

А. Т. КИСЕЛЕВ,
И. Н. КРУСИР

ВРАЩАТЕЛЬНО- УДАРНОЕ БУРЕНИЕ ГЕОЛОГО- РАЗВЕДОЧНЫХ СКВАЖИН



МОСКВА
«НЕДРА»
1982

Киселев А. Т., Крусир И. Н. Вращательно-ударное бурение геологоразведочных скважин. М., Недра, 1982. 103 с.

Рассмотрено современное состояние техники и технологии вращательно-ударного бурения и пути повышения его эффективности. Проанализирован процесс бурения с наложением ударных импульсов. Даны рекомендации по рациональным параметрам режима бурения для различных пород. Предложена методика оптимизации процесса бурения. Изложены вопросы искривления стволов скважин и технологии отбора зерна. Приведена технико-экономическая эффективность вращательно-ударного бурения для различных режимов. В заключение изложены основные направления и перспективы развития вращательно-ударного бурения.

Для инженерно-технических и научных работников геологоразведочных организаций, занимающихся бурением скважин на твердые полезные ископаемые.

Табл. 40, ил. 37, список лит.— 27 назв.

Рецензент канд. техн. наук *Б. Е. Скобочкин* (КАЗИМС)

ВВЕДЕНИЕ

В последнее время в СССР и за рубежом уделяют большое внимание развитию техники и технологии ударно-вращательного бурения гидравлическими забойными машинами.

В СССР в различных организациях был создан ряд опытных образцов гидроударных машин для разведочного бурения на твердые полезные ископаемые: в Днепропетровском горном институте им. Артема под руководством Е. Ф. Эпштейна, В. Г. Ясова; в Институте горного дела им. А. А. Сковинского под руководством В. Б. Соколинского; в Свердловском горном институте им. Вахрушева под руководством Г. Н. Неудачина, А. Н. Бажутина и Л. Г. Шолохова; в Казахском институте минерального сырья под руководством Б. Е. Скобочкина.

Для бурения скважин на нефть и газ созданы опытные образцы гидроударников во Всесоюзном научно-исследовательском институте буровой техники и Московском институте нефтехимической и газовой промышленности им. И. М. Губкина под руководством А. И. Тагиева, Д. Д. Баркана, А. М. Ашавского, В. И. Назарова, Ф. Ф. Воскресенского, В. М. Славского и В. Д. Круглова.

В этих же институтах были исследованы рабочие циклы гидроударных машин и разработаны отдельные элементы методики их расчета.

В качестве особого этапа в развитии гидроударного бурения следует выделить работы Специального конструкторского бюро Миннео СССР, начатые под руководством Л. Э. Графа. Отличительная черта этого этапа, который продолжается в настоящее время под руководством А. Т. Киселева, заключается в комплексном решении проблемы. Наряду с конструированием гидроударных машин, исследованием их рабочих процессов и расчетами разрабатывают также породоразрушающий и вспомогательный инструменты, элементы обвязки скважины и технологии бурения. При этом используется теоретический и экспериментальный материал перечисленных выше институтов, а часть вопросов решалась и решается совместно с ними.

Такой подход дал положительный результат. Были созданы первые серийные конструкции гидроударных машин, породоразрушающий и вспомогательный инструменты, осуществлена оптимизация их параметров, разработаны основы технологии гидроударного бурения. В ходе работ был также накоплен опыт эксплуатации технических средств в производственных условиях.

На этом этапе работ были разработаны и сданы в серийное производство четыре типа гидроударных машин Г-3А, Г-5А, ГМД-2 и ГВ-2; восемь типов коронок и долот: К5БМ-6, К19М-4, К24М-6, ГПИ2М, ГПИ34М, ГПИ48М, Д4М-3 и 4ДГ-115К, а также кернорватели и ловушки твердосплавных пластин.

Гидроударные машины, породоразрушающий и вспомогательный инструмент серийно изготовлялись на экспериментальных заводах ВПО «Союзгеотехника» и на машиностроительном заводе им. Ф. Дзержинского Минхимнефтемаша.

Опыт эксплуатации разработанных технических средств показал, что при их внедрении достигался рост технико-экономических показателей, по сравнению с применяющимся в те годы бурением дробью, в следующих пределах:

Механическая скорость	2—4
Углубка за рейс	1,4—1,8
Скорость бурения	1,5—2,0

При этом стоимость бурения 1 м снизилась на 20—25%, и улучшилось качество разведки вследствие значительного снижения интенсивности искривления скважин.

Таким образом, в результате работ, проведенных в СССР, впервые в мире гидроударное бурение получило признание как самостоятельный способ проходки скважин.

Однако, несмотря на это, рост объемов гидроударного бурения стал замедляться и в 1969—1970 гг. стабилизировался на уровне 100—110 тыс. м в год, что обусловлено рядом причин:

- 1) переходом разведочного бурения с дробового на алмазный способ и уменьшением диаметров скважин до 76 и 59 мм;
- 2) недостаточной эффективностью гидроударного бурения существующими техническими средствами при проходке очень крепких (X—XII категорий) и средних по крепости пород (IV—VI категорий);
- 3) недостаточной стойкостью гидроударных машин с промывкой глинистым раствором;
- 4) трудностью обеспечения буровых достаточным количеством промывочной жидкости, необходимым для эффективной работы гидроударных машин (250—300 л/мин);
- 5) усложнением техники и технологии бурения, увеличением массы оборудования, инструмента и др.

Детальное изучение перечисленных факторов позволило наметить дальнейшие направления развития и пути более широкого внедрения этого прогрессивного способа проходки геолого-разведочных скважин.

В качестве основных задач приняты следующие:

- 1) снижение диаметра гидроударных машин и породоразрушающего инструмента и приведение их в соответствие со стандартным для вращательного способа;
- 2) снижение количества потребляемой промывочной жидкости;
- 3) упрощение конструкции машин и повышение их надежности;
- 4) разработка машин, эффективно работающих на глинистых растворах;
- 5) разработка технических средств и рациональных техно-

логий гидроударного бурения в широком диапазоне крепости горных пород (IV—XII категорий).

Сложность решения поставленных задач была обусловлена не только трудностями создания надежных в эксплуатации при промывке глинистым раствором гидроударных машин малого диаметра, но и необходимостью обеспечения конкурентоспособности гидроударного способа с такими прогрессивными технологическими способами, как высокооборотное алмазное бурение с применением легкосплавных бурильных труб и со съёмными керноприемниками.

Поставленные задачи определили необходимость перед началом проектирования проведения обширных теоретических и экспериментальных исследований гидравлических процессов и параметров гидроударных машин, механизма разрушения горных пород, технологии бурения, а также необходимость обобщения опыта проектирования и внедрения в производство ранее созданных гидроударных машин.

Основной объем таких исследований выполнен СКБ ВПО «Союзгеотехника» в содружестве с КАЗИМСом, ДГИ им. Артема и рядом производственных организаций. В результате исследований разработаны основы проектирования и установлены оптимальные параметры ударных систем гидроударных машин для бурения скважин в различных геологических условиях с разными типами породоразрушающих чаконечников, созданы и внедрены в производство комплексы технических средств для гидроударного бурения скважин малых диаметров (76 и 59 мм) в породах VII—IX и частично X категорий (КТСГ 7-76 и КТСГ 9-59), созданы и широко внедрены в производство высокочастотные гидроударные машины ГВ-5 и ГВ-6; разработана технология бурения ими в породах средней крепости IV—VII категорий серийными твердосплавными коронками и в крепких породах IX—XII категорий серийными алмазными коронками.

С созданием малогабаритных малорасходных гидроударных машин типа Г-7 и Г-9 для ударно-вращательного бурения и высокочастотных гидроударников ГВ-5 и ГВ-6 для вращательно-ударного метода роль гидроударного бурения в решении задач повышения производительности и качества буровых работ в отрасли значительно возросла. Этому способствовали такие преимущества гидроударного бурения, как значительное уменьшение степени искривления скважин, снижение самозаклинивания керна, возможность одновременного достижения высоких механических скоростей и проходок за рейс, улучшение качества кернового опробования вследствие более эффективного применения эжекторных снарядов, повышение ресурса бурильных труб и бурового оборудования, снижение аварийности, возможность комбинации гидроударного бурения с бескерновым, твердосплавным или алмазным, поскольку при этих способах предъявляются практически идентичные требования к оборудованию и

бурильной колонне. Кроме того, в результате снижения крутящего момента на колонне бурильных труб при бурении высокочастотными гидроударниками ГВ-5 и ГВ-6 открываются возможности реализации форсированных режимов на большие глубины. Расширению объемов гидроударного бурения способствовали также применение глинистых растворов и использование в качестве породоразрушающего и вспомогательного инструмента серийных твердосплавных и алмазных коронок, а также кернователей.

Объемы гидроударного бурения и его

Показатели	Год					
	1970	1971	1972	1973	1974	1975
Объем бурения, тыс. м	120,0	140,0	188,0	254,0	336,0	710,0
Экономия, тыс. руб.	470,0	600,0	560,0	695,0	1150	1400

Обоснование целесообразности использования высокочастотных гидроударных машин в сочетании с алмазными коронками и разработка этого нового направления позволили расширить области применения гидроударного бурения в сторону увеличения крепости горных пород до XII категорий включительно.

Таким образом, итогом проведенных работ явилось то, что гидроударное бурение стало высокоэффективным способом проходки разведочных скважин на твердые полезные ископаемые в различных геолого-технических условиях при категории пород по буримости от IV до XII включительно при глубине скважин до 1200 м и при промывке забоя как водой, так и глинистым раствором.

Разработанные положения и рекомендации нашли отражение в утвержденных нормативных материалах в СССР и в рамках сотрудничества стран — членов СЭВ, в координационных и долгосрочных планах развития техники и технологии бурения в отрасли.

