра насадки, и снижается при разрушении пород на повышенных относительных скоростях перемещения струи.

Повышение разрушающей способности водяных струй высокого давления за счет добавок абразивных материалов

Анализ развития рынка технологий, используемых для разрушения твердых материалов в промышленно развитых странах (США, Германия, Япония, Китай и др.), показывает, что технологиям гидроабразивного резания твердых материалов в настоящее время уделяется большое внимание [16, 17]. Однако следует отметить, что разработанное оборудование создавалось под решение конкретных технологических задач, поэтому диапазон варьирования его рациональных конструктивных и гидравлических параметров и область эффективного применения достаточно небольшие. В основном это резка металлов, композитов, твердых сплавов, стекла, резины и других трудно обрабатываемых материалов на специальных высокомеханизированных установках с программным управлением.

Для формирования гидроабразивной струи, например, в конструкции инструмента фирмы Woma, используются струеформирующие насадки диаметром 0,3–0,6 мм и давление воды 100–300 МПа. При изменении диаметра насадки и неизменных параметрах камеры смешивания рациональный режим формирования гидроабразивной струи достигается соответствующим подбором диаметра и длины коллиматора.

Кроме этого, в конструкции инструмента фирмы Woma отсутствуют элементы, отвечающие за снижение турбулентности потока воды на входе в струеформирующую насадку. Выполненные ранее исследования [1] показывают, что длина начального участка струи при этом неизбежно снижается на 20–30% и составляет 15–20 мм для насадок диаметром 0,4–0,5 мм.

Следует отметить, что при выполнении вспомогательных работ в шахтных условиях и строительстве необходимо эффективно резать как металлы (крепь, решетки, цепи и т.д.), так и горные породы, бетон, железобетон и другие строительные материалы различной прочности [17–19].

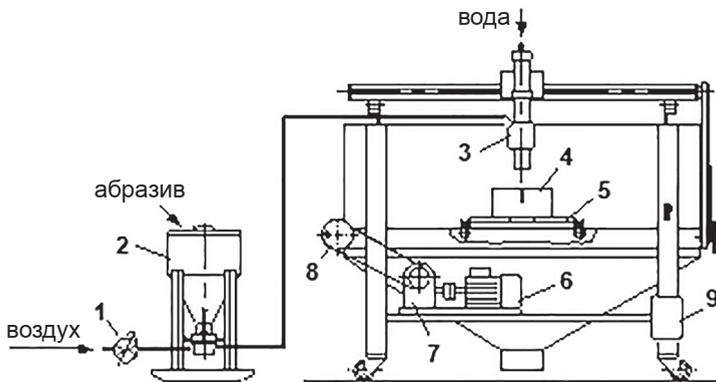
Для этих целей технология гидроабразивного резания твердых материалов должна базироваться на инструменте, имеющем возможность изменять исходные параметры формирования гидроабразивной струи в широком диапазоне.

В этой связи представляются актуальными комплексные экспериментальные исследования, выполненные в последние годы в ИГД им. А.А. Скочинского, связанные с разработкой и созданием техники и технологии резания крепких горных пород, бетона, железобетона, конструкционных сталей и других твердых материалов гидроабразивными струями воды давлением до 200 МПа [20].

Исследования были проведены на стендовой установке, схема конструкции которой приведена на рис. 5. Техническая характеристика стендовой установки:

- диаметры струеформирующих насадок 0,4–1,0 мм;
- давление воды 10–120 МПа;
- скорость перемещения струи 0,5–10 мм/с;
- расход абразива 0,3–4,0 кг/мин.

Выполненные исследования показали, что величина расхода абразива че-



1 – регулируемый дроссель, 2 – бункер абразива, 3 – режущий инструмент, 4 – образец, 5 – платформа, 6 – электродвигатель, 7 – редуктор, 8 – винтовая передача, 9 – частотный преобразователь

Рис. 5. Схема стендовой установки для изучения гидравлического и гидроабразивного резания твердых материалов

Fig. 5. Diagram of a bench installation for studying hydraulic and waterjet cutting of solid materials

рез дозатор бункера при прочих равных условиях зависит от диаметра струеформирующей насадки гидроабразивного инструмента.

На рис. 6 приведены графики расхода абразива крупностью 0,2–0,3 мм в зависимости от диаметра проходного сечения шайбы дозатора в питающем бункере. График 1 для инструмента построен по данным фирмы Woma (диаметры насадок до 0,5 мм и давление воды 150–200 МПа). График 2 получен при испытании гидроабразивного инструмента конструкции ННЦ ГП–ИГД им. А.А. Скочинского (диаметр насадки 1 мм, давление воды 30–100 МПа).

