

УДК 622.24.053:531.5

## АНАЛИЗ И НАУЧНОЕ ОБОБЩЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ УДАРНО-ВРАЩАТЕЛЬНОГО СПОСОБА БУРЕНИЯ СКВАЖИН МАЛОГО ДИАМЕТРА ИЗ ПОДЗЕМНЫХ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК

**Шадрина Анастасия Викторовна,**

д-р техн. наук, доцент каф. транспорта и хранения нефти и газа Института природных ресурсов Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. E-mail: avshadrina@rambler.ru

**Саруев Лев Алексеевич,**

д-р техн. наук, профессор каф. теоретической и прикладной механики Института природных ресурсов Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. E-mail: saruev@tpu.ru

*Актуальность работы обусловлена необходимостью совершенствования технологии и техники геологоразведочных работ, связанного с обеспечением энерго- и ресурсоэффективности процессов бурения.*

**Цель работы:** научный обзор результатов теоретических и экспериментальных исследований в области ударно-вращательного способа бурения, направленный на выяснение перспектив возможности разработки и применения ресурсоэффективной технологии бурения геологоразведочных скважин малого диаметра из подземных горных выработок, основанной на использовании генератора волн деформаций, передаваемых по бурильной колонне. Для повышения скорости бурения скважин в твердых породах созданы мощные ударные механизмы. Однако повышение энергии удара ограничивается прочностью бурового инструмента. При неизменном диаметре скважин увеличенную ударную мощность приходится передавать по бурильным трубам и их соединениям прежних размеров. Именно эти элементы бурильной колонны стали сдерживающим фактором внедрения новой технологии. В связи с этим весьма актуальным становится проведение анализа и научное обобщение результатов исследований для решения указанной проблемы.

**Методы исследования:** теоретический анализ; обширный обзор научной литературы по вопросам формирования ударных импульсов, передачи волн деформаций по бурильной колонне, разрушения горных пород, выбора рациональных режимов ударно-вращательного способа бурения, оптимизации процесса бурения на этапе, предшествующем технологическому процессу, выбора методов расчета систем ударно-вращательного способа бурения скважин, моделирования рабочих процессов, определения энергетических параметров буровых агрегатов, а также сопоставление результатов независимых исследований.

**Результаты.** Приведены современные представления и достижения в области ударно-вращательного способа бурения скважин малого диаметра. Выявлены причины существенного расхождения результатов исследований у различных авторов. Показана целесообразность проведения конкретных исследований, которые позволяют добиться наиболее эффективных результатов при совершенствовании технологии и техники бурения скважин. Определены основные направления исследований технологических процессов и техники бурения, и сформулированы научно обоснованные рекомендации по повышению производительности бурения благодаря интенсификации процесса разрушения горных пород при бурении скважин.

### **Ключевые слова:**

*Геологоразведочное бурение, технология бурения, подземная горная выработка, бурильная колонна, формирование ударных импульсов, передача волн деформаций, разрушение горной породы, оптимизация бурения, моделирование рабочих процессов, энергетические параметры буровых агрегатов.*

### **Введение**

Одним из основных требований к производственным процессам является их ресурсоэффективность.

Известно, что в разведочном бурении одним из важнейших вопросов является качество извлекаемых из недр образцов горной породы. Очевидно, самым распространенным способом получения такой информации является разведочное колонковое бурение.

Однако стоит отметить, что и бурение, дающее образцы в виде шлама, например бурение с обратной циркуляцией воздуха, достаточно распространено, особенно в зарубежных странах (рис. 1).

Традиционно для интенсификации бурения при проходке скважин в твердых породах применяют погружные пневматические и гидравлические ударные машины.

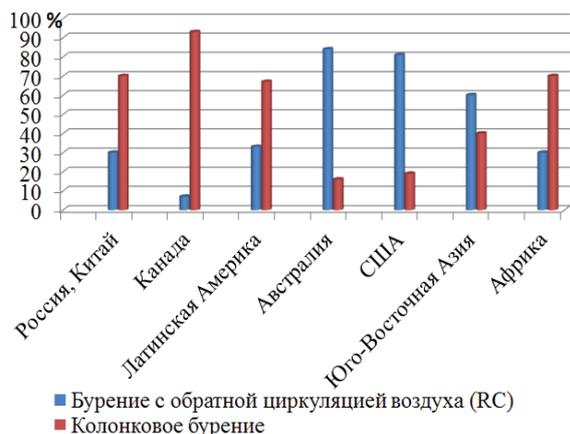
Результаты исследований, проводимые в Томском политехническом университете И.А. Ней-

штетером [2], С.С. Сулакшиным, В.П. Рожковым и др. [3], показали, что воздействие на породоразрушающий инструмент (ПРИ) ударного импульса при вращательном бурении горных пород позволяет увеличить механическую скорость бурения от полутора до пяти раз.

Анализ геологоразведочного оборудования показал, что предлагаемые установки с погружными ударными механизмами в преобладающей своей части позволяют бурить скважины средних и больших диаметров.

Применение буровых установок с ударными механизмами, расположенными вне скважины, и независимым вращением бурильной колонны может являться альтернативным вариантом бурения сравнительно неглубоких геологоразведочных скважин (до 50 м) малого диаметра (40–70 мм) на месторождениях с хорошо изученными геологическими разрезами (условия залегания, физико-химические свойства полезных ископаемых и гор-

ных пород, мощность отложений и т. п.) и при бурении по «пустым породам» как более экономичный и быстрый способ углубки до рудного тела; при бурении с отбором шлама для его последующего анализа при эксплуатационной разведке этажей, горизонтов, блоков с целью уточнения данных для планирования добычи, контроля за качеством отработки запасов полезного ископаемого.



**Рис. 1.** Соотношение бурения с RC (обратной циркуляцией воздуха) и колонкового (данные национальной статистики по общим затратам на разведку с поверхности и из подземных горных выработок) [1]

**Fig. 1.** Ratio of RC (reverse circulation) drilling and core drilling (the data of national statistics on general costs for surface prospecting and from underground digging) [1]

Рассматривая технологию бурения скважин как широкий комплекс способов, приемов и средств бурения в соответствии с их назначением [4], следует выделить основные факторы, определяющие возможные пути и следствия сбережения ресурсов при ее применении (рис. 2).

#### Анализ современного геологоразведочного оборудования

В области геологоразведочного бурения возможность приложения ударной нагрузки на ПРИ предусмотрена посредством применения погружных пневмо- и гидроударников, которые в настоящее время представлены на рынке бурового оборудования следующими моделями:

- пневмоударные буровые комплексы серии ПН для сооружения скважин различного назначения диаметром 76, 93, 112, 132 мм с отбором и без отбора керна в породах VI–XII категорий по буримости (диапазон изменения энергии удара от 80 до 440 Дж) (ОАО «Тулское НИГП», г. Тула) [5];
- кольцевые пневмоударники ПКР-130, ПКР-150, ПКР-190 с энергией единичного удара от 150, 200 и 300 Дж, соответственно (СКБ «Геотехника», г. Москва и ИГД СО РАН, г. Новосибирск);
- зарубежные образцы погружных пневмоударных машин: Permon VKP 100 (Чехия), для ударно-вращательного бурения скважин диа-

метром от 100 до 110 мм в горных породах с коэффициентом крепости по Протоdjяконову от 6 до 20 (в т. ч. при геологоразведочных работах); «Sandvik» – Mission 30 (диаметры коронок от 90 до 105 мм); «Atlas Copco» – COP 34 (диапазон от 90 до 110 мм), COP 44 (диапазон от 110 до 130 мм); «Rockmore International» (Австрия/США) – серия ROK: ROK 2LT (диаметры коронок от 70 до 76 мм), ROK 350–006 Sonic Flow (диаметры коронок от 95 до 105 мм) и др.; а также погружные пневмоударники фирм-производителей Bolher (Австрия), Holman (Великобритания) и др.;

- разработанные в СКБ «Геотехника» унифицированные гидроударные машины Г-59 и Г-76 для бурения горных пород VII–XII категорий по буримости твердосплавными и алмазными коронками диаметром 59 и 76 мм (диапазон изменения энергии удара от 10 до 80 Дж) [6];
- зарубежные образцы погружных гидроударных машин: «Wassara» (Швеция) – энергия единичного удара от 350 до 400 Дж (наружный диаметр 96 мм); «IET» (Китай) – энергия единичного удара от 150 до 350 Дж (наружный диаметр 146 мм и др.).

Для эффективного бурения скважин малого диаметра предпринимаются попытки разработать малогабаритные погружные пневмоударные машины: АШ45 (ИГД СО РАН, г. Новосибирск) [7], ПП65 [8]. Такие пневмоударники требуют увеличения давления сжатого воздуха, в том числе и путем установки дополнительных компрессоров, а также увеличения мощности пневмоударника за счет более совершенных конструкций. Однако в настоящее время эти разработки не получили промышленного применения.

Таким образом, буровые агрегаты ударно-вращательного действия с ударными механизмами, расположенными вне скважины, позволяют проводить скважины малого диаметра из подземных горных выработок, используя большие мощности и обеспечивая существенное повышение скорости бурения. В табл. 1 в качестве примера приведены основные характеристики таких агрегатов.

#### Научное обобщение и анализ достижений в области ударно-вращательного бурения скважин из подземных горных выработок

Вторая половина XX в. характеризовалась значительным ростом теоретических и экспериментальных исследований в области применения технологий, в которых используется энергия удара при бурении скважин.

Отечественные и зарубежные исследователи сформировали следующие направления в этой области:

- 1) аналитические исследования;
- 2) экспериментальные исследования с выводом эмпирических формул и зависимостей;
- 3) определение взаимосвязей между свойствами горных пород и эффективностью их разрушения;

