

## ГОРНОЕ МАШИНОВЕДЕНИЕ

УДК 622.026; 622.243.4; 622.24.051

### КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕССА РАЗРУШЕНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД ПРИ УДАРНО-ВРАЩАТЕЛЬНОМ БУРЕНИИ СКВАЖИН

**В. Н. Опарин, В. В. Тимонин, В. Н. Карпов**

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

Рассмотрены факторы, оказывающие существенное влияние на эффективность ударно-вращательного бурения скважин погружными ударными машинами. Представлены результаты физического моделирования динамического вдавливания породоразрушающих инденторов в горную породу. Проведен анализ результатов с позиции явления знакопеременной реакции горных пород на динамические воздействия.

*Количественный показатель эффективности, разрушение горных пород, погружной пневмоударник, буровой станок, ударно-вращательное бурение скважин, волны маятникового типа, безразмерное энергетическое условие, структура, напряженно-деформированное состояние*

#### ВВЕДЕНИЕ

В работе [1] подчеркивается, “что детальные и глубокие познания по физике и геомеханике разрушения многофазных гетерогенных геосред в областях концентрации напряжений чрезвычайно важны, когда последние формируются в результате взаимодействия породоразрушающих органов горных машин и оборудования с породными массивами (особенно при сверхглубоком бурении скважин и осуществлении буровзрывных работ)”.

Дальнейшее перспективное развитие бурения скважин в грунтовых и скальных массивах видится с учетом “тонких геомеханических процессов” взаимодействия между рабочими органами буровых установок и породными массивами до их разрушения, которые построены на “принципе обратной связи” режимов бурения с физико-механическими свойствами подсекаемых породных толщ в изменяющемся поле их напряжений и деформаций [1 – 3].

Осуществление “принципа обратной связи” в конструктивном воплощении в современных условиях может строиться на проверке и реализации фундаментальных идей [4 – 6], опирающихся на достижения по развитию теории волн маятникового типа, а также каноническую связь между динамико-кинематическими характеристиками физических (акустических, электромагнитных, тепловых, деформационно-волновых) полей, индуцируемых в процессах разрушения напряженных массивов горных пород, их блочно-иерархическим строением и физико-механическими свойствами [7]. Здесь основные достижения во многом реализует спектроско-

пический подход, а также использование безразмерного энергетического критерия объемного разрушения горных пород и возникновения геомеханических квазирезонансов в очаговых зонах [8, 9]. С этим энергетическим критерием связано также проявление эффекта аномально низкого трения в геосредах блочно-иерархического строения [10]. По существу, это и есть те “тонкие геомеханические процессы”, учет которых способен дать качественно новый импульс для развития техники и технологий бурения в будущем.

Одновременно с этим реализуется и обосновываемая в [1] необходимость “разработки энергетического подхода к анализу процессов формирования и развития очаговых зон взаимодействия горных машин и их породоразрушающих инструментов с породным массивом при бурении “сверхглубоких” скважин на принципе обратной связи с физико-механическими свойствами подсекаемых породных толщ” — как технологической основы для прорывных геотехнологий будущего.

В настоящей статье рассматривается задача о количественной оценке эффективности процесса разрушения горных пород при ударно-вращательном бурении скважин именно с отмеченных энергетических позиций осуществления этого сложного технологического процесса, постановка и начало исследований которой были даны в работах [11 – 14].

#### **ПОГРУЖНЫЕ ПНЕВМОУДАРНИКИ И БУРЕНИЕ СКВАЖИН**

Погружные пневмоударники (ППУ) получили широкое распространение во всем мире при бурении взрывных, разведочных, дегазационных, дренажных, добычных, технологических и спасательных скважин [15–18]. В настоящее время в России насчитывается свыше 5000 различных организаций, осуществляющих бурение скважин ППУ на станках ударно-вращательного бурения. При этом наибольшие объемы работ связаны с добычей полезных ископаемых (ПИ) буровзрывным способом на карьерах и рудниках. В зависимости от горно-геологических и горнотехнических условий применяются различные технологии бурения с использованием пневмоударников широкого типоразмера на станках ударно-вращательного бурения.

Российский рынок горного оборудования насыщен образцами погружных пневмоударных машин отечественного и зарубежного производства для открытых и подземных горных работ. При этом для потребителей конечной продукции важны такие показатели, как низкая стоимость проходки скважин (стоимость 1 п.м) при оптимальном сочетании механической и рейсовой скоростей бурения, обеспечивающих максимальную производительность проведения буровых работ в конкретных природных, технических и технологических условиях месторождения.

Бренды известных компаний, “агрессивная” реклама в печати и сети интернет с представлением технико-экономических показателей ППУ, работа менеджеров-консультантов (по продажам) и другие аспекты нередко оказывают влияние при выборе бурового оборудования на потребителей продукции: будь то крупные горнодобывающие предприятия или небольшие организации, занимающиеся проведением буровых работ в разных регионах нашей страны.

Однако объективную оценку такой продукции дают реальные данные по эксплуатации технических разработок в конкретных горно-геологических и горнотехнических условиях разрабатываемого месторождения. При этом оказывается, что ожидания в отношении приобретенной продукции, согласно соответствующим гарантийным обязательствам, далеко не всегда оправдываются по таким показателям, как механическая и рейсовая скорость бурения и его производительность, ресурс, стоимость бурового оборудования и его обслуживания, ремонт и эксплуатация. В ряде случаев это приводит к весьма негативным финансово-экономическим последствиям, в частности для крупных горнодобывающих предприятий [19].

Дело в том, что механическое разрушение горных пород при бурении скважин ППУ и другими известными способами с использованием породоразрушающих исполнительных органов и инструмента является сложным и не вполне изученным процессом. При этом механизм разрушения до настоящего времени в достаточной мере не выяснен.

### О ФАКТОРАХ, ВЛИЯЮЩИХ НА СКОРОСТЬ БУРЕНИЯ ПОГРУЖНЫМИ ПНЕВМОУДАРНИКАМИ В ПОРОДНЫХ МАССИВАХ

Изучению процессов разрушения горных пород при бурении скважин посвящено большое количество работ. Тем не менее у исследователей не сложилось общего представления о механизмах разрушения горной породы при ударном и ударно-вращательном бурении, о качественном и количественном влиянии отдельных факторов на характер протекающих процессов. Это объясняется тем, что на разрушение горных пород одновременно или с некоторым временным лагом влияет совокупность природных, технических и технологических факторов (размер инструмента, энергия удара, частота ударов и т. д.). Поэтому известные методы расчета производственных показателей технологического бурения в настоящее время нередко являются весьма приближенными [20–22].