Анализ рис. 6 позволяет сделать вывод, что при диаметре насадок 0,3–0,5 мм расходная характеристика дозирующей шайбы определяется в основном соотношением между силами гравитации и силами трения частиц абразива между собой и о стенки дозирующих элементов. Уровень разряжения в камере смешивания при этом практически не влияет на расход абразива, но достаточен для обеспечения необходимой скорости воздушного потока для транспортирования абразива, проходящего через дозирующую шайбу. Увеличение диаметра струеформирующих насадок до 0,6–1,0 мм способствует увеличению разряжения в камере смешивания и приводит

к увеличению сил избыточного давления на абразивные частицы. При этом, как следствие, увеличивается расход абразива через отверстие дозирующей шайбы.

Влияние сил трения в пограничном слое абразива существенно зависит от диаметра дозирующего отверстия, причем с увеличением последнего силы трения уменьшаются, вызывая нелинейное увеличение расхода абразива. С увеличением диаметра дозирующей шайбы более 8 мм расход абразива увеличивается практически линейно. Происходит это за счет достижения равновесия гравитационных сил и сил внутреннего трения в потоке абразива. Однако за счет слабого разряжения в смесительной камере устойчивая подача абразива достигается только при небольших расстояниях питающей емкости от инструмента.

При использовании струеформирующей насадки диаметром 1 мм (см. рис. 6, кривая 2) ведущим параметром, определяющим расход абразива через дозирующую шайбу, является разряжение, создаваемое в камере смешения инструмента и силы трения по периметру дозирующего отверстия. При увеличении диаметра дозирующего отверстия влияние сил всасывания снижается пропорционально увеличению площади дозирующей шайбы. При диаметре дозирующей шайбы более 6 мм ведущим фактором,

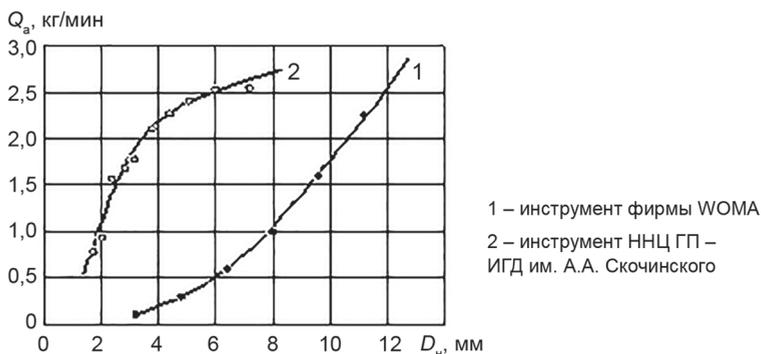


Рис. 6. Зависимость расхода абразива крупностью 0,2–0,3 мм от диаметра шайбы дозатора
 Fig. 6. Dependence of abrasive consumption by size on the diameter 0,2–0,3 mm of dispenser washer

Таблица 2

Опытные данные эффективности резания гидроабразивной струей различных твердых материалов

Experimental data on the efficiency of waterjet cutting of various solid materials

Разрезаемый материал	Скорость резания, мм/мин	Глубина резания, мм
Гранит красный	120	37
Гранит серый	120	52
Песчаник	30	125
Мрамор	30	125
Железобетон	60	155
Листовая сталь	120	10
	30	30

определяющим расход абразива, становится соотношение гравитационных сил и сил внутреннего трения в потоке.

Опыт эксплуатации гидроабразивного инструмента показал, что, несмотря на значительную силу всасывания, использование дозирующих шайб диаметром менее 3–4 мм приводит к неустойчивой подаче абразива, вызванной увеличением удельного влияния сил трения на поверхности дозирующей шайбы, вызывающих периодические пульсации абразивного потока.

Одним из недостатков эжекционной схемы доставки абразива является зависимость максимально возможной длины шланга между бункером абразива и режущим инструментом от разряжения в камере смешивания, что в ряде случаев ограничивает область использования технологии гидроабразивного резания.

Для устранения указанного недостатка была предложена [21] принудительная схема подачи абразива в режущий инструмент. При этом существенно упрощается выбор параметров, необходимых для транспортирования практически любого необходимого количества абразива на значительные расстояния от места расположения бункера абразива. Кроме того, уменьшается неравномерность подачи абразива в режущий инструмент, присущая другим схемам, которая свя-

зана со сложными колебательными процессами в шлангах в процессе транспортирования абразива.