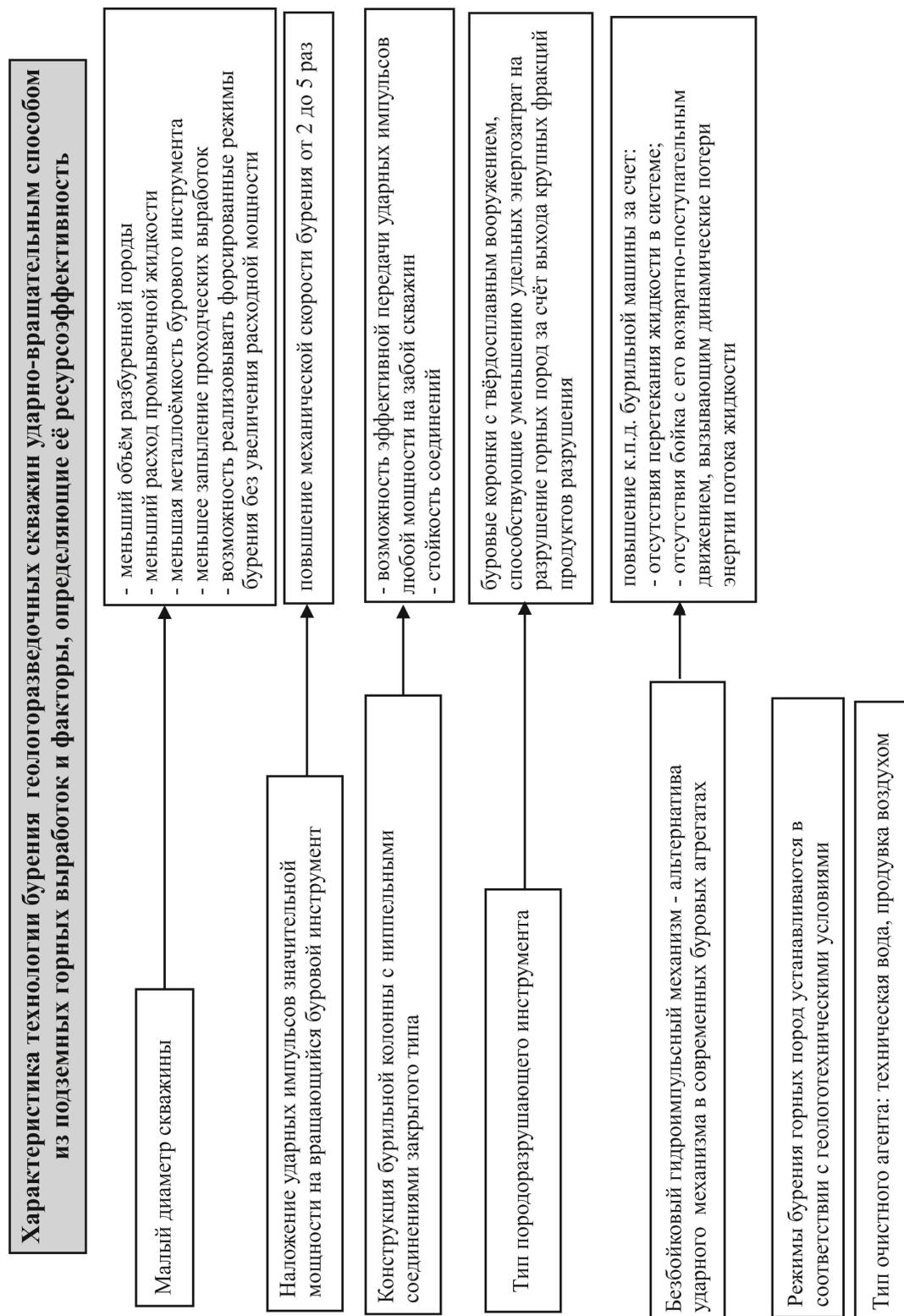


Рис. 2. Факторы, определяющие ресурсоэффективность технологии бурения геологоразведочных скважин ударно-вращательным способом

Fig. 2. Factors, determining resource efficient technologies in impact-rotary drilling of exploration wells

**Таблица 1.** Основные характеристики некоторых современных отечественных и зарубежных буровых агрегатов ударно-вращательного действия для бурения скважин из подземных горных выработок

**Table 1.** Basic parameters of some modern domestic and foreign impact-rotary drilling units for underground digging

Показатели/Indices	Техническая характеристика некоторых отечественных и зарубежных моделей буровых агрегатов ударно-вращательного действия					
	Performance of some domestic and foreign models of impact-rotary drilling units					
Наименование/Title	БУ-80НБ		Simba M3C	DrillMaster 100	DL331-5	
Глубина бурения, м Drilling depth, m	40		51	50	23	
Диаметр скважины, мм Well diameter, mm	52-85		51-89	64-89	51-64	
Направление бурения Direction of drilling	Круговой веер в вертикальной плоскости Circular fan in a vertical plane		Бурение кольцевых, веерных и параллельных скважин на расстоянии до 1,5 м без переездов Drilling circular, fan and parallel wells within 1,5 m without moving	Бурение кольцевых, веерных и параллельных скважин Drilling circular, fan and parallel wells		
Тип перфоратора Type of perforator	M2	M3	M4	COP 1838ME	HC 109	HLX5
Осевая нагрузка на буровой инструмент, кН Axial load on a drilling tool, kN	до (to) 13		20	до (to) 15	20	
Крутящий момент, Н·м Rotative moment, N·m	294		до (to) 640	от (from) 325 до (to) 415	до (to) 1355	
Энергия единичного удара, Дж Single beat energy, J	132	167	260	330	210	400
Частота ударов, с <sup>-1</sup> Impact frequency, s <sup>-1</sup>	42	37	37	60	62	42-52
Частота вращения, об/мин Rotation frequency, rev/min	80-130		от (from) 0 до (to) 340	от (from) 195 до (to) 250	250	
Ударная мощность, кВт, не менее Impact power, kW, not less	5,5	5,5	7,5	20	13	20
Рабочее давление сжатого воздуха (гидросистемы), МПа Operation pressure of compressed air (hydraulic system), MPa	0,5		до 23	от (from) 8,5 до (to) 14	от (from) 10 до (to) 17	
Фирма-производитель Producing company	Старооскольский механический завод (Россия) Starooskolsk mechanical plant (Russia)		Atlas Copco (Швеция) (Sweden)	RDH (Канада) (Canada)/ перфоратор (perforator) – Montabert (Франция) (France)	Sandvik (Швеция) (Sweden)	

4) теоретические решения и моделирование процессов, основанные на определенной идеализации горной породы, ПРИ и механизмов их взаимодействия.

При проведении теоретических и экспериментальных исследований руководствуются следующим:

- при математическом представлении результатов исследований основываются на физической сущности явления;
- при выводе формул допускают некоторые упрощения для возможности их применения в инженерных расчетах;
- результаты расчетов по формулам должны совпадать с экспериментальными данными.

Прежде всего, актуальным являлось исследование и установление зависимости механической скорости бурения от режимов работы буровых агрегатов (осевой нагрузки; крутящего момента;

скорости вращения бурильной колонны; предупредительной скорости бойка; энергии, амплитуды и длительности ударного импульса; количества агента для очистки забоя; давления сжатого воздуха и т. п.) и геометрических параметров ПРИ, а также оценка энергоемкости процесса разрушения горной породы с учетом влияния различных факторов.

Для буровых машин, имеющих ударный и вращательный механизмы, расположенные вне скважины, процессы формирования, передачи ударных импульсов силы по бурильной колонне, внедрение под их воздействием ПРИ в горную породу разделены во времени, т. е. протекают последовательно. Значительное число ученых исследовали данные процессы в поисках возможностей управления параметрами волн деформаций, что в конечном итоге способствовало повышению эффективности бурения твердых горных пород.

По данной проблеме накоплен достаточно большой теоретический и экспериментальный материал. В годы перестройки из-за сложившейся экономической ситуации в стране объем исследований по данным направлениям резко снизился, однако в настоящее время на основе многочисленных предшествующих исследований, имеющих огромную значимость, ведется научная работа применительно к современным требованиям технологии бурения.

#### Формирование ударных импульсов

Как известно, основные параметры волны деформации, генерируемой в результате приложения удара (форма, амплитуда, длительность, энергия), существенно влияют на характер разрушения горной породы.

Целый ряд исследований показал возможность регулирования процессов преобразования энергии при работе ударных механизмов [9–15].

Обобщая теоретический и экспериментальный опыт в вопросах генерирования ударных импульсов рациональной формы, можно выделить следующие направления:

- формирование ударных импульсов в ударных системах различной конструкции [10–13];
- формирование ударных импульсов ударными механизмами с использованием жидкости (масла, воды), а также твердого тела в качестве промежуточного элемента [14];
- формирование ударных импульсов в ударных системах с элементами из различных материалов (сталь, сплав титана, сплав алюминия [9]).

Основной целью подобных исследований является определение условий формирования ударных импульсов оптимальной формы, приводящей к эффективному разрушению горной породы.

Форма ударного импульса должна соответствовать силам сопротивления среды внедрению ПРИ во времени. Чем больше это соответствие, тем меньше доля отраженной энергии, и, соответственно, меньше ее потери. Длина бойка, его диаметр и масса, а также скорость приложения ударной нагрузки должны быть подобраны таким образом, чтобы обеспечить их большее взаимное соответствие. Если усилие, развиваемое импульсом, превосходит величину, необходимую для внедрения, то ПРИ легко внедряется в разрушаемую среду. При этом происходит отражение импульса растяжения. Нереализованная энергия удара расходуется на переизмельчение шлама, а возвращаемая в ударный механизм повышает шум и вибрацию. Если величина усилия импульса недостаточна для внедрения бурового инструмента, то отражается импульс сжатия. Таким образом, нерациональное использование энергии волны деформации приводит к повышению энергоемкости разрушения горных пород.

В реальных условиях, как правило, отражается часть ударного импульса.

В работах Л.Т. Дворникова, А.А. Мясникова [13, 15] обоснована модель сопротивления породы внедрению инструмента, а также определены формы продольных колебаний, оптимально переходящих в работу разрушения горной породы по критерию минимума энергии отраженной волны деформации. Оптимальным авторами считают импульс, определяемый формой, обеспечивающей минимум энергии отраженному импульсу при заданной зависимости «сила–внедрение» и заданном значении энергии сформированного (падающего) импульса.

Кроме того, автором разработана конструкция бойка ударного механизма, имеющая форму гиперболоида вращения, генерирующая оптимальные по форме ударные импульсы и обеспечивающая существенное повышение производительности без увеличения подводимой к механизму мощности [13].

Идеи предыдущих авторов получили развитие в работах других исследователей [11, 14, 16, 17]. В трудах [11, 16] представлены решения задач, связанных с созданием и совершенствованием машин, предназначенных для разрушения хрупкой среды ударом в отсутствие поворота инструмента. Обоснованы и предложены конструкции бойков с рациональной конфигурацией в виде катеноидов для ударных механизмов, защищенные патентами РФ. Сравнительный анализ импульсов, формируемых различными ударниками, выявил, что бойки полукатеноидальной формы генерируют в волноводе импульс, приближенный к ударному импульсу оптимальной формы. В основе исследований лежит модифицированная волновая теория удара, рассматривающая трехмерное распространение волн в упругой среде и учитывающая геометрию деталей ударных механизмов [11].

В работе [17] обоснована и представлена конструктивная схема ударного механизма с генератором ударных импульсов, адаптирующегося к разрушаемой среде. Отмечается необходимость увеличения длительности ударного импульса для повышения эффективности удара, так как за короткое время контакта при ударе ударная нагрузка не успевает реализоваться в горной породе. Использование при этом гидропривода позволяет получить высокий к.п.д., увеличение долговечности оборудования и производительности разрушения горной породы, обеспечивает повышенные технико-экономические показатели бурения. Данная задача решалась путем математического моделирования. Разработанная математическая модель позволяет ускорить разработку опытного образца ударного механизма, близкого к исходным техническим требованиям.

В настоящее время в ударных механизмах, как правило, применяются цилиндрические или ступенчато-цилиндрические элементы, которые перемещаются и соударяются только в осевом направлении. Для обеспечения центрального удара один

из контактирующих торцов выполняется в виде сферического сегмента, а второй – плоским [18]. В работе Г.В. Топорова и М.Я. Левандовского рекомендован радиус закругления ударных торцов цилиндрических бойков 300 мм [19].