На рис. 1 схематично представлена структура взаимосвязей природных, технологических и технических факторов, оказывающих существенное воздействие на механическую скорость бурения при проходке взрывных, разведочных и добычных скважин ударно-вращательным способом бурения ППУ. Основные факторы, влияющие на механическую скорость бурения ППУ, — это конструкция пневмоударника и породоразрушающего инструмента; режим разрушения горных пород; размер зон разрушения (объем выкола) геоматериала, образующихся при динамическом внедрении инденторов бурового инструмента в породный массив; качество очистки забоя от шлама.

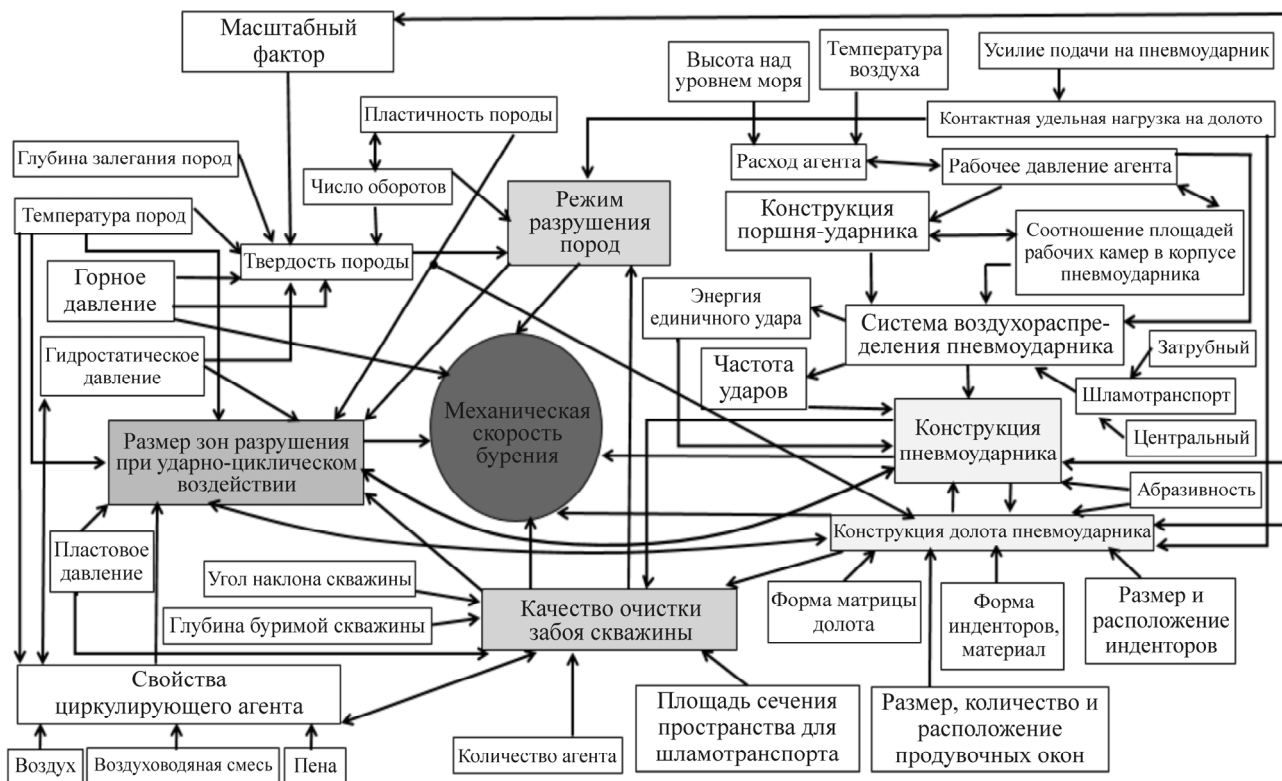


Рис. 1. Схема совокупного влияния природных, технических и технологических факторов на механическую скорость бурения при проходке скважин ударно-вращательным способом

Кроме того, на механическую скорость бурения ППУ влияет и “человеческий фактор” (например, квалификация и мотивация бурильщика). Если брать в расчет “реалии производства”, а также множество других косвенных факторов, то эта взаимосвязь приводит к исключительно сложной картине.

В ИГД СО РАН уделяется значительное внимание каждому из отмеченных на рис. 1 факторов. В частности, в [17, 18, 23] рассмотрены вопросы создания новых конструктивных схем погружных пневмоударников как на обычное (0.5 МПа), так и на повышенное (1.2–2.4 МПа) давление энергоносителя; проведены исследования влияния параметров систем воздухораспределения на энергетические параметры ударных машин [24, 25]; изучен вопрос применения упругого клапана в воздухораспределительных системах пневмоударников [26, 27]; ведутся работы по изучению возможности применения новых материалов и новых видов упрочнения рабочих поверхностей для деталей ударных механизмов [28]; изучены вопросы взаимодействия рабочих органов ударных машин с грунтовым массивом [29]. Ряд результатов получены на уровне изобретений [30–33].

В данной работе исследуются режимы разрушения горных пород и размеры зон разрушения (объем выкола) геоматериалов, образующихся при динамическом внедрении инденторов бурового инструмента в породный массив.

#### РЕЖИМ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО БУРЕНИЯ ПРИ ДИНАМИЧЕСКОМ ВНЕДРЕНИИ ИНДЕНТОРОВ РАБОЧЕГО ИНСТРУМЕНТА И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ КРИТЕРИЙ ОБЪЕМНОГО РАЗРУШЕНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД

Как известно [34, 35], область разрушения горной породы под индентором состоит обычно из трех основных зон: смятия и раздавливания, выкола и “предразрушения” (рис. 2).

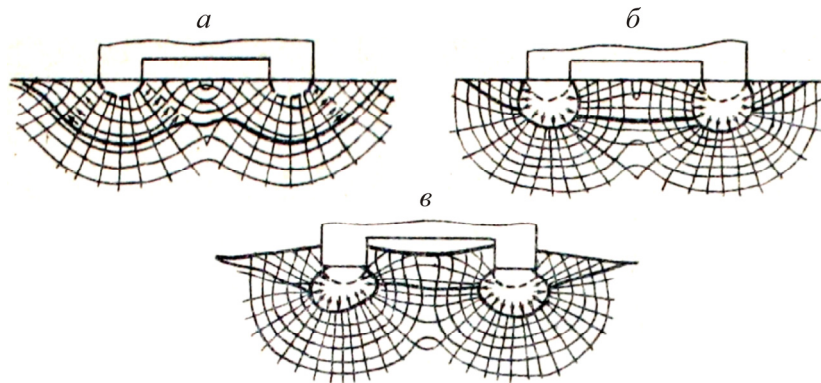


Рис. 2. Модели механизмов разрушения горных пород: *a, б* — в атмосферных условиях; *в* — в условиях всестороннего давления. Утолщенные линии — участки нарушения сплошности массива

На всех фазах этого процесса разрушения важную роль играет процесс трещинообразования. При взаимодействии рабочего инструмента с забоем в окрестности последнего возникают в хрупких горных породах трещины двух видов. Одни из них за время “элементарного акта” успевают выйти на свободную поверхность и отделить от массива некоторую по объему часть породы, другие развиваются внутрь объема и там “затухают”. Геометрические параметры и прочностные характеристики этой зоны практически не изучены и, следовательно, не используются при проектировании породоразрушающего инструмента. Зона “предразрушения” оказывает на самом деле существенное влияние на процесс бурения. С одной стороны, наличие в массиве развитой системы трещин снижает прочность окрестных пород забоя и облегчает ус-

ловия работы породоразрушающего инструмента, так как для обеспечения возможности последующего развития уже образованных трещин требуется значительно меньшие энергетические затраты, чем для зарождения новых. С другой стороны, с ростом плотности трещин в единице объема пород призабойной зоны ухудшаются условия для их свободного проникновения через трещиноватый слой в технологически ненарушенной части массива. Поэтому вслед за образованием зоны “предразрушения” сразу же следует ее удалять.