В табл. 2 приведены опытные данные, дающие представление об эффективности резания различных твердых материалов гидроабразивной струей давлением 100 МПа со струеформирующей насадкой диаметром 1 мм.

Выбор рациональных параметров струеформирующих элементов гидроабразивного режущего инструмента [18–20].

Одним из направлений комплексных исследований технологии гидроабразивного резания твердых материалов, выполненных с нашим участием, являлась разработка метода расчета гидроабразивного инструмента и создание его рациональной конструкции.

Формирование гидроабразивной струи в режущем инструменте можно разделить на два основных процесса:

- формирование водяной струи в проточном канале малогабаритного струеформирующего устройства и насадке;
- формирование гидроабразивной струи в камере смешивания и коллиматоре режущего инструмента.

Исходными данными для выбора рациональных параметров струеформирующих элементов гидроабразивного инструмента являются величины диаметра

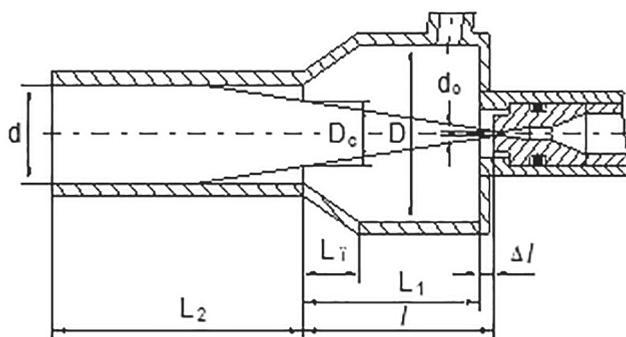


Рис. 7. Схема проточной части гидроабразивного режущего инструмента

Fig. 7. Flow diagram of the waterjet cutting tool

струеформирующей насадки d_0 и давление воды перед насадкой P_0 .

Расчет параметров проточной части гидроабразивного инструмента, обеспечивающей формирование высокоскоростной водяной струи, производится с использованием зависимостей [21, 22] для определения рациональных параметров малогабаритных струеформирующих устройств и насадок.

На рис. 7 представлена схема проточной части разработанного в ИГД им. А.А. Скочинского гидроабразивного инструмента.

За счет применения комплекта сменных струеформирующих элементов в инструменте обеспечиваются рациональные параметры процесса формирования гидроабразивной струи при изменении диаметра струеформирующей насадки в пределах $d_0 = 0,3 - 1,5$ мм. Формирование гидроабразивной струи происходит путем внедрения сухого абразива в тело высокоскоростной струи воды в смесительной камере и коллиматоре гидроабразивного инструмента.

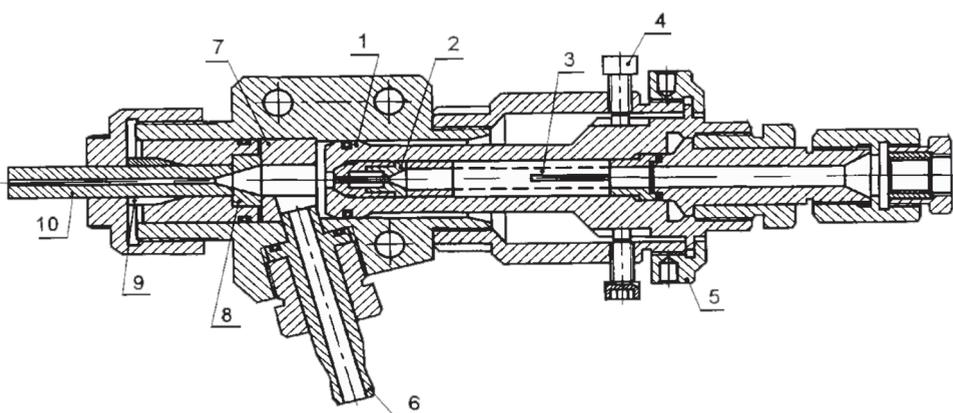
Эффективность формирования гидроабразивной струи в камере смешивания зависит от правильного выбора ее диаметра и длины с учетом гидравлических параметров, качества формирования водяной струи и количества абразива, поступающего в камеру смешивания. Для практического использования реко-

мендуются следующие диапазоны варьирования основных параметров гидроабразивного инструмента: $D/d = 2,5 \div 6,5$; $d/d_0 = 3 \div 4$; $D/d_0 = 8 \div 20$; $L_1/D = 1,35 \div 3$.