Следует отметить еще один важный момент в вопросе формирования ударных импульсов, связанный с развитием гидроударных систем [14, 17, 20]. Данное направление является более прогрессивным в развитии буровой техники и связано со значительно превосходящим к.п.д. буровых установок по сравнению с пневматическими.

Тем не менее, несмотря на то, что накоплен значительный объем теоретических и экспериментальных исследований в данном вопросе, до настоящего времени нет серийного выпуска отечественных гидравлических ударных машин, соответствующих лучшим зарубежным образцам [20]. Существующие зарубежные и отечественные образцы гидравлических буровых установок включают боек и реализуют механический удар. В работе [21] рассматривается представление об управлении амплитудой и длительностью ударных импульсов на основе введения в структуру механизмов ударного действия промежуточного жидкостного элемента. Это позволяет увеличить технический ресурс бурового инструмента за счет формирования ударных импульсов рациональной формы и снижения напряжений; увеличить частоту удара в 2 раза; исключить волны изгиба; снизить уровень шума; передавать большие энергии удара; защитить от отраженных ударных импульсов детали буровой машины.

В работах А.С. Сердечного [21] и В.П. Рындина [14] установлено, что при соударении через слой жидкости исключаются высокочастотные составляющие сглаженного ударного импульса. Это способствует уменьшению шума от вибрации бурового инструмента.

По нашему мнению, перспективной для бурения скважин может стать разработка безбойковой гидроимпульсной системы, позволяющей формировать импульсы давления со сглаженным передним фронтом, т. е. осуществляющей плавное нагружение бурового снаряда [22].

**Таблица 2.** Плотности материалов бойка ударного механизма и волновода (бурильной колонны)

**Table 2.** Density of the materials of percussive mechanism head and waveguide (drilling stem)

Материал/Material	Плотность, кг/м <sup>3</sup> Density, kg/m <sup>3</sup>
Сталь/Steel	7800
Сплав титана/Titanium alloy	4400
Сплав алюминия/Aluminum alloy	2600

Влияние акустических свойств материалов ударной системы на параметры формируемых импульсов установлено в работе [9]. Указанные свойства материала бойков и бурильных труб опреде-

ляются декрементом затухания, а также скоростью распространения волн. Для стали, сплава титана и сплава алюминия скорость распространения ударных импульсов была принята авторами одинаковой и равной 5100 м/с с погрешностью 3 %, а удельное акустическое сопротивление, определяемое произведением скорости звука в среде на ее плотность ( $\rho_i \cdot a_i$ ), пропорционально плотности (табл. 2).

Для указанных трех материалов авторы [9] рассмотрели девять вариантов ударных систем с различным сочетанием материалов бойка и волновода и выявили закономерности генерирования волн деформаций в них:

- 1) при неизменной энергии удара и геометрических параметрах системы (площадь поперечного сечения бойка больше площади поперечного сечения волновода) с уменьшением акустического сопротивления (плотности) материала бойка амплитуда силы импульса в волноводе возрастает, а длительность головной части ударного импульса, содержащей около 98 % начальной энергии удара, уменьшается. В свою очередь, уменьшение акустического сопротивления материала волновода приводит к снижению амплитуды силы импульса, но возрастанию его длительности;
- 2) уменьшение акустического сопротивления волновода приводит к снижению напряжений в волне деформаций и увеличению длительности этой волны. Например, с уменьшением акустического сопротивления волновода в 3 раза и значениях отношений площадей поперечного сечения бойка  $S_1$  к площади поперечного сечения волновода  $S_2$  в диапазоне от 2 до 6 напряжения в волне деформации уменьшаются в 2,5–3 раза, а длительность волны возрастает в 3 раза;
- 3) если боек и волновод выполнены из одного материала, то уменьшение акустического сопротивления материала приводит к снижению напряжений, возникающих в волноводе, без изменения длительности генерируемой в нем волны деформации.

Очевидно, что выбор параметров ударной системы необходимо производить, учитывая прочностные качества материалов, а также из условий наилучшей передачи энергии волны деформации к разрушаемой горной породе.

В дальнейшем исследования ударных систем, включающих элементы с разной акустической жесткостью, были продолжены в работе [14] и направлены на использование возможности фильтрации отраженных сжатием ударных импульсов, направленных по бурильной колонне к буровому агрегату и приводящих к ее разрушению.

Передача волн деформаций по бурильной колонне

Е.В. Александров и др. [23] доказали, что передача удара имеет сложный характер и осуществляется вследствие взаимодействия масс и волновых

**Таблица 3.** Известные формулы для определения коэффициента передачи энергии удара  $\eta$   
**Table 3.** Known formulas to determine impact energy transfer coefficient  $\eta$

Автор/Author	Формула/Formula	Примечание/Note
Ю.В. Беллев [26, 27] Yu.V. Belyaev [26, 27]	$\eta = \frac{m_1}{m_2} [1 - f + \alpha(1 - f) f']^2$ , где $f = \frac{a_2 - ka_1}{a_2 + ka_1}$ ; $k = \frac{E_2 S_2}{E_1 S_1}$ (is the integral in the expression) $\frac{T_2}{T_1} = p + \alpha$ .	Индексы 1 и 2 относятся к бойку и ударяемому стержню соответственно. Под стержнем понимается буровой инструмент, воспринимающий ударную нагрузку Indices 1 and 2 refer to a head and a rod, respectively. The rod is regarded as a drilling unit taking up impact stress  $m_1$ и $m_2$ – массы стержней; $a$ – скорость распространения звуковых волн в материале стержней; $\alpha$ – декремент затухания ( $0 < \alpha < 1$ ); $E$ и $S$ – модуль упругости материала и площадь поперечного сечения стержней, соответственно; $T$ – время движения волн при соударении $m_1$ and $m_2$ are the rod mass; $a$ is the velocity of sound wave propagation in rod material; $\alpha$ is the damping ratio ( $0 < \alpha < 1$ ); $E$ and $S$ are the material elasticity module and rod cross-section area, respectively; $T$ is the time of wave motion at impacting
П.С. Кучеров [26, 28] P.S. Kucherov [26, 28]	$\eta = 1 - (1 - c^2) \frac{k}{1 + k}$ , где $c$ – коэффициент восстановления при ударе (coefficient of elasticity); $k = \frac{m_2}{m_1}$ . Так, например, для удара стали о сталь $c \approx 0,56$ (for steel-on-steel impact), тогда $\eta = 1 - 0,7 \frac{k}{1 + k}$ .	Предполагается, что передается вся кинетическая энергия бойка за вычетом энергии, идущей на неупругие деформации при ударе It is supposed that the whole kinetic energy of a head except the energy for inelastic deformation at impact is transferred
Б.И. Бокий [26] B.I. Boky [26]	$\eta = \eta_1 \eta_2$ , где $\eta_1 = (1 + c)^2 \frac{Q_1 Q_2}{Q_1 + Q_2}$ ; $0,5 < \eta_2 < 0,7$ .	$\eta_1$ – коэффициент передачи удара от ударника к стержню; $\eta_2$ – коэффициент использования энергии непосредственно на разрушение горной породы; $c$ – коэффициент восстановления скорости при ударе ( $0 < c < 1$ ); $Q$ – вес ударника и стержня. Автор считает, что общий к.п.д. удара при бурении нельзя принимать более 0,05–0,07, что кажется нам весьма заниженным значением $\eta_1$ is the coefficient of impact transmission from a tester to a rod; $\eta_2$ is the coefficient of energy use directly for rock destruction; $c$ is the coefficient of rate recovery at impact ( $0 < c < 1$ ); $Q$ is the weight of a tester and a rod. The author considers that impact total efficiency could not be taken more than 0,05–0,07 when drilling. But the authors of this paper suppose it this value to be rather underestimated
И.А. Афанасьев [27] I.A. Afanasyev [27]	$\eta = \frac{m_1 m_2 (1 + c_1)^2 (1 - c_2)^2}{(m_1 + m_2)^2}$ , где $m_1$ и $m_2$ – массы бойка и стержня (mass of a head and a rod); $c_1$ – коэффициент восстановления скорости при ударе бойка по стержню (coefficient of rate recovery at head-on-rod impact); $c_2$ – коэффициент восстановления скорости при ударе стержня по горной породе (coefficient of rate recovery at rod-on-rock impact).	Автор определяет общий к.п.д. удара как произведение двух коэффициентов: к.п.д. удара по стержню и к.п.д. удара стержня по породе The author determines the total efficiency as a product of two coefficients: efficiency of impact with rod and efficiency of rod impact with a rock
В.М. Мостков [27, 29] V.M. Mostkov [27, 29]	$\eta_2 = \frac{A_y}{A}$ , где $A_y$ – полезная работа, совершаемая стержнем при внедрении в породу (effective capacity of a rod at penetration): $A_y = \frac{k}{\varepsilon} [2 \cdot l^{-\mu} (1 - l^{-\varepsilon})]^2 \frac{m_b V_0^2}{2}$ ; $A$ – кинетическая энергия бойка перед ударом (kinetic energy of a head before impact): $A = \frac{m V_0^2}{2}$ ; где $\mu = \frac{Q_{ст}}{2Q_0}$ – отношение веса стержня к удвоенному весу бойка (ratio of a rod weight to double weight of a head); $\varepsilon = \frac{r_b S_0 J}{2 E S_b}$ , где $r_b$ – коэффициент внедрения (penetration coefficient);	Автор считает, что потери энергии при ударе происходят только между стержнем и породой; к.п.д. удара $\eta_2$ не зависит от скорости поршня в момент удара. Общий к.п.д. $\eta$ определяется как произведение к.п.д. собственно бурового агрегата $\eta_1$ и к.п.д. удара стержня при внедрении в горную породу The author considers that energy losses at impact occurs only between the rod and the rock; impact efficiency $\eta_2$ does not depend on piston velocity at impact. Total efficiency $\eta$ is determined as the product of the drilling unit efficiency $\eta_1$ and rod impact efficiency at penetration