Поскольку при вдавливании рабочих элементов породоразрушающего инструмента в забой скважины объем формирующейся под каждым из них напряженно-деформированной области на один-два порядка превышает объем воронки разрушения, а последний во много раз больше объема внедрившейся части рабочего элемента, то при создании конструкций породоразрушающей части инструмента целесообразно исходить из возможности получения положительного эффекта от взаимодействия полей напряжений смежных областей напряженно-деформированного состояния.

Взаимодействие механических полей, на самом деле, процесс динамический. Он реализуется с определенными амплитудами и скоростями, зависящими от структуры, вещественного состава, исходного напряженно-деформированного состояния, расстояния, размеров и энергетических характеристик источника механических воздействий [4]. В известной мере [6] отмеченные факторы используются при проектировании паспортов буровзрывных работ (БВР) и, в частности, ступеней замедления инициирования взрывчатых веществ (ВВ). Однако это делается с опорой на весьма идеализированные представления линейной теории распространения упругих волн в однородных геосредах (продольных, поперечных, обменных, интерференционного типа и проч.) в основном от “точечных” источников достаточно простого по амплитудно-периодным характеристикам вида. Такой доминирующий ныне подход в результате привел к тому, что буровзрывное дело до сих пор во многом является “делом инженерного опыта и искусства” — эмпирическим по существу.

Современные достижения в развитии теории волн маятникового типа [1] открывают новые горизонты и технологические возможности для “прорывного” развития как в области взрывного дела [6], так и бурения скважин различного назначения в реальных массивах горных пород с учетом их большого разнообразия по структуре, вещественному составу и видам напряженно-деформированного состояния.

При это не следует забывать, что взрывные процессы при разрушении массивов горных пород и механические процессы при бурении скважин во многом “родственные” по конечной цели — достижению оптимального по энергозатратам и качеству разрушения заданных объемов пород в их напряженных массивах в единицу времени. ***В этом смысле должен существовать аналог понятию “ступеней замедления инициирования ВВ” во взрывном деле, но уже для осуществления сложного механического процесса бурения скважин, где элементарными источниками разрушения являются отдельные инденторы буровых коронок.***

Традиционно в буровых системах разного назначения геометрические и кинематические параметры “зафиксированы” и определяются рабочей поверхностью буровых коронок. Здесь отсутствует возможность автономного движения жестко “впрессованных” отдельных инденторов или их групп относительно заданной поверхности буровой коронки — наличие компонентов трансляционного и вращательного движения отдельных инденторов, которые могут быть реализованы в разных вариантах: “пассивном” (адаптивном в определенной мере к структурным и физико-механическим свойствам встречающихся по направлению бурения скважины), “активном” (с технически задаваемым режимом автономного движения отдельных инденторов

на забойной части бурового долота) либо “комбинированном” (программно-управляемом с обратной механической связью, реализацией возможности оперативной контрольной функции “пассивного варианта” при задании технологического режима бурения в “активном варианте”).

Несмотря на кажущуюся сложность (научную и технико-технологическую) для практического воплощения этих идей, отметим главное: для соответствующих перспективных исследований и прикладных разработок уже существует необходимый научный потенциал [1]. **Подчеркнем особо, что назревшая необходимость введения механического аналога “ступеней замедления” в режиме действия породоразрушающих буровых систем (органов) следует из теории волн маятникового типа.**

Так, “одномерное” кинематическое выражение для этого типа волн [4] позволяет описать практически все встречающиеся случаи распространения как “низкоскоростных”, так и “высокоскоростных” нелинейных деформационно-волновых процессов от механических и взрывных источников их возбуждения:

$$v_g[\sigma] = \frac{(1 + \mathcal{G}[\sigma])v_\varepsilon v_p}{v + \mathcal{G}[\sigma]v_p}, \quad (1)$$

где  $v_g[\sigma]$  — скорость распространения маятниковой волны ( $\mu$ -волна), зависящая от напряженного состояния пород  $\sigma$ ;  $v_p$  — скорость распространения продольной волны в структурных отдельностях разрушаемого объема горной породы (носителях  $\mu$ -волны);  $v_\varepsilon$  — средняя скорость относительного трансляционного движения этих “соударяющихся” структурных отдельностей диаметром  $\Delta$ ;  $\mathcal{G}[\sigma]$  — структурно-иерархический параметр разрушаемых горных пород, характеризующий подвижность структурных отдельностей горной породы в стесненных условиях породного массива и связанный с геомеханическим инвариантом  $\mu_\Delta[\sigma]$  [36].

Последний представляет собой статистически инвариантное соотношение между средними расстояниями между берегами трещин  $\delta_i$  и диаметрами отделяемых ими блоков (структурных отдельностей)  $\Delta_i$  для различных иерархических уравнений в массивах горных пород  $i$ :

$$\mu_\Delta(\delta) = \frac{\delta_i}{\Delta_i} \in \left( \frac{1}{2} \div 2 \right) 10^{-2} \text{ для любого } i. \quad (2)$$

Характеристика (2) позволяет количественно оценить “меру подвижности” естественных структурных отдельностей в породном массиве  $v_\Delta(\delta)$ :

$$v_\Delta(\delta) \in (10^{-2} \div 10^{-1}) \mu_\Delta(\delta). \quad (3)$$

С учетом того, что трещины, отделяющие структурные отдельности пород, всегда заполнены полностью или частично газом, жидкостью или твердыми частицами вещества, для реальных массивов горных пород вместо (3) можно использовать оценку

$$v_\Delta(\delta) \sim 10^{-1} \mu_\Delta(\delta). \quad (4)$$

В силу “статистической инвариантности” структурных характеристик (2)–(4) по размерам породных отдельностей ( $\delta_i$ ;  $\Delta_i$ ) в формуле (1) для  $v_g[\sigma]$  эти параметры в обозначениях ниже опущены. При этом характер зависимости  $v_g[\sigma]$  на допредельной стадии деформирования горных пород может быть аппроксимирован функциями параболического вида, например [4]:

$$v[\sigma] = v_0[2 - (\sigma/\sigma_0)^2], \quad (5)$$

где  $v_0$  — предельное значение  $v_\Delta(\delta)$  из (3) при всестороннем сжатии разрушаемой горной породы  $\sigma_0$ . Очевидно, что при более сложных видах напряженно-деформированного состояния пород в окрестностях породоразрушающих инструментов при бурении скважин формулу (5) следует уточнять экспериментально.