С учетом результатов экспериментальных исследований [19], а также результатов экспериментов [20 – 22], в которых использовались насадки диаметром $d_0 = 1 \div 1,5$ мм и камеры смешивания диаметром $D = 20 \div 25$ мм, получены эмпирические зависимости, отражающие приведенный выше механизм взаимодействия абразива с высокоскоростной струей воды в камере смешивания (табл. 3).

Использование приведенных в табл. 4 зависимостей позволило обосновать параметры струеформирующих элементов созданного в ИГД им. А.А. Скочинского режущего гидроабразивного инструмента с переменной геометрией проточной части (Патент РФ № 2109950, 27.04.98) для достижения максимальной разрушающей способности формируемых гидроабразивных струй, способного адаптироваться к выполнению различных вспомогательных операций на горнодобывающих предприятиях и в строительстве [19]. Принципиальная схема такого инструмента представлена на рис. 8.

В отличие от известных зарубежных и отечественных аналогов [17, 23 – 25], конструкция инструмента позволяет изменять геометрические параметры его проточной части в зависимости от ре-



1 – корпус струеформирующего устройства; 2 – насадка; 3 – пластинчатый успокоитель; 4 – регулировочный винт; 5 – зажимная крышка; 6 – штуцер для подачи песка; 7 – камера смешивания; 8 – переходная втулка; 9 – цанга; 10 – коллиматор

Рис. 8. Гидроабразивный инструмент с переменной геометрией проточной части
Fig. 8. Waterjet tool with variable geometry of the flow part

шаемых технологических задач и обеспечивает оптимальные условия формирования и центрирования гидроабразивных струй во всем диапазоне диаметров струеформирующих насадок $d_0 = 0,4 - 1,5$ мм и давлении воды 100 – 250 МПа.

Указанным инструментом был оснащен режущий модуль комплекса гидро-режущего оборудования МАГ-1, прошедший успешные испытания в стен-

довых и промышленных условиях [26]. Испытания комплекса мобильного оборудования МАГ-1 подтвердили эффективность гидроабразивной технологии нарезания глубоких (до 150 мм) щелей в гранитном массиве с указанными выше параметрами и режимами работы гидроабразивного инструмента.

Принимая во внимание общность дискретной природы гидравлического и

Таблица 3

Эмпирические зависимости для определения рациональных параметров гидроабразивного инструмента

Empirical dependencies for determining the rational parameters of a waterjet tool

Диаметр камеры смешивания D , $D = 8 \div 22$ мм	$D = 8 \left(\frac{d_0}{0,3} \right)^{0,5} + d_0$
Длина камеры смешивания L_1 , $1,35D \leq L_1 \leq 3D$	$L_1 = 0,12DK_k P_0^{0,5}$ $K_k = 1 \div 1,5$
Диаметр проточного канала коллиматора D_c	$\frac{D_c}{d_0} = 2,37 \left(\frac{l}{d_0} \right)^{0,13} - 1,16$
Диаметр канала коллиматора d	$D_c + 2d_a \leq d < D_c + 5d_a$
Длина коллиматора	$27d \leq L_2 \leq 40d$
d_a – осредненный диаметр абразивных частиц, мм. Эффективный размер абразивных частиц обычно составляет $d_a = 0,2 \div 0,5$ мм.	

Таблица 4

Сопоставление экспериментальных и расчетных значений глубины щели
Comparison of experimental and calculated values of the slit depth

Давление воды, МПа	Скорость резания, мм/с	Глубина щели, мм			
		экспериментальная h_3	расчетная h_p	$h_3 - h_p$	$\frac{h_3 - h_p}{h_3} \cdot 100\%$
60	0,5	21,4	22,5	-1,1	-5,1
70	0,5	24,6	26,2	-1,6	-6,5
80	0,5	31,1	30,0	1,1	3,5
90	0,5	34,7	33,7	1,0	2,9
100	0,5	34,8	37,5	-2,7	-7,8
80	0,5	31,1	30,0	1,1	3,5
80	1,0	13,4	12,9	0,5	3,7
80	2,0	3,0	3,34	-0,34	-11,3

гидроабразивного разрушения, представляется целесообразным использовать структуру зависимости (9) при построении математической модели процесса резания твердых материалов гидроабразивными струями. Для обоснования указанной модели использованы результаты экспериментов гидроабразивного резания углеродистой стали с $\sigma_{сж} = 280$ МПа, приведенные на рис. 6 [18]. При проведении экспериментов применялась струеформирующая насадка диаметром 1 мм. В качестве абразива был использован кварцевый песок крупностью 0,22 мм. Расход абразива составлял 2,5 кг/мин.