Вследствие того, что разработанные технические средства для гидроударного бурения выполнены с учетом современных требований геологической службы, а также благодаря проделанной работе по их массовому внедрению, с 1970 г. резко возрастают объемы гидроударного бурения и полученный при этом экономический эффект (табл. 1).

Обладая патентной чистотой, технические средства для гидроударного бурения экспортируются на мировой рынок. С 1973 г. их успешно применяют при проходке скважин в ГДР, НРБ, ЧССР и ДРВ.

Таким образом, в последние годы гидроударное бурение из

узкоспецифического превращается в универсальный способ проходки геологоразведочных скважин и является одним из эффективных методов, определяющих прогресс разведочного бурения в отрасли.

В данной книге рассматривается только одно направление развития гидроударного бурения — бурение алмазными и твердосплавными коронками, работающими во вращательном режиме с наложением ударных импульсов.

Такой метод следует рассматривать как переход технологии вращательного бурения на новый,

более высокий качественный уровень. Ввиду существенных отличий механизма разрушения горных пород, технологических особенностей бурения и применяемых технических средств, разработанный метод бурения характеризуется авторами как вращательно-ударный способ бурения в отличие от традиционного

Т а б л и ц а 1
экономический эффект

Год				
1976	1977	1978	1979	1980
1000 2500	1350 3100	1500 3500	1600 3600	1700 3650

гидроударными машинами ударно-вращательного.

В настоящее время вращательно-ударное бурение высокочастотными гидроударными машинами признано как одно из перспективных и широко внедряется в практику.

Настоящая книга представляет обобщение теоретических, экспериментальных и производственных исследований, проведенных в основном авторами или под их руководством. Часть материалов заимствована у организаций, в содружестве с которыми проводились исследовательские работы.

Авторы выражают надежду, что данная работа окажет помощь в освоении и дальнейшем развитии прогрессивного вращательно-ударного способа бурения гидроударниками.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА БУРЕНИЯ

ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ПРИМЕНЕНИЯ ГИДРОУДАРНЫХ МАШИН

Объемы ударно-вращательного бурения до 1970 г. оставались незначительными в общем объеме геологоразведочных работ, что обусловило постановку специальных исследований по определению эффективных областей применения метода и разработке рекомендаций по его дальнейшему развитию.

Опытные работы проводили непосредственно на скважинах в Джезказганской экспедиции Центрально-Казахстанского ГУ, Шалымской экспедиции Западно-Сибирского ГУ, Лениногорской

экспедиции Восточно-Казахстанского ГУ и Краснодарской экспедиции треста «Ворошиловградгеология» при бурении пород с различными физико-механическими свойствами от VII до XII категории по буримости.

Из результатов исследований (рис. 1) следует:

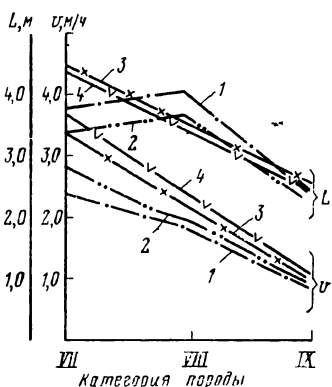


Рис. 1. График сводных данных при бурении гидроударниками различного типа:

1 — Г-3А; 2 — ГБМС-5; 3 — ГМД-2; 4 — Р-3М

а) при проходке пород VII—IX категорий применение гидроударников ГМД-2, Р-3М и Р-3МГ (табл. 2) обеспечивает рост механических скоростей бурения на 15—40% и проходки за рейс на 12—15% по сравнению с гидроударниками Г-3А и ГБМС. 5, имеющими энергию единичного удара на 10—15 Дж меньше;

б) при проходке пород X категории и выше разрыв в показателях бурения значительно уменьшается, следовательно, увеличения энергии удара на 10—15 Дж для эффективного разрушения более крепких пород явно недостаточно;

в) при бурении пород V—VI категорий типа сланцев показатели бурения резко снижаются, причем у машин, типа ГМД-2, имеющих большую энергию единичного удара и меньшую частоту, они ниже, чем у машин Г-3А с меньшей энергией и большей частотой;

Таблица 2

Техническая характеристика гидроударников

Показатели	Г-3А (СКБ)	Г-5А (СКБ)	ГБМС-5 (ИГД)	ГМД.2 (СКБ)	Р-3М (КАЗИМС)	Р-3МГ (КАЗИМС)
Диаметр скважины, мм	115; 96	115; 96	115; 96	115	115; 96	115; 96
Длина, мм	3765	3850	2300	1650	3050	2000
Масса, кг	144	150	100	90	90	75
Энергия единичного удара, Дж	50—60	60—70	50—60	70—80	70—80	70—80
Частота ударов, 1/мин	1500	1500	1000	1200	1200	1200

Примечание. В скобках приведены организации, разработавшие данную гидроударную машину.

г) применение гидроударных машин с энергией единичного удара 50—70 Дж и частотой ударов 1200—1500 1/мин обеспечивает эффективное бурение в породах с различными физико-механическими свойствами от VII до IX категорий; при проходке пластичных пород V—VI и крепких пород X категорий и выше

указанные параметры энергии и частоты не обеспечивают эффективного процесса бурения.

Для определения возможных путей расширения эффективных областей гидроударного бурения, вследствие применения рациональных режимов, проведены технологические исследования в стеновых и полевых условиях.

Полевые исследования проводили в Южно-Украинской геологоразведочной экспедиции, геологический разрез участков в которой сложен изверженными и метаморфическими породами VII—XI категорий, и в Бело-Калитвинской экспедиции, разрез которой представлен осадочным комплексом пород V—IX категорий по буримости.

Таким образом, полевыми исследованиями был охвачен широкий комплекс осадочных, изверженных и метаморфических пород с различными физико-механическими свойствами табл. 3.

Таблица 3

Физико-механические свойства пород

Интервал отбора образца, м	Порода	Категория породы по данным партии	Динамическая прочность по отношению F_d	Коэффициент абразивности $K_{абр}$	Объединенный показатель P_m	Категория пород по ОСГ 41-89-74
215,3—223,5	Гранит	VIII—IX	5,88	2,25	25	IX
115—116	Гранит биотитовый крупнозернистый	IX	8,00	1,98	30	IX
125,1—127,5	Гранит серо-розовый крупнозернистый	IX	10,53	1,93	45	X
139,7—142,0	Гранит серый крупнозернистый	IX	10,0	2,28	50	X
99,8—119,7	Гранит розовый	X	12,5	2,2	51	X
	Альбит-хлоритовая порода	X	28,57	0,8	43	X
202,7—203,6	То же	XI	22,92	0,93	30	IX
203,6—107,9	»	X	18,22	1,25	50	X
133,1—144,5	Сиенит красный крупнозернистый	IX	8,33	2,03	32	IX
225—226	То же	IX—X	9,10	2,28	38	X
75,7—95,3	Альбит буро-красный	X	16,67	2,08	50	X
75,5—95,3	Альбит буро-красный	X	16,67	2,00	50	X
95,3—99,8	Альбитит пластинчатый	X	16,67	1,95	50	X
166,9—168,8	То же	X	20,0	1,8	65	XI
171,4—179,8	»	X	14,29	2,05	35	X
125,1—126,0	»	X	11,11	2,05	30	IX
146,4—165,8	Альбит розово-серый	IX	11,77	2,15	30	IX
168,8—171,4	Альбитит сахаровидный	X	20,0	1,53	68	XI
135,3—138,1	Гнейс	IX	9,10	1,65	25	IX
223,5—224,9	»	IX	14,29	1,40	28	IX
87,8—88,8	»	IX	16,67	1,17	30	IX
125,2—128,4	Сланцы углистого, глинистого и песчано-глинистого состава	VI—VII	4—6	0,55—1,30	7—15	VI—VIII

