

ГОРНОЕ МАШИНОВЕДЕНИЕ

УДК 622.026; 622.243.4; 622.24.051

О ПРИМЕНЕНИИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО КРИТЕРИЯ ОБЪЕМНОГО РАЗРУШЕНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД ПРИ СОВЕРШЕНСТВОВАНИИ ТЕХНОЛОГИИ УДАРНО-ВРАЩАТЕЛЬНОГО БУРЕНИЯ СКВАЖИН

В. Н. Опарин, В. В. Тимонин, В. Н. Карпов, Б. Н. Смоляницкий

*Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН,
E-mail: oparin@misd.ru, timonin@misd.ru, karpov@misd.ru, bsmol@misd.ru,
Красный проспект, 54, 630091, г. Новосибирск, Россия*

Теоретически обоснована и экспериментально доказана в натурных условиях горнодобывающих предприятий России при бурении скважин ударно-вращательным способом эффективность использования энергетического критерия объемного разрушения геоматериалов для оценки применяемых технологий бурения. Осуществлена адаптация этого критерия к энергетическим характеристикам буровых установок различных типов путем введения эмпирических коэффициентов трансформации энергозатрат при рейсовом бурении скважин в соответствующие им энергетические характеристики разрушения напряженных горных пород в призабойной зоне. Приведено математическое описание критерия минимизации затрат энергии ударных импульсов на разрушение горной породы ударно-вращательным способом в зависимости от уровня их напряженности, физико-механических свойств и силовых параметров вращательно-подающего механизма. Введено новое геомеханическое понятие “фактор топологической связности горных пород”, дано его аналитическое выражение с использованием экспериментально измеренных пределов прочности горных пород на одноосное растяжение и сжатие, необходимых для проектирования новых и совершенствования существующих технологий ударно-вращательного бурения скважин в различных горно-геологических и горнотехнических условиях ведения горных работ.

Ударно-вращательное бурение, энергетический критерий объемного разрушения горных пород, нелинейные геомеханические процессы, напряженно-деформированное состояние, буровые установки, энергоэффективность, призабойная зона скважин, физико-механические свойства, фактор топологической связности

DOI: 10.15372/FTPRI20170609

На горнодобывающих предприятиях России в условиях современного промышленного производства при годовом планировании буровзрывных работ на карьерах и рудниках важным технологическим аспектом является выбор и адаптация главных исполнительных органов ударно-вращательного бурения взрывных скважин применительно к конкретным условиям площадей буровых участков с учетом основных природных, технических и технологических факторов [1, 2].

Выбор и адаптация средств проходки скважин, а также режимных параметров бурения с учетом основных характеристик физико-математических свойств породного массива конкретного месторождения без рассмотрения вида их напряженно-деформированного состояния и других энергетических факторов бурового процесса в научно-методическом отношении часто несостоятельно, так как влияние каждого из них имеет свою специфику, влияющую на механизм разрушения породного массива, энергоемкость и в конечном счете себестоимость затрат на бурение скважин [3].

В ИГД СО РАН с целью повышения эффективности буровых работ при разработке и эксплуатации новых и серийных образцов главных исполнительных органов ударно-вращательного бурения — погружных пневмударников — используется комплексная методологическая база, в которой традиционно важную роль занимают следующие оценочные способы: аналитический “качественный”, который основан на математическом анализе сил, действующих на породоразрушающий инструмент; определения физико-механических свойств горных пород в массиве; по буримости — на основании результатов испытаний погружных пневмударников в лабораторных условиях и на горном производстве для различных горно-геологических условий; комбинированный, учитывающий как физико-механические свойства конкретных горных пород, так и их буримость, — представляющий наибольший интерес для практического применения в производственных условиях.

На рис. 1 представлен “алгоритм” (схема) реализации системы повышения эффективности ударно-вращательного бурения, основанный на разработке и эксплуатации как новых образцов пневмударников, так и серийно выпускаемых.



Рис. 1. Схема повышения эффективности ударно-вращательного бурения скважин погружными пневмударниками

Из рис. 1 видно, что предложенная схема реализует оценку эффективности пневмударного бурения в производственных условиях и служит количественной проверкой (доказательной базой) для ранее проведенных исследований математического и/или физического моделирования

при разработке более совершенных образцов погружных ударных машин. Это позволяет оценить влияние одного из основных управляемых факторов на процесс разрушения породного массива, который, по существу, является “неуправляемым” и его необходимо количественно определить с позиций успешности проведенных ранее комплексных исследований, но в иных — натуральных условиях.

Практическая направленность проведения научно-исследовательской работы в условиях промышленного производства заключается в оценке эффективности исполнительных органов пневмоударного бурения и способов их адаптации к реальным горно-геологическим условиям разрушения породного массива при разработке месторождения полезных ископаемых. Это “первичная задача” с учетом требований обеспечения рациональных норм выработки буровых бригад.

На рис. 2 представлен объект реализации предложенных задач в рамках схемы адаптации “управляемых” параметров буровзрывных работ (БВР) к собственно “неуправляемым” для конкретного месторождения.

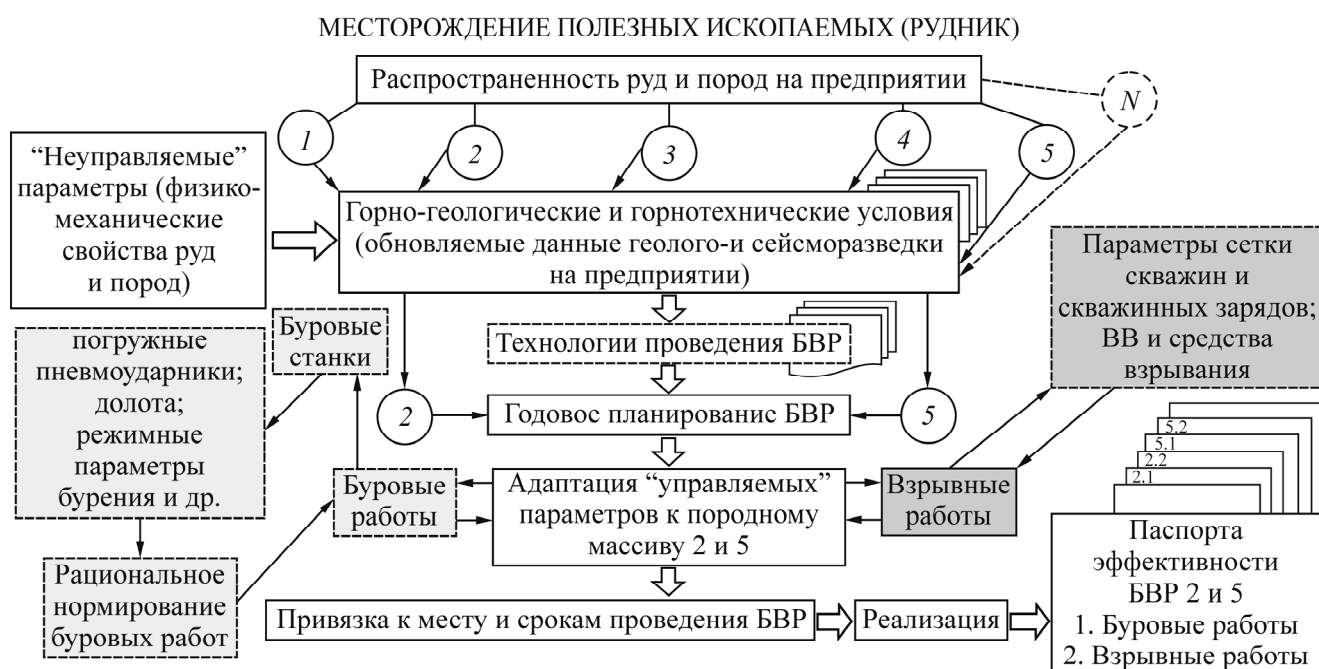


Рис. 2. Принципиальная схема повышения эффективности добычи полезных ископаемых на горных предприятиях с учетом адаптации “управляемых” параметров проведения буровзрывных работ к “неуправляемым”: 1 — магнетитовые кварциты; 2 — железослюдково-магнетитовые кварциты; 3 — силикатно-магнетитовые кварциты; 4 — диорид-порфиты; 5 — слаборудные кварциты; N — потенциал доразведанных руд и пород на месторождении

Паспорта эффективности БВР включают в себя разделы по оценке эффективности ударно-вращательного бурения погружными машинами и взрывных работ с учетом применяемой системы разработки. В них указываются технические, технологические параметры средств проведения БВР и результаты их применения для конкретных горно-геологических и горнотехнических условий буровых участков месторождения с известными физико-механическими свойствами (на рис. 2 схематично представлены паспорта эффективности БВР для участков 2 и 5 с формулярами для буровых и взрывных работ). Компоненты содержания формуляров для буровых работ приведены в [3], а для взрывных работ — в [4].

В ИГД СО РАН совершенствуется методическая база проведения оценочных испытаний погружных пневмоударников по количественным показателям бурения в производственных условиях, позволяющая при использовании видеоакустического способа измерений осуществлять регистрацию (запись), определение и анализ технических и технико-экономических параметров бурения погружными пневмоударниками на станках ударно-вращательного бурения с учетом горно-геологических и горнотехнических условий места проведения испытаний конкретного месторождения [5]. Важной составляющей применяемой методики является оценка эффективности бурения скважин погружными пневмоударниками, где с учетом возможного влияния ряда природных, технических и технологических факторов проявляется их “кумулятивный” эффект, имеющий непосредственное отношение к механизму разрушения породного массива. В данном случае речь идет о безразмерном энергетическом критерии эффективности пневмоударного бурения k , введенном в [1, 2].

Оценка эффективности разрушения породного массива при этом осуществляется с энергетических позиций нелинейной геомеханики — явления знакопеременной реакции горных пород на динамические воздействия и волн маятникового типа [6]. Такая оценка позволяет определить, насколько эффективно использована энергия сжатого воздуха, подведенная к пневмоударнику, по скорости бурения с учетом физико-механических свойств горных пород, применяемой рабочей схемы пневмоударника, его КПД и энергетических характеристик, схемы вооружения буровой коронки, выбора рациональных режимов бурения, используемых системы воздухораспределения машин и “очистных агентов” для освобождения ствола скважины от продуктов разрушения.

В настоящей работе рассмотрены основные результаты исследований, проведенных для обоснования применения безразмерного энергетического критерия объемного разрушения горных пород [7] на примере ударно-вращательного бурения с целью повышения производительности буровых работ в натурных условиях.