С учетом приведенного выше анализа структура математической модели гидроабразивного резания углеродистой стали по аналогии с математической моделью гидравлического разрушения имеет следующий вид:

$$h_s = K_a d_0 \left(\frac{P_0}{P_{kp}} \right)^{0,75} \left(\frac{v_0}{v_n} \right)^{0,5}, \quad (13)$$

где K_a — коэффициент, учитывающий затухание процесса гидроабразивного резания при увеличении скорости перемещения струи. Его величина может быть определена по формуле

$$K_a = 0,03 \exp(-v_n). \quad (14)$$

В табл. 4 приведено сопоставление экспериментальных и расчетных значений глубины щели, прорезаемой абразивной струей в образце углеродистой стали.

Относительная величина отклонения экспериментальных значений глубины щели от расчетных составила 2,9—11,3%, что свидетельствует о достаточно высокой адекватности предложенной математической модели.

Выводы

Таким образом, результаты выполненных экспериментальных исследований процессов разрушения угля и горных пород тонкими струями воды высокого давления позволили разработать их рациональные параметры и рекомендовать мероприятия для повышения разрушающей способности водяных струй. Повышение эффективности гидравлического разрушения возможно за счет добавок абразивных материалов. Установлены основные закономерности и разработаны математические модели процессов гидравлического и гидроабразивного резания горных пород.

Полученные расчетные зависимости позволили обосновать параметры нового режущего гидроабразивного инструмен-

та с переменной геометрией проточной части и принудительной схемой подачи абразива. Для практического использования рекомендованы следующие диапазоны варьирования основных параметров гидроабразивного инструмента: $D/d = 2,5 \div 6,5$; $d/d_0 = 3 \div 4$; $D/d_0 = 8 \div 20$; $L_1/D = 1,35 \div 3$.

В отличие от известных зарубежных и отечественных аналогов предложен-

ная конструкция инструмента позволяет изменять геометрические параметры его проточной части в зависимости от решаемых технологических задач, адаптироваться к выполнению различных вспомогательных операций на горнодобывающих предприятиях и в строительстве и обеспечивает достижение максимальной разрушающей способности формируемых гидроабразивных струй.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мерзляков В. Г., Бафталовский В. Е. Физико-технические основы гидроструйных технологий в горном производстве. — М.: ННЦ ГП – ИГД им. А.А.Скочинского, 2004. — 645 с.

2. Talele S., Dalvi A., Rane G., Nawar J. Water-jet cutting — a precise method for manufacturing process // International Journal of Engineering Applied Sciences and Technology. 2020, vol. 4, pp. 471 — 473. DOI:10.33564/IJEAST.2020.v04i11.084.

3. Liu S., Chen J., Liu X. Rock breaking by conical pick assisted with high pressure water jet // Advances in Mechanical Engineering. 2014, vol. 2014, 10 p. DOI: 10.1155/2014/868041.

4. Бреннер А. А., Жабин А. Б., Щеголевский М. М., Поляков Ал., Поляков Ан. Гидроструйные технологии в промышленности. Совершенствование гидроструйных технологий в горном производстве. — М.: Изд-во «Горная книга», 2010. — 337 с.

5. Хачатурян В. Г. Разрушение горючих сланцев высокоскоростными струями воды по целевой схеме: Автореф. дис.... канд. техн. наук. — Тула: ТулГУ, 2016. — 16 с.

6. Шкаруба Н. А., Кисляков В. Е., Николаева Н. В., Катышев П. В., Тешаев У. Р. Производительность отбойки пород гидромонитором при наличии в его струе твердых частиц различной крупности // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2021. — № 11. — С. 37 — 44. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_11_0_37.

7. Мерзляков В. Г., Деревяшкин И. В. Применение гидроструйных технологий в горном производстве // Технический оппонент. — 2022. — № 1(8). — С. 24 — 27.

8. Xiao S., Re Q., Cheng Y., Zhao H., Cao Sh., Zhang L., Chen B., Meng X. Damage and fracture characteristics of rocks with different structures under high-velocity water jet impact // Engineering Fracture Mechanics. 2021, vol. 256, article 107961. DOI: 10.1016/j.engfracmech.2021.107961.