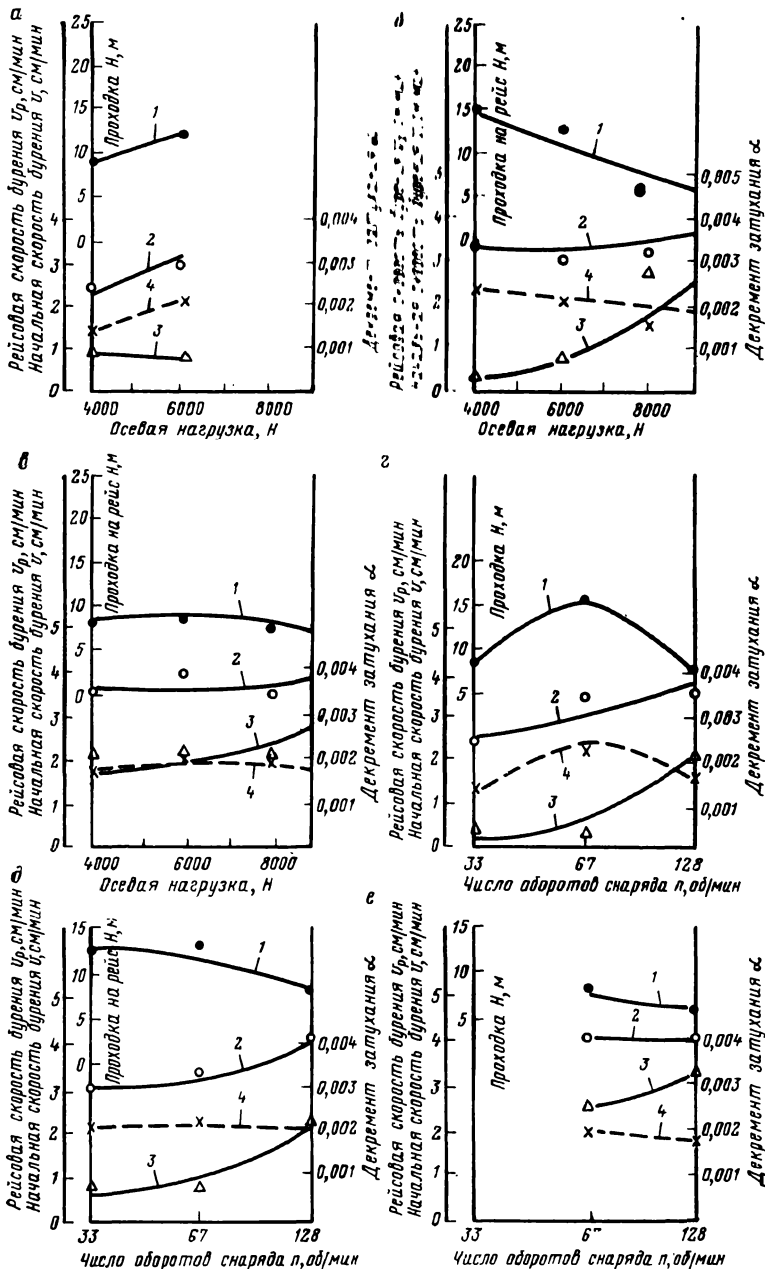


Рис. 2. Графики показателей бурения сланцев в зависимости от осевой нагрузки и частоты вращения:
 а — $n=33$ об/мин; б — $n=67$ об/мин; в — $n=127$ об/мин; г — $P_{ос}=4000$ Н; д — $P_{ос}=6000$ Н; е — $P_{ос}=10000$ Н; 1 — оптимальная проходка за рейс; 2 — начальная скорость бурения; 3 — декремент скорости бурения; 4 — рейсовая скорость

Стендовые исследования проводили при бурении по блокам лезниковского гранита IX категории по буримости.

В качестве основных показателей физико-механических свойств приняли динамическую прочность пород по толчению F_d , коэффициент абразивности в раздробленном состоянии $K_{абр}$ и объединенный показатель r_m , определяемые по методу Н. И. Любимова, который показал [12, 13], что данные значения физико-механических свойств имеют наилучшую корреляцию с показателями как вращательного, так и ударно-вращательного бурения.

Рассмотрим только отдельные результаты исследований с точки зрения возможности повышения эффективности гидроударного бурения при проходке пород VII—IX категорий и выработки предварительных рекомендаций по обеспечению эффективности гидроударного бурения в породах средней крепости IV—VI категорий и очень крепких породах X—XII категорий.

Полевые исследования. Результаты исследования (рис. 2) показали, что при увеличении осевой нагрузки и частоты вращения снаряда начальная механическая скорость бурения возрастает, причем при увеличении частоты вращения интенсивность ее роста несколько большая, чем при росте осевой нагрузки.

Декремент затухания скорости при росте осевой нагрузки до 6000 Н и частоты вращения до 67 об/мин увеличивается незначительно, а при больших значениях нагрузки и частоты — интенсивно.

Сравнение данных исследований позволяет считать оптимальным для проходки сланцев режим 67 об/мин при осевой нагрузке 4000—6000 Н.

При бурении сланцев в качестве породоразрушающего инструмента применяли четырехрезцовые коронки К19М-4, которые использовали на один рейс и в процессе исследований не перезатачивали.

В результате проведенного комплекса технологических работ при бурении пород средней крепости типа сланцев было отмечено следующее.

Показатели гидроударного бурения с энергией удара 50—70 Дж и частотой 1200—1500 уд/мин в породах средней крепости низкие и часто не превышают показателей обычного вращательного бурения твердосплавными коронками. Скорости бурения несоизмеримы с прочностными и абразивными свойствами пород.

Если при бурении более крепких пород типа гранитов, сиенитов и гнейсов, имеющих значения динамической прочности $F_d=5-12$ и коэффициента абразивности $K_{абр}=1,5-2,5$, механические скорости и проходки за рейс составляют 2,0—4,0 м/ч и 4,0—5,0 м, то при проходке пород средней крепости они значительно ниже — 0,6—1,5 м/ч и 1,5—2,5 м.

Исследования по выявлению оптимальных параметров режи-

ма бурения показали, что при указанных выше значениях энергии и частоты ударов, а также конструкции коронки изменение параметров режима не приводит к существенному увеличению показателей бурения. При низких частотах вращения это объясняется неравномерностью вращения снаряда. Резцы, вследствие высокой энергии удара, выбивают в породе глубокие лунки, и большинство повторных ударов приходится по этим лункам, а не между ними, так как низкая частота вращения не сглаживает неравномерности вращения снаряда (явление «гребенки»).

Отсутствие значительного роста показателей бурения при увеличении частоты вращения снаряда, которое отмечает большинство исследователей, связано с особенностями геометрии существующего гидроударного породоразрушающего инструмента, с большой величиной отрицательного переднего угла, мало-пригодного для эффективного разрушения горных пород средней крепости, в которых большое значение имеет эффект срезания между ударами. Поэтому для повышения эффективности гидроударного бурения в породах средней крепости надо изменить конструкцию коронки.

Более высокие значения показателей, полученные при бурении машинами с меньшей энергией единичного удара и большей частотой (50—60 Дж, 1500 1/мин), свидетельствуют о необходимости изменения параметров гидроударных машин (снижение энергии и увеличения частоты ударов).

В Южно-Украинской экспедиции преобладающие типы горных пород в разрезе — граниты, сиениты, альбититы, альбит-хлоритовые породы и гнейсы. Из данных табл. 4 видно, что значения физико-механических свойств указанных пород колеблются в относительно больших пределах и в некоторой степени перекрываются для отдельных пород.

Таблица 4

**Рекомендуемые режимы бурения скважин
диаметром 115 мм машинами Г-3А**

Порода	Динамическая прочность F_d	Коэффициент абразивности $K_{абр}$	Осевая нагрузка, Н	Частота вращения, об/мин
Гранит	6—12	2,0—2,3	5000—6000	71
Сиенит	8—10	2,0—2,3	7000—8000	71
Альбитит	11—20	1,5—2,15	7000—8000	71
Гнейс	9—16	1,2—1,7	5000—6000	33
Альбит-хлоритовая	18—28	0,8—1,3	3500—5000	48
Сланцы песчано-глинистые	5—8	0,55—1,36	4000—6000	67

На основании анализа технологических исследований в крепких породах можно заключить, что:

а) рациональные параметры режима бурения для крепких

пород с различными физико-механическими свойствами при существующих параметрах удара близки между собой;

б) изменение режимных параметров в исследуемых пределах повышает показатели бурения не более чем на 10—15%;

в) в породах, где при исследованиях не были достигнуты оптимальные значения скоростей и проходок, дальнейшее изменение параметров не дает положительных результатов: уменьшение частоты вращения ниже 33 об/мин приводит к рывкам и остановкам бурового снаряда вследствие повторности ударов по одним и тем же лункам, увеличение осевых нагрузок свыше 8000 Н вызывает поломку резцов породоразрушающего инструмента;

г) при проходке пород с высокими значениями динамической прочности и коэффициента абразивности типа альбита и альбит-хлоритовых сланцев показатели гидроударного бурения даже на оптимальных режимах не превышают показателей бурения алмазными коронками.

Стендовые условия. Влияние удельной энергии удара на показатели бурения определяли на специальном стенде, так как существующие гидроударные машины не позволяют изменять в широких пределах параметры ударника. Стенд был разработан для горизонтального бурения и состоял из рамы основания, направляющей рамы, вращателя, ударного узла, гидроцилиндра подачи, пульта управления и двух насосных станций. Ударный узел, разработанный по схеме гидрозавхватного молотка, позволял плавно и в широких пределах изменять энергию удара и ступенчато, посредством смены шкивов — их частоту.

Приводом для вращателя служил гидродвигатель МГ155А, позволяющий плавно изменять частоту вращения коронки. Насосные станции включали два насоса НШ-46Д, три насоса НШ-32Д и один насос НШ-10В.

Техническая характеристика стенда

Энергия удара, Дж	30—300
Частота ударов, 1/мин	740—1050; 1475—2200
Масса ударника, кг	20; 30; 40; 50
Частота вращения снаряда, об/мин	10—100
Осевая нагрузка, Н	5000—20000

Забой скважины промывали от водопроводной сети. Условия бурения на стенде были максимально приближены к условиям бурения гидроударными машинами. Ударный импульс от бойка через переходник передавался колонковой трубе диаметром 108 мм, длиной 2,7 м, далее подкороннику и коронке. Бойки по своей форме и размеру аналогичны бойку гидроударной машины ГМД-2. Бурение проводилось коронками КГ.3 диаметром 115 мм, армированными четырьмя резцами с симметричной заточкой 90°, и коронками КГ.2, армированными шестью резцами. Уменьшение числа резцов до двух и трех пороводили путем перетачивания шестирезцовых коронок. Энергия ударов изменялась

вследствие изменения массы бойков. Скорость удара при этом изменялась незначительно и колебалась от 1,6 до 2,2 м/с.

Лезниковский гранит бурили с осевой нагрузкой 5000 Н, частотой вращения снаряда 60 об/мин и частотой ударов 1450 1/мин.

В табл. 5 и 6 приведены значения показателей бурения, полученные с применением коронок с двумя, тремя, четырьмя и шестью резами при энергии удара 75 Дж и при изменении энергии единичного удара от 75 до 200 Дж с применением четырехрезцовой коронки.