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ КРИТЕРИЙ ОБЪЕМНОГО РАЗРУШЕНИЯ ГЕОМАТЕРИАЛОВ КАК ОБОБЩЕННЫЙ ПОКАЗАТЕЛЬ ОПТИМАЛЬНЫХ ЭНЕРГОЗАТРАТ НА БУРЕНИЕ СКВАЖИН В НАПРЯЖЕННЫХ МАССИВАХ ГОРНЫХ ПОРОД С УЧЕТОМ ИХ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ

Несмотря на то что бурение скважин различного назначения — давно и широко применяемый технологический процесс в горном деле, геологической разведке, строительстве и других видах деятельности, тем не менее оно до сих пор во многом остается делом инженерного искусства, основанном на опыте методом проб и ошибок. И это неудивительно, поскольку здесь исследователи, инженеры и проектанты вплотную сталкиваются с чрезвычайно трудной проблемой — установления и использования “обратной связи” между нелинейными геомеханическими процессами разрушения напряженных горных пород и технико-технологическими процессами, осуществляющими это разрушение с оптимальной энергоемкостью.

Учитывая реальную (иерархическую) сложность структурного строения, многофазность, тепловую и физико-механическую неоднородность, а также изменяющийся вид напряженно-деформированного состояния разрушаемых горных пород в призабойной зоне проходимых скважин, заранее трудно ожидать существования “простого решения” отмеченной проблемы. Во всяком случае, при планировании и выполнении технологических процессов бурения горных пород важно учитывать, какой критерий из имеющегося их многообразия (Кулона – Мора, Мизеса, градиентный и др.) на самом деле реализуется в принятой технологической схеме бурения.

Фундаментальная роль в осуществлении проектных решений по оптимизации технико-технологических аспектов буровых работ при создании новой техники конкретного целевого назначения по условиям ее эксплуатации (в первую очередь, по параметрам энергоемкости и ресурса) принадлежит прочностным характеристикам как собственно разрушаемых горных пород, так и породоразрушающих буровых коронок (инструментов). В этом отношении область разрушающего воздействия последних в породном массиве (призобойная зона) представляет собой непосредственный объект для экспериментально-теоретических исследований, имеющих важное значение для практических приложений, в том числе и для “сверхглубокого бурения” [6].

Прочность горных пород — их способность сопротивляться разрушению при воздействии механических нагрузок, гравитационных, тепловых и электромагнитных полей — является характеристикой фундаментальной значимости как для геоматериалов, так и породных массивов практически во всех ныне известных технологических процессах горнодобывающего производства. Большую роль эта характеристика играет также в процессах дезинтеграции горных пород, осуществляемых при технологических взрывах и бурении скважин [8–10].

В ее основе (теоретически) лежат межатомные силы сцепления, оцениваемые примерно в 1/6 часть от модуля продольной упругости. Однако (практически) горные породы — поликристаллические неоднородные по вещественному составу геоматериалы, с иерархической внутренней структурой, обычно выделяемой системами пор и трещин со сложной топологией. В результате наличие такой внутренней структуры для геоматериалов и их породных массивов приводит к существенной зависимости прочностных характеристик горных пород как от испытываемого ими вида напряженно-деформированного состояния, так и скоростных характеристик источников разрушающих воздействий. Это нашло свое отражение в понятиях *статической*, *динамической*, *длительной* и *остаточной* прочности горных пород.

Для механических нагрузок при описании процессов дезинтеграции горных пород обычно используют понятия пределов их прочности на одноосное сжатие и растяжение, на сдвиг и объемную прочность. Последняя характеризуется тремя главными компонентами тензора напряжений ($\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$) в виде параметра Надаи – Лоде:

$$\mu_\sigma = \frac{2\sigma_2 - \sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_2}, \quad (1)$$

который изменяется в диапазоне от -1 до $+1$. Наиболее употребительными в горном деле являются “макропоказатели” прочности горных пород на одноосное сжатие $\sigma_{сж}$ и растяжение σ_p , практически задающие основной диапазон изменения прочностных свойств горных пород при различных видах напряженно-деформированного состояния. Следует особо отметить, что для большинства типов горных пород их предел прочности на одноосное сжатие порядково отличается от предела прочности на одноосное растяжение, наиболее часто оцениваемый диапазоном [9]:

$$\sigma_{сж} \in (5 \div 30)\sigma_p. \quad (2)$$

Учитывая, что диапазоном (2), по аналогии с межатомными силами сцепления, можно количественно оценивать и влияние “фактора топологической связности” между структурными элементами горных пород в их массивах, то при планировании технологических процессов бурения скважин и выбора паспортов ведения буровзрывных работ представляется целесообразным ввести количественную оценку данного фактора α для целей предварительного картирования породных массивов в отмеченных технологических целях:

$$\alpha = \frac{2\sigma_p}{\sigma_{сж} + \sigma_p}. \quad (3)$$

Из (3) следует, что при $0 \leq \sigma_p \leq \sigma_{сж}$ имеем $\alpha \in 0 \div 1$. С учетом (2) нетрудно оценить и “модальный” диапазон изменений параметра $\bar{\alpha}$ согласно (3): $\bar{\alpha} \in 0.33 \div 0.65$. Очевидно, что для “несвязных” гранулированных веществ $\alpha \cong 0$, в то время как для “бездефектных” (равнопрочных) пород $\alpha \cong 1$. В целях более контрастного картирования массивов горных пород по параметру α , для его выражения в (3) можно ввести соответствующий масштабный множитель (нормирующий коэффициент).

Фактор топологической связности горных пород (3) имеет непосредственное отношение к энергоемкости их разрушения в призабойной зоне скважины в процессе проходки. Она обычно находится в напряженно-деформированном состоянии, при котором нормальный компонент тензора напряжений непосредственно у груди забоя σ_r значительно меньше “кольцевого” σ_ϕ . По существу, его можно моделировать испытаниями образцов горных пород на одноосное нагружение до разрушения при слабом боковом отпоре и его динамическом индентировании рабочим инструментом буровой коронки.

Анализ выражения (2) свидетельствует о том, что существенно менее энергоемкий процесс разрушения призабойной зоны скважины будет идти при условиях ее “индентирования” с доминированием роли предела прочности горных пород на растяжение σ_p , а также при значениях α , существенно меньших единицы.

В разрабатываемом подходе к описанию процессов разрушения горных пород при бурении [1] за основу взят энергетический подход как наиболее универсальный с позиций учета основных геомеханических факторов влияния на этот сложный процесс, так и с позиций экономической целесообразности его применения в практических целях. Важно отметить и то, что “принцип минимума энергии” лежит в основе самоорганизации любых природных систем, независимо от сложности их строения. В данном случае, когда теоретическая оценка каждого из потенциально значимых факторов влияния на изучаемый процесс разрушения — нетривиальная задача, энергетический подход также имеет существенные преимущества как “кумулятивный” для учета их совместного влияния.

Как показано в [1, 7, 11], для описания сложных процессов разрушения горных пород в очаговых зонах повышенных напряжений (механические удары, взрывы, землетрясения, горные удары) оказалось весьма полезным безразмерное энергетическое условие $\hbar$ возникновения волн маятникового типа и геомеханических квазирезонансов (безразмерный энергетический критерий объемного разрушения горных пород В. Н. Опарина):

$$\hbar = \frac{W}{Mv_p^2} = \theta \cdot 10^{-9}, \quad \theta \in 1 \div 4, \quad M = \rho V, \quad (4)$$

$$W = \alpha(V)[U_0 + W_k], \quad (5)$$

где $[U_0 + W_k]$ — сумма упругой (потенциальной) U_0 и кинетической W_k энергий структурных элементов горных пород в очаговой зоне их разрушения; $\alpha(V)$ — коэффициент сейсмического действия взрывов по М. А. Садовскому [12], механический аналог которого для процессов бурения дан в [5]; V — объем зоны разрушения (очага); ρ — плотность горных пород; v_p — скорость продольной волны, известным образом зависящая от модуля Юнга, коэффициента Пуассона и плотности горных пород. Обоснование формулы (5) дано в [13].

При бурении скважин ударно-вращательным способом в напряженных массивах горных пород параметр U_0 характеризует уровень их напряженности в призабойной зоне скважины с энергетических позиций (интеграл от упругого потенциала по объему разрушаемой буровой коронкой зоны за период нанесения единичного удара), а W_k — кинетическая энергия, сообщаемая породоразрушающим органом в период его взаимодействия с породным массивом до разрушения призабойной зоны скважины.

Формулы (4) и (5) позволяют дать с позиций теории волн маятникового типа количественную оценку оптимального диапазона энергии, сообщаемой буровой установкой на ее рабочий породоразрушающий орган. С физической точки зрения [1, 7], при энергиях W , отвечающих $\hbar < \theta \cdot 10^{-9}$ (порядка $10^{-11} - 10^{-10}$), процесс бурения практически не осуществляется; при $\hbar > \theta \cdot 10^{-9}$ (порядка 10^{-8} и более) процесс протекает с переизмельчением горной породы. Таким образом, энергетическая зона W , отвечающая $\hbar \in (1 \div 4) \cdot 10^{-9}$, является с отмеченных позиций оптимальной. Данное обстоятельство связано с обоснованием выбора рациональных параметров породоразрушающих инструментов для осуществления буровых работ в различных по физико-механическим свойствам горных породах, а также режимов их взаимодействия с массивом.

Для проверки изложенных теоретических позиций проведены исследования по определению рациональных параметров породоразрушающего инструмента в зависимости от подведенной энергии единичного удара для различных горных пород [1] (табл. 1).

ТАБЛИЦА 1. Динамические параметры очагов коровых землетрясений и подземных взрывов по М. А. Садовскому [12]

Y , кТ	E_0	$\overline{\lg E_c}$	$\overline{V_c}$, см ³	$\overline{L}$, км	Расчетный коэффициент сейсмического действия подземных взрывов, %		
					α , для любых пород	α_1 , для рыхлых пород	α_2 , для средних и плотных пород
1	$4.2 \cdot 10^{19}$	$\frac{17.0 - 16.6}{16.8}$	$6.30 \cdot 10^{13}$	0.7	0.15	0.10	0.3
10	$4.2 \cdot 10^{20}$	$\frac{18.4 - 17.8}{18.1}$	$1.25 \cdot 10^{15}$	1.8	0.30	0.15	0.8–1.0
100	$4.2 \cdot 10^{21}$	$\frac{19.8 - 19.0}{19.4}$	$2.50 \cdot 10^{16}$	5.0	0.60	0.20	2.0–4.0
1000	$4.2 \cdot 10^{22}$	$\frac{21.2 - 20.2}{20.7}$	$5.00 \cdot 10^{17}$	13.5	1.20	0.30	3.0–5.0

Примечание. Черта над математическими символами — средние значения; в числителе диапазон $\lg E_c$ для плотных и рыхлых пород; Y — мощность взрыва; E_0 — полная энергия очаговой зоны землетрясений; E_c — сейсмическая энергия; V_c — объем очаговой зоны землетрясений; L — длина разрыва.