9. Liu S., Liu X., Chen J., Lin M. Rock breaking performance of a pick assisted by high-pressure water jet under different configuration modes // Chinese Journal of Mechanical Engineering. 2015, vol. 28, no. 3, pp. 607 — 617. DOI: 10.3901/CJME.2015.0305.023.

10. Бражкин О. В. Обоснование параметров гидроагрегатной технологии отработки крутых пластов с использованием тяжелых сред: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. — М.: МГГУ, 2000. — 24 с.

11. Головин К. А. Установление параметров процесса нарезания щелей в горных породах гидроабразивным инструментом: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. — Тула: ТулГУ, 1997. — 18 с.

12. Мерзляков В. Г. Гидроструйные технологии в горном деле. Основные результаты научно-исследовательских работ // Горное оборудование и электромеханика. — 2018. — № 2. — С. 6 — 11.

13. Zhabin A., Polyakov A., Averin E. Experimental studies on cutting oil shale by high-pressure water jets // Oil Shale. 2019, vol. 36, no. 1, pp. 32 — 42. DOI: 10.3176/oil.2019.1.03.

14. Stoxreitera T., Martinb A., Tezac D., Gallera R. Hard rock cutting with high pressure jets in various ambient pressure regimes // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2018, vol. 108, pp. 179 – 188. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2018.06.007.

15. Жабин А. Б., Поляков А. В., Хачатурян В. Г. Исследование закономерностей разрушения горючих сланцев высокоскоростными струями воды // *Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле*. — 2016. — № 3. — С. 135 – 141.

16. Arab P. B., Celestino T. B. A microscopic study on kerfs in rocks subjected to abrasive waterjet cutting // *Wear*. 2020, vol. 448-449, article 203210. DOI: 10.1016/j.wear.2020.203210.

17. Huan Li, Zhongwei Huang, Jingbin Li Rock breaking characteristics by swirling impeller abrasive water jet (SAWJ) on granite // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2022, vol. 159, article 105230. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2022.105230.

18. Бреннер В. А., Жабин А. Б., Пушкарев А. Е., Щеголевский М. М. Гидроабразивное резание горных пород. — М.: Изд-во МГГУ, 2003. — 279 с.

19. Бафталовский В. Е., Иванушкин И. В., Барабаш В. В., Мерзляков В. Г., Шубняков А. А. Технология и средства гидроабразивного резания крепких горных пород // *Горные машины и автоматика*. — 2003. — № 3. — С. 37 – 40.

20. Бафталовский В. Е. Выбор рациональных параметров струеформирующих элементов гидроабразивного режущего инструмента / *Разрушение горных пород и горнотехнологическое породоведение. Научные сообщения*, вып. 310. — М., 1998. — С. 193 – 202.

21. Мерзляков В. Г., Бафталовский В. Е., Иванушкин И. В. и др. Разработка математической модели процесса и путей совершенствования средств гидроабразивного разрушения твердых материалов / *Труды 2-й Международной конференции «Динамика и прочность горных машин»*. Т. 1. — Новосибирск, 2003. — С. 13 – 19.

22. Бафталовский В. Е. Выбор рациональных параметров малогабаритных струеформирующих устройств / *Разрушение углей и горных пород: Научные сообщения*. — М.: Ин-т горн. дела, 1989. — С. 55 – 63.

23. Жабин А. Б., Поляков А. В., Аверин Е. А., Щеголевский М. М. Анализ и доработка аналитического метода расчета гидроабразивной эрозии горных пород // *Горное оборудование и электромеханика*. — 2018. — № 2. — С. 17 – 25.

24. Zhang J., Li Y. Using a high-pressure water jet-assisted tunnel boring machine to break rock // *Advance in Mechanical Engineering*. 2020, vol. 12, no. 10. DOI: 10.1177/1687814020962290.

25. Song D., Wang E., Liu Z., Liu X., Shen R. Numerical simulation of rock-burst relief and prevention by water-jet cutting // *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*. 2014, vol. 70, pp. 318 – 331. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2014.05.015.

26. Бафталовский В. Е., Иванушкин И. В. Испытания опытного образца комплекса оборудования МАГ для гидроабразивной резки твердых материалов / *Проблемы разработки угольных месторождений: Научные сообщения. Ин-т горн. дела им. А.А. Скочинского*, вып. 320. — М., 2001. — С. 124 – 132. **ПИАБ**

REFERENCES

1. Merzlyakov V. G., Baftalovskiy V. E. *Fiziko-tekhnicheskie osnovy gidrostruynykh tekhnologiy v gornom proizvodstve* [Physicotechnical elements of water-jet technologies in mining], Moscow, 2004, 645 p.