Таким образом, из формул (1)–(5) следует, что в зависимости от вида и энергии источников разрушения в напряженных геосредах размеры “работающих” блоков — вещественных носителей маятниковых волн и их скоростной диапазон в изменяющихся полях напряжений могут иметь чрезвычайно широкий охват. В [37, 38] приведены соответствующие примеры, где описаны реальные случаи, отражающие скоростной диапазон изменений от  $\sim 0.9 \cdot 10^{-5}$  до 3.3–6.1 м/с.

Это не может не учитываться при количественном определении понятия о степенях замедления при выборе режима взаимодействия породоразрушающих инструментов (инденторов) буровых машин и, соответственно, при обосновании схем конструктивного исполнения буровых коронок.

Исследованию процесса разрушения горных пород при ударно-вращательном бурении посвящены работы [39–43]. В них дается описание процессов разрушения не по результатам специально проведенных экспериментальных исследований, а на основе косвенных наблюдений. Неудивительно, что физическая картина одного и того же явления разрушения пород различными авторами объясняется по-разному. Отраженные в этих публикациях результаты сложно использовать для определения таких важных параметров породоразрушающего инструмента, как оптимальное расстояние между соседними инденторами в группе, а также необходимое и достаточное их количество в зависимости от подводимой к работающему инструменту механической энергии единичного удара для разрушения различных по прочности горных пород заданного объема.

Однако в работе [4] представлено экспериментально-теоретическое обоснование наличия формализованной связи между концентрационным критерием прочности твердых тел по С. Н. Журкову, спектральными характеристиками волн маятникового типа и критерием “схлопывания” подземных полостей в напряженных массивах горных пород блочно-иерархического строения. При этом 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 [9, 38]:

$$\hbar = \frac{W}{Mv_p^2} = \theta \cdot 10^{-9}, \quad \theta \in 1-4, \quad M = \rho V; \quad (6)$$

$$W = \alpha(V)[U_0 + W_k], \quad (7)$$

где  $U_0 + W_k$  — сумма упругой (потенциальной)  $U_0$  и кинетической  $W_k$  энергий структурных элементов горных пород в очаговой зоне их разрушения [3];  $\alpha(V)$  — коэффициент сейсмического действия взрывов по М. А. Садовскому [44], механический аналог которого для процессов бурения дан в [38];  $V$  — объем зоны разрушения (очага);  $\rho$  — плотность горных пород;  $v_p$  — скорость продольной волны, зависящая от модуля Юнга, коэффициента Пуассона и плотности горных пород.

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 (6) и (7) 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 [5, 9] 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 бурения происходит с переизмельчением горной породы. Таким образом, энергетическая зона  $W$ , отвечающая  $\hbar \in (1-4) \cdot 10^{-9}$ , является с отмеченных позиций оптимальной [9]. Данное обстоятельство связано и с обоснованием выбора рациональных параметров породоразрушающих инструментов при проведении буровых работ для различных по физико-механическим свойствам горных пород, а также режимов их взаимодействия с массивом.

Для проверки изложенных теоретических позиций выполнены специальные исследования по определению рациональных параметров породоразрушающего инструмента в зависимости от подведенной энергии единичного удара для различных горных пород.

#### ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ КРИТЕРИЙ ОБЪЕМНОГО РАЗРУШЕНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД И РАЦИОНАЛЬНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ПОРОДОРАЗРУШАЮЩЕГО ИНСТРУМЕНТА

Проведены эксперименты по динамическому внедрению твердосплавных породоразрушающих штырей (рис. 3) в горную породу, моделируемую блоками из органического стекла, мрамора и гранита. Органическое стекло выбрано в качестве эквивалентного материала из-за возможности визуального наблюдения за развитием процесса трещинообразования [45]. Образцы из мрамора и гранита по основной своей характеристике — крепости по М. М. Протодьяконову — охватывают достаточно широкий диапазон горных пород (таблица).

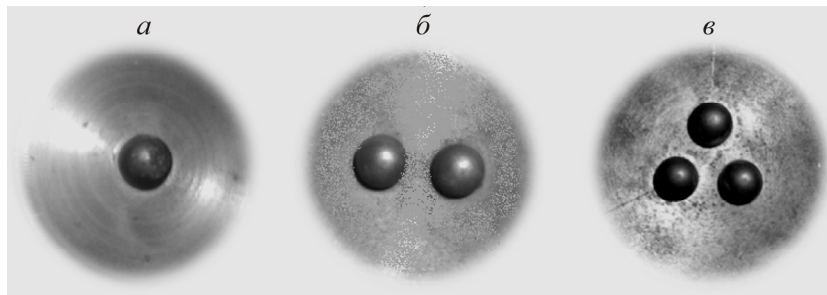


Рис. 3. Породоразрушающие инструменты, используемые в экспериментах: *а* — с одним штырем; *б* — с двумя штырями; *в* — с тремя штырями, расположенными в углах равностороннего треугольника

#### Механические характеристики горных пород

Горная порода	Предел прочности образцов на одноосное сжатие, кг/см <sup>2</sup>	Крепость по шкале Протодьяконова	Твердость по Шору	Твердость по штампу, кг/см <sup>2</sup>	Предел текучести, кг/мм <sup>2</sup>	Модуль Юнга $E$ , 10 <sup>5</sup> кг/см <sup>2</sup>	Коэффициент пластичности
Мрамор	388–644	4–6	57	75	38	1.6–2.0	3–8
Гранит	1255–3000	17–19	93	450	300	4.5	1.5



Породы средней крепости представлены мрамором, породы высокой крепости — гранитом. Выбор мрамора обусловлен рядом причин. Мрамор является относительно однородной породой, разброс результатов испытаний с его использованием невелик, поэтому многие исследователи предпочитают этот геоматериал [46]. По твердости и пластичности мрамор соответствует наиболее распространенной группе упругопластичных пород и значительной части “глубинных” пород, включающих в себя нефтегазовые месторождения.

В экспериментах единичные с заданной энергией удары наносились ударником по инструменту, под действием которого породоразрушающий штырь внедрялся в породу. Требовалось установить минимальный уровень кинетической энергии удара, при котором объем разрушенной породы будет “максимальным”, а дальнейшее повышение энергии удара не приведет к значительному увеличению объема. С учетом формул (6) и (7) эффективность подводимой энергии оценивалась по следующему показателю энергоемкости отдельного акта разрушения:

$$A_{об} = \frac{A_{уд}}{V}, \quad (8)$$

где  $A_{уд}$  — кинетическая энергия удара ударника, Дж;  $V$  — объем разрушенной породы, м<sup>3</sup>.