В настоящей статье, в продолжение исследований [1], основное внимание уделяется натурной проверке критерия (4), (5) в производственных условиях проходки скважин ударно-вращательным способом бурения.

ВЕРИФИКАЦИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО КРИТЕРИЯ ОБЪЕМНОГО РАЗРУШЕНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД ПРИ БУРЕНИИ СКВАЖИН НА ГОРНОДОБЫВАЮЩИХ ПРЕДПРИЯТИЯХ РОССИИ

Как известно [14], вещественное содержание руд и вмещающих горных пород не всегда может количественно характеризовать их физико-механические свойства, что необходимо знать при реализации технологических процессов по разработке месторождений полезных

ископаемых. Так, на рис. 3 представлены схема месторождения и диаграмма, характеризующая распространенность основных руд и пород на шахте им. Губкина (Белгородская область) по данным геолого-разведочных работ.

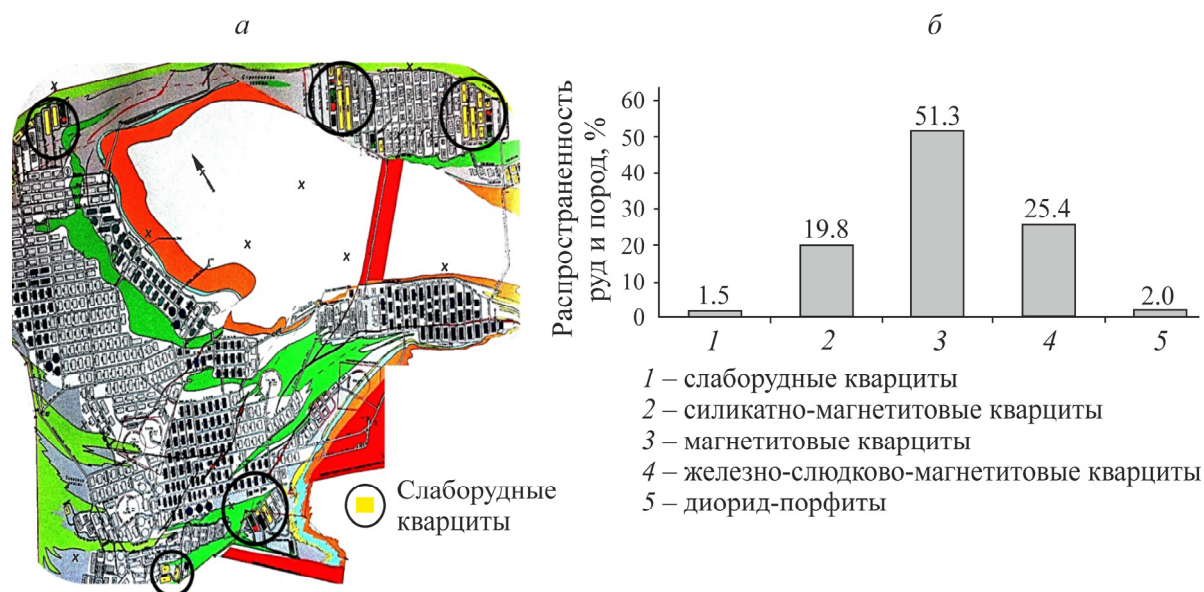


Рис. 3. Схема месторождения (а) и распространенность типов руд и пород (б) на шахте им. Губкина

Прочность наиболее распространенных в руднике магнетитовых кварцитов варьирует от 80 до 136 МПа, а для наиболее крепких слаборудных и безрудных кварцитов этот показатель составляет 190–200 МПа [15]. В приведенном примере большая часть годовых объемов бурения выпала именно на эту группу пород, составляющую 1.5% по месторождению, но вызвавшую целый комплекс проблем, обусловленных снижением производительности бурения из-за использования пневмоударников с низкими энергетическими параметрами, буровых долот с вооружением, не соответствующим физико-механическим условиям породного массива, а также неверно выбранными режимными параметрами бурения (высокая скорость вращения става, усилие подачи и др.).

Подробная геологическая характеристика на планах буровых участков распространена на всех отечественных рудниках, однако при этом обычно отсутствуют количественные описания по таким важным механическим показателям, как прочность, трещиноватость и абразивность. Это следовало бы осуществлять с необходимой детальностью уже на стадии доразведки месторождения для соответствующих горизонтов, с конкретной их адресной количественной привязкой к геологической сетке.

Как показывает опыт научных экспедиционных исследований, “предвестники” технологических проблем на горных предприятиях, как правило, начинаются “неожиданно” — с резкого снижения производительности бурения, а затем уже переходят в технологический аспект [16]. Даже при наличии и соответствии прочностных характеристик породного массива, например для осуществления взрывания блока при отработке полезного ископаемого системой этажного обрушения, перед началом проведения буровых работ эти показатели оказываются сложно применять для адекватного нормирования работы буровых бригад: часто задается диапазон прочностных свойств пород (например, 100–150 МПа) для всего блока. При таких условиях получается, что если местное “нормирование” проведено на участке блока с прочностью 100 МПа, составляющего 10% объема буровых работ, то на его оставшихся 90% у буровых бригад начнутся проблемы с выполнением установленных норм выработки. Это выявляется

уже с первых рейсов буримых скважин. Поэтому неудивительно, что при таком “местном нормировании” буровые бригады вынуждены занижать производительность буровых работ. В противном случае наступают “экономические санкции”.

И, тем не менее, в геологических отделах горных предприятий нередко достаточно подробно представлена информация по объемной массе руд и пород, которую в обязательном порядке предоставляют обогащательным комбинатам. Эти показатели в совокупности с данными по скорости продольных волн, получаемых в ходе малоглубинной сейсморазведки, уже могут вполне конструктивно использоваться при расчете энергетического критерия объемного разрушения горных пород при бурении скважин в качестве объективного показателя в осуществлении этого технологического процесса (*в обозначении для буровых систем*), определяемого по формуле:

$$k = \frac{E(t)\alpha}{V_p(t)\rho v_p^2} = (1 \div 4) \cdot 10^{-9}, \quad (6)$$

где $E(t)$ — энергия, затрачиваемая пневмоударником на разрушение породного массива забоя скважины при прохождении контрольного участка рейса; α — расчетный коэффициент сейсмического действия подземных взрывов по [5]; $V_p(t)$ — объем разрушенной породы при прохождении контрольного участка рейса буримой скважины.

Для нужд малоглубинной сейсморазведки в ИГД СО РАН активно ведутся научно-исследовательские работы по созданию мобильных малогабаритных сейсмоисточников автоматического и полуавтоматического действия для открытых и подземных горных работ, имеющих широкий спектр применения в горном деле — от изучения механизмов разрушения руд и пород при внедрении породразрушающих элементов в образцы геоматериалов до предупреждения и прогнозирования горных ударов на рудниках [17–20].

Определение энергетических параметров буровых машин для вычисления безразмерного энергетического критерия k имеет свои особенности и подходы. “Эталонными” для его расчетов являются результаты лабораторных исследований на испытательном полигоне “Зеленая горка” ИГД СО РАН, где при помощи стендового оборудования, показанного на рис. 4, по известной в России методике Б. В. Суднишникова определялись мощностные и расходные характеристики отечественных машин, а также их КПД [21–24].

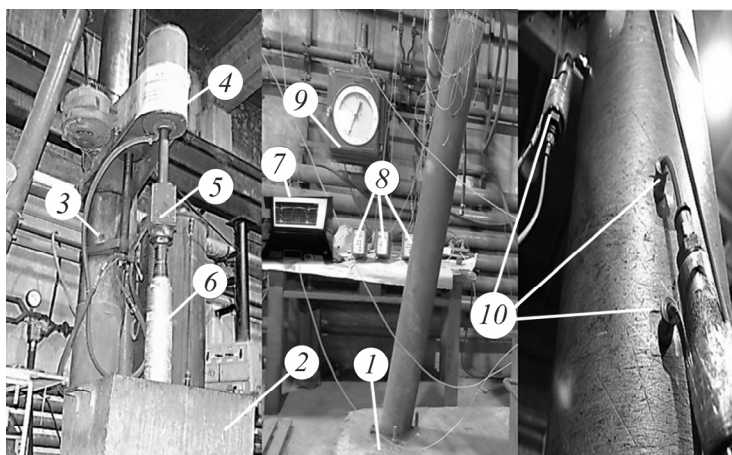


Рис. 4. Стенд для определения энергетических параметров погружных пневмоударников ГД-251: 1 — фундамент; 2 — энергопоглотитель (образец горной породы); 3 — станина; 4 — прижимное устройство; 5 — переходник; 6 — опытный образец пневмоударника (ПВ170); 7 — ПК с АЦП Е 14-140; 8 — одноканальные усилители сигналов тип 5011; 9 — расходомер ДС-300; 10 — пьезоэлектрические датчики давления

Для обоснования возможности натурального применения энергетического критерия (6) введены следующие технико-технологические условия:

- при расчете безразмерного энергетического критерия k при бурении скважин учитывалась энергия сжатого воздуха, подводимая к первой штанге бурового станка в буровой колонне, поскольку фактический расчет энергии, подведенной к машине, а далее через инструмент — на забой, в производственных условиях затруднителен. Это связано со сложностью ее достоверного определения из-за утечек энергоносителя при прохождении по ставу, влияния наработки машин и инструмента на энергетические показатели машины и некоторые другие особенности, определяющие КПД пневмоударника в процессе бурения скважин в режиме реального времени;
- объем разрушенной породы в процессе бурения находился с учетом диаметра скважины и длины буровых штанг — по интервалам рейсового пути;
- плотность пород для буровых участков уточнялась в технологических отделах горнодобывающих предприятий;
- значения скорости распространения продольных волн уточнялись по данным сейсморазведочных работ, проводимых на месторождениях полезных ископаемых, а также по справочным материалам проведенных ранее исследований, в частности в Сибирском федеральном округе [25].

На рис. 5 представлен экспедиционный комплект измерительной аппаратуры для регистрации перемещений исполнительных органов буровой установки и режимных параметров в процессе проходки скважин. Он включает цифровую камеру (ЦК), установленную неподвижно на штативе, для регистрации перемещения буровых штанг при ударно-вращательном бурении и вспомогательную ЦК — для регистрации рабочего давления с манометра; маркировочные средства для обозначения нумерации штанг (для удобства обработки видеоматериалов), а также дополнительный источник освещения — фонарь.