Автор/Author	Формула/Formula	Примечание/Note
	<p><math>l</math> – длина стержня (rod length); <math>S_0</math> – эффективная площадь ПРИ (effective area of a rock-destruction tool); <math>S_0</math> – площадь сечения волновода (area of a waveguide section); <math>E</math> – модуль упругости материала волновода (elasticity module of waveguide material).</p> <p><math>\eta_1 = \frac{N}{N_0}</math>, где <math>N_0</math> – подводенная к буровому агрегату мощность (power delivered to a drilling unit); <math>N</math> – полезная мощность бурового агрегата до внедрения стержня в горную породу (effective capacity of a drilling unit before rod penetration); общий к.п.д. (total efficiency) <math>\eta = \eta_1 \eta_2</math></p>	<p>Индексы 1 и 2 относятся к бойку и ударяемому стержню соответственно. Под стержнем понимается буровой инструмент, воспринимающий ударную нагрузку Indices 1 and 2 refer to a head and a rod, respectively. The rod is regarded as a drilling unit taking up impact stress</p>
<p>А.Г. Цуканов [30] A.G. Tsukanov [30]</p>	<p><math>\eta = \frac{m_1}{m_2} \left( \frac{2m_2}{1-l} \right)^2</math>, где <math>m_1</math> и <math>m_2</math> – массы бойка и стержня соответственно (mass of a head and a rod, respectively); <math>l</math> – длина волновода (waveguide length)</p>	<p>Формула позволяет определять коэффициент передачи энергии удара по длинным стержням The formula allows determining the coefficient of energy transfer along the long rods</p>
<p>К.И. Иванов и др. [12] K.I. Ivanov et al. [12]</p>	<p>Общие потери амплитуды напряжения в цельном стержне (total losses of stress amplitude in the integral rod): <math>\sigma = \sigma_0 e^{-\alpha_1 l}</math>, <math>\sigma_0</math> – начальная амплитуда напряжения (initial stress amplitude); <math>l</math> – расстояние от поперечного сечения с напряжением <math>\sigma_0</math> до поперечного сечения с искомым напряжением (distance from cross-section with stress <math>\sigma_0</math> to the cross-section with unknown stress); <math>\alpha_1</math> – декремент затухания колебаний в материале труб (oscillation damping factor in pipe material); <math>\alpha_1 = \frac{f}{2a_0} \frac{\Delta W}{W_0}</math>, <math>f</math> – частота колебаний (oscillation frequency); <math>W_0</math> – начальная энергия колебаний в волноводе (initial oscillation energy in a waveguide); <math>\Delta W</math> – потерянная энергия колебаний (lost oscillation energy); <math>a_0</math> – скорость распространения волн в материале трубы (wave distribution rate in a pipe material). Потери энергии волны деформации (losses of strain wave energy): <math>W = W_0 e^{-(\alpha_1 + \alpha_2) l}</math>, где <math>\alpha_1</math> – потери стержне постоянного сечения без соединений (losses in the uniform section rod without connections); <math>\alpha_2</math> – потери в одном соединении (losses in one connection); <math>l</math> – общая длина колонны (total column length); <math>n</math> – число соединений (number of connections)</p>	<p>Предложена методика определения потери амплитуды напряжения и энергии удара при распространении по колонне стержней The authors proposed the technique for determining the stress amplitude and impact energy loss at propagation along the rod column</p>
<p>Лаборатория удара и вибрации ИГД им. А.А. Скочинского [31] A.A. Skochinsky laboratory of impact and vibration [GD] [31]</p>	<p>а) <math>\eta = \frac{A_2}{A_0} = \frac{4c_1 c_2}{(c_0 + c_2)^2}</math>, где <math>A_2</math> – энергия, полученная стержнем за время соударения (energy obtained by the rod during impacting); <math>A_0</math> – энергия ударника перед соударением (energy of a tester before impacting); <math>c</math> – жесткости (<math>c = Spa</math>) ударника и стержня (tester and rod stiffness); при (at) <math>c_0 = c_1</math> возможна полная передача энергии (complete energy delivery is possible); б) <math>\eta = \frac{4c_1 c_2}{(c_0 + c_2)^2} \frac{1}{T} \left[ \sum_0^T \left( \frac{N}{N_0} \right)^2 dt + \int_0^T \left( \frac{N_{\text{уд}}}{N_0} \right)^2 dt \right]</math>, где <math>T</math> – период прохождения импульса энергии по всей длине ударника (period of energy pulse propagation over the tester length); <math>N_0</math> – подводенная к буровому агрегату мощность (power delivered to a drilling unit); <math>N</math> – полезная мощность бурового агрегата до внедрения стержня в горную породу (effective capacity of a drilling unit before rod penetration)</p>	<p>Коэффициент передачи энергии удара может быть определен для нескольких случаев соударения: а) случай плоского удара ударника о бесконечный стержень (или <math>\frac{l_2}{a_2} &gt; \frac{l_1}{a_1}</math>, когда отраженная волна не сможет оказать влияние на следующий удар); б) неплоский удар двух стержней Coefficient of impact energy transfer may be determined for some cases of impacting: а) case of a tester flat impact with an infinite rod (or <math>\frac{l_2}{a_2} &gt; \frac{l_1}{a_1}</math>, when the reflected wave could not influence the next impact); б) non-flat impact of two rods</p>
<p>П.М. Алабужев и др. [32] P.M. Alabuzhev et al. [32]</p>	<p><math>\eta = \frac{(1+k)^2 m_1 m_2}{(m_1 + m_2)^2}</math>, <math>m_1</math> и <math>m_2</math> – массы бойка и стержня, соответственно (mass of a head and a rod, respectively)</p>	<p>Применяется формула классической механики, предполагается, что коэффициент восстановления скорости (отскока) <math>k</math> – величина переменная The authors apply the formula of classical mechanics and suppose that the coefficient of rate recovery (rebound) <math>k</math> is the variable value</p>

процессов, возникающих при соударении, зависит от формы соударяемых тел и степени податливости торцов. Кроме того, с увеличением глубины скважины требуется увеличение крутящего момента на буровом инструменте.

В литературе недостаточно подробно представлены результаты экспериментальных исследований передачи энергии удара по относительно длинным колоннам буровых труб (50 м и более).

В процессе движения волны деформации по буровой колонне возможна потеря ее энергии, вызванная различными факторами. Одним из главных факторов, обуславливающих эффективность бурения, реализующего энергию удара, является коэффициент передачи энергии удара [24, 25].

К настоящему времени существует несколько методов определения коэффициента передачи энергии удара  $\eta$  (табл. 3).

Таким образом, труды значительного количества ученых были посвящены поискам путей и решений передачи энергии удара по буровому инструменту с наименьшими потерями. Однако существенный разброс численных значений полученных результатов требует проведения дополнительных исследований с целью получения объективной оценки. При этом одним из принципиальных факторов может быть унификация условий проведения экспериментов.

#### Разрушение горной породы

При исследовании разрушения горных пород внимание ученых было направлено на изучение механизма разрушения горной породы, ПРИ, а также энергоемкости разрушения горной породы [29, 33–36].

Систематизация и анализ описаний механизма разрушения горной породы при вращательно-ударном бурении разных исследователей (Е.Ф. Эпштейна, Ф. Патцольда, Е. Иннета, Е.П. Пфлейдера и В.Д. Лакабанне, О.Д. Алимова, А.И. Мелекесцева, Ю.М. Парийского, Ихара Мамото, Б.З. Израелита) приведены в работе Л.Т. Дворникова [15]. Механизм разрушения забоя при вращательно-ударном бурении представляется следующим (рис. 3) [15]:

- 1) лезвие коронки в результате действия ударной нагрузки мгновенно заглубляется на некоторую величину  $h_y$  (положение 1);
- 2) инерционность подающего механизма буровой машины вызывает снижение осевого прижатия ПРИ к забою, лезвие коронки несколько отходит от уровня первоначального заглубления, перемещается в положение 2;
- 3) осевая нагрузка достигает максимального значения, и в положении 2 лезвие коронки перед слоем горной породы, который необходимо срезать, замедлит свое движение или остановится;
- 4) по мере формирования и дальнейшего увеличения в системе «вращательно-ударный механизм – штанга – коронка» крутящего момента, необходимого для скола горной породы, лезвие

коронки внедряется в забой (положение 3) на величину  $h_1$ , меньшую  $h_y$ ; под действием крутящего момента происходит скол горной породы по линии  $a$ ;

- 5) лезвие коронки, сменяя частицы горной породы, за счет упругих деформаций штанги переместится в положение 4; вновь может произойти внедрение на  $h_1$  (положение 5), скол по линии  $b$  и перемещение лезвия в положение 6;
- 6) этот процесс может происходить многократно (положения 7, 8) до следующего внедрения коронки от удара на  $h_y$  (положение 9).

Данный процесс может видоизменяться в зависимости от величины осевой нагрузки, угла поворота между ударами и энергии удара.



Рис. 3. Механизм разрушения горной породы при вращательно-ударном бурении [15]

Fig. 3. Mechanism of rock destruction at rotary-impact drilling [15]

На первом этапе исследований механизм разрушения горных пород изучался на упрощенных конструкциях инденторов: острое и притупленное лезвие, плоский штамп, сфера для целей изучения процесса формирования угловой части забоя. В дальнейшем исследования проводились при бурении как известными коронками, имеющими классическое радиальное расположение лезвий, так и новыми, с иной геометрией рабочих лезвий, главным образом для исследования износа инструмента, сопоставление его по энергоемкости разрушения горной породы.

Так, в работе И.В. Куликова, В.Н. Воронова, И.И. Николаева [43] отмечается, что ширина лунок, формируемых острым и притупленным лезвиями, при прочих равных условиях остается примерно постоянной (площадка притупления имела ширину 4 мм), а длина в значительной степени зависит от формы лезвия. Длины острых лезвий и лунок разрушения ими практически равны, а притупленное лезвие образует лунку, длина которой превосходит длину лезвия на две ширины площадки притупления. Глубина внедрения острого лезвия мало отличается от глубины лунок разрушения. Глубина внедрения притупленного лезвия в 10–15 раз меньше глубины лунок разрушения, причем с увеличением энергии удара эта разница растет.

Важное внимание было уделено изучению различными методами (фотоупругости, скоростной киносъемки, тензометрии, поэтапного «заморажи-

вания», разрушения, методами конечных элементов) процесса трещинообразования в горной породе, как неизбежного следствия концентрации предельных напряжений в контактной зоне. Характер трещинообразования при разрушении горных пород индентором с острым лезвием состоит в образовании относительно глубоких трещин лишь в центре лунки вдоль ее длинной оси. В бортовых зонах трещины практически не наблюдаются. В то же время лунки разрушения, образованные притупленным индентором, образуют глубокие трещины. Вывод о том, что увеличение угла заострения лезвия инструмента приводит к незначительным размерам лунки выкола, но глубокой трещине подтверждается К.И. Ивановым и др. [12].

Высокоомощные буровые агрегаты ударно-вращательного действия обуславливают необходимость применения высокопрочного твердосплавного ПРИ [38]. Исследования в этом вопросе направлены на существенное повышение стойкости ПРИ путем поиска оптимальных значений для всей гаммы конструктивных, технологических и эксплуатационных параметров коронок [39–41].

Большой научный и практический вклад в решение задач увеличения стойкости ПРИ внесли О.Д. Алимов, В.В. Бойков, В.И. Власюк, Л.Т. Дворников, В.И. Зайцев, С.А. Куклин, В.А. Латышев, Ю.А. Медовый, Э.М. Патрикеева, Н.Г. Петров, Н.С. Родионов, С.Я. Рябчиков, А.М. Чувилин, И.И. Яновский и др.