Как известно [47], процесс разрушения горной породы и его энергоемкость в большой мере определяются удельной нагрузкой на забой скважины, поскольку с изменением ее величины может происходить либо “усталостное”, либо (менее энергоемкое) объемное разрушение геоматериала. Определение условий получения объемного разрушения, установление обеспечивающих эти условия параметров рабочего инструмента и их сочетания с оптимальным по уровню энергетическим воздействием — ключевая задача повышения эффективности бурения.

В данном случае понятие “оптимальности” подразумевает определение допустимого и необходимого количества механической энергии для того, чтобы этой энергии было достаточно на осуществление собственно процесса (или акта) разрушения определенного объема горной породы, но при этом был бы минимизирован и процесс переизмельчения образующихся фракций, которые могут негативно сказываться на скорости истирания рабочего инструмента. Этому способствуют раскрывающиеся в процессе переизмельчения минеральные зерна с повышенной твердостью по шкале Мооса (кварц, коэсит, топаз, шпинели и др.).

***Таким образом, под оптимальным или рациональным уровнем энергетического воздействия будем понимать минимально необходимое и достаточное количество кинетической энергии импульсного воздействия от породоразрушающего органа машины на забой скважины для того, чтобы эффективно по проектным показателям производительности бурения выполнять процесс разрушения породного массива без переизмельчения горной породы.***

Как показали результаты экспериментов, по мере увеличения энергии удара наблюдается следующая картина разрушения мрамора (рис. 4): *a* — образование лунок разрушения от каждого из инденторов в отдельности; *b* — образование лунок разрушения от каждого из инденторов в отдельности с развитием зоны трещинообразования вокруг лунок разрушения от инденторов; выкол зоны, ограниченной трещинами, с образованием плоского дна; *в* — увеличение зоны выкола по ее ширине и глубине соответствующего объема геоматериала. Рассматривая эти стадии разрушения совместно с данными по объемам и энергоемкости разрушения, представленными на рис. 5, можно отметить: с ростом значения подведенной к “забою” энергии удара объем разрушения увеличивается, в то время как значение энергоемкости после начального снижения начинает расти.

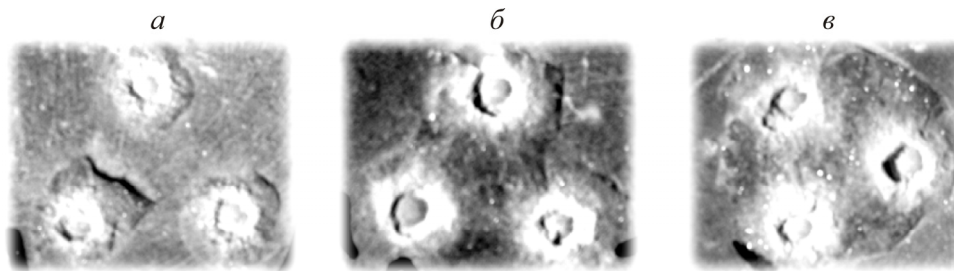


Рис. 4. Картины разрушения мрамора тремя штырями по мере увеличения энергии удара: *а* — энергия удара 90 Дж, объем разрушения  $0.05 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3$ ; *б* — энергия удара 120 Дж, объем разрушения  $0.12 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3$ ; *в* — энергия удара 150 Дж, объем разрушения  $0.2 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3$

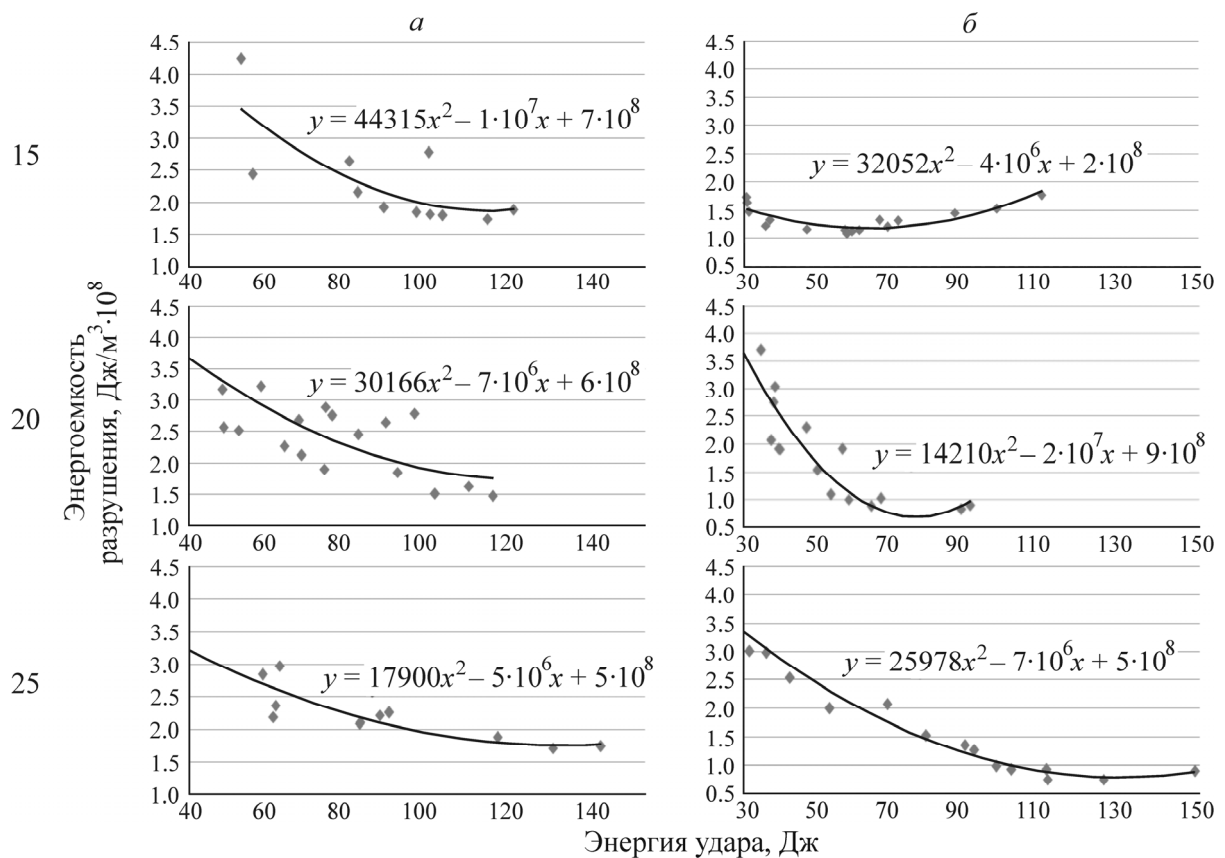


Рис. 5. Зависимости энергоемкости разрушения от энергии единичного удара ударником: для гранита (*а*) и мрамора (*б*) при вооружении породоразрушающего инструмента тремя штырями диаметрами 10 мм на расстоянии 15, 20 и 25 мм друг от друга соответственно