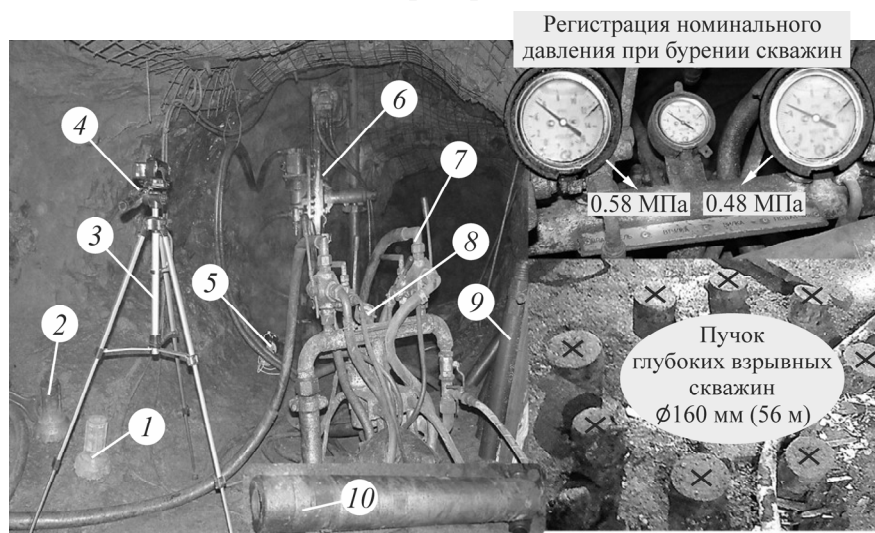


Рис. 5. Экспедиционный комплект регистрирующей аппаратуры для шахтных условий Таштагольского железорудного месторождения: 1 — долото КНШ-160Ш5; 2 — долото КНШ-180К/160Ш (забурочное); 3 — штатив; 4 — цифровая камера; 5 — фонарь; 6 — буровой станок БП-100; 7 — выносной пульт управления; 8 — манометр; 9 — штанга (0.75 м); 10 — пневмоударник П-160-5,5Ш (МХ)

Время перемещения пневмоударника на контрольных участках массива, равных длине погружаемой штанги, определялось по данным спектрального анализа акустической записи процесса бурения (рис. 6). Устанавливались времена основной $t_{\text{осн}}$ и вспомогательной $t_{\text{вс}}$ работы по отличительной особенности ударных способов разрушения — наличию характерных удар-

ных импульсов $f_{\text{уд}}(t)$, возникающих при работе машин, идентифицирующих время “чистого бурения” ударного механизма из оперативного $t_{\text{оп}}$, которое включает в себя $t_{\text{осн}}$ и $t_{\text{вс}}$ при бурении для каждой штанги рейса буримой скважины длиной L ($t_{\text{оп}} = t_{\text{вс}} + t_{\text{осн}}$ для участка L). На рис. 6 приведен пример такой идентификации “чистого бурения” $t_{\text{осн}}$ по спектральному анализу записей акустических сигналов при запуске и остановке погружного пневмударника.

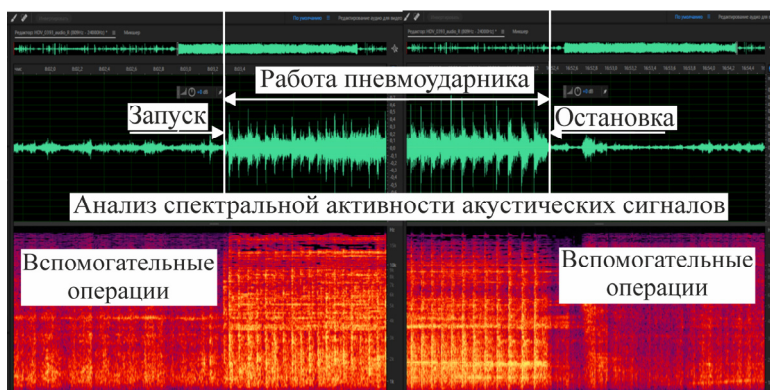


Рис. 6. Определение времени “чистого” бурения интервала скважины при работе пневмударника

Без необходимости более “тонкого” масштабирования акустических данных, можно и по амплитудным “перепадам” в акустических записях определить время основной и вспомогательной работы погружных пневмударников. На рис. 7 представлен фрагмент аудиоциклограммы проходки скважины диаметром 160 мм пневмударником П-160-5,5Ш (АО “Машиностроительный холдинг”, г. Екатеринбург) при бурении пучка глубоких взрывных скважин буровой установкой БП-100 в руднике Таштагол (АО “Евразруда”) в 2016 г.

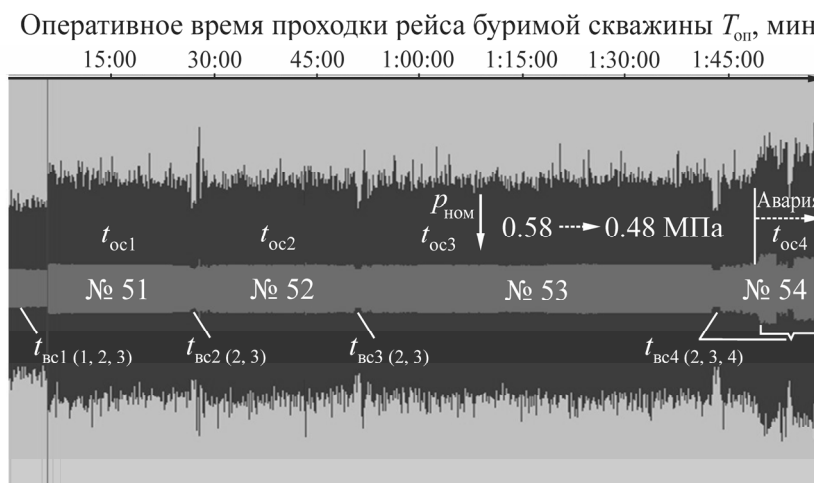


Рис. 7. Фрагмент циклограммы рейса буримой скважины пневмударником П-160-5,5Ш на буровом станке БП-100: 1 — позиционирование станка (разворот); 2 — наращивание бурового става; 3 — очистка ствола скважины от продуктов разрушения породного массива; 4 — мероприятия по ликвидации аварийной ситуации

Проходка рейса глубокой взрывной скважины закончилась аварийной ситуацией и ее длительным устранением (до конца рабочей смены буровой бригады) ввиду отсутствия своевременных контраварийных мероприятий при проходке штанги № 53. По акустическим данным и показателям манометра было установлено, что при падении номинального давления с 0.58 до

0.48 МПа механическая скорость бурения снизилась в 2.2 раза. При этом мероприятия по “усиленной очистке” скважины (режим блокировки пневмоударника при отрыве от забоя скважины) бурильщиком не осуществлялись. Технологическая особенность бурения на данном буровом участке предполагала “усиленную очистку скважины” лишь перед погружением каждой новой штанги. Это объяснялось малым размером используемых буровых штанг — 0.75 м (наибольшее распространение имеют штанги длиной 1.2 м). Известно, что короткие штанги ведут к искривлению ствола скважины, вызывая непрогнозируемые углы девиации буримых скважин от установленных показателей паспорта БВР, снижение мощности погружных пневмоударников и увеличение количества вспомогательных операций по наращиванию и разборке става при проходке глубоких взрывных скважин [26].

Также из рис. 7 видно, что время “чистого” бурения для каждой штанги не прерывается вспомогательными операциями в ходе прохождения скважины, в отличие от станка НКР 100, где при бурении, без вмешательства бурильщика, каждый интервал забуриваемой штанги будет иметь три малопротяженных участка вспомогательных работ с интервалами от 2 до 4 с, вызванных перехватом штанги с коротким отрывом пневмоударника от забоя из-за короткого хода (365 мм) механизма подачи бурового станка (рис. 8).

Индивидуальный “почерк” проходки скважин буровыми установками ударно-вращательного бурения, определяемый акустическим способом, позволяет установить время основной и вспомогательной работы в течение всего рейса(ов) буримых скважин и найти показатели механической V_m и рейсовой V_r скорости бурения на контрольных участках забуриваемых штанг (или всей штанги) с учетом их размера, а также известного хода механизма подачи отдельно взятой буровой машины согласно техническим характеристикам.

Важно отметить, что даже при одновременной работе двух установок НКР 100 на удалении 15–20 м друг от друга и размещении измерительной аппаратуры на удалении не более 5 м от станков расшифровать запись возможно и без шумовой обработки (на рис. 8 показан этот случай: шумовой фон автоматического перехвата штанг станком НКР 100 по амплитудному анализу выше, чем фон работы буровых машин). При расшифровке полученных результатов необходимо иметь представление о циклограмме работы станка при прохождении рейса буримой скважины, в частности о вспомогательных операциях (наращивание и развинчивание става и др.), зависящих от уровня механизации и автоматизации буровых установок, которые имеют свой индивидуальный “почерк” по продолжительности, амплитуде и частоте акустических сигналов.

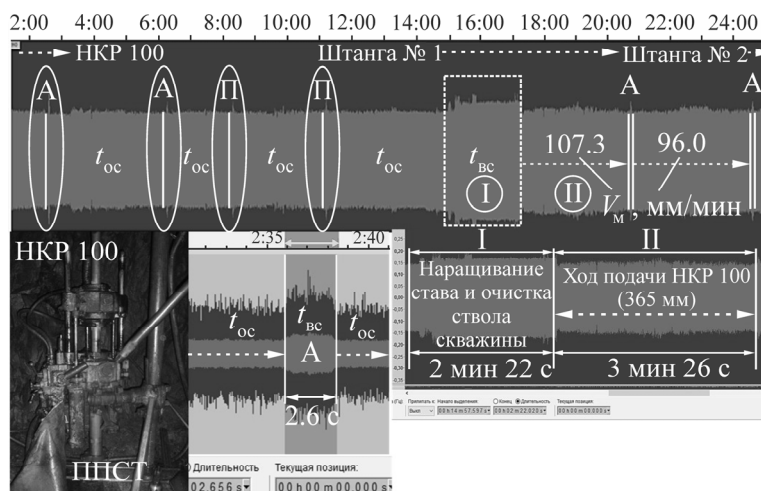


Рис. 8. Фрагмент циклограммы рейса буримой скважины пневмоударником ППСТ (ООО “Сталь-Трест”, г. Москва) на станке НКР 100: А — перехват штанги станком НКР 100 автоматический; П — перехват штанги принудительный (бурильщик); А, П — вспомогательные операции ($t_{ос}$)

Акустические записи использовались как основные для определения времени, затраченного на разрушение объемов горной массы при бурении скважин на контрольных участках, равных длине забуриваемых штанг; видеоданные являлись вспомогательными для уточнения операций, проводимых бурильщиком на участках $t_{\text{вс}}$. Для расчета времени прохождения более коротких интервалов разрушения пород, расположенных по всей длине буровых штанг, использовались данные видеорегистрации. Для удобства их обработки в файл записи вдоль оси перемещения буровых штанг устанавливался постоянный фотосубтитр в виде измерительной шкалы на всем протяжении исследуемых процессов на видео. Монтаж субтитра осуществлялся с помощью программы видеоредактора типа Pinnacle Studio. Количество и интервал делений шкалы задавались с учетом длины погружаемых штанг. Интервалы пути, отображенные на фотосубтитре, вычислялись при помощи измерительных программ (“экранных линеек”), позволяющих получать размеры различных объектов с экрана монитора ПК в пикселах. Использование этих программ для определения линейных размеров возможно и без встроенных в файл фотосубтитров (его “прожига”).