Таблица 5

Показатели бурения в зависимости от числа резцов в коронке

Показатели	Число резцов в коронке			
	2	3	4	6
Начальная скорость бурения, см/мин	4,797	5,97	6,339	4,887
Декремент затухания скорости α	0,0556	0,0922	0,105	0,1235
Максимальная проходка за рейс, см	68,4	54,0	50,8	31,5

Таблица 6

Показатели бурения в зависимости от энергии ударов

Показатели	Энергия единичного удара, Дж			
	75	100	150	200
Начальная скорость бурения, см/мин	6,497	8,222	14,53	21,78
Декремент затухания скорости α	0,1791	0,164	0,124	0,0915
Максимальная проходка за рейс, см	30,7	44	112	227

Данные табл. 6 представлены на графике (рис. 3).

Как видно из графика, показатели гидроударного бурения с увеличением удельной энергии единичного удара резко возрастают. Так, при увеличении энергии удара от 75 до 200 Дж начальная скорость бурения возрастает в 3,5 раза, а проходка за рейс — в 7,4 раза. Поломок твердосплавных пластин зафиксировано не было, поэтому сделали вывод, что большинство поломок коронок происходит не от высокой энергии единичного удара. Скорее, наоборот, у существующих гидроударников энергия ударов недостаточна, вследствие чего зона разрушения породы под резами мала, скважина начинает зауживаться, коронка

срабатывается на конус и твердосплавные вставки ломаются.

Кроме того, в процессе затупления твердосплавных резцов значение удельной энергии на единицу площади снижается. Вследствие этого меньшее количество энергии реализуется на разрушение горной породы и увеличивается количество энергии возвращенной в систему, что также отрицательно сказывается на стойкости породоразрушающего инструмента.

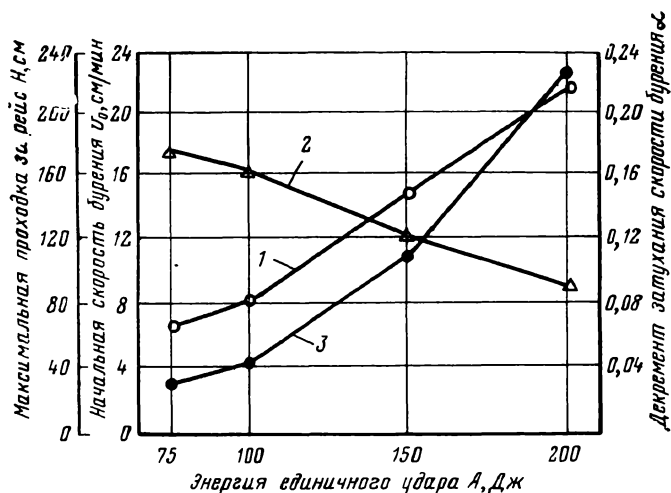


Рис. 3. График показателей бурения в зависимости от величины энергии единичного удара:

1 — начальная скорость бурения; 2 — декремент затухания скорости бурения; 3 — максимальная проходка за рейс

Влияние диаметра исследовали при бурении по блокам лезниковского гранита при энергии ударов 75 Дж, частоте ударов 1450 1/мин, осевой нагрузке 5000 Н и частоте вращения снаряда 60 об/мин (табл. 7). Коронки всех диаметров имели одинаковое число, форму и размер твердосплавных пластин.

Результаты исследований свидетельствуют о значительном увеличении показателей бурения с уменьшением диаметра.

Таблица 7

Показатели гидроударного бурения при различных диаметрах породоразрушающего инструмента

Диаметр скважины, мм	Начальная скорость бурения, см/мин	Декремент затухания скорости α	Проходка за рейс, см
135	4,613	0,133	27,2
115	6,497	0,1791	30,7
96	7,620	0,1779	37,3
76	9,520	0,1322	88,1
59	11,220	0,0911	123,4

Эффект от уменьшения диаметра бурения достигается за счет уменьшения расстояний между ударами на забое. Расчетные расстояния между смежными ударами при частоте вращения 60 об/мин и числе ударов 1450 1/мин для различных диаметров бурения следующие:

Диаметр коронки, мм		59	76	96	115	135
Расстояние между ударами, мм		4,3	6,1	10,7	13,1	15,7

Отсюда следует, что одним из путей повышения эффективности гидроударного бурения является уменьшение диаметра породоразрушающего инструмента, а следовательно, и диаметра гидроударных машин. Таким образом, исследования показали, что развитие гидроударного бурения должно идти по следующим направлениям:

- 1) изменение конструкции породоразрушающего инструмента для более полного использования эффекта резания при бурении пород IV—VII категорий;
- 2) увеличение частоты ударов и снижение их энергии при бурении тех же пород;
- 3) снижение диаметра гидроударных машин;
- 4) увеличение энергии ударов для бурения пород высокой крепости.

Исследования также выявили, что существенное увеличение энергии единичных ударов в конструкциях гидроударных машин связано с повышением расхода очистного агента и ростом давления в нагнетательной линии до 10 МПа и более. Это непременно вызовет повышение мощностей оборудования, изменение конструкции бурильных труб в сторону увеличения их проходного канала и так далее, что в конечном результате может оказаться экономически нецелесообразным.

Первые три перечисленных направления показывают, что для расширения областей применения гидроударного бурения к процессу разрушения горных пород следует подойти в другом аспекте — рассмотреть вращательный фактор как основной, а ударный как вспомогательный. Это предопределило постановку исследований по оценке целесообразности наложения ударных импульсов на серийный породоразрушающий инструмент, работающий во вращательном режиме, и исследований процесса разрушения горных пород при этом виде бурения.

НАЛОЖЕНИЕ УДАРНЫХ ИМПУЛЬСОВ НА ПОРОДОРАЗРУШАЮЩИЙ ИНСТРУМЕНТ, РАБОТАЮЩИЙ ВО ВРАЩАТЕЛЬНОМ РЕЖИМЕ

В основе вращательного, ударного и других методов механического бурения лежит один и тот же процесс, заключающийся в отделении частиц породы от массива при внедрении инструмента. Вследствие этого процесс бурения можно изучать на ос-

нове исследований единичного акта внедрения разрушающего элемента в образцы горных пород.

Исследованию процесса разрушения пород при внедрении единичного индентора посвящены работы В. С. Владиславлева, Е. Ф. Эпштейна, Р. М. Эйгелесса, А. Ф. Кичигина, В. Б. Соколинского, С. С. Сулакшина, В. С. Федорова, Ф. А. Шамшева, Л. А. Шрейнера и других авторов.

Рассмотрим известную из этих работ схему сил, действующих на резец, внедрившийся под действием статической нагрузки на глубину h и движущийся по поверхности полупространства (рис. 4).

Со стороны полупространства на резец действуют силы, обусловленные сопротивлением горной породы разрушению. Примем, что давление по поверхности AB распределяется равномерно и равнодействующая сил направлена перпендикулярно к линии, соединяющей крайние точки поверхности контакта (в данном случае A и B), и составит некоторый угол α с перпендикуляром к плоскости полупространства. Силы, действующие на резец в нормальном F_n и поперечном F_{π} направлениях к плоскости полупространства, определяют путем разложения равнодействующей R на составляющие

$$F_n = R \cos \alpha; \quad (1)$$

$$F_{\pi} = R \sin \alpha. \quad (2)$$

Окончательно с учетом силы трения, возникающей при движении резца по поверхности полупространства, сила, действующая на резец в поперечном направлении, выразится следующим образом:

$$F_{\pi} = R \sin \alpha + R \cos \alpha f, \quad (3)$$

где f — коэффициент трения материала резца о горную породу.

Из рис. 4 видно, что с увеличением глубины h внедрения резца в горную породу вместе с повышением сил сопротивления горной породы разрушению R будет возрастать и угол α .

При этом синус угла увеличивается, а косинус уменьшается, в связи с чем при неограниченном статическом нагружении рост поперечной составляющей будет опережать рост нормальной составляющей.

Сравнивая выражения (1) и (3) и учитывая коэффициент трения материалов резца о горную породу (0,2—0,5), нетрудно

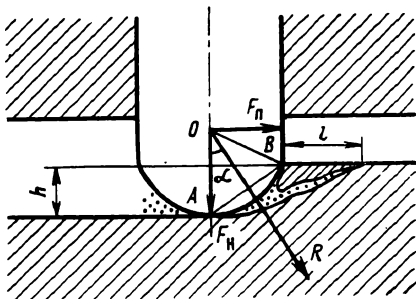


Рис. 4. Схема сил, действующих на резец, разрушающий горную породу, во вращательном режиме бурения

заметить, что силы F_n и F_{π} являются величинами одного порядка, в то время как критические значения прочности твердосплавного или алмазного резцов на изгиб на порядок ниже, чем на сжатие. Поэтому при неограниченном увеличении осевой нагрузки изгибающие напряжения в резце достигнут критических значений в несколько раз быстрее, чем сжимающие.

Следовательно, стойкость резцов при вращении обусловлена прежде всего изгибающими напряжениями и при расчете допустимых осевых нагрузок на породоразрушающий инструмент необходимо исходить из прочностных свойств резцов на изгиб, а не на раздавливание.

Из сказанного также следует, что значительный резерв прочностных свойств резцов на сжатие при статическом нагружении в режиме вращательного бурения не реализуется. Как видно из рассмотренной схемы, более полно реализовать прочностные свойства резцов при бурении можно путем увеличения только нормальной составляющей. Это возможно импульсным приложением нагрузки при направлении вектора скорости импульса перпендикулярно к плоскости забоя. В подобном случае в результате кратковременности действия импульса силы трения на границе резец — горная порода не успевают развиться, а поперечная составляющая в выражении (3), несмотря на передачу в породу дополнительной энергии, не увеличится или увеличится незначительно.

Таким образом, прилагая нагрузку в виде кратковременных импульсов, направленных перпендикулярно к плоскости забоя, можно передать в горную породу большую энергию и интенсифицировать процесс вращательного бурения.

Изложенные представления проверили путем расчета напряжений, возникающих в инденторе сферической формы (основная форма алмазов в буровых коронках). При расчете исходили из следующего.