Полученные результаты проанализированы с позиции явления знакопеременной реакции горных пород на динамические воздействия [48–50]. Его сущность заключается в том, что при образовании полостей внутри массивов горных пород под действием ударов в окрестностях последних происходят колебательные смещения геоблоков (структурных элементов разного иерархического уровня) относительно друг друга с их трансляционным и вращательным движением. При этом “работающие” структурные отдельности сопряжены по своим размерам с размерами образуемых полостей [36, 49]. Наличие этого эффекта применительно к бурению скважин свидетельствует о том, что значительная доля энергии удара и запасенной упругой энергии горных массивов не только расходуется на дробление горных пород в очаговой зоне,

но и передается их структурным элементам в виде кинетической энергии. На базе этого явления теоретически предсказано, а затем экспериментально доказано существование в массивах горных пород нового типа нелинейных упругих волн маятникового типа. Элементарными носителями такого типа волн являются геоблоки определенного иерархического уровня за счет их трансляционного и вращательного движения в результате импульсного воздействия определенного энергетического класса. Этот тип низкоскоростных волн (300–600 м/с и много ниже) получил название волн маятникового типа  $U_{\mu}$  [51]. Экспериментально установлено, что разрушительное действие ударных импульсов связано с возникновением волн маятникового типа. Волны этого типа характеризуются безразмерным энергетическим критерием (6), но с поправкой на условия соответствующих экспериментов [11].

В условиях лабораторных испытаний образцы горных пород находились в “свободном” состоянии, поэтому потенциальная энергия  $U_0$  в (7) приравнивалась нулю. Систематических исследований по отмеченным направлениям, насколько известно, не проводилось. В связи с этим по результатам экспериментов построены зависимости безразмерного критерия  $\hbar$  (6) от энергии удара, приведенные на рис. 6.

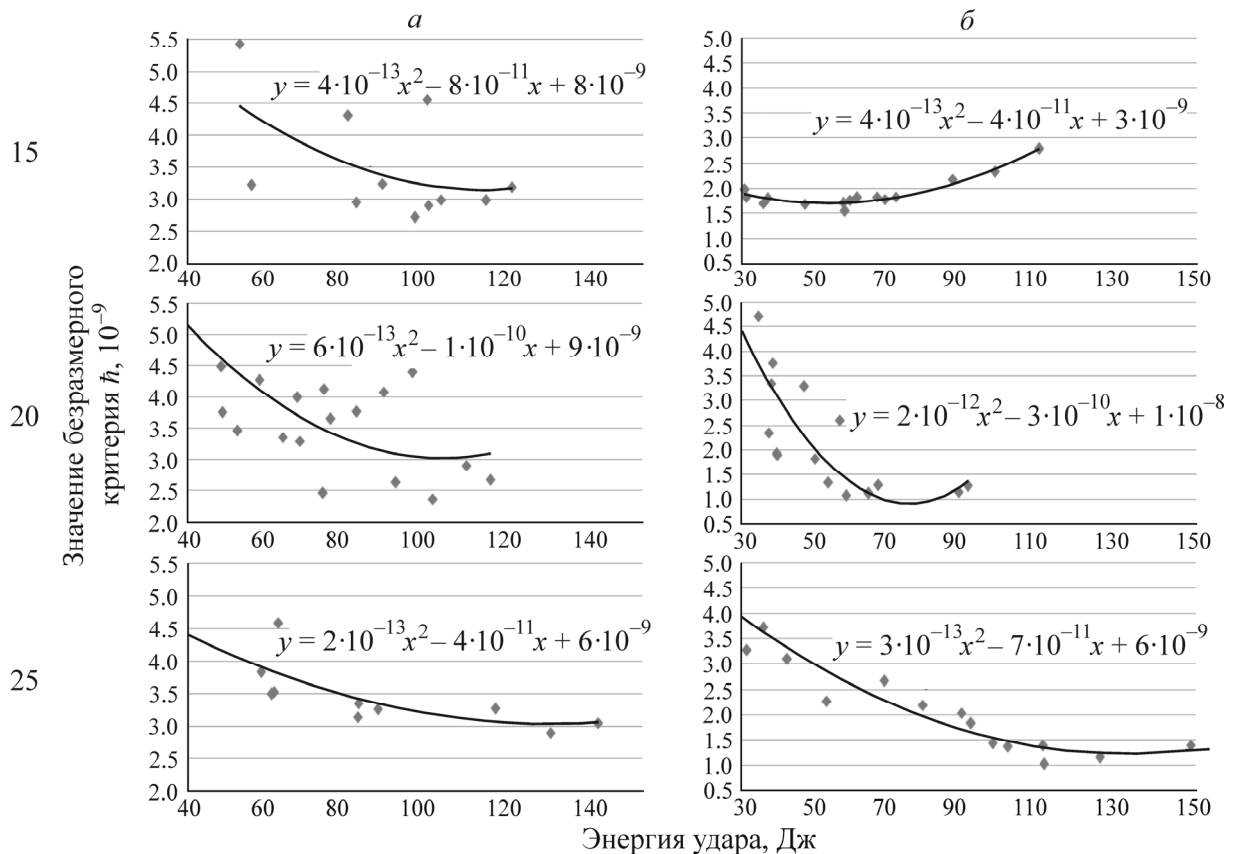


Рис. 6. Зависимости безразмерного энергетического критерия  $\hbar$  от энергии единичного удара ударника для гранита (а) и мрамора (б) при вооружении породоразрушающего инструмента тремя штырями на расстоянии 15, 20 и 25 мм друг от друга соответственно

Как показал анализ зависимостей безразмерного критерия  $\hbar$  от энергии удара, этот критерий в каждом случае находится в пределах, приведенных в [6]. Это свидетельствует о совпадении энергетического условия возникновения волн маятникового типа и геомеханических квазирезонансов с минимумом упругой энергии, необходимой для разрушения геоматериалов от

внешнего динамического воздействия. В известном смысле оптимальное разрушительное действие ударный импульс оказывает при достижении минимального значения безразмерного энергетического критерия  $\hbar$  в пределах, указанных в формуле (6). Согласно рис. 6, минимум энергоемкости разрушения и минимальное значение критерия  $\hbar$  практически совпадают. Из этого можно сделать заключение о том, что именно та доля подведенной упругой энергии, при которой энергоемкость разрушения минимальна, идет в основном на разрушение и отделение породных фракций от массива.