При обработке данных видеозаписи таким способом отслеживается лишь изменение времени перемещения неподвижно установленного ориентира на буровой штанге или ориентира в виде элементов конструкции бурового става, служащих горизонтальной меткой (место соединения патрона вращателя с буровой штангой) относительно контрольных участков шкалы измерительного субтитра (рис. 9).

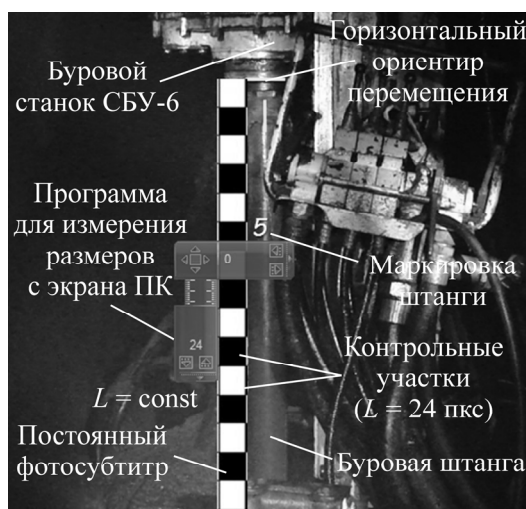


Рис. 9. Определение параметров для расчета объемной скорости бурения на участках с постоянными линейными размерами при проходке скважин пневмоударником П130ШВ на станке СБУ-6 (Абаканское железорудное месторождение)

Перевод длины пройденных участков к натурным единицам осуществляется по формуле

$$L = L_{\text{пкс}} k_m, \quad (7)$$

где $L_{\text{пкс}}$ — путь, пройденный при бурении скважин пневмоударником, измеренный в пикселах; $k_m = L_0 / L_{\text{ок}}$ — масштабный коэффициент (L_0 — размер масштабного шаблона, установленного на буровой штанге в натуральную величину; $L_{\text{ок}}$ — размер масштабного шаблона на видео, в качестве которого может быть использован размер внешнего диаметра буровой штанги).

За верхний предел точности измерений в проведенных исследованиях взяты требования инструкций по определению категорий горных пород по буримости (ЦБНТ 1963) — по затратам основного времени бурения 1 п. м при проходке скважин станками вращательного и ударно-вращательно бурения [27–29]. Расчет времени проводится с точностью до 1 с, а “объема работ” (длина пройденных скважин) — с точностью до 0.01 м. В осуществленных способах измерений использовались цифровые регистрирующие устройства, минимизирующие влияние “человеческого фактора” и позволяющие сохранять, уточнять и анализировать полученные результаты вне производственных участков. Хронометраж времени “классическим” способом на горных предприятиях: “человек – секундомер – измерение” — не обладает такой возможностью.

Рассмотрим далее практические подходы, используемые при расчете безразмерного энергетического критерия k с помощью рассмотренных ранее способов. В общем виде энергия, затрачиваемая на разрушение породного массива при бурении скважин, записывается формулой

$$E = W\tau,$$

где W — мощность машины, подведенная к породоразрушающему инструменту (принимая как подведенную к забою), Вт; τ — продолжительность процесса разрушения пород контрольного участка при ударно-вращательном бурении, с. Значение W находим по формуле

$$W = W_c \eta,$$

где W_c — мощность энергоносителя, подведенного к буровому ставу, обеспечивающего работу пневмоударника и очистку скважины от шлама в процессе бурения скважин, Вт; η — КПД пневмоударника, рассчитанный по данным комплексных лабораторных испытаний, проведенных в ходе разработки машин на полигоне “Зеленая горка”. Значение W_c определяется по формуле [30]:

$$W_c = \frac{RT}{\mu} Q_m \ln \frac{p}{p_{\text{атм}}}, \quad (8)$$

здесь $R = 8.31$ — универсальная газовая постоянная, Дж/(кмоль·К); $T = t + 273.15$ — абсолютная температура воздуха, К; $\mu = 0.02896$ — молекулярная масса воздуха, кг/кмоль; Q_m — массовый расход воздуха, кг/с; p — рабочее (номинальное) давление пневмоударника, МПа; $p_{\text{атм}}$ — атмосферное давление.

Массовый секундный расход воздуха в выражении (8) равен

$$Q_m = \frac{Q_{\text{об}}}{\rho \cdot 60},$$

где $Q_{\text{об}}$ — объемный расход воздуха, потребляемый погружным пневмоударником при бурении скважин, м³/мин; ρ — плотность воздуха при нормальном атмосферном давлении, кг/м³ (при изменении температуры t , см. табл. 2).

ТАБЛИЦА 2. Изменение плотности воздуха от температуры (из уравнения Клайперона)

$t, ^\circ\text{C}$	35	30	25	20	15	10	5	± 0	-5	-10	-15	-20	-25
$\rho, \text{кг/м}^3$	1.145	1.164	1.183	1.204	1.225	1.246	1.269	1.292	1.316	1.341	1.367	1.394	1.422

С использованием (8) рассмотрим пример расчета мощности энергоносителя W_c , подведенного к ставу, при $t = 10^\circ\text{C}$, номинальном давлении рабочей среды (воздуха) $p = 2.4$ МПа с расходом воздуха 24 м³/мин: $W_c = (8.31 \cdot 283.15 / 0.02896)(24 / (60 \cdot 1.246)) \ln(2400000 / 101326) = 128222.19 = 128222$ Вт.

Таким образом, за время $\tau = 11$ с внедрения погружного пневмоударника ПВ170 расходуемая энергия сжатого воздуха, подведенного к ставу, составит $E_c = 11 \cdot 128\,222 = 1\,410\,442$ Дж. Зная мощность погружного пневмоударника ($W = 25\,844$ Дж), вычисленную по результатам стендовых испытаний, определяем энергию, подведенную к породоразрушающему инструменту: $E = 11 \cdot 25\,844 = 128\,222$ Дж. Следовательно, КПД пневмоударника $\eta = 25\,844 / 128\,222 \approx 0.2$.

Для обоснования применения безразмерного энергетического критерия k в практике ударно-вращательного бурения погружными пневмоударниками проведен соответствующий комплекс научно-исследовательских работ на ряде горнодобывающих предприятий России. В табл. 3 представлены полученные исходные экспериментальные данные, необходимые для расчета энергетического критерия k .

Рассмотрим пример практического расчета безразмерного энергетического критерия k (6) для одного из контрольных участков длиной $L = 0.1$ м при бурении скважины диаметром 172 мм погружным пневмоударником ПВ170, пройденного за 11 с.

Подставляя исходные данные из табл. 3 (эксперимент № 1) в (6), получим:

$$k = \frac{3 \cdot 10^{-6} \cdot (25\,844 \cdot 11)}{2.958 \cdot 10^{-3} \cdot 2600 \cdot 5000^2} = 4.27 \cdot 10^{-9}.$$

В табл. 4 для одного из пяти проведенных натурных экспериментов № 1 представлен пример заполнения исходных данных для расчета энергетического критерия k в двух вариантах — k и k_c . Критерий k_c рассчитывается по (6), но вместо энергии, затрачиваемой на разрушение породы непосредственно погружным пневмоударником на забой скважины $E(t)$, в формуле используем показатель $E_c(t)$.

Расчет энергетического критерия по варианту k_c применялся в эксперименте № 2 ввиду отсутствия достоверной информации о мощностных характеристиках пневмоударника зарубежного образца (данных о КПД пневмоударника по результатам стендовых испытаний зарубежного образца нет) и в эксперименте № 4 — для наглядного количественного отображения работы машин с высокой энергоемкостью. Здесь же приведены результаты расчета стоимости затрат на энергоноситель (воздух) при прохождении контрольных участков в породных массивах. При расчете использовалась “секундная удельная стоимость” воздуха (руб./с), полученная по данным табл. 3.

О ЗАВИСИМОСТИ ИЗМЕНЕНИЯ КРИТЕРИАЛЬНОГО ПОКАЗАТЕЛЯ ОБЪЕМНОГО РАЗРУШЕНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД ОТ ГЛУБИНЫ БУРЕНИЯ В НАТУРНЫХ УСЛОВИЯХ ГОРНОДОБЫВАЮЩИХ ПРЕДПРИЯТИЙ

Для экспериментальной верификации исходного безразмерного энергетического критерия k (4), (5) в промышленных условиях горнодобывающих предприятий в данном разделе используется более общее понятие — “критериальный показатель k ” объемного разрушения горных пород в процессе бурения скважин. В отличие от понятия “энергетического критерия k ”, характеризующегося выделенным диапазоном его значений согласно (4)–(6) — $k \in (1 \div 4) \cdot 10^{-9}$, понятие “критериального показателя k ” может относиться к более широкому диапазону значений энергий W , применяемому в буровой технике. По существу, “критериальный показатель k ” может принимать любые положительные значения в соответствии с его общей функциональной зависимостью (4) по учитываемым механическим параметрам (аргументам).