В обобщенном виде схема разрушения горных пород включает три стадии: упругую деформацию, остаточную деформацию и отделение частиц породы от массива. В период упругой деформации формируются ядро разрушения и консоли отрыва массива, т. е. реализуются основные затраты энергии. Вследствие этого процесс реализации энергии и кинематику резца можно рассматривать на первой стадии — стадии упругой деформации.

В теории упругости анализ напряженного состояния при вдавливании базируется на задачах Бусинеска и Герца. Суть задачи Бусинеска состоит в нахождении закона распределения напряжений и деформаций при действии сосредоточенной силы, приложенной к поверхности линейно деформированного массива, ограниченного плоскостью и имеющего безграничное простиранье в глубину и ширину.

На основании этой задачи определяют давление по поверхности при вдавливании плоского штампа. Анализ же напряжен-

ного состояния при вдавливании штампа со сферическим основанием основывается на решении задачи Герца о сжатии двух соприкасающихся тел по криволинейной поверхности.

Решение отмеченных задач сводится к установлению закона перемещения бесконечно малой части контура поверхности d_s и увеличения радиуса кривизны от ρ_s до ρ_s' , откуда определяется абсолютное удлинение элементарной дуги полупространства и с учетом физико-механических свойств горных пород устанавливаются максимальные напряжения (в вершине контура) и средние напряжения по поверхности контакта индентора и горной породы.

Для сферического жесткого штампа зависимость величины упругого прогиба породы h от действующей нагрузки P имеет следующий вид:

$$h = \frac{1}{2} \sqrt[3]{\frac{9\pi(1-\nu^2)}{2\rho E}} P^{2/3}, \quad (4)$$

где ν — коэффициент Пуассона; ρ — радиус скругления вершины штампа; E — модуль упругости горной породы; P — осевая нагрузка.

Р. М. Эйгелес и Р. М. Стрекалова [26] приводят для определения величины прогиба выражение, близкое к равенству (4):

$$h = \sqrt[3]{\frac{9\pi^2}{8} \beta K^2 P^2}, \quad (5)$$

где $\beta = 1/2 r$; $K = (1-\nu)\pi E$; r — радиус скругления штампа.

В приведенных выражениях использованы только упругие константы породы. В связи с этим можно сделать вывод, что более полно процесс деформации описывает выражение, предложенное А. Ф. Кичигиным и другими [16], которые дополнительно рассматривают растяжение горной породы. На основании предложенной гипотезы контуров они получили следующее выражение для среднего давления по контуру в месте контакта горной породы и сферического индентора:

$$p_{cp} = \frac{\sqrt{2}}{3\pi\theta} \sqrt{\frac{\sigma_p}{E}}, \quad (6)$$

где σ_p — предельное состояние горной породы при растяжении; E — модуль упругости горной породы; θ — константа горной породы

$$\theta = (1-\nu^2)/3E.$$

Зная величину среднего давления по контуру, можно определить силу, действующую на индентор. Для этого необходимо найти площадь контакта.

В случае сферы площадь контакта

$$S = 2\pi r h. \quad (7)$$

Тогда сила, воспринимаемая сферой, будет представлена в виде

$$R = \frac{2rh\sqrt{2}}{3\theta} \sqrt{\frac{\sigma_p}{E}}. \quad (8)$$

Из рис. 4 следует, что

$$\sin \alpha = \sqrt{rh/r}; \quad (9)$$

$$\cos \alpha = \sqrt{1 - h/r}. \quad (10)$$

Тогда с учетом выражений (1), (3), (8—10) силы, действующие на индентор в нормальном и поперечном направлениях, можно записать следующим образом:

$$F_n = \frac{2\sqrt{2}rh}{3\theta} \sqrt{1 - \frac{h}{r}} \sqrt{\frac{\sigma_p}{E}}; \quad (11)$$

$$F_{\pi} = \frac{2\sqrt{2}h}{3\theta} \sqrt{\frac{\sigma_p}{E}} \left(\sqrt{2h} + r \sqrt{1 - \frac{h}{r}} f \right). \quad (12)$$

Очевидно, выражение (11) представляет собой нагрузку, которую необходимо приложить к индентору, чтобы внедрить его на глубину h (осевую нагрузку).

Сжимающие и изгибающие напряжения в инденторе полусферической или сферической формы определяются исходя из выражений (11) и (12) с учетом равенства (7):

$$\sigma_{сж} = \frac{2\sqrt{2}h}{3\pi r\theta} \sqrt{1 - \frac{h}{r}} \sqrt{\frac{\sigma_p}{E}}; \quad (13)$$

$$\sigma_{изг} = \frac{2\sqrt{2}h}{3\pi r^2\theta} \sqrt{\frac{\sigma_p}{E}} \left(\sqrt{rh} + r \sqrt{1 - \frac{h}{r}} f \right). \quad (14)$$

Результаты расчетов по полученным выражениям для граничных условий (глубина внедрения равна выпуску резцов из матрицы коронки) следующие:

Характеристика коронки	
Диаметр резцов, см	0,18
Выпуск резцов, см	0,025
Число резцов	200
Характеристика породы	
Порода	Кварцит
σ_p , Па	0,1200
E , Па	$10 \cdot 10^2$
ν	0,25
Напряжение в алмазе	
Напряжение на изгиб, Па:	
расчетное	2,4330
допустимое	2,0000

Напряжение на сжатие, Па:

расчетное	2,6468
допустимое	20,0000

Необходимая осевая нагрузка, Н	100 500
--	---------

Как видно из приведенных сведений, при заданных условиях изгибающие напряжения в алмазных резцах превысили критические значения, а сжимающие составили только 1/10. Это подтверждает вывод авторов данной работы о значительном резерве резцов на сжатие.

ПРОТИВОРЕЧИЕ МЕЖДУ НАЛОЖЕНИЕМ УДАРНЫХ ИМПУЛЬСОВ НА АЛМАЗНЫЙ ПОРОДОРАЗРУШАЮЩИЙ ИНСТРУМЕНТ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ТРЕБОВАНИЯМИ О СНИЖЕНИИ ВИБРАЦИИ И УДАРОВ

В настоящее время в практике геологоразведочных работ известно технологическое правило снижения вибрации и ударов при алмазном бурении. Вследствие этого необходимо более подробно остановиться на кажущемся противоречии рекомендаций по интенсификации вращательного алмазного бурения путем наложения динамических нагрузок.

Обзор отечественных и зарубежных работ показал, что исследований по определению эффективности наложения ударных импульсов на алмазный породоразрушающий инструмент не проводилось, что связано, по-видимому, с относительно низкой динамической прочностью алмазов по сравнению с их твердостью.

В то же время в последние годы опубликован ряд работ, в которых приведены результаты исследований прочностных свойств алмазов под действием статических и динамических нагрузок.

Так, исследованием прочностных свойств алмазов на раздавливание занимались Л. М. Ступкина, С. И. Кувыкин, И. Ф. Кагарманов и др. Анализ этих работ показывает, что алмазы, применяющиеся в бурении, могут выдерживать значительные нагрузки. Причем с уменьшением размера алмазных зерен значения критических нагрузок возрастают. Кроме того, прочность алмазных зерен, находящихся в стесненном состоянии, в 3—9 раз превышает прочность зерен в свободном состоянии.

Расчетные величины предельных осевых нагрузок из условия прочности алмазов на раздавливание, по данным этих исследований следующие:

Диаметр коронки, мм	59	76
Осевая нагрузка в кН при алмазах:		
I и II категорий	26,0	35,0
дробленых	13,0	17,5
химически полированных	10,5	14,0
механически полированных	7,9	10,5
овализованных	4,2	5,6

Из этих данных видно, что допустимые осевые нагрузки из условия прочности алмазов на раздавливание во много раз превышают осевые нагрузки, применяющиеся в бурении. Это вновь подтверждает вывод авторов о необходимости определения допустимых нагрузок исходя из прочностных свойств алмазов на изгиб.

Исследованиями прочностных свойств алмазов при воздействии динамических нагрузок занимались В. Л. Калинин и А. М. Спицин во ВНИИАлмазе. По их данным, максимально допустимые значения энергии ударов, в зависимости от сорта алмазов, составляют 0,009—0,08 Дж на зерно; значения динамической прочности алмазов, применяющихся в бурении, по данным работы [18], составляют 16—68 Дж/см².

Расчет, выполненный, исходя из последних значений, показывает, что допустимые энергии ударов на алмазные коронки диаметром 76 мм составляют 97 Дж, а на коронки диаметром 59 мм — 78 Дж. Это превышает значения энергии единичного удара у существующих гидроударных машин. Таким образом, утвердившееся представление о низкой динамической прочности алмазов сложилось, вероятно, в то время, когда коронки чеканили вручную в стальном корпусе крупными кристаллами алмазов.

В настоящее время при бурении применяют мелкоалмазные коронки, а зерна алмазов закреплены методом спекания в твердосплавной матрице и находятся в условиях, приближающихся к всестороннему сжатию. Вследствие этого современные алмазные коронки могут выдерживать значительные динамические нагрузки, что и подтверждается исследованиями авторов.

Вместе с тем, рассматривая вибрацию как результат стохастических колебаний бурильной колонны, следует иметь в виду, что на коронку накладываются ударные импульсы, различные по величине, направлению и времени действия. Такие нагрузки, очевидно, приводят к увеличению поперечной составляющей и к возрастанию изгибающих напряжений, которые и без того находятся на пределе своих критических значений. Кроме того, величина стохастических ударных импульсов может превысить значения прочности алмазов на сжатие. Поэтому борьба с влиянием на резцы коронок такого рода вибраций является безусловно эффективной, а предложение о полезном использовании ударных импульсов, организованных по времени действия, силе и направлению, не противоречит общепринятому технологическому правилу, а уточняет его.