Обобщая результаты исследований, можно сформулировать следующие представления по данной проблеме:

- 1) при прочих равных условиях штыревые коронки типа КТШ позволяют ликвидировать возможные случаи заклинивания лезвий долотчатых коронок в забое; в то же время обеспечивают повышение скорости бурения по сравнению с крестовыми коронками из-за более высокой энергии удара на единицу длины лезвия [41];
- 2) для буровых машин малой мощности С.А. Куклиным [40] предложен вариант буровой коронки с линейным расположением цилиндросферических твердосплавных вставок, имеющих меньше концентраторов напряжений, механизм разрушения близкий к механизму действия коронок долотчатого типа (разрушение секторами), не вызывающий сильную отдачу и снижение скорости бурения, как в случае применения коронок западных образцов;
- 3) сравнительный анализ напряженного состояния инденторов сферической, баллистической, тороидальной и клиновой форм ударной поверхности, воздействующих на горную породу, показал следующее [43, 40]:
  - инденторы лезвийного типа требуют наименьшее количество подводимой энергии и обладают наименьшей разрушающей способностью;
  - инденторы, имеющие ударную поверхность тороидальной формы могут воспринимать

наибольшую энергию удара и обладают наименьшей разрушающей способностью;

- инденторы со сферической контактной поверхностью являются переходной формой от лезвийных к тупым типа «тороид». Сравнительный анализ проведен методом конечных элементов в компьютерных программах фирмы «Ansys»;
- при малых энергиях удара эффективность разрушения горных пород острым лезвием выше эффективности разрушения притупленным индентором.

По результатам физического моделирования взаимодействия лезвия ПРИ и горной породы в работе [42] установлено, что напряжения, возникающие в твердой породе при заданной нагрузке, зависят от диаметра скважины, угла приострения ПРИ, затупления лезвия, а также удаленности контактной зоны от свободной поверхности, образованной предварительным сколом.

Анализ динамического взаимодействия индентора со сферами различных радиусов позволил установить, что при равных энергиях удара энергоемкость существенно зависит от радиуса сферы индентора: с увеличением последнего энергоемкость резко возрастает [37]. Авторы объясняют данное явление тем, что при большем радиусе сферы при равных нагрузках все зоны разрушения перекрыты поверхностью сферы.

Исследованиями особенностей воздействия на горную породу твердосплавных вставок различных форм, а также инденторов-эллипсоидов методом конечных элементов в Ansys занимался С.А. Куклин [42]. Подобная форма инденторов в отличие от осесимметричных позволяет создавать протяженную зону разрушения, подобную зоне разрушения лезвийных инденторов, но не создает столь высокой концентрации напряжений. Исследуя на основе численного эксперимента распределение напряжений в горной породе, инденторе, а также удельную работу разрушения при различных соотношениях осей эллипса (1; 0,75; 0,5; 0,25), автор приводит выводы о том, что [43]:

- картина распределения напряжений может существенно меняться для случаев внедрения в плоскую поверхность и в предварительно сформированную лунку;
- инденторы малой толщины более равномерно нагружены;
- максимальные напряжения в породе примерно одинаковы для всех форм инденторов;
- независимо от того, в какую поверхность внедряются инденторы (в плоскую или в предварительно сформированную лунку), по энергоемкости инденторы со сферической формой ударной поверхности не являются наиболее рациональными. Установлено, что в первом случае наиболее рационально применять инденторы с соотношением осей 0,4 (что связано с упругими свойствами среды и с наибольшими деформациями в горной породе, когда поперечный раз-

мер площадки контакта составляет 40 % от продольного размера). Во втором случае более рациональными будут инденторы с соотношением осей 0,6, т. е. при предварительно сформированной лунке.

Рациональные режимы ударно-вращательного способа бурения. Оптимизация процесса бурения на этапе, предшествующем технологическому процессу

В работе Л.И. Дворникова [15] проанализированы все доступные результаты отечественных и зарубежных исследований (более 125), на основе которых установлены основные закономерности процесса вращательно-ударного бурения шпуров. Главным образом исследовалось влияние на величину углубления бурового инструмента за оборот основных параметров процесса вращательно-ударного бурения: физико-механических свойств горных пород, осевой нагрузки, скорости вращения бурового инструмента, энергии единичного удара, частоты ударов, геометрических параметров и количества лезвий инструмента.

Обобщение полученных результатов приводит к следующим выводам:

- 1) одним из преимуществ вращательно-ударного способа бурения является возможность подвода к буровому инструменту больших мощностей;
- 2) установлены основные эмпирические зависимости и рациональные параметры процесса вращательно-ударного бурения в горных породах различной твердости:
  - осевая нагрузка до значений 12 кН практически не оказывает влияния на объем разрушения от ударов. Для горных пород с коэффициентом прочности по М.М. Протодьяконову  $f=16-18$  приложение осевой нагрузки практически не целесообразно и необходимо только для обеспечения контакта буровой коронки с забоем;
  - для горных пород с коэффициентом прочности по М.М. Протодьяконову от 4 до 20 среднее число ударов за оборот буровой колонны заключено в интервале 10–50 уд./об. (при усредненном значении угла поворота лезвий инструмента 36–37°). Увеличение скорости вращения коронки приводит к снижению углубления ПРИ за оборот буровой колонны. При этом отмечается увеличение энергоемкости разрушения горной породы. Это обусловлено переизмельчением бурового шлама в случае числа ударов за оборот буровой колонны больше некоторого рационального значения или неэффективностью бурения при значении ударов за оборот меньших рационального значения, когда последующий удар наносится по участку забоя, не воспринявшему необходимое воздействие от предыдущего удара;
  - влияние энергии удара на объем разрушенной породы при бурении горных пород сред-

ней твердости не так существенно, как, например, при бурении гранита;

- меньшее число ударов за один оборот буровой колонны должно соответствовать менее твердым горным породам. При бурении гранита с коэффициентом прочности по М.М. Протодьяконову  $f=14-16$  изменение угла поворота лезвий ПРИ с 45 до 5° приводит к увеличению углубления скважины за оборот с 1 до 7 мм, а также уменьшению объемной работы разрушения.

Сложная задача, связанная с поиском теоретических зависимостей между параметрами режима бурения и их практической реализацией, представляет собой оптимизацию процесса бурения [44, 45]. Вопросами повышения технико-экономической эффективности бурения и оптимизацией приводов буровых станков занимались М.Г. Абрамсон, Э.А. Айзуппе, В.А. Акулов, М.А. Александров, О.Д. Алимов, Р.А. Бадалова, Г.А. Блинов, В.Д. Буткин, В.А. Бражников, Г.Д. Бредов, Н.М. Бройтман, В.И. Брылин, В.Г. Владиславлев, Н.В. Волков, Л.А. Вуккерт, Р.Х. Гафиятуллин, Н.Е. Гарнер, Ю.В. Грабов, В.И. Дусев, А.А. Жуковский, С.Г. Калошин, А.С. Карачев, В.Г. Кардыш, Е.А. Козловский, Л.Ф. Куликовский, Б.Н. Кутузов, Н.И. Любимов, Д.Н. Маликов, И.Ф. Медведев, А.А. Минин, В.В. Нескормных, А.В. Орлова, И.А. Остроушко, И.П. Петров, Ю.Ф. Потапова, В.М. Питерский, Б.М. Радищев, Б.М. Ребрик, С.Я. Рябчиков, А.П. Саммель, Н.Б. Ситников, Б.Ф. Скаф, В.И. Солод, Л.И. Старков, С.С. Сулакшин, Н.И. Терехов, А.В. Топчиев, А.Е. Троп, В.С. Федоров, М.А. Фингерит, В.Г. Храменков, К.А. Чефранов, Г.А. Шаумян, Н.И. Шацев, Р.Г. Шмидт, Л.А. Шрейнер, В.Ф. Щербинин, Р.М. Эйгелес, Е.Ф. Эпштейн и др.

Особое внимание авторов уделено:

- анализу и методам оценки экономической эффективности оптимальных режимов бурения, в частности рациональным областям применения различных способов бурения и оптимальных режимов;
- исследованиям зависимости производительности буровых агрегатов от различных технологических и конструктивных факторов, в которых основное внимание было направлено на достижение высоких скоростей бурения, а также к.п.д. буровых агрегатов.

Оптимизация любого процесса, в том числе и бурения, основывается на поиске и обосновании критериев оптимизации.

Как известно, оптимизация процесса бурения должна проходить в два этапа:

- 1) предшествует технологическому процессу бурения и направлен на выбор оборудования, бурового инструмента, обоснование конструкции скважины;
- 2) оптимизация самого процесса бурения основана на применении различных систем автоматического управления процессом бурения, ре-

лизующих оптимальные параметры процесса по выбранному критерию.

Как отмечено в [44, 35], понятие оптимального решения может быть определено лишь с точки зрения конкретного критерия оптимальности. На основе этих критериев разработаны и внедрены различные типы приводов механизмов вращателя, ударного механизма, подачи бурового инструмента, лебедки.

Большая часть работ перечисленных выше исследователей направлена на разработку и развитие систем автоматического управления станками геологоразведочного бурения. В то же время выбор конструкции станков, в частности ударно-вращательного действия для бурения в условиях подземных рудников, проводится довольно часто интуитивно, недостаточно обоснованно.

Методы расчета систем ударно-вращательного способа бурения скважин. Моделирование рабочих процессов

Ценным практическим результатом исследований процессов ударно-вращательного способа бурения является разработка метода расчета ударных систем «ударно-вращательный механизм – буровой снаряд – горная порода». Особое внимание уделяется как математическому, так и компьютерному моделированию процессов при продольном ударе. Математические модели, алгоритмы, программы и программные комплексы позволяют существенно облегчить и ускорить процессы моделирования и расчета систем, реализующих продольный удар.

Вопросы разработки методов расчета ударных систем для бурения скважин представлены в работах [9, 12, 46–53] и получили развитие в [11, 40, 54, 55].

Как правило, аналитические решения подобных задач представляют собой громоздкие формулы, а в некоторых случаях найти такое решение практически невозможно. Это обуславливает перспективность применения при расчетах численных методов, например графодинамического метода, представленного в работе [9]. Данный метод позволяет проводить расчеты ударных систем, включающих элементы сложной конфигурации. Анализ примера расчета ударных систем с бойками различной формы по предлагаемому методу показал, что в рассматриваемом интервале параметров бойков их длина в большей степени влияет на эффективность передачи энергии волны деформации в горной породе, по сравнению с формой.

В работе [52] приведен метод расчета формы ударного импульса и величины напряжения в буровом инструменте на основе графодинамического метода. Автор привел ряд наиболее часто встречающихся в практике бурения случаев представления импульсов напряжения: ударник равного со штангой поперечного сечения и акустической жесткостью; ударник с большим поперечным сечением и акустической жесткостью, чем у штанги; ударник сложной конфигурации; конический ударник.

В работе [12] также на основе графодинамического метода приведен расчет формирования ударных импульсов и его распространения по буровому снаряду. Расчет сводится к определению величин силы, напряжения, а также энергии в элементах системы «ударник – хвостовик – буровая штанга». Элементы системы – стержни переменного сечения, а сама система представляет собой целое, не размыкается в процессе прохождения ударного импульса.

В работе [22] приведена методика определения максимальных напряжений в резьбовых соединениях труб в зависимости от энергетических параметров ударного механизма, величины крутящего момента и осевой нагрузки, создаваемых буровыми агрегатами.

В работе [55] математически представлено множество частных случаев расчета ударных систем.

Авторами работы [56] предложен метод расчета распространяющихся ударных импульсов по буровой колонне, позволяющий с относительной погрешностью, не превышающей 10 %, получить: коэффициенты прохождения и отражения ударного импульса в реальном буровом инструменте; частоту волны деформации, при которой в буровом снаряде появляются волны деформации, не способствующие его продольному перемещению, а значит и разрушению горной породы; значение продольного смещения бурового снаряда и продольной силы; энергию волны деформации, в т. ч. энергию, переносимую ее гармоническими составляющими.