ТАБЛИЦА 3. Исходные данные для расчета объемного безразмерного энергетического критерия k (эксперименты № 1 – 5)

Номер эксперимента	1	2	3	4	5
Месторождение	Карьер “Ложок” (Искитимский р-н, Новосибирская обл.)	Карьер “Коеп” (Тогучинский р-н, Новосибирская обл.)	Карьер “Борок” (г. Новосибирск)	Абаканский рудник (Красноярский край)	Шахта им. Губкина (Белгородская область)
Руды и породы бурового участка	Мраморизованный известняк	Диабаз	Гранит	Песчаник	Слабобурные кварциты
Прочность, МПа	140	160	125	80	193
Объемная масса, кг/м³	2600	2700	2660	2460	2810
Скорость продольных волн v_p , м/с	5000	6000	5500	3000	5590
Коэффициент сейсмического воздействия a	0.3				
Температура воздуха, К	283.15	288.15	288.15	295.15	293.15
Плотность воздуха, кг/м³	1.246	1.225	1.225	1.196	1.204
Особые условия	—	—	Обводненность, трещиноватость I категории	—	Класс абразивности IV
Погружные пневмодарники					
Марка	ПВ170	СОР64.2	ПВ170М	ПВ170М	ПВ170
Номинальное давление, МПа	2.4	1.2		0.6	0.65
Диаметр буримой скважины, мм	172	165	172	130	105
Объемный расход, м³/мин	24	11.5	12	8	4.8
Удельная стоимость потребления воздуха C , руб./мин*	19.92	9.54	9.96	12.8	7.68
Интервал контрольных участков, м	0.1	1.0	1.0	0.1	1.2
*Данные по стоимости воздуха предоставляют предприятия с учетом затрат на компрессорное оборудование, в нашем случае принимаем для открытых работ — 50 руб./ч, для подземных условий — 100 руб./ч					
Мощность I , Вт	25844	—	11776	4000	2800
Мощность I_c , Вт	128222	47984	50071	26423	15687
					16630

ТАБЛИЦА 4. Расчет объемного энергетического критерия k (на примере эксперимента № 1, см. табл. 3)

Номер участка	τ , с	E_c , Дж	E , Дж	αE	$\nu \rho v_p$	k_c	k	C	V_m , м/мин
1	15.4	1974619	397997.6	1.193993	2E+08	2.97E-08	5.98E-09	5.1	0.389
2	26.4	3385061	682281.6	2.046845	2E+08	5.09E-08	1.03E-08	8.7	0.227
3	22.0	2820884	568568.0	1.705704	2E+08	4.24E-08	8.54E-09	7.5	0.272
4	52.8	6770122	1364563.0	4.093690	2E+08	1.02E-07	2.05E-08	17.5	0.113
5	26.4	3385061	682281.6	2.046845	2E+08	5.09E-08	1.03E-08	8.7	0.227
6	26.4	3385061	682281.6	2.046845	2E+08	5.09E-08	1.03E-08	8.7	0.227
7	11.0	1410442	284284.0	0.852852	2E+08	2.12E-08	4.27E-09	3.6	0.545
8	11.0	1410442	284284.0	0.852852	2E+08	2.12E-08	4.27E-09	3.6	0.545
9	11.0	1410442	284284.0	0.852852	2E+08	2.12E-08	4.27E-09	3.6	0.545
10	11.0	1410442	284284.0	0.852852	2E+08	2.12E-08	4.27E-09	3.6	0.545
11	19.8	2538796	511711.2	1.535134	2E+08	3.81E-08	7.69E-09	6.5	0.303
12	19.8	2538796	511711.2	1.535134	2E+08	3.81E-08	7.69E-09	6.5	0.303
13	19.8	2538796	511711.2	1.535134	2E+08	3.81E-08	7.69E-09	6.5	0.303
14	26.4	3385061	682281.6	2.046845	2E+08	5.09E-08	1.03E-08	8.7	0.227
15	39.6	5077591	1023422	3.070267	2E+08	7.63E-08	1.54E-08	13.1	0.151
16	27.5	3526105	710710.0	2.132130	2E+08	5.30E-08	1.07E-08	9.1	0.218
17	9.2	1179642	237764.8	0.713294	2E+08	1.77E-08	3.57E-09	3.0	0.652
18	10.5	1354024	272912.6	0.818738	2E+08	2.03E-08	4.10E-09	3.5	0.568
19	11.2	1436086	289452.8	0.868358	2E+08	2.16E-08	4.35E-09	3.7	0.535
20	12.8	1641242	330803.2	0.992410	2E+08	2.47E-08	4.97E-09	4.2	0.468
21	12.8	1641242	330803.2	0.992410	2E+08	2.47E-08	4.97E-09	4.2	0.468
22	12.8	1641242	330803.2	0.992410	2E+08	2.47E-08	4.97E-09	4.2	0.468
23	12.8	1641242	330803.2	0.992410	2E+08	2.47E-08	4.97E-09	4.2	0.468
24	11.2	1436086	289452.8	0.868358	2E+08	2.16E-08	4.35E-09	3.7	0.535
25	12.8	1641242	330803.2	0.992410	2E+08	2.47E-08	4.97E-09	4.2	0.468
26	12.8	1641242	330803.2	0.992410	2E+08	2.47E-08	4.97E-09	4.2	0.468
27	12.8	1641242	330803.2	0.992410	2E+08	2.47E-08	4.97E-09	4.2	0.468
28	12.8	1641242	330803.2	0.992410	2E+08	2.47E-08	4.97E-09	4.2	0.468
29	11.2	1436086	289452.8	0.868358	2E+08	2.16E-08	4.35E-09	3.7	0.535
30	14.4	1846397	372153.6	1.116461	2E+08	2.77E-08	5.59E-09	4.7	0.416
31	14.4	1846397	372153.6	1.116461	2E+08	2.77E-08	5.59E-09	4.7	0.416
32	11.2	1436086	289452.8	0.868358	2E+08	2.16E-08	4.35E-09	3.7	0.535
33	16.0	2051552	413504.0	1.240512	2E+08	3.08E-08	6.21E-09	5.3	0.375
34	14.4	1846397	372153.6	1.116461	2E+08	2.77E-08	5.59E-09	4.7	0.416
35	12.8	1641242	330803.2	0.992410	2E+08	2.47E-08	4.97E-09	4.2	0.468
36	11.2	1436086	289452.8	0.868358	2E+08	2.16E-08	4.35E-09	3.7	0.535
37	11.2	1436086	289452.8	0.868358	2E+08	2.16E-08	4.35E-09	3.7	0.535
38	11.2	1436086	289452.8	0.868358	2E+08	2.16E-08	4.35E-09	3.7	0.535
39	9.6	1230931	248102.4	0.744307	2E+08	1.85E-08	3.73E-09	3.1	0.625
40	12.8	1641242	330803.2	0.992410	2E+08	2.47E-08	4.97E-09	4.2	0.468
41	11.2	1436086	289452.8	0.868358	2E+08	2.16E-08	4.35E-09	3.7	0.535
42	12.8	1641242	330803.2	0.992410	2E+08	2.47E-08	4.97E-09	4.2	0.468
43	12.8	1641242	330803.2	0.992410	2E+08	2.47E-08	4.97E-09	4.2	0.468
44	11.2	1436086	289452.8	0.868358	2E+08	2.16E-08	4.35E-09	3.7	0.535

Примечание. В расчетах также используются следующие значения: $W_c = 128\,222$ Вт, $W = 25\,844$ Вт, $L = 0.1$ м, $\nu = 0.002958$ м³, $\alpha = 0.000003$, $v_p = 25000000$ (м/с)², $\rho = 2700$ кг/м³.

В приводимых ниже данных натуральных экспериментов решалась “двуединая задача”: каков реальный диапазон значений показателя k по (6) при осуществлении бурения скважин для месторождений твердых полезных ископаемых с разными типами буровых установок и насколько он близок к диапазону оптимальных значений $k \in (1 \div 4) \cdot 10^{-9}$. Понятно, что заранее что-либо утверждать по этому сложному вопросу невозможно, учитывая большую неоднородность породного массива, технико-технологических и энергетических аспектов в процессах бурения.

В соответствии с представленными в табл. 3 натурными данными по пяти горнодобывающим предприятиям России (три карьера строительного камня и два рудника) приведем результаты натуральных экспериментов для ответа на поставленный вопрос.

Эксперимент № 1. Карьер “Ложок”, буровой станок ROC L8 (Швеция), погружной пневмоударник ПВ170 разработки ИГД СО РАН; осуществлялось бурение взрывных скважин диаметром 172 мм в мраморизованном известняке. В эксперименте перед оператором бурового комплекса ставилась задача “произвольно” произвести изменения режимных параметров бурения — от *малопродуктивного* (режим “забурки”) до *рационального*, обеспечивающего наибольшую производительность при рабочем давлении 2.4 МПа.

На рис. 10 показана результирующая зависимость изменения значения безразмерного критериального показателя k в процессе поинтервального бурения скважины. Видно, что до глубины 1.7 м бурение ведется в режиме “забурки” верхнего трещиноватого слоя горной породы, предразрушенного взрывом. Далее наблюдается установившийся процесс бурения с постоянными режимными параметрами, при котором значение энергетического критерия k близко к $5 \cdot 10^{-9}$. Это немного выше оптимального его диапазона значений — $(1 \div 4) \cdot 10^{-9}$. Для расчета затраченной на разрушение забоя энергии принята энергия удара ударника по породоразрушающему инструменту, определенная в стендовых условиях лаборатории бурения и технологических импульсных машин ИГД СО РАН по измеренным индикаторным диаграммам изменения давления сжатого воздуха в рабочих камерах пневмоударника. Закономерно выделяются два интервала максимальных значений критерия k . Последующее падение его значений вызвано принудительной и интенсивной очисткой скважины от шлама оператором буровой установки. На рис. 11 представлено место проведения исследований — карьер “Ложок” и бурение скважины отечественной погружной машиной на станке ROC L8.

Эксперимент № 2. Карьер “Коев”, породный массив представлен диабазами. Бурение велось двумя пневмоударниками: СОР64.2 фирмы Atlas Copco (Швеция) и ПВ170М разработки ИГД СО РАН (отличие пневмоударника ПВ170М от ПВ170 заключается в повышенных энергетических характеристиках). Буровой станок — SWDB165 (Китай). Давление сжатого воздуха 1.2 МПа; расход воздуха 11.5 и 12 м³/мин, диаметры буримых скважин — 165 и 172 мм соответственно.