2. Talele S., Dalvi A., Rane G., Nawar J. Water-jet cutting – a precise method for manufacturing process. *International Journal of Engineering Applied Sciences and Technology*. 2020, vol. 4, pp. 471 – 473. DOI:10.33564/IJEAST.2020.v04i11.084.

3. Liu S., Chen J., Liu X. Rock breaking by conical pick assisted with high pressure water jet. *Advances in Mechanical Engineering*. 2014, vol. 2014, 10 p. DOI: 10.1155/2014/868041.

4. Brenner A. A., Zhabin A. B., Shchegolevskiy M. M., Polyakov Al., Polyakov An. *Gidrostruynye tekhnologii v promyshlennosti. Sovershenstvovanie gidrostruynykh tekhnologiy*

v gornom proizvodstve [Water-jet technologies in industry. Improvement of water-jet technologies in mining], Moscow, Izd-vo «Gornaya kniga», 2010, 337 p.

5. Khachatryan V. G. *Razrushenie goryuchikh slantsev vysokoskorostnymi struyami vody po shchelevoiy skheme* [Destruction of oil shales by high-speed water jets according to a slit scheme], Candidate's thesis, Tula, TulGU, 2016, 16 p.

6. Shkaruba N. A., Kislyakov V. E., Nikolaeva N. V., Katyshev P. V., Tshaev U. R. Rock jetting performance with solid particles of different sizes in hydraulic monitor jet. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021, no. 11, pp. 37 – 44. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_11_0_37.

7. Merzlyakov V. G., Derevyashkin I. V. Application of water-jet technologies in mining. *Technical opponent.* 2022, no. 1(8), pp. 24 – 27. [In Russ].

8. Xiao S., Re Q., Cheng Y., Zhao H., Cao Sh., Zhang L., Chen B., Meng X. Damage and fracture characteristics of rocks with different structures under high-velocity water jet impact. *Engineering Fracture Mechanics.* 2021, vol. 256, article 107961. DOI: 10.1016/j.engfracmech.2021.107961.

9. Liu S., Liu X., Chen J., Lin M. Rock breaking performance of a pick assisted by high-pressure water jet under different configuration modes. *Chinese Journal of Mechanical Engineering.* 2015, vol. 28, no. 3, pp. 607 – 617. DOI: 10.3901/CJME.2015.0305.023.

10. Brazhkin O. V. *Obosnovanie parametrov gidroagregatnoy tekhnologii otrabotki krutykh plastov s ispol'zovaniem tyazhelykh sred* [Substantiation of the parameters of the hydraulic aggregate technology for mining steep formations using heavy media], Candidate's thesis, Moscow, MGGU, 2000, 24 p.

11. Golovin K. A. *Ustanovlenie parametrov protsessa narezaniya shcheley v gornykh porodakh gidroabrazivnym instrumentom* [Determination of the parameters of the process of cutting cracks in rocks with a hydroabrasive tool], Candidate's thesis, Tula, TulGU, 1997, 18 p.

12. Merzlyakov V. G. Water-jet technologies in mining. Basic research findings. *Mining equipment and electromechanics.* 2018, no. 2, pp. 6 – 11. [In Russ].

13. Zhabin A., Polyakov A., Averin E. Experimental studies on cutting oil shale by high-pressure water jets. *Oil Shale.* 2019, vol. 36, no. 1, pp. 32 – 42. DOI: 10.3176/oil.2019.1.03.

14. Stoxreitera T., Martinb A., Tezac D., Gallera R. Hard rock cutting with high pressure jets in various ambient pressure regimes. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences.* 2018, vol. 108, pp. 179 – 188. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2018.06.007.

15. Zhabin A. B., Polyakov A. V., Khachatryan V. G. Investigation of the patterns of destruction of oil shales by high-speed water jets. *News of the Tula state university. Sciences of Earth.* 2016, no. 3, pp. 135 – 141. [In Russ].

16. Arab P. B., Celestino T. B. A microscopic study on kerfs in rocks subjected to abrasive waterjet cutting. *Wear.* 2020, vol. 448-449, article 203210. DOI: 10.1016/j.wear.2020.203210.

17. Huan Li, Zhongwei Huang, Jingbin Li Rock breaking characteristics by swirling impeller abrasive water jet (SAWJ) on granite. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences.* 2022, vol. 159, article 105230. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2022.105230.