С развитием компьютерных технологий исследователи получили возможность разрабатывать методы, уточняющие механизмы формирования и передачи ударных импульсов, как по буровому снаряду, так и в горную породу, реализовывать данные методы в программных продуктах.

Так, разработки, представленные в работе [43], позволяют повысить точность вычислений волновых процессов в стержневых неоднородных системах от 20 до 40 % за счет учета волновых состояний внутри каждого элемента, возникновения повторных ударов и т. п. Алгоритмы вычисления позволяют повысить в 2,5 раз производительность моделирования и анализа полученных результатов, а сами результаты – дать новые представления о состоянии стержней до и после нанесения продольного удара.

Кроме этого, в последнее время актуальными являются разработки, связанные с исследованиями взаимодействия ПРИ различного типа с разрушаемой горной породой, механизма разрушения на основе метода конечных элементов, реализованном в компьютерных программах фирмы «Ansys», «Abaqus».

В работах С.А. Куклина [40, 43] приводятся результаты исследований особенностей воздействия на горную породу безлезвийного ПРИ (инденторов-эллипсоидов) и сравнительный анализ напряженного состояния одиночных твердосплавных вста-

вок различных форм (сферической, баллистической, тороидальной, клиновидной). В работе И.А. Жукова [11] приведена зависимость «сила–внедрение» для буровых коронок с числом инденторов 1–4, дается оценка влияния количества инденторов на объем разрушенной породы, рекомендованы рациональные схемы размещения инденторов.

Вычислительные эксперименты на основе метода конечных элементов позволили проводить расчеты на новом уровне: определять и оценивать напряженно-деформированное состояние бойков ударных механизмов [48], инденторов, а также горных пород [40, 43].

Определение энергетических параметров буровых агрегатов

Вопросам разработки методов определения энергии волн деформаций, направленных на разрушение горных пород, посвящена работа В.П. Рындина [14]. Автор приводит классификацию и анализ всех доступных в настоящее время методов измерения энергии удара буровых агрегатов. Частота и энергия удара – одни из основных параметров, которые определяют производительность буровой машины. Методы и технические средства для измерения энергии и частоты ударов постоянно совершенствуются. Особенно острым стал этот вопрос при создании мощных буровых машин (с энергией удара 300 Дж и выше). Разработанный автором новый метод определения энергетических параметров буровых агрегатов и экспериментальная аппаратура для его реализации основаны на интегральных характеристиках импульсов и позволяют определять энергию волны деформации, распространяющейся к буровой коронке, независимо от типа генератора этих импульсов, с приемлемой для практики точностью и надежностью.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Йонссон Я. Найти оптимальный баланс: керн или шлам // Горное дело и строительство. Механизированная разработка пород с Atlas Copco. – 2005. – № 3. – С. 18–20.
2. Нейштетер И.А. Исследование энергоёмкости разрушения горных пород при вращательном и ударно-вращательном способах бурения алмазными коронками с целью прогнозирования механической скорости бурения: дис. ...канд. техн. наук. – Томск, 1983. – 221 с.
3. Исследование процесса разрушения горных пород и производительности ударно-вращательного бурения при наложении высокочастотных ударов (с целью разработки рекомендаций по конструктивным и эксплуатационным параметрам высокочастотных гидроударных машин: Отчет о НИР: Тема 2–37/74 / руководители С.С. Сулакшин, В.П. Рожков. – Томск: ТПИ, 1976. – 99 с.
4. Терминологический словарь по бурению скважин / под ред. С.И. Голикова, А.Г. Калинина. – М.: Геоинформмарк, 2005. – 272 с.
5. Твердосплавный породоразрушающий инструмент для бурения скважин // ОАО «Туйское научно-исследовательское геологическое предприятие». URL: <http://tulnigp.ru/tverdospplavu-porodorazrushayuschi> (дата обращения: 27.04.2015).
6. Милютин А.Г., Калинин И.С., Карпиков А.П. Методика и техника разведки месторождений полезных ископаемых. – М.: Высшая школа, 2010. – 526 с.

#### Выводы

- 1) Представленное научное обобщение позволяет предложить новые технические решения, направленные на разработку ресурсосберегающей технологии и техники бурения геологоразведочных скважин из подземных горных выработок, что имеет важное значение для эксплуатационной разведки полезных ископаемых при подземной разработке рудных месторождений.
- 2) В вопросах совершенствования технологий и техники бурения скважин малого диаметра из подземных горных выработок, реализующих энергию удара, одним из принципиальных факторов может быть унификация условий проведения экспериментов. В частности, необходимо использовать бурильную колонну, которой пробурено заданное количество метров скважин, чтобы были проработаны в производственных условиях стыки бурильных труб, через которые распространяются волны деформаций от ударного механизма к породоразрушающему инструменту.
- 3) Дополнительной возможностью повышения производительности буровых агрегатов ударно-вращательного действия с различными типами приводов (пневматический, гидравлический, электропневматический, пневмогидравлический) может быть сокращение времени на вспомогательные операции. Решение такой задачи требует разработки методики расчета и обоснования параметров буровых агрегатов, которая на этапе проектирования позволяет оценить их ресурсоэффективность на основе некоторых критериев (например, приведенных затрат, себестоимости метра пробуренной скважины, материалоёмкости агрегата и бурового инструмента).
7. Важнейшие результаты исследований ИГД СО РАН в 2005 г. // Институт горного дела СО РАН. URL: <http://www.misd.nsc.ru/about/results/> (дата обращения: 13.05.2005).
8. Матвеева Л.И. Выбор и обоснование конструктивных параметров малогабаритных погружных пневмоударников: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Владикавказ, 2004. – 20 с.
9. Алимов О.Д., Манжосов В.К., Еремьянц В.Э. Удар. Распространение волн деформаций в ударных системах. – М.: Наука, 1985. – 357 с.
10. Влияние формы ударника на импульсы напряжений и эффективность разрушения горной породы / Л.И. Барон, Ю.Г. Коняшин, А.В. Кузнецов, В.М. Курбатов // Шахтное строительство. – 1969. – № 8. – С. 8–10.
11. Жуков И.А. Формирование упругих волн в волноводах при ударе по ним полукатеноидальными бойками: дис. ... канд. техн. наук. – Томск, 2005. – 132 с.
12. Иванов К.И., Латышев В.А., Андреев В.Д. Техника бурения при разработке месторождений полезных ископаемых. 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Недра, 1987. – 272 с.
13. Мясников А.А. Обоснование рациональной конструкции механического генератора волн продольных колебаний машин ударного действия для разрушения горных пород: автореф. ... дис. канд. техн. наук. – Алма-Ата, 1983. – 19 с.

14. Рындин В.П. Определение энергетических параметров и совершенствование динамики ударных систем бурильных машин: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. – Кемерово, 2005. – 330 с.
15. Дворников Л.Т. Исследование режимов бурения шпуров в горных породах машинами вращательного и вращательно-ударного действия: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. – Томск, 1974. – 61 с.
16. Губанов Е.Ф. Ударное разрушение хрупких сред при использовании в них отверстий без поворота инструмента: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Томск, 2003. – 22 с.
17. Дерюшева В.Н. Модели пневмогидравлического ударного узла с учетом свойств формователя импульса и нагрузки: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Томск, 2009. – 19 с.
18. Астафьев В.Д. О теоретическом определении продолжительности соударения элементов ударных механизмов. – М.: Институт горного дела им. А.А. Скочинского, 1956. – 19 с.
19. Топоров Г.В., Левандовский М.Я. Оптимальная форма поверхностей контакта деталей машин ударного действия // Известия вузов. Горный журнал. – 1969. – № 11. – С. 83–85.
20. Городилов Л.В. Разработка основ теории гидроударных систем объемного типа для исполнительных органов горных и строительных машин: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. – Новосибирск, 2010. – 39 с.
21. Сердечный А.С. Управление амплитудой и длительностью ударного импульса: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. – Новосибирск, 1997. – 31 с.
22. Саруев Л.А., Шадрина А.В., Саруев А.Л. Разработка методики расчета максимальных напряжений в элементах резьбовых соединений труб при вращательно-ударном бурении скважин малого диаметра // Вестник Российской академии естественных наук. Западно-Сибирское отделение. – 2010. – Вып. 12. – С. 11–15.
23. Александров Е.В., Флавицкий Ю.Ф., Хомяков К.С. Определение импульсов напряжения при продольном соударении упругих стержней произвольной геометрической формы. – М.: ИГД им. А.А. Скочинского, 1965. – 40 с.
24. Beccu R., Lundberg B. Transmission and dissipation of stress wave energy under a percussive drill rod joint // International Journal of Impact Engineering. – 1987. – V. 6. – № 3. – P. 157–173.
25. Hustrulid W., Fairhurst C. A theoretical and experimental study of percussive drilling of rock // International Journal Rock Mechanics and Mining Sciences. – 1972. – V. 9. – № 3. – P. 417–418.
26. Алимов О.Д. О механизме разрушения горных пород при ударно-вращательном бурении бурильными молотками // Известия Томского политехнического университета. – 1954. – Т. 75. – С. 351–371.
27. Беляев Ю.В. Об оценке степени использования энергии удара в ударных машинах // Сборник трудов Всесоюзного НИИ строительного дорожного машиностроения. – М.: Машгиз, 1955. – № 10. – С. 35–49.
28. Кучеров П.С. К вопросу об исследовании пневматических отбойных молотков // Уголь. – 1933. – № 93. – С. 62–73.
29. Мостков В.М. Основы теории пневматического бурения. – М.: Углетехиздат, 1952. – 140 с.
30. Цуканов А.Г. О потерях энергии удара в удлиненных штангах // Известия вузов. Горный журнал. – 1965. – № 10. – С. 92–95.
31. Отчет лаборатории удара и вибрации ИГД им. А.А. Скочинского по теме № 58, этап 4 «Рекомендации по проектированию соединений буровых штанг». – М., 1966. – 62 с.
32. Алабужев П.М., Стихановский Б.Н., Шпигельбурд И.Я. Введение в теорию удара. – Новосибирск: НЭТИ, 1970. – 158 с.
33. Жлобинский Б.А. Динамическое разрушение горных пород при вдавливаниях. – М.: Недра, 1970. – 152 с.
34. Сулакшин С.С., Чубик П.С. Разрушение горных пород при проведении геологоразведочных работ. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2011. – 367 с.
35. Нескоромных В.В., Храменков В.Г. Оптимизация в геологоразведочном бурении. – Томск: Изд-во ТПУ, 2013. – 256 с.
36. Павлова Н.Н., Шрейнер Л.А. Разрушение горных пород при динамическом нагружении. – М.: Недра, 1964. – 159 с.
37. Куликов И.В., Воронов В.Н., Николаев И.И. Пневмоударное бурение разведочных скважин. – М.: Недра, 1989. – 239 с.
38. Емшанов А.А. Alpha 330 – новый буровой горный инструмент компании SANDVIK // Горная промышленность. – 2006. – № 1. – С. 32–34.
39. Зайцев В.И. Научно-методические основы создания и эксплуатации твердосплавного инструмента для бурения шпуров ударными способами: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. – Новосибирск, 1989. – 37 с.
40. Куклин С.А. Обоснование рациональных форм твердосплавных вставок (инденторов) для бурения шпуров машинами ударного действия: дис. ... канд. техн. наук. – Новокузнецк, 1998. – 120 с.
41. Медовый Ю.А. Обоснование, исследование и серийное освоение буровых коронок типа КТШ: дис. ... канд. техн. наук (в форме научного доклада). – Кемерово, 1991. – 26 с.
42. Хесин Г.Л., Бабенков И.С., Иванов К.И. Распределение напряжений в буровом инструменте и породе. Статические и динамические исследования методом фотоупругости. – М.: Центральный научно-исследовательский институт экономики и научно-технической информации угольной промышленности, 1963. – 90 с.
43. Куклин С.А. Исследование особенностей воздействия на горную породу инденторов-эллипсоидов // Проблемы машиностроения и горных машин: матер. XV науч.-практ. конф. – Новокузнецк: ИЦ СибГИУ, 2005. – С. 35–42.
44. Козловский Е.А. Оптимизация процесса разведочного бурения. – М.: Недра, 1975. – 303 с.
45. Медведев И.Ф. Режимы бурения и выбор буровых машин. – М.: Недра, 1975. – 224 с.
46. Александров Е.В., Соколинский В.Б. Прикладная теория и расчеты ударных систем. – М.: Наука, 1969. – 199 с.
47. Андреев В.Д. Исследование и расчет динамических нагрузок и механических параметров ударных систем буровых машин: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. – Днепропетровск, 1972. – 33 с.
48. Дружинин М.М. Реализация численного моделирования напряженно-деформированного состояния бойка погружного пневмоударника // Горный информационно-аналитический бюллетень (ГИАБ). – 2009. – № 9. URL: [http://www.giab-online.ru/files/Data/2009/9/Drujinin\\_9\\_2009.pdf](http://www.giab-online.ru/files/Data/2009/9/Drujinin_9_2009.pdf) (дата обращения: 15.12.2013).
49. Пучинян Г.С. Исследование и создание методики расчета сложнонагруженных резьбовых соединений: дис. ... канд. техн. наук. – Фрунзе, 1989. – 162 с.
50. Слепухин В.В. Моделирование волновых процессов при продольном ударе в стержневых системах неоднородной структуры: автореф. ... дис. канд. техн. наук. – Ульяновск, 2010. – 19 с.
51. Слестин А.П., Саруев Л.А. Моделирование процесса соударения бойка с хвостовиком ударного инструмента // Известия Томского политехнического университета. – 2005. – Т. 308. – № 2. – С. 116–119.
52. Шелковников И.Г. Использование энергии удара в процессах бурения. – М.: Недра, 1977. – 160 с.
53. Эйгелес Р.М., Стрекалова Р.В. Расчет и оптимизация процессов бурения скважин. – М.: Недра, 1977. – 200 с.
54. Малков О.Б. Динамика стержневых систем с внутренними граничными поверхностями: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. – Омск, 2000. – 23 с.
55. Манжосов В.К., Слепухин В.В. Моделирование продольного удара в стержневых системах неоднородной структуры. – Ульяновск: УлГТУ, 2011. – 208 с.
56. Авдеева А.И., Шадрина А.В., Саруев Л.А. Разработка методики расчета распространения продольных волн деформаций по буровому инструменту // Горный информационно-аналитический бюллетень. – М.: Изд-во «Горная книга», 2014. – С. 328–333.