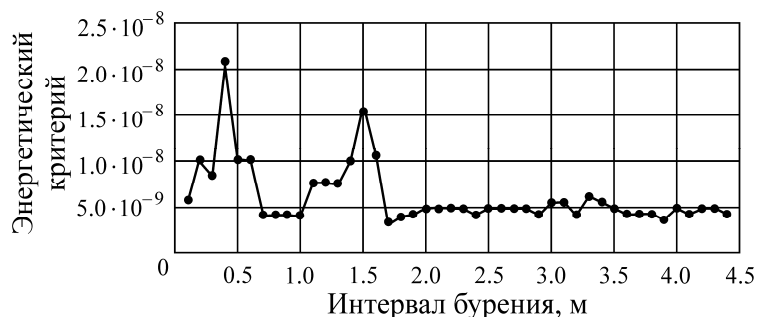


Рис. 10. Изменение критериального показателя k с глубиной поинтервального бурения мраморизованного известняка (карьер “Ложок”)



Рис. 11. Карьер “Ложок” (Новосибирская область) (а), буровой станок ROC L8 (б)

Оценка проводилась по критериальному показателю k_c ввиду отсутствия данных об энергетических параметрах импортного образца для определения k (рис. 12). Несмотря на большую затрачиваемую мощность отечественного пневмоударника, энергоёмкость разрушения коенских диабазов имеет более низкие показатели при прохождении скважины на глубине 8 м с интервалом контрольных участков 1 м. Значение показателя k_c при бурении скважин указанными пневмоударниками находится в пределах $\sim (1 \div 2) \cdot 10^{-8}$. Поскольку подводимая энергия на разрушение пород оценивалась по затраченной энергии сжатого воздуха, то с учетом КПД пневмоударника (0.1–0.25) значение этого критериального показателя становится близким к диапазону оптимальных его значений — $(1 \div 4) \cdot 10^{-9}$.

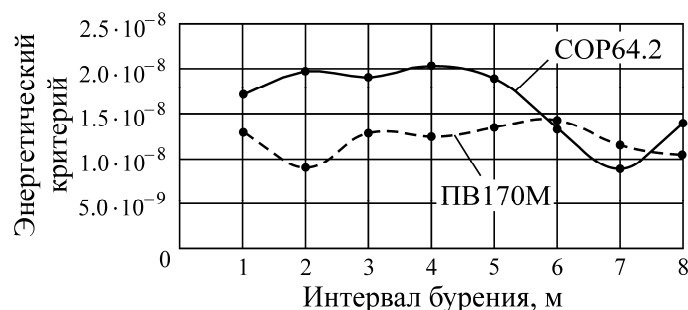


Рис. 12. Изменение критериального показателя k_c с глубиной поинтервального бурения диабазов (карьер “Коен”)

На рис. 13 приведено фото, показывающее структуру породного массива, которая меняется от устья скважины в сторону снижения дезинтеграции. При этом стенки скважины имеют более устойчивое состояние, здесь меньше трещин и разрушений.

Важно отметить, что по механической скорости бурения машины имели близкие показатели, но энергетический критерий выявил “лидера”: у отечественного пневмоударника больший диаметр долота — 172 мм, а у импортного образца — 165 мм (табл. 3). Импортный образец в меньшей степени предназначен для работ на повышенном давлении, его номинальный диапазон начинается от 2 МПа [31–33]. Учитывая, что шведские высокотехнологичные машины данного типоразмера вместе с долотами стоят от 9 тыс. евро (выставка “Уголь России и Майнинг-2017”), целесообразно использование отечественной продукции, которая позволит снизить себестоимость бурения 1 п. м буримых скважин на горных предприятиях [15].



Рис. 13. Скважина, пробуренная пневмоударником П170 на станке SWDB165

Эксперимент № 3. Карьер “Борок”. Бурение велось по гранитам пневмоударниками ПВ170 и ПВ170М. Последний обладает повышенными энергетическими характеристиками. Буровой станок — SWDB165, давление сжатого воздуха 1.2 МПа. На рис. 14 показаны изменения энергетического критерия k , отвечающие данным условиям бурения в диабазовых породах. Видно, что значения этого критерия после интервала “забурки” стремятся в диапазон их оптимальных значений — $(1 \div 4) \cdot 10^{-9}$. При этом пневмоударник ПВ170М входит в указанные пределы при установившемся процессе бурения. На рис. 15 представлено фото пробуренной пневмоударником ПВ170М скважины, с выделенными зонами разрушения.



Рис. 14. Изменения критериального показателя k с глубиной поинтервального бурения гранитных пород (карьер “Борок”)

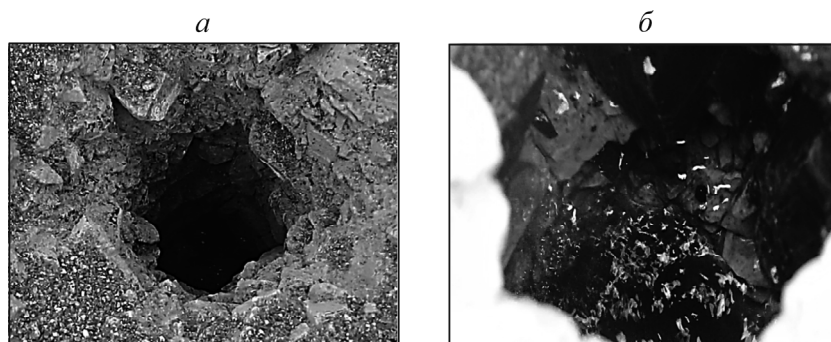


Рис. 15. Повышенная трещиноватость породного массива и обводненность при бурении скважины пневмоударником П170М: *а* — диаметр устья скважины из-за обрушения стенок 500 мм; *б* — через разломы трещин проникает вода, скважина на удалении 650 мм от устья заполнилась водой

“Перепад” значений показателя k на отметке 0.6 м с последующим резким возрастанием указывает на возможность возникновения аварии. Ударные воздействия пневмоударника отбивают большие куски на забое буримой скважины, высвобождая пространство под долотом и

в стенках скважины, тем самым на короткое время увеличивая скорость проходки. После этого следует “застывание” отбитых кусков между стенками скважины и ставом. Без подъема става с принудительной очисткой происходят заклинивание всего става, обрыв, повреждение буровых штаг. Это в конечном счете может привести к потере буровой колонны.

Во время проведения эксперимента бурение проводилось без обсадной трубы, что характерно для добычи строительных материалов, на увеличенных оборотах вращения става (60 об/мин) с интенсивной принудительной очисткой ствола скважины. Увеличение частоты вращения при прохождении скважин в породном массиве с повышенной трещиноватостью было рациональным решением опытного бурильщика. Поскольку гранитный массив карьера имеет зоны дезинтеграции (сетки трещин), на разрушение требуется меньше затрат энергии, т. е. меньшее количество ударов за полный оборот долота погружной машины. Бурильщик выявил повышенную частоту ударов отечественной машины (в сравнении с ранее эксплуатируемыми зарубежными образцами) и увеличил угол между ударными нагрузками породоразрушающих инденторов долота пневмоударника, изменив режимные параметры бурения. В случаях проходки по монолитным, малотрещиноватым или абразивным породам это приводит к преждевременному износу данного типоразмера машин и долот [27–29]. Низкая частота вращения может вызвать аварийную ситуацию, так как способствует разрушению стенок скважины и обрушению крупных отбитых фрагментов на машину (буровую колонну), которые являются преградой для выхода шлама из забойной области на поверхность. Крупные выколы в забойной части образуют трещины, где происходит заклинивание инденторов с последующим их разрушением при вращении или выпадением из гнезд — при отсутствии контакта с породой в момент нанесения ударно-циклических воздействий.

Опыт работы буровых бригад ОАО “Новосибирсквзрывпром” на карьерах Новосибирской области и Алтайского края обозначил карьер “Борок” как наиболее сложный в горнотехническом отношении, где случаются потери погружных пневмоударников, в том числе вместе с буровыми штангами. В целом для карьеров это менее характерно, чем для рудников. Достаточно частым является прекращение бурения взрывных скважин до технологического соответствия (глубины), особенно вблизи уступов, ввиду опасности потерь бурового оборудования и выхода из строя силовых агрегатов станка.

Эксперимент № 4. Абаканский рудник. Бурение велось на станке СБУ-6 по песчанику погружным пневмоударником П130ШВ разработки ИГД СО РАН. Давление сжатого воздуха 0.6 МПа. Оценка эффективности бурения скважины проведена по критериальному показателю (6) в двух его модификациях: как по затраченной энергии, рассчитанной по расходу сжатого воздуха, так и по энергии удара, подведенной к забою, т. е. рассчитанной по диаграммам давления воздуха в рабочих камерах пневмоударника. На рис. 16 представлены диаграммы бурения гранитного массива по критериальным показателям k и k_c .

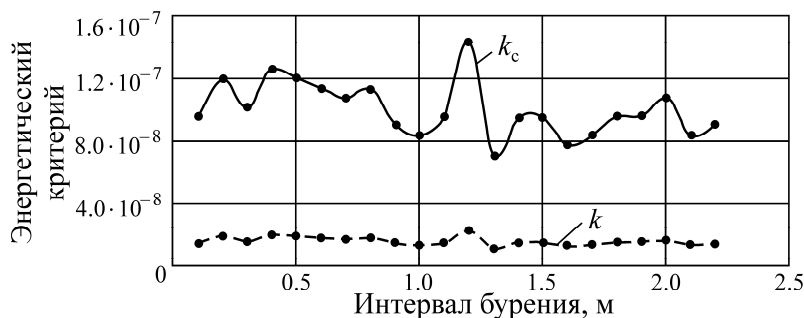


Рис. 16. Изменение критериальных показателей k и k_c с глубиной поинтервального бурения песчаников (Абаканский рудник)

Пнемоударник П130ШВ имеет высокий расход энергоносителя, что отражается на показателях критериев k и k_c , которые идентичны по обратной связи “порода–машина”. Показатели любого из критериев целесообразно использовать для определения мощностных потерь погружных машин при прохождении рейсов буримых скважин. Для этого необходимо привязать k или k_c к конкретному “стабильному” контрольному участку в начале прохождения рейса буримой скважины и после прохождения вскрыши (забурка) и принять его за эталонный показатель W_3 или W_{c3} соответственно. К примеру, $k_2 = k_3$, $W_2 = W_3$, $k_1 \neq k_3$, так как k_1 — забурка, аналогично $k_2 = k_{c3}$, $W_2 = W_{c3}$. Тогда потери мощности на контрольных участках рейса буримой скважины могут определяться по формулам: $W_{n+1} = W_3 k_p$, $W_{c(n+1)} = W_{c3} k_p$ (где $k_{p(n+1)} = k_{n+1} / k_3 = k_{c(n+1)} / k_{c3}$ — коэффициент мощностных потерь).

Эксперимент № 5. Шахта им. Губкина (Белгородская область). Бурение велось по слаборудным кварцитам. Давление сжатого воздуха 0.65 МПа. Сравнивалась эффективность бурения взрывных скважин разными типами пневмоударников на станках НКР-100М — пневмоударником ППСТ (опытный образец ООО “Сталь-Трест”), ПП105ПМ (серийный образец пневмоударника, выпускаемый Старооскольским механическим заводом) и ПП105ЭН (экспериментальный образец пневмоударника разработки ИГД СО РАН).