Представленные исследования проведены для отдельного акта — единичного динамического вдавливания твердосплавных породоразрушающих инденторов в горную породу. Полученные результаты уже позволяют обосновать возможность использования безразмерного энергетического критерия (6) механического воздействия породоразрушающих инструментов при определении эффективности самого процесса бурения в промышленных условиях.

#### **ВЫВОДЫ**

Установлено, что основными факторами, влияющими на механическую скорость бурения погружными пневмоударниками, являются: конструкция пневмоударника и породоразрушающего инструмента; режим разрушения горных пород; размер зон разрушения (объем выкола) геоматериала, образующихся при динамическом внедрении инденторов бурового инструмента в породный массив; качество очистки забоя от шлама.

Экспериментально доказано, что при ударном взаимодействии горных пород с инструментом, оснащенным разрушающими инденторами со сферической торцевой поверхностью, существует относительное пороговое значение энергии удара, обеспечивающее разрушение геоматериала с минимальной энергоемкостью; эта характеристика совпадает с безразмерным энергетическим критерием объемного разрушения горных пород по В. Н. Опарину.

Для количественной оценки эффективности процесса бурения в промышленных условиях целесообразно использование безразмерного энергетического критерия В. Н. Опарина — возникновения волн маятникового типа и квазирезонансных явлений в массиве горных пород; при этом зона минимальных значений данного критерия совпадает с интервалом минимальной энергоемкости разрушения породного массива.

***В рамках явления знакопеременной реакции горных пород на динамические воздействия и индуцируемых ими волн маятникового типа в напряженных блочных геосредах дается обоснование необходимости введения нового понятия — о ступенях замедления действия породоразрушающих инструментов при бурении скважин, что имеет принципиально важное прикладное значение для проектирования и создания буровых систем нового поколения, в том числе и для направленного (управляемого) бурения сверхглубоких скважин в многофазных геосредах.***

#### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Адушкин В. В., Опарин В. Н. От явления знакопеременной реакции горных пород на динамические воздействия — к волнам маятникового типа в напряженных геосредах. Ч. IV // ФТПРПИ. — 2016. — № 1. — С. 3–49.
2. Oparin V. N., Smolyanitsky B. N. Promote efficiency of drilling in tunneling and drilling rock, Journal of Lening technical University (National Science), 2009, Vol. 28, No. 3. — P. 445–449.

3. Смоляницкий Б. Н., Репин А. А., Данилов Б. Б. Повышение эффективности и долговечности импульсных машин для сооружения протяженных скважин в породных массивах. — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2013 (Интеграционные проекты СО РАН, вып. 43). — 204 с.
4. Адушкин В. В., Опарин В. Н. От явления знакопеременной реакции горных пород на динамические воздействия — к волнам маятникового типа в напряженных геосредах. Ч. III // ФТПРПИ. — 2014. — № 4. — С. 10–38.
5. Опарин В. Н., Яковицкая Г. Е., Вострецов А. Г., Серяков В. М., Кривецкий А. В. О коэффициенте механо-электромагнитных преобразований при разрушении горных пород // ФТПРПИ. — 2013. — № 3. — С. 3–20.
6. Опарин В. Н., Юшкин В. Ф., Пороховский Н. Н., Гришин А. Н., Кулинич Н. А., Рублев Д. Е., Юшкин А. В. О влиянии массового взрыва в карьере строительного камня на формирование спектра сейсмических волн // ФТПРПИ. — 2014. — № 5. — С. 74–89.
7. Опарин В. Н., Танайно А. С. Каноническая шкала иерархических представлений в горном породоведении. — Новосибирск: Наука, 2011. — 259 с.
8. Курленя М. В., Опарин В. Н. Скважинные геофизические методы диагностики и контроля напряженно-деформированного состояния массивов горных пород. — Новосибирск: Наука, 1999. — 335 с.
9. Опарин В. Н. Энергетический критерий объемного разрушения горных пород // Труды науч. семинара “Неделя горняка–2009”. — М.: МГТУ, 2009. — С. 43–69.
10. Курленя М. В., Опарин В. Н., Востриков В. И. Об эффекте аномально низкого трения в блочных средах // ФТПРПИ. — 1997. — № 1. — С. 3–16.
11. Тимонин В. В. Обоснование параметров породоразрушающего инструмента и гидравлической ударной машины для бурения скважин в породах средней и высокой крепости: автореф. дис. ... канд. техн. наук. — Новосибирск: ИГД СО РАН, 2009. — 22 с.
12. Карпов В. Н., Тимонин В. В. Методика оценки эффективности погружных ударных машин при бурении скважин на станках ударно-вращательного бурения в производственных условиях // Тез. докл. II Междунар. науч. шк. акад. К. Н. Трубецкого “Проблемы и перспективы комплексного освоения и сохранения земных недр”. — М.: ИПКОН РАН. — 2016. — С. 191–195.
13. Тимонин В. В. Оценка процесса разрушения горных пород при динамическом вдавливании группы инденторов с точки зрения нелинейной геомеханики // Тр. науч. конф. с участием иностр. ученых “Геодинамика и напряженное состояние недр Земли”. — Новосибирск, 2008. — С. 470–474.
14. Тимонин В. В. К оценке энергоемкости бурения скважин машинами ударного действия // Материалы 4-й Междунар. конф. “Проблемы механики современных машин”. Т. II. — Улан-Удэ, 2009. — С. 272–275.
15. Танайно А. С., Липин А. А. Состояние и перспективы ударно-вращательного бурения // ФТПРПИ. — 2004. — № 2. — С. 82–93.
16. Репин А. А., Смоляницкий Б. Н., Алексеев С. Е., Попелюх А. И., Тимонин В. В., Карпов В. Н. Погружные пневмоударники высокого давления для открытых горных работ // ФТПРПИ. — 2014. — № 5. — С. 157–167.
17. Липин А. А., Тимонин В. В., Танайно А. С. Современные погружные ударные машины для бурения скважин: каталог-справочник “Горная техника”. — СПб., 2006. — С. 116–123.
18. Тимонин В. В. Погружные пневмоударники для подземных условий разработки // Горное оборудование и электромеханика. — 2015. — № 2 (111). — С. 13–17.
19. Еременко В. А., Карпов В. Н., Тимонин В. В., Барнов Н. Г., Шахторин И. О. Основные направления развития бурового оборудования для системы разработки с этажным принудительным обрушением руды // ФТПРПИ. — 2015. — № 6. — С. 49–64.
20. Воздвиженский Б. И., Мельничук И. П., Пешалов Ю. А. Физико-механические свойства горных пород и влияние их на эффективность бурения. — М.: Недра, 1973. — 240 с.