РАЗРУШЕНИЕ ГОРНЫХ ПОРОД ЕДИНИЧНЫМ ИНДЕНТОРОМ

Цель создания технических средств для бурения скважин — эффективное разрушение горных пород. В связи с этим для определения рациональных значений ударных нагрузок при конст-

руировании гидроударных машин необходимо прежде всего исходить из механизма разрушения горных пород.

Как уже отмечалось, разрушение упруго-хрупких пород при внедрении индентора завершается отделением части породы от массива, т. е. выколом фрагмента породы на определенную глубину. При этом глубина лунки разрушения может значительно превышать глубину внедрения индентора.

Вместе с тем существующие математические построения описывают только часть процесса разрушения — упругую деформацию. Расчетно-теоретические построения функции $P(h)$ для остальных стадий упруго-хрупкого разрушения пока не созданы, хотя теория о формализации накопления дефектов и структурных изменений в области разрушения, а также зарождения и распространения трещин успешно разрабатывается [26].

Таким образом, на современном уровне развития теории вид функции $P(h)$ вплоть до выкола породы и определения ее экстремальных значений может находиться только на основе эксперимента.

В связи с изложенным процесс разрушения горных пород при динамическом нагружении индентора изучали в стендовых условиях с максимальным приближением этих условий к скважинным.

Стенд включал специальную камеру, в которой устанавливали заранее подготовленный образец горной породы. На снивелированной поверхности образца размещали шток с закрепленным в нем штабиком, содержащим алмаз или твердосплавный резец. На штоке закрепляли датчики нагрузки и перемещения. Скорость приложения удара составляла 1,5—2,2 м/с.

В опытах использовали образцы кварцита, габбро и известняка, подготовленные из кернов, полученных при бурении блоков этих пород на стенде. Форму и величину ударного импульса записывали на осциллографе С1-17 с системой усиления, позволяющей записывать на одной осциллограмме график нагрузки — перемещение.

Для выделения импульса, отраженного от горной породы, и установления истинной деформации породы проводили дополнительные опыты, заменяя образец горной породы резиной и сплавом Вуда, а также при постановке штабика без индентора на стальную шайбу (жесткий удар без деформации горной породы) на оборудовании, изготовленном и установленном в лаборатории разрушения горных пород во ВНИИБТ.

Анализ работ по исследованию процесса разрушения горных пород при вдавливании инденторов показывает, что интенсивность разрушения при различных уровнях энергии не одинакова. Так, если передаваемой энергии недостаточно для достижения скачка разрушения (так называемого объемного разрушения), то на разрушение горной породы расходуется только незначительное количество энергии, остальная же ее часть возвращает-

ся в систему в виде упругих колебаний горной породы. Кроме низкой эффективности процесса разрушения в этом случае, отдача энергии в обратную сторону может отрицательно влиять на работоспособность породоразрушающих элементов. Сумма энергий падающего и отраженного от горной породы импульсов может превысить критические значения прочности алмазов или твердых сплавов.

В связи с этим было принято решение в качестве оптимального выбрать такой уровень энергии, который обеспечивал бы достижение скачка разрушения, находящегося в области, не превышающей значения прочности породоразрушающих элементов.

Осциллограммы позволили установить нагрузку на разрушение и величину деформации горной породы, по которым определяли энергетические затраты на разрушение. Установить скачки разрушения, ввиду сложности процесса непосредственно на осциллограммах было трудно. Кроме того, при анализе осциллограмм учитывали следующее.

Известно, что при внедрении индентора в горную породу образуется ядро разрушенной, мелкодиспергированной породы, через которое и передается нагрузка на полупространство. По данным некоторых исследований [14], ядро разрушения имеет свойства псевдожидкости. В таком случае при нанесении удара ядро разрушения может его амортизировать, что в какой-то мере сглаживает процесс разрушения горной породы. Поэтому в опытах дополнительно определяли значения энергии по высоте сбрасывания бойка и известной массе, а также измеряли глубину и объем лунки разрушения.

Скачки разрушения хорошо прослеживались по форме самих лунок, их глубине и объему. По результатам исследований построен график (рис. 5).

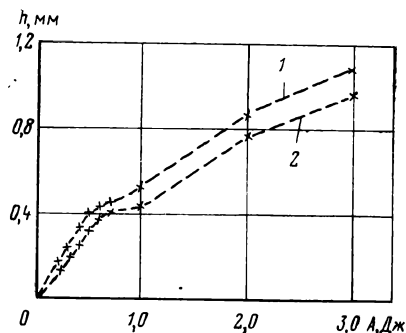


Рис. 5. График зависимости глубины лунки разрушения твердым сплавом от энергии удара:
1 — известняк; 2 — габбро

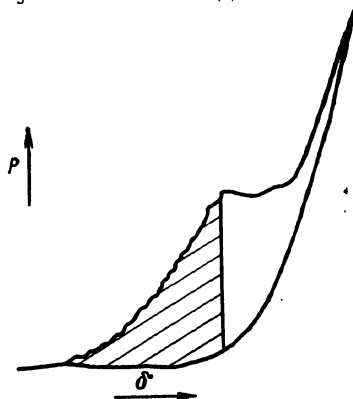


Рис. 6. Гистограмма нагрузка — деформация при статическом нагружении габбро IX категории ($\rho=24,0$ г/см³) с диаметром 1,8 мм при $S=3,2$ см² и $A=0,08$ Дж

Для подтверждения существования скачков разрушения и уточнения их энергетических характеристик провели серию опытов, в которых снимали график нагрузка—деформация при статическом нагружении (рис. 6). Энергию, затраченную на разрушение, определяли как площадь фигуры, ограниченной кривой $P(\delta)$ и осью абсцисс.

Результаты исследований, приведенные в табл. 8 и 9, позволили установить следующее.

Механизм разрушения горной породы непрерывный. При приложении любого количества энергии, достаточного для переда-

Таблица 8

Результаты исследований процесса разрушения горных пород при динамическом внедрении твердосплавного резца $1,8 \times 1,5$ мм, передний угол 90° , угол скоса 45°

Энергия удара, Дж	Нагрузка по осциллограмме, Н	Деформация по осциллограмме, мм	Энергия по осциллограмме на разрушение, Дж	Коэффициент реализации энергии	Глубина лунки разрушения, мм	Объем лунки разрушения, мм ³	Удельная энергоёмкость, Дж/мм ³
Известняк $\rho=12,0$ VII категории							
0,2	200	0,15	0,03	0,15	0,16	0,15	1,33
0,3	480	0,20	0,10	0,33	0,22	0,18	1,67
0,4	800	0,31	0,25	0,62	0,30	0,21	1,90
0,5	1250	0,35	0,44	0,88	0,40	0,63	0,79
0,6	1286	0,37	0,55	0,92	0,42	0,65	0,92
0,7	1600	0,41	0,66	0,94	0,44	0,75	0,93
1,0	2320	0,45	0,95	0,95	0,52	1,23	0,81
2,0	3100	0,54	1,70	0,85	0,86	3,17	0,63
3,0	4050	0,69	2,8	0,98	1,07	7,6	0,39
0,2	320	0,16	0,05	0,25	0,15	0,08	2,5
Габбро $\rho=22,1$ VIII категории							
0,3	580	0,20	0,12	0,40	0,20	0,11	2,72
0,4	1250	0,24	0,30	0,75	0,26	0,13	3,1
0,5	1630	0,26	0,43	0,86	0,28	0,18	2,78
0,6	1812	0,32	0,58	0,97	0,40	0,54	1,1
0,7	1970	0,34	0,67	0,95	0,41	0,56	1,25
1,0	2450	0,38	0,93	0,93	0,44	0,85	1,18
2,0	3210	0,56	1,8	0,90	0,73	2,55	0,78
3,0	3940	0,71	2,8	0,93	0,97	4,92	0,61

чи ударного импульса, достигается соответствующая глубина разрушения горной породы. Однако при приложении определенного, постоянного для данной горной породы и данного индентора количества энергии происходит скачкообразное увеличение объема и глубины лунки выкола. Скачки разрушения прослеживаются на графиках, а также при анализе значений удельной энергоемкости (скачкам разрушения соответствуют минимальные ее значения).

При любой форме породоразрушающего индентора в процессе деформирования образуется ядро уплотнения горной породы.

Таблица 9

Результаты исследований процесса разрушения горных пород при динамическом внедрении алмаза диаметром 1,8 мм

Энергия удара, Дж	Нагрузка по осциллограмме, Н	Деформация по осциллограмме, мм	Энергия на разрушение по осциллограмме, Дж	Коэффициент реализации энергии	Глубина лунки разрушения, мм	Объем лунки разрушения, мм ³	Удельная энергоемкость, Дж/мм ³
Габбро $\rho=22,1$ VIII категории							
0,2	500	0,12	0,06	0,30	0,18	0,210	0,95
0,3	780	0,18	0,14	0,46	0,20	0,314	0,96
0,4	1330	0,21	0,28	0,70	0,21	0,324	1,23
0,5	1916	0,24	0,46	0,92	0,26	0,354	1,41
0,6	2072	0,28	0,58	0,97	0,28	0,380	1,58
0,7	2167	0,30	0,65	0,92	0,28	0,450	1,56
1,0	2638	0,36	0,95	0,95	0,55	0,830	1,20
2,0	2950	0,61	1,80	0,90	0,80	2,211	0,90
3,0	3810	0,76	2,9	0,97	1,10	3,500	0,85
Кварцит $\rho=39,0$ X категории							
0,2	670	0,06	0,04	0,10	0,08	0,07	2,86
0,3	1500	0,12	0,18	0,60	0,16	0,216	1,39
0,4	1857	0,14	0,26	0,65	0,18	0,216	1,85
0,5	2210	0,19	0,42	0,84	0,21	0,225	2,22
0,6	2760	0,21	0,58	0,97	0,23	0,238	2,52
0,7	2950	0,23	0,68	0,97	0,26	0,251	2,79
1,0	3241	0,29	0,94	0,94	0,33	0,316	3,16
2,0	4166	0,42	1,75	0,88	0,65	0,980	2,04
3,0	4836	0,61	2,95	0,98	0,85	1,550	1,93

После достижения скачка разрушения глубина и объем лунки выкола увеличиваются незначительно, незначительно возрастает и нагрузка. Повышение энергоемкости можно объяснить тем, что энергия в этот момент затрачивается на дополнительное разрушение сформировавшегося и уплотненного ранее ядра разрушения.