На рис. 17 показаны изменения критериального показателя k при поинтервальном бурении слаборудных кварцитов шахты им. Губкина тремя типами пневмоударников, из которых можно заключить: 1) по критерию оптимальности диапазона энергозатрат (6) удовлетворяет опытный образец пневмопробойника П105ЭН конструкции ИГД СО РАН ($k \sim 3 \cdot 10^{-9}$); 2) существенно более энергозатратна в бурении скважин конструкция пневмоударника ППСТ ($k \in (8 \div 10) \cdot 10^{-9}$); 3) энергоэффективность работы серийного пневмоударника ПП105ПМ близка к диапазону ее оптимальности ($k \in (4 \div 6) \cdot 10^{-9}$), однако существенно ниже, чем пневмоударника П105ЭН.

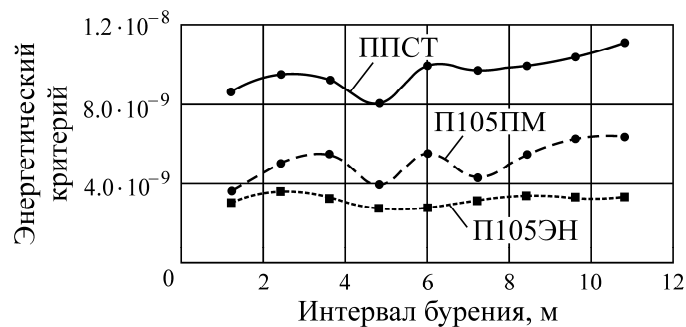


Рис. 17. Изменение показателя k с глубиной поинтервального бурения слаборудных кварцитов в зависимости от типа применяемых при бурении скважин пневмоударников (шахта им. Губкина)

По существу, представленные выше результаты закладывают научные основы для принципиально нового — энергетического — направления исследований в построении комплексных мониторинговых систем: не только с опорой на современные методы инструментального контроля напряженно-деформированного состояния массивов горных пород (разгрузки, флюидоразрыва, деформационно-волновые, спутниковой геодезии, электромагнитные маркшейдерии, сейсмические и др.), но и существенно развивая широко применяемый в практике горного дела метод дискования кернов пород при бурении скважин. Потенциал такого развития видится в использовании принципа “обратной связи” между напряженно-деформированным состоянием, механическими свойствами горных пород и

динамико-кинематическими характеристиками излучаемых при бурении геофизических полей (акустических, электромагнитных и деформационно-волновых), с учетом энергоемкости бурения по критериальному показателю В. Н. Опарина.

ВЫВОДЫ

Проведенный комплекс экспериментальных исследований по натурной верификации безразмерного энергетического критерия объемного разрушения геоматериалов при ударно-вращательном бурении скважин различных по прочностным свойствам горных пород на карьерах и в рудниках позволил доказать, что оптимальной по энергоемкости процесс разрушения осуществляется в диапазоне изменений $(1 \div 4) \cdot 10^{-9}$.

С целью предварительного картирования месторождений полезных ископаемых перед проведением буровых работ в оптимальном по энергоемкости технологическом процессе введено и предложено математическое выражение *коэффициента (фактора) топологической связности* разрушаемых горных пород, изменяющегося в диапазоне от нуля (несвязные гранулированные среды) до единицы (равнопрочные на сжатие и растяжение).

На основе практического применения критериального показателя k впервые выполнена количественная оценка энергоэффективности ударно-вращательного бурения скважин различными типами пневмоударников, работающих на сжатом воздухе с рабочим давлением 0.5–2.4 МПа, а также на воздушно-водяной смеси как в подземных условиях, так и на открытых горных работах для горных пород в широком диапазоне их физико-механических свойств.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Опарин В. Н., Тимонин В. В., Карпов В. Н. Количественная оценка эффективности процесса разрушения горных пород при ударно-вращательном бурении скважин // ФТПРПИ. — 2016. — № 6. — С. 60–74.
2. Тимонин В. В., Карпов В. Н. Оценка процесса разрушения горных пород при ударно-вращательном бурении скважин // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. — 2016. — № 3. — Т. 2. — С. 172–176.
3. Карпов В. Н. Методика проведения оценочных испытаний погружных пневмоударников в производственных условиях // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. — 2016. — № 3. — Т. 2. — С. 74–80.
4. Соколов И. В., Смирнов А. А., Антипин Ю. Г., Барановский К. В., Рожков А. А. Выбор оптимального варианта комбинированной системы разработки месторождения высокоценного кварца на основе моделирования // ФТПРПИ. — 2016. — № 6. — С. 124–133.
5. Тимонин В. В. Обоснование параметров породоразрушающего инструмента и гидравлической ударной машины для бурения: дис. ... канд. техн. наук. Специальность 05.05.06 “Горные машины”. — Новосибирск: ИГД СО РАН, 2009. — 129 с.
6. Адушкин В. В., Опарин В. Н. От явления знакопеременной реакции горных пород на динамическое воздействия — к волнам маятникового типа в напряженных геосредах // ФТПРПИ. — Ч. I. — 2012. — № 2. — С. 3–27; Ч. II. — 2013. — № 2. — С. 3–46; Ч. III. — 2014. — № 4. — С. 10–38; Ч. IV. — 2016. — № 1. — С. 3–49.
7. Опарин В. Н. Энергетический критерий объемного разрушения горных пород // Тр. науч. семинара “Неделя горняка–2009”. — М.: МГТУ, 2009. — С. 43–69.
8. Ржевский В. В., Новик Г. М. Основы физики горных пород. — М.: Недра, 1984. — 359 с.
9. ГОСТ Р 50544-93. Породы горные: термины и определения; свойства горных пород при различных видах и режимах нагружения. — М., 1993. — 46 с.
10. Справочник (кадастр) физических свойств горных пород. — М., 1975. — 279 с.
11. Курленя М. В., Опарин В. Н., Востриков В. И. Об одном подходе к прогнозированию горных ударов // ФТПРПИ. — 1998. — № 6. — С. 3–15.

12. Садовский М. А., Кедров О. К., Пасечник И. Н. О сейсмической энергии и объеме очагов при коровых землетрясениях и подземных взрывах // ДАН. — 1985. — Т. 283. — № 5. — С. 1153–1156.
13. Опарин В. Н., Симонов Б. Ф. О нелинейных деформационно-волновых процессах в виброволновых геотехнологиях освоения нефтегазовых месторождений // ФТПРПИ. — 2010. — № 2. — С. 3–25.
14. Опарин В. Н., Танайно А. С. Каноническая шкала иерархических представлений в горном породоведении. — Новосибирск: Наука, 2011. — 264 с.
15. Карпов В. Н., Тимонин В. В. О важности заблаговременной коррекции параметров главных рабочих органов ударно-вращательного бурения к условиям породного массива месторождений полезных ископаемых // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. — 2017. — Т. 4. — № 1. — С. 15–22.
16. Eremenko V. A., Karpov V. N., Timonin V. V., Shakhtorin I. O., Barnov N. G. Basic trends in development of drilling equipment for ore mining with block caving method, J. of Mining Science, 2015, Vol. 51, No. 6. — P. 1113–1125.
17. Timonin V. V., Tkachuk A. K., Karpov V. N. Double-action compression/vacuum–impact machine, J. of Mining Science, 2017, Vol. 52, Issue 5. — P. 927–932. doi: 10.1134/S1062739116041418.
18. Тимонин В. В., Степанов Д. В. Сравнительный анализ и оценка существующих малогабаритных импульсных источников для проведения сейсморазведочных работ // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. — 2017. — № 1. — Т. 4. — С. 61–66.
19. Интернет-канал ИГД СО РАН: <https://www.youtube.com/watch?v=3C0AgNkm20g>.
20. Еременко А. А., Тимонин В. В., Беспалько А. А., Карпов В. Н., Штирц В. А. Определение влияния виброударного воздействия на массив горных пород на интенсивность геодинамических явлений // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. — 2017. — № 2. — Т. 4. — С. 42–46.
21. Суднишников Б. В., Есин Н. Н. Экспериментальное исследование рабочего процесса пневматических молотков ИГД СО АН СССР; Машины ударного действия. — Новосибирск: ГГИ ЗСФАН, 1953. — С. 145–146.
22. Repin A. A., Alekseev S. E., Timonin V. V., Karpov V. N. Analysis of the compressed air distribution in down-the-hole hammer drills, Proc. XXIII Int Conf Miner's Week, 2015. — P. 475–482 (in Russian).
23. Шахторин И. О. Доводка машин ударного действия при помощи современного программного обеспечения // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. — 2017. — № 1. — Т. 4. — С. 72–76.
24. Repin A. A., Smolyanitsky B. N., Alekseev S. E., Popelyukh A. I., Timonin V. V., Karpov V. N. Down-hole high-pressure air hammers for open pit mining, J. of Mining Science, 2014, Vol. 50, Issue 5. — P. 929–937. doi: 10.1134/S1062739114050123.
25. Капитонов А. М., Васильев В. Г. Физические свойства горных пород западной части Сибирской платформы. — Красноярск: СФУ, 2011. — 424 с.
26. Емельянов П. М., Есин Н. Н., Зиновьев А. А., Семенов Л. И., Суксов Г. И. Машины для бурения скважин погружными молотками в подземных условиях. — Новосибирск: СО АН СССР, 1965. — 200 с.
27. Единые нормы выработки (времени) на бурение скважин на открытых горных работах предприятий угольной и сланцевой промышленности. Утв. 30 октября 1980 г. — М., 1981. — 41 с.
28. Постановление Госкомтруда СССР, Секретариата ВЦСПС от 15.10.1990 № 404/18-94 “Об утверждении Межотраслевых укрупненных нормативов времени на открытые горные работы для предприятий горнодобывающей промышленности. Бурение”. — М., 1990. — 29 с.
29. Единые нормы выработки и времени на подземные очистные, горнопроходческие и нарезные горные работы. Ч. I. Утверждено комитетом СССР по труду и социальным вопросам и ВЦСПС. Постановление № 326/20-93 от 31 декабря 1982 г. — М., 1982. — 219 с.
30. Володько Ю. И. Ламинарное истечение сжатого воздуха в атмосферу и бестопливный монотермический двигатель. — М.: Общественная польза, 1998. — 68 с.
31. A–Z of DTH drilling. Halco rock tools, 2016. — P. 76.
32. Фокс Брайан и др. Бурение взрывных скважин на открытых горных выработках: издатель Ульф Линде, Atlas Copco Drilling Solutions LLC, Garland, Texas, USA, 2011. — 274 с.
33. Погружные пневмоударники Secoroc Q LX5: инструкция по эксплуатации; пер. на русский язык, Atlas Copco Secoroc AB Fagersta, Sweden, 2015. — 34 с.

Поступила в редакцию 16/X 2017