Поступила 14.05.2015 г.

UDC 622.24.053:531.5

## ANALYSIS AND SCIENCE-BASED COMPILATION OF THE RESULTS OF STUDYING PERCUSSION-ROTARY UNDERGROUND SLIMHOLE DIGGING

Anastasiya V. Shadrina,

National Research Tomsk Polytechnic University,  
30, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia. E-mail: avshadrina@rambler.ru

Lev A. Saruev,

National Research Tomsk Polytechnic University,  
30, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia. E-mail: saruev@tpu.ru

The relevance of the research is caused by the necessity of improving the engineering and technology of geological explorations and the energy and resource efficiency of drilling.

**The main aim** of the research is to analyse and generalize research results obtained for the possible development and application of the resource-efficient drilling technology using the strain wave generator. The literature review of theoretical and experimental research was carried out in percussion drilling of small holes in medium-hard and harder rocks. To increase the penetration rate, the percussive mechanisms were designed. However, the increase of strain wave energy is reduced by the strength of the drilling tool. At constant hole diameter, the increased impact load should be transmitted over the drill string and their connections having the original size. These very elements of a drill string are the deterrents to implement a new technology.

**Methodology:** theoretical analysis; a vast review of scientific literature on all problems of power pulse formation, strain wave transmission over the drill string, rock failure, appropriate modes of operation of percussion drilling, drilling optimization prior the engineering process, design techniques chosen for percussion drilling systems, work process modeling, energy parameter determination for drilling units, comparison of independent research results.

**Findings.** The paper introduces the modern ideas and achievements in the field of small hole percussion drilling. The authors have identified the causes of research results divergence. The expediency of carrying out the research to improve technological and engineering processes and drilling techniques was shown. The authors determined the main trends in researching drilling technology and engineering process and stated the recommendations for improving drilling effectiveness due to intensification of rock failure at well boring.

### Key words:

Exploratory drilling, drilling technique, underground digging, drill string, impact pulses generation, strain waves transfer along the drill string, rock failure, drilling optimization, work process simulation, drill rig energy parameters.

### REFERENCES

- Jönsson J. In search of the right balance. *Mining & Construction. Mechanized rock excavation with Atlas Copco*, 2005, no. 3, pp. 18–20.
- Neyshteter I.A. *Issledovanie energoemkosti razrusheniya gornyykh porod pri vrashchatelnom i udarno-vrashchatelnom sposobakh bureniya almaznymi koronkami s tselyu prognozirovaniya mekhanicheskoy skorosti bureniya*. Dis. Kand. nauk [A study of specific fracture energy at percussion-rotary drilling for drilling speed prognosis purposes. Cand. Diss.]. Tomsk, 1983. 221 p.
- Sulakshin S.S., Rozhkov V.P. *Issledovanie protsessa razrusheniya gornyykh porod i proizvoditelnosti udarno-vrashchatelnogo bureniya pri nalozhenii vysokochastotnykh udarov (s tselyu razrabotki rekomendatsiy po konstruktivnym i ekspluatatsionnym parametram vysokochastotnykh gidroudarnyykh mashin: otchet o NIR: Tema 2–37/74* [A study of rock failure and rotary-percussive drilling productivity at high-frequency impacts (for drafting of guidelines for hydraulic hammer design and operating parameters): Research report: 2–37/74]. Tomsk, TPI Publ. house, 1976. 99 p.
- Terminologichesky slovar po bureniyu skvazhin* [Terminological dictionary for drilling wells]. Eds. S.I. Golikova, A.G. Kalinina. Moscow, Geoinformmark Publ., 2005. 272 p.
- Tverdospлавny porodorazrushayushchy instrument dlya bureniya skvazhin* [The carbide rock destruction tools for drilling wells]. Available at: <http://tulanigp.ru/tverdospлавny-porodorazrushayuschi> (accessed 27 April 2015).
- Milyutin A.G. *Metodika i tekhnika razvedki mestorozhdeniy poleznykh iskopaemykh* [Methodology and technics for mineral exploration]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 2010. 526 p.
- Vazhneyshie rezultaty issledovaniy IGD SO RAN v 2005 g. [The most important research results of Institute of Mining Affairs SB RAS]. Available at: <http://www.misd.nsc.ru/about/results/> (accessed 13 May 2015).
- Matveeva L.I. *Vybor i obosnovanie konstruktivnykh parametrov malogabaritnykh pogruzhnykh pnevmoudarnikov*. Dis. Kand. nauk [Choice and validation of small-size downhole hammers design value. Cand. Diss.]. Vladikavkaz, 2004. 20 p.
- Alimov O., Manzhosov V., Eremyants V. *Udar. Rasprostraneniye voln deformatsiy v udarnyykh sistemakh* [Impulse. The propagation of strain waves in percussion system]. Moscow, Nauka Publ., 1985. 357 p.
- Baron L.I. Vliyaniye formy udarnika na impulsy napryazheniy i effektivnost razrusheniya gornoy porody [The influence of hammer form on tension impulses and rock failure efficiency]. *Shahtnoe stroitelstvo*, 1969, no. 8, pp. 8–10.
- Zhukov I.A. *Formirovaniye uprugikh voln v volnovodakh pri udare po nim polukatenoidalnymi boykami*. Dis. Kand. nauk [The generation of elastic waves in waveguides using semicatenoidal hammers. Cand. Diss.]. Tomsk, 2005. 132 p.
- Ivanov K.I. *Tekhnika bureniya pri razrabotke mestorozhdeniy poleznykh iskopaemykh* [Drilling technique for exploitation of mineral deposits]. Moscow, Nedra Publ., 1987. 272 p.
- Myasnikov A.A. *Obosnovaniye ratsionalnoy konstruktivnoy mekhanicheskogo generatoya voln prodolnykh kolebaniy mashin udarnogo deystviya dlya razrusheniya gornyykh porod*. Dis. Cand. nauk [Validation of rational construction of longitudinal oscillation mechanical generator of impact drilling machine for rock failure. Cand. Diss.]. Alma-Ata, 1983. 19 p.
- Ryndin V.P. *Opreделение energeticheskikh parametrov i sovershenstvovanie dinamiki udarnyykh sistem burilnykh mashin*.