Небольшие величины коэффициента передачи при малых значениях энергии объясняются ее потерями в самом стержне (наковальне), а также на границе резец — порода.

С увеличением энергии удара энергоемкость в общем случае уменьшается, резко возрастают также объем и глубина лунки. Однако зависимость $V(A)$ имеет характер гиперболы, а зависимость $h(A)$ — параболы. Отсюда следует, что при увеличении энергии ударов объем разрушенной породы растет в основном вследствие диаметра лунки выкола, т. е. увеличение ширины лунки опережает рост ее глубины. Этот вывод может иметь значение при конструировании коронок и выборе рационального расстояния между инденторами.

Учитывая, что как при алмазном, так и при твердосплавном инденторе поломки наблюдали при значениях энергии свыше 1,0 Дж, рациональные значения энергии выбирали по первому скачку разрушения:

Материал	Алмаз	Твердый сплав
Размеры, мм	1,8 (диаметр)	$1,6 \times 1,8$
A, Дж	0,25—0,3	0,5—0,6

Резкое увеличение объема разрушения с ростом энергии до 2,5—3,0 Дж свидетельствует о резервах повышения эффективности процесса разрушения, заключающихся в увеличении ударной стойкости инденторов.

Следует отметить, что в реальных условиях бурения поверхностный слой горной породы всегда ослаблен усталостными трещинами от предыдущих ударов. Поэтому приведенные выше значения энергии ударов несколько завышены и вполне обеспечат эффективное разрушение горных пород на забое скважины.

ЧАСТОТА НАЛОЖЕНИЯ УДАРНЫХ ИМПУЛЬСОВ

При исследовании механизма резания горных пород твердосплавными резцами отмечают дискретный характер разрушения с резкими колебаниями нормальных и тангенциальных нагрузок на резце от максимума до минимума. В этом случае период минимальных нагрузок соответствует свободному пробегу резца по разрушенному полупространству с последующим постепенным нарастанием напряжения до встречи с ненарушенной породой. Сопротивление движению резца при этом снова увеличивается

до максимума, происходит скол фрагмента породы и цикл разрушения повторяется (рис. 7).

Четко выраженная дискретность процесса разрушения при твердосплавном бурении свидетельствует о целесообразности передачи дополнительной нагрузки в виде кратковременных ударных импульсов с частотой, близкой к частоте разрушения горной породы, и позволяет теоретически определить требуемую частоту ударника.

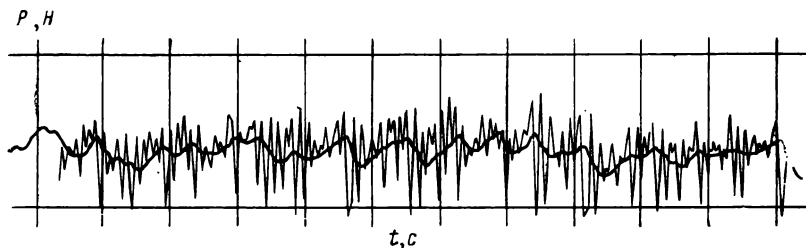


Рис. 7. Осциллограмма нормальных нагрузок на резце при резании горных пород: $v_p = 0,5$ м/с; $v_{пр} = 2,5$ м/с; $h_{рез} = 1,35$ мм

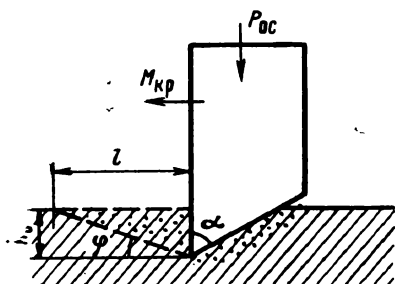


Рис. 8. Схема разрушения горной породы резцом клиновидной формы

Воспользуемся известной схемой разрушения пород резцом клиновидной формы (рис. 8) [9, 23, 25].

Частоту разрушения при бурении на определенных режимах можно выразить следующим равенством:

$$n_{ск} = \frac{2\pi R n_{об}}{l}, \quad (15)$$

где R — радиус породоразрушающего инструмента; $n_{об}$ — частота вращения; l — длина скола фрагмента горной породы.

Длина скола l зависит от нескольких факторов, но прежде всего от глубины внедрения резца h_0 и угла скола φ

$$l = h_0 / \operatorname{tg} \varphi. \quad (16)$$

Б. И. Воздвиженский, С. С. Сулакшин и другие исследователи, рассматривая кинематику работы резца клиновидной формы, приводят для определения h_0 следующую формулу:

$$h_0 = \frac{\eta P}{\sigma_{вд} L \operatorname{tg} \alpha}, \quad (17)$$

где $\eta = \frac{\cos^2 \varphi}{\sin (\alpha + 2 \varphi)}$ — коэффициент пропорциональности, учи-

тывающий влияние свойств пород (угла внутреннего трения φ) и угла приострения резца α ; P — нагрузка; $\sigma_{вд}$ — предел прочности породы на вдавливание; L — длина резца.

Выражение (17) справедливо для определения глубины внедрения неподвижного или движущегося с небольшой скоростью резца. Однако с увеличением скоростей движения происходит перераспределение нагрузок на резце в нормальном и горизонтальном направлениях, вследствие чего влияние осевой нагрузки на глубину внедрения снижается.

В первом приближении в интервалах частот вращения снаряда, применяемых в настоящее время на практике, зависимость глубины внедрения от соотношения осевой нагрузки и частоты вращения носит линейный характер и снижение действия нагрузки может быть учтено соответствующим коэффициентом K

$$P = P_{ос} K, \quad (18)$$

где $P_{ос}$ — осевая нагрузка на резец.

Тогда с учетом равенства (18) глубину внедрения при определенных частотах вращения снаряда можно записать следующим образом:

$$h = \frac{P_{ос} K}{\sigma_{вд} L \operatorname{tg} \alpha} \eta. \quad (19)$$

Как отмечалось выше, длина скола фрагмента горной породы l за единичный акт разрушения зависит не только от глубины внедрения индентора, но и от направления распространения трещины — угла скола.

Для обоснования направления развития трещины скола будем исходить из современных представлений о разрушении горных пород при статическом нагружении. При движении резца в объеме горной породы впереди его будут развиваться сжимающие напряжения. Из условия предельного равновесия, определенного Кулоном и развитого Мором, следует, что разрыв сплошности породы произойдет от тангенциальных напряжений в направлении, определяемом углом внутреннего трения горной породы.

Направление развития трещины обусловлено многими факторами: микротрещиноватостью, зернистостью породы и др. Однако развитие трещины будет иметь тенденцию направления соответственно углу внутреннего трения породы, и поэтому в общем случае следует ожидать подчинения процесса разрушения этой закономерности, т. е.

$$\varphi_{тр} = \varphi_{ск}. \quad (20)$$

Тогда с учетом выражений (19) и (20) длина скола будет равна

$$l = \frac{P_{ос} K \eta}{\sigma_{вд} L \operatorname{tg} \alpha \operatorname{tg} \varphi}, \quad (21)$$

а частота скалывания

$$n_{\text{ск}} = \frac{2 \pi R n_{\text{об}} \sigma_{\text{вд}} L \operatorname{tg} \alpha \operatorname{tg} \varphi}{P_{\text{ос}} K \eta} . \quad (22)$$

Из выражения (22) следует, что частота скалывания зависит от режимов бурения, физико-механических свойств пород и угла приострения резца. Она увеличивается с ростом частоты вращения, прочности пород и угла приострения резца, а уменьшается, с увеличением осевой нагрузки и угла внутреннего трения.

Очевидно, в том случае, когда частота накладываемых ударных импульсов $n_{\text{уд}}$ будет соответствовать частоте актов разрушения горной породы $n_{\text{ск}}$, повышение механической скорости будет соответствовать дополнительному увеличению осевой нагрузки, равнозначной нагрузке, развиваемой ударным импульсом.

Выразим значение механической скорости бурения твердосплавной коронкой известной формулой

$$v_m = h m n_{\text{об}} , \quad (23)$$

где m — число резцов на одной окружности радиуса коронки; $n_{\text{об}}$ — частота вращений.

С учетом равенства (19) механическая скорость равна

$$v_m = \frac{P_{\text{ос}} K \eta}{\sigma_{\text{вд}} L \operatorname{tg} \alpha} m n_{\text{об}} . \quad (24)$$

Определим влияние на механическую скорость дополнительной мощности, передаваемой в породу вследствие наложения на резец ударных импульсов. В связи с кратковременностью импульсов силы, действующие на резец, с увеличением скорости его движения перераспределяться не будут. Поэтому действие нагрузки от ударного импульса на резец,двигающийся с определенной скоростью, в этом случае равно действию нагрузки при неподвижном резце.

Как показывают исследования (см. рис. 7), частота актов разрушения породы твердосплавным резцом настолько велика, что реализовать ее в конструкциях гидроударных машин невозможно. Поэтому при наложении ударных импульсов с частотой, меньшей частоты разрушения породы, будет увеличиваться глубина лунки разрушения не каждого выкола, а только определенной их части.