18. Brenner V. A., Zhabin A. B., Pushkarev A. E., Shchegolevskiy M. M. *Gidroabrazivnoe rezanie gornykh porod* [Hydroabrasive cutting of rocks], Moscow, Izd-vo MGGU, 2003, 279 p.

19. Baftalovskiy V. E., Ivanushkin I. V., Barabash V. V., Merzlyakov V. G., Shubnyakov A. A. Technology and tools of hydroabrasive cutting of strong rocks. *Gornye mashiny i avtomatika.* 2003, no. 3, pp. 37 – 40. [In Russ].

20. Baftalovskiy V. E. Selecting rational parameters for jet-forming elements of hydroabrasive cutting tool. *Razrushenie gornykh porod i gornotekhnologicheskoe porodovedenie. Nauchnye soobshcheniya* [Rock fracture and rock engineering. Scientific reports], no. 310, Moscow, 1998, pp. 193 – 202. [In Russ].

21. Merzlyakov V. G., Baftalovskiy V. E., Ivanushkin I. V., etc. Mathematical modeling and technological advancement of hydroabrasive cutting process and tools for solid materials. *Trudy 2-y Mezhdunarodnoy konferentsii «Dinamika i prochnost' gornykh mashin»* [The 2nd Interna-

tional Conference Proceedings on Strength and Dynamics of Mining Machines], vol. 1. Novosibirsk, 2003, pp. 13–19. [In Russ].

22. Baftalovskiy V. E. Selecting rational parameters for small-size jet-forming tools. *Razrushenie ugley i gornykh porod: Nauchnye soobshcheniya* [Fracture of coal and rocks. Scientific reports], Moscow, 1989, pp. 55–63.

23. Zhabin A. B., Polyakov A. V., Averin E. A., Shchegolevskiy M. M. Review and refinement of analytical estimation of hydroabrasive erosion in rocks. *Mining equipment and electro-mechanics*. 2018, no. 2, pp. 17–25. [In Russ].

24. Zhang J., Li Y. Using a high-pressure water jet-assisted tunnel boring machine to break rock. *Advance in Mechanical Engineering*. 2020, vol. 12, no. 10. DOI: 10.1177/1687814020962290.

25. Song D., Wang E., Liu Z., Liu X., Shen R. Numerical simulation of rock-burst relief and prevention by water-jet cutting. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*. 2014, vol. 70, pp. 318–331. DOI: 10.1016/j.ijrmmms.2014.05.015.

26. Baftalovskiy V. E., Ivanushkin I. V. Tests of experimental prototype equipment system MAG in hydroabrasive cutting of solid materials. *Problemy razrabotki ugol'nykh mestorozhdeniy: Nauchnye soobshcheniya* [Coal Mining: Problems. Scientific reports], no. 320, Moscow, 2001, pp. 124–132. [In Russ].

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Мерзляков Виктор Георгиевич¹ — д-р техн. наук,
профессор, e-mail: vgm458@mail.ru,

Деревяшкин Игорь Владимирович¹ — д-р техн. наук,
профессор, e-mail: robotron-04@mail.ru,

Бойкова Ирина Евгеньевна¹ — зав. лабораторией,
e-mail: bie07@list.ru,

Толмачев Алексей Иванович — канд. техн. наук,
ассистент кафедры,

Губкинский филиал НИТУ «МИСиС»,

¹ Московский политехнический университет.

Для контактов: Мерзляков В.Г., e-mail: vgm458@mail.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

V.G. Merzlyakov¹, Dr. Sci. (Eng.), Professor,
e-mail: vgm458@mail.ru,

I.V. Derevyashkin¹, Dr. Sci. (Eng.), Professor,
e-mail: robotron-04@mail.ru,

I.E. Boykova¹, Head of Laboratory,
e-mail: bie07@list.ru,

A.I. Tolmachev, Cand. Sci. (Eng.),
Assistant of Chair, Gubkin branch
of National University of Science and Technology
«MISiS», 309186, Gubkin, Russia,

¹ Moscow Polytechnic University,
107023, Moscow, Russia.

Corresponding author: V.G. Merzlyakov, e-mail: vgm458@mail.ru.

Получена редакцией 28.11.2022, получена после рецензии 06.02.2023, принята к печати 10.03.2023.

Received by the editors 28.11.2022, received after the review 06.02.2023, accepted for printing 10.03.2023.