- Dis. Dokt. nauk [Determination of energy parameters and retrofit of dynamics of drilling machine impact. Dr. Diss.]. Kemerovo, 2005. 330 p.
15. Dvornikov L.T. *Issledovanie rezhimov bureniya shpurov v gornyykh porodakh mashinami vrashhatelnogo i vrashhatelno-udarnogo deystviya*. Dis. Dokt. nauk [The investigation of shot hole drilling practices by rotative and rotary-percussive action drillrigs. Dr. Diss.]. Tomsk, 1974. 61 p.
  16. Gubanov E.F. *Udarnoe razrushenie khrupkikh sred pri ispolzovani v nikh otverstiy bez povorota instrumenta*. Dis. Kand. nauk [The impact failure of brittle rocks using percussion drilling tool without angular rotation. Cand. Diss.]. Tomsk, 2003. 22 p.
  17. Deryusheva V.N. *Modeli pnevmogidravlicheskogo udarnogo uzla s uchetom svoystv formirovatel'nykh impulsa i nagruzki*. Dis. Kand. nauk [The airhydraulic percussive mechanism models that takes into account the impulse generator and loading characteristics. Cand. Diss.]. Tomsk, 2009. 19 p.
  18. Astafev V.D. *O teoreticheskom opredelenii prodolzhitel'nosti soudareniya elementov udarnykh mekhanizmov* [On theoretic definition of the impact time of percussive mechanism elements]. Moscow, Institute of Mining Affairs Publ., 1956. 19 p.
  19. Toporov G.V., Levandovskiy M.Ya. *Optimal'naya forma poverkhnostey kontakta detaley mashin udarnogo deystviya* [The optimum shape of contact surfaces of impacting machines elements]. *Izvestiya vuzov. Gornyy zhurnal*, 1969, no. 11, pp. 83–85.
  20. Gorodilov L.V. *Razrabotka osnov teorii gidroudarnykh sistem obemnogo tipa dlya ispolnitel'nykh organov gornyykh i stroitel'nykh mashin*. Dis. Dokt. nauk [Development of the theory of hydropercussion systems for operating members of mining and construction machines. Dr. Diss.]. Novosibirsk, 2010. 39 p.
  21. Serdechny A.S. *Upravlenie amplitudoy i dlitel'nostyu udarnogo impulsa*. Dis. Dokt. nauk [The control of pulse height and duration. Dr. Diss.]. Novosibirsk, 1997. 31 p.
  22. Saruev L.A., Shadrina A.V., Saruev A.L. *Razrabotka metodiki rascheta maksimalnykh napryazheniy v elementakh rezbovykh soedineniy trub pri vrashhatelno-udarnom burenii skvazhin malogo diametra* [The development of maximum strain calculation methodology in thread connection elements of drill string under rotary-percussive underground slimhole drilling]. *Vestnik Rossiyskoy akademii estestvennykh nauk. Zapadno-Sibirskoe otdelenie*, 2010. no. 12, pp. 11–15.
  23. Aleksandrov E.V., Flavitskiy Yu.F., Homyakov K.S. *Opredelenie impulsov napryazheniya pri prodolnom soudarenii uprugikh sterzhney proizvol'noy geometricheskoy formy* [Definition of tension impulses under longitudinal impact of arbitrary shape rods]. Moscow, IGD im. A.A. Skochinskogo Publ., 1965. 40 p.
  24. Beccu R., Lundberg B. *Transmission and dissipation of stress wave energy under a percussive drill rod joint*. *International Journal of Impact Engineering*, 1987, vol. 6, no. 3, pp. 157–173.
  25. Hustrulid W., Fairhurst C. *A theoretical and experimental study of percussive drilling of rock*. *International Journal Rock Mechanics and Mining Sciences*, 1972, vol. 9, no. 3, pp. 417–418.
  26. Alimov O.D. *O mekhanizme razrusheniya gornyykh porod pri udarno-vrashchatel'nom burenii buril'nymi molotkami* [The rock failure mechanism under percussion-rotary drilling by blast-hole drills]. *Izvestiya Tomskogo politehnicheskogo instituta*, 1954, vol. 75, pp. 351–371.
  27. Belyaev Yu.V. *Ob otsenke stepeni ispolzovaniya energii udara v udarnykh mashinakh* [The impact energy application efficiency in the impactors]. *Sbornik trudov Vsesoyuznogo NII stroitel'no-dorozhnogo mashinostroeniya* [Collected papers of All-Union Research Institute of constructive-road machine engineering]. Moscow, Mashgiz Publ., 1955, no. 10, pp. 35–49.
  28. Kucherov P.S. *K voprosu ob issledovanii pnevmaticheskikh otboynykh molotkov* [Investigation of pneumatic picks]. *Ugol*, 1933, no. 93, pp. 62–73.
  29. Mostkov V.M. *Osnovy teorii pnevmaticheskogo bureniya* [Foundations of air-drilling theory]. Moscow, Ugletekhizdat Publ., 1952. 140 p.
  30. Tsukanov A.G. *O poteryakh energii udara v udlinennykh shtangakh* [Lost of impact energy in long rods]. *Izvestiya vuzov. Gornyy zhurnal*, 1965, no. 10, pp. 92–95.
  31. *Otchet laboratorii udara i vibratsii IGD im. A.A. Skochinskogo po teme № 58, etap 4 «Rekomendatsii po proektirovaniyu soedineniy burovykh shtang»* [The report of impact and vibration laboratory named after A.A. Skochinskii, topic no. 58, step 4, «The guidelines for drill-rods joints design»]. Moscow, 1966. 62 p.
  32. Alabuzhev P.M., Stikhanovskiy B.N., Shpigelburd I.Ya. *Vvedenie v teoriyu udara* [The introduction into impact theory]. Novosibirsk, NJeTI Publ., 1970. 158 p.
  33. Zhlobinskiy B.A. *Dinamicheskoe razrushenie gornyykh porod pri vдавливании* [Dynamic rock disintegration during denting]. Moscow, Nedra Publ., 1970, 152 p.
  34. Sulakshin S.S., Chubik P.S. *Razrushenie gornyykh porod pri provedenii geologorazvedochnykh rabot* [Rock failure under geological exploration works]. Tomsk, TPU Publ. house, 2011. 367 p.
  35. Neskorumnykh V.V., Khramenkov V.G. *Optimizatsiya v geologorazvedochnom burenii* [Exploratory drilling optimization]. Tomsk, TPU Publ. house, 2013. 256 p.
  36. Pavlova N.N., Shreyner L.A. *Razrushenie gornyykh porod pri dinamicheskoy nagruzhennii* [Rock failure under dynamic loading]. Moscow, Nedra Publ., 1964. 159 p.
  37. Kulikov I.V., Voronov V.N., Nikolaev I.I. *Pnevmo-udarnoe burenie razvedochnykh skvazhin* [The exploratory wells air percussion drilling]. Moscow, Nedra Publ., 1989. 239 p.
  38. Emsharov A.A. *Alpha 330 – novyy burovo gorny instrument kompanii SANDVIK* [Alpha 330 is the new SANDVIK drilling tool]. *Gornaya promyshlennost*, 2006, no. 1, pp. 32–34.
  39. Zaytsev V.I. *Nauchno-metodicheskie osnovy sozdaniya i ekspluatatsii tverdosplavnogo instrumenta dlya bureniya shpurov udarnymi sposobami*. Dis. Dokt. nauk [The hard-carbide tools development and operation methodology for percussion blasthole drilling. Dr. Diss.]. Novosibirsk, 1989. 37 p.
  40. Kuklin S.A. *Obosnovanie ratsionalnykh form tverdosplavnykh ustavok (indentorov) dlya bureniya shpurov mashinami udarnogo deystviya*. Dis. Kand. nauk [The definition of indenters rational forms for percussion blasthole drilling. Cand. Diss.]. Novokuznetsk, 1998. 120 p.
  41. Medovy Yu.A. *Obosnovanie, issledovanie i seriynoe osvoenie burovykh koronok tipa KTSh*. Dis. Kand. nauk [The research, evaluation and full-scale production of KTSh insert bits. Cand. Diss.]. Kemerovo, 1991. 26 p.
  42. Khesin G.L., Babenkov I.S., Ivanov K.I. *Raspredelenie napryazheniy v burovom instrumente i porode. Sticheskie i dinamicheskie issledovaniya metodom fotouprugosti* [Stress distribution in drilling tools and rock. Photoelastic method investigations under static and dynamic conditions]. Moscow, 1963. 90 p.
  43. Kuklin S.A. *Issledovanie osobennostey vozdeystviya na gornuyu porodu indentorov-ellipsoydiv* [The research of influence of ellipsoid indentors on rock]. *Materialy XV nauchno-prakticheskoy konferentsii «Problemy mashinostroeniya i gornyykh mashin»* [Proc. 15<sup>th</sup> Research and Application Conference. Problems of machine construction and mining machines]. Novokuznetsk, 2005. pp. 35–42.
  44. Kozlovskiy E.A. *Optimizatsiya protsessy razvedochnogo bureniya* [The exploratory drilling optimization]. Moscow, Nedra Publ., 1975. 303 p.
  45. Medvedev I.F. *Rezhimy bureniya i vybor burovykh mashin* [The drilling practices and drilling machines selection]. Moscow, Nedra Publ., 1975. 224 p.
  46. Aleksandrov E.V., Sokolinskiy V.B. *Prikladnaya teoriya i raschety udarnykh sistem* [The percussion systems applicable theory and calculations]. Moscow, Nauka Publ., 1969. 199 p.

47. Andreev V.D. *Issledovanie i raschet dinamicheskikh nagruzok i mekhanicheskikh parametrov udarnykh sistem burovyykh mashin*. Dis. Dokt. nauk [The dynamic forces and mechanical parameters in percussion mechanisms of drilling machines. Dr. Diss.]. Dnepropetrovsk, 1972. 33 p.
48. Druzhinin M.M. Realizatsiya chislennogo modelirovaniya napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya boyka pogrurnogo pnevmoudarnika [The numerical simulation of strain-stress state downhole hammer]. *Mining informational and analytical bulletin (scientific and technical journal)*, 2009, no. 9. Available at: [http://www.giab-online.ru/files/Data/2009/9/Druzhinin\\_9\\_2009.pdf](http://www.giab-online.ru/files/Data/2009/9/Druzhinin_9_2009.pdf) (accessed 15 December 2013).
49. Puchinyan G.S. *Issledovanie i sozdanie metodiki rascheta slozhnonagruzhenykh rezbovykh soedineniy*. Dis. Kand. nauk [Research and calculation method development of thread connections under complex loading. Cand. Diss.]. Frunze, 1989. 162 p.
50. Slepukhin V.V. *Modelirovanie volnovykh protsessov pri prodolnom udare v sterzhnevyykh sistemakh neodnorodnoy struktury*. Dis. Kand. nauk [Wave process simulation in waveguides with heterogeneous structure under longitudinal impact. Cand. Diss.]. Ulyanovsk, 2010. 19 p.
51. Slistin A.P., Saruev L.A. Modelirovanie protsessa soudareniya boyka s khvostovikom udarnogo instrumenta [Simulation of impact between anvil block and shank]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2005, vol. 308, no. 2, pp. 116–119.
52. Shelkovnikov I.G. *Ispolzovanie energii udara v protsessakh bureniya* [Application of impact energy in drilling process]. Moscow, Nedra Publ., 1977. 160 p.
53. Eygeles R.M., Strekalova R.V. *Raschet i optimizatsiya protsessov bureniya skvazhin* [Well drilling calculation and optimization]. Moscow, Nedra Publ., 1977. 200 p.
54. Malkov O.B. *Dinamika sterzhnevyykh sistem s vnutrennimi granichnymi poverkhnostyami*. Dis. Dokt. nauk [The dynamics of wave guides with boundary surfaces. Dr. Diss.]. Omsk, 2000. 23 p.
55. Manzhosov V.K., Slepukhin V.V. *Modelirovanie prodolnogo udara v sterzhnevyykh sistemakh neodnorodnoy struktury* [Longitudinal impact simulation in wave guides with heterogeneous structure]. Ulyanovsk, 2011. 208 p.
56. Avdeeva A.I., Shadrina A.V., Saruev L.A. Razrabotka metodiki rascheta rasprostraneniya prodolnykh voln deformatsiy po burovomu instrumentu [The development of calculation methods of dilatational strain waves propagating throughout the drilling tool]. *Mining informational and analytical bulletin (scientific and technical journal)*. Moscow, Gornaya kniga Publ., 2014. pp. 328–333.

Received: 14 May 2015.