21. **Голубинцев О. Н.** Механические и абразивные свойства горных пород и их буримость. — М.: Недра, 1968. — 199 с.
22. **Шадрина А. В.** Теоретические и экспериментальные исследования волновых процессов в колонне труб при бурении скважин малого диаметра из подземных горных выработок: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. — Томск: НИ ТПУ, 2014. — 44 с.
23. **Тимонин В. В., Кондратенко А. С.** Погружной пневмоударник для открытых горных работ для бурения скважин на высоком давлении сжатого воздуха // ИНТЕРЭКСПО ГЕО-СИБИРЬ. — Новосибирск: СГУГиТ, 2015. — Т. 2. — № 3. — С. 251–255.
24. **Шахторин И. О., Тимонин В. В.** Доводка машин ударного действия при помощи современного программного обеспечения // Сб. материалов Всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием “Современные проблемы в горном деле и методы моделирования горно-геологических условий при разработке месторождений полезных ископаемых”. — Кемерово, 2015. — 5 с.
25. **Repin A. A., Alekseev S. E., Timonin V. V., Karpov V. N.** Analysis of the compressed air distribution in down-the-hole hammer drills, MINER'S WEEK–2015, Reports of the XXIII International Scientific Symposium, 2015. — P. 475–482.
26. **Петреев А. М., Примычкин А. Ю.** Влияние типа системы воздухораспределения на энергетические показатели пневмоударного узла кольцевой ударной машины // ФТПРПИ. — 2015. — № 3. — С. 117–123.
27. **Петреев А. М., Примычкин А. Ю.** Работа кольцевого упругого клапана в пневмоударном приводе // ФТПРПИ. — 2016. — № 1. — С. 132–143.
28. **Репин А. А., Смоляницкий Б. Н., Алексеев С. Е., Попелюх А. И., Тимонин В. В., Карпов В. Н.** Погружные пневмоударники высокого давления для открытых горных работ // ФТПРПИ. — 2014. — № 5. — С. 157–167.
29. **Денисова Е. В., Конурин А. И.** Геомеханическая модель взаимодействия рабочего органа пневмоударной машины с грунтовым массивом // ФТПРПИ. — 2013. — № 5. — С. 61–70.
30. **Пат. 156214 РФ, МПК E21B4/14 (2006.01).** Пневматический ударный механизм / В. В. Тимонин, А. В. Белоусов; заявитель и патентообладатель Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН. — № 2015126191/03; заявл. 30.06.2015; опубл. 10.11.2015, Бюл. № 31. — 5 с.
31. **Пат. 2535314 РФ, МПК E21B4/14 (2006.01).** Буровая коронка / А. В. Белоусов, В. В. Тимонин; заявитель и патентообладатель Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН. — № 2013133217/03; заявл. 16.07.2013; опубл. 10.12.2014, Бюл. № 34. — 6 с.
32. **Пат. 2540368 РФ, МПК E21B4/14 (2006.01).** Пневматический ударный механизм / А. В. Белоусов, В. В. Тимонин; заявитель и патентообладатель Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН. — № 2013156082/03; заявл. 17.12.2013; опубл. 10.02.2015, Бюл. № 4. — 7 с.
33. **Пат. 2549649 РФ, МПК E21B4/14 (2006.01).** Погружной пневмоударник / А. В. Белоусов, В. В. Тимонин; заявитель и патентообладатель Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН. — № 2014109614/03; заявл. 12.03.2014; опубл. 27.04.2015, Бюл. № 12. — 6 с.
34. **Арцимович Г. В.** Влияние забойных условий и режима бурения на эффективность проходки глубоких скважин. — Новосибирск: Наука, 1974. — 124 с.
35. **Арцимович Г. В.** Исследование и разработка породоразрушающего инструмента для бурения. — Новосибирск: Наука, 1978. — 182 с.
36. **Курленя М. В., Опарин В. Н., Еременко А. А.** Об отношении линейных размеров блоков пород к раскрытию трещин в структурной иерархии массивов // ФТПРПИ. — 1993. — № 3. — С. 3–10.
37. **Опарин В. Н., Симонов Б. Ф., Юшкин В. Ф., Востриков В. И., Погарский Ю. В., Назаров Л. А.** Геомеханические и технические основы увеличения нефтеотдачи пластов в виброволновых технологиях. — Новосибирск: Наука, 2010. — 404 с.

38. **Опарин В. Н., Симонов Б. Ф.** О нелинейных деформационно-волновых процессах в виброволновых геотехнологиях освоения нефтегазовых месторождений // ФТПРПИ. — 2010. — № 2. — С. 3–25.
39. **Арцимович Г. В., Эпштейн Е. Ф.** Ударно-вращательное бурение скважин гидроударниками. — М.: Госгортехиздат, 1963. — 85 с.
40. **Алимов О. Д.** Исследование вращательно-ударного бурения // Изв. ТПИ. — 1959. — Т. 106. — 156 с.
41. **Ребрик Б. М.** Бурение скважин при инженерно-геологических изысканиях. — М.: Недра, 1997. — С. 35–48.
42. **Крюков Г. М., Кутузов Б. Н.** Теоретическое исследование динамического взаимодействия бурового инструмента с породой // Всесоюз. науч.-техн. конф. “Разрушение горных пород при бурении скважин”. — Уфа, 1973. — С. 116–126.
43. **Масленников И. К., Матвеев Г. И.** Инструмент для бурения скважин: справ. пособие. — М.: Недра, 1981. — 432 с.
44. **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.
45. **Бурение шпуров и скважин: по материалам Третьего Всесоюз. совещ. по бурению шпуров и скважин.** — Фрунзе: Илим, 1968. — 332 с.
46. **Павлова Н. Н., Шрейнер Л. А., Портнова А. Г.** Экспериментальные исследования механических свойств горных пород при динамическом вдавливании // Вопросы деформации и разрушения горных пород при бурении. — М., 1961. — С. 4–34.
47. **Сулакшин С. С.** Бурение геологоразведочных скважин: справ. пособие. — М.: Недра, 1991. — 334 с.
48. **Курленя М. В., Опарин В. Н., Ревуженко А. Ф., Шемякин Е. И.** О некоторых особенностях реакции горных пород на взрывные воздействия в ближней зоне // ДАН. — 1987. — Т. 293. — № 1. — С. 67–70.
49. **Курленя М. В., Опарин В. Н.** О явлении знакопеременной реакции горных пород на динамические воздействия // ФТПРПИ. — 1990. — № 4. — С. 3–13.
50. **Курленя М. В., Адушкин В. В., Гарнов В. В., Опарин В. Н., Ревуженко А. Ф., Спивак А. А.** Знакопеременная реакция горных пород на динамическое воздействие // ДАН. — 1992. — Т. 323. — № 2. — С. 263–265.
51. **Курленя М. В., Опарин В. Н., Востриков В. И.** О формировании упругих волновых пакетов при импульсном возбуждении блочных сред. Волны маятникового типа  $\nu_{\mu}$  // ДАН. — 1993. — Т. 333. — № 4. — С. 3–13.

*Поступила в редакцию 5/VIII 2016*