В этом случае увеличение скорости бурения будет неадекватно действию постоянно действующей дополнительной осевой нагрузки, равнозначной нагрузке, развиваемой ударным импульсом. В связи с этим эффект от действия дополнительной динамической нагрузки должен быть уменьшен на величину, равную соотношению частоты ударов, генерируемых гидроударной машиной, к частоте актов разрушения породы

$$K_2 = n_{\text{уд}}/n_{\text{ск}} , \quad (25)$$

где $n_{\text{уд}}$ — частота ударов технического средства; $n_{\text{ск}}$ — частота актов разрушения.

Таким образом, интенсивность разрушения горной породы уменьшается по сравнению с постоянно действующей нагрузкой на величину, кратную отмеченному коэффициенту. Поэтому выражение для механической скорости бурения, с учетом дополнительно приложенных ударных нагрузок, можно записать следующим образом:

$$v_{\text{м. вр. уд}} = \frac{P_{\text{ос}} K \eta m n_{\text{об}}}{\sigma_{\text{вд}} L \operatorname{tg} \alpha} + \frac{P_{\text{дин}} \eta m n_{\text{об}}}{\sigma_{\text{вд}} L \operatorname{tg} \alpha} K_2. \quad (26)$$

Силу, развиваемую динамическим импульсом, можно найти из волновой теории удара

$$P_{\text{дин}} = 2 N_0, \quad (27)$$

где N_0 — максимальная сила удара в головной ступени волны

$$N_0 = \rho a v_{\text{ур}} K_{\text{в}}; \quad (28)$$

$v_{\text{уд}}$ — предударная скорость бойка; ρ — плотность материала соударяющихся стержней; a — скорость распространения волны напряжения в материале стержней; $K_{\text{в}}$ — коэффициент прохождения волны

$$K_{\text{в}} = F_1 F_2 / (F_1 + F_2); \quad (29)$$

F_1 — площадь сечения ударника, F_2 — площадь сечения накопительной.

Введем обобщенный коэффициент, характеризующий конструктивные особенности конкретного породоразрушающего инструмента

$$K_3 = \eta m / L \operatorname{tg} \alpha. \quad (30)$$

Тогда в окончательном виде, с учетом принятых коэффициентов, выражение (26) для механической скорости бурения примет вид

$$v_{\text{м. вр. уд}} = \frac{K_3 n_{\text{об}}}{\sigma_{\text{вд}}} (P_{\text{ос}} K + P_{\text{дин}} K_2). \quad (31)$$

Таким образом, механическая скорость прямо пропорциональна коэффициенту, характеризующему конструктивные особенности породоразрушающего инструмента и обратно пропорциональна прочности породы на вдавливание, частоте вращения снаряда, осевой нагрузке, коэффициенту соотношения осевой нагрузки и частоты вращения снаряда, энергии ударных импульсов, коэффициенту соотношения частоты ударов и частоты актов разрушения данной горной породы на вдавливание.

Определим коэффициент повышения механической скорости в результате дополнительного наложения ударных импульсов:

$$K_{\text{эф}} = v_{\text{м. вр. уд}} / v_{\text{м. вр.}} \quad (32)$$

С учетом формул (26) и (24)

$$K_{\text{эф}} = 1 + \frac{P_{\text{дин}} K_2}{P_{\text{ос}} K} . \quad (33)$$

Анализ этой зависимости показывает, что рост механической скорости, вследствие дополнительного наложения ударных импульсов, пропорционален их энергии и частоте. При увеличении осевых нагрузок эффект от дополнительно приложенной ударной нагрузки снижается.

Сущность коэффициента K_2 показывает, что с ростом частоты вращения снаряда при постоянной частоте ударов относительная эффективность от наложения ударных импульсов также снижается.

Таким образом, максимальная эффективность вращательно-ударного бурения в породах средней крепости обеспечивается при наложении на резец ударов с частотой, близкой к частоте актов разрушения горной породы. При наложении меньшего числа ударов механическая скорость уменьшается на величину, кратную отношению числа ударов к частоте актов разрушения.

Расчет, выполненный по выражению (33), показывает, что наложение на твердосплавные коронки диаметром 76 мм типа СА-2 ударных импульсов с энергией 20 Дж и с частотой 40 Гц при бурении пород средней крепости обеспечивает увеличение механической скорости на 15—20%. Примерно такие же показатели получены при вращательно-ударном бурении на стенде и в полевых условиях.

Кроме того, качественная и количественная оценка сходимости теоретических и экспериментальных исследований проводилась также путем сравнения результатов вычислений по выражению (22) с результатами опытных работ, полученных при осциллографировании нагрузок на резце при резании твердосплавным индентором пород различной крепости.

Опытные работы проводили в лаборатории разрушения горных пород ВНИИБТ на специальном стенде. Форма твердосплавного индентора была принята аналогичной форме резца микрорезцовой коронки СА-2. Тангенциальные и нормальные нагрузки на инденторе записывали двухлучевым осциллографом на диаграммной ленте.

Частоту актов разрушения определяли путем подсчета колебаний нормальных нагрузок на инденторе с учетом масштаба времени протяжки ленты.

Результаты теоретических и экспериментальных исследований представлены в табл. 10, из которой видно, что расхождение между теоретическими и экспериментальными данными не превышает 20—22%.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА БУРЕНИЯ

Исследование процесса вращательно-ударного бурения заключалось в экспериментальном установлении факторов, опре-

Таблица 10

Сравнительные данные по частоте сколов при резании горных пород

Горная порода	$\sigma_{\text{вед}} \cdot 10^3 \text{ МПа}$	Угол приостре- ния реза α , градус	Длина реза L , мм	Кэффи- циент ха- рактери- зующий коронку, η	Осевая нагрузка $P_{\text{ос}}, \text{ Н}$	Скорость резания v , мм/с	K	Угол внутрен- него трения горной породы φ , градус	Глубина резания, мм	Тангенци- альная нагрузка, Н	Нормальная на- грузка, Н	Частота скола $n_{\text{ск}}$		Относи- тельная погреш- ность, %
												теорети- ческая	фактиче- ская	
Мрамор	8	45	3	0,93	500	500	0,95	17	0,33	560	470	831	1014	22
					480	100	0,98	17	0,27	480	470	167	200	20
					1200	500	0,95	17	0,92	880	1140	346	410	20
					2600	500	0,95	17	3,02	1780	2470	159	194	22
					1560	1000	0,90	17	2,04	1760	1400	562	646	15
					1040	2000	0,72	17	0,99	1200	750	2109	1708	19
Доломит	45	45	3	0,93	3250	500	0,95	25	0,12	1350	3080	1095	908	17
					6300	500	0,95	25	0,25	5000	5980	565	627	11
					4600	2000	0,72	25	0,28	1000	3300	4084	3185	22
					5100	2000	0,72	25	1,4	2050	3670	3684	2947	20
					2500	500	0,95	25	0,18	1700	2380	1424	1666	17
					4100	500	0,95	25	1,8	1750	3900	868	789	19
Известняк	35	45	3	0,93	2800	500	0,95	22	0,18	700	2700	857	925	09
					3200	500	0,95	22	0,30	850	3050	750	652	13
					4500	500	0,95	22	2,3	1800	4280	533	634	09
					5200	2000	0,72	22	2,09	1600	3800	2436	1924	21

деляющих его эффективность, и в разработке рекомендаций по дальнейшему его совершенствованию.

Исследования проводили на стенде, оснащенном станком СБА-500, а также на стенде со станком ТФ-3А фирмы «Тоне Боринг» (Япония), имеющим частоту вращения шпинделя до 3000 об/мин.

Бурили блоки лабрадорита твердосплавными коронками на следующих параметрах режима:

Осевая нагрузка по индикатору веса, Н	5000; 10 000; 15 000
Частота вращения, об/мин	150; 300; 450

Режимы алмазного бурения по блокам лезниковского гранита:

Осевая нагрузка по индикатору веса, Н	10 000; 15 000
Частота вращения, об/мин	420; 626; 1020

Осевые нагрузки, установленные по индикатору веса, корректировались с учетом потерь нагрузок в станке на трение, определенных по образцовому динамометру при вращении шпинделя на соответствующих режимах с упором на пята с подшипником.

При исследованиях бурили и твердосплавными и алмазными коронками с частотой 2500 уд/мин и энергий единичного удара 10—15 Дж.

Замеры мощности при бурении и снятие характеристик бурового станка проводили по методике, разработанной отделом подготовки проектирования СКБ ВПО «Союзгеотехника» и изложенной в работах [8, 11].

При анализе процесса бурения и разделения затрат мощности на составляющие был использован известный принцип исключения из эксперимента фактора разрушения пород [9]. Сущность метода описана в работе [11] и заключается в том, что разность между затратами мощности, соответствующими определенному значению механической скорости и механической скорости, снизившейся на тех же режимах бурения

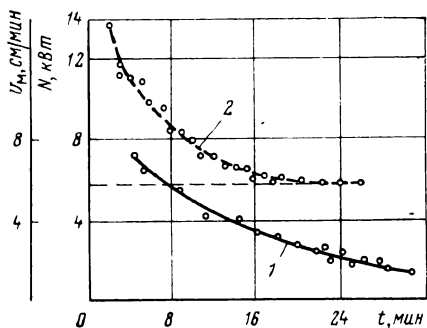


Рис. 9. График изменения механической скорости (1) и мощности (2) при бурении пород, вызывающих заполирование алмазов

на тех же режимах бурения до нуля, выражает энергетические затраты на разрушение горной породы. Значения же мощности, соответствующие нулевым значениям механической скорости, будут выражать затраты на трение заполированного алмаза или затупившегося твердосплавного резца о породу (рис. 9).

Поскольку в аналитических и экспериментальных выражениях, установленных

различными исследователями, отмечается линейная зависимость мощности от механической скорости [2, 9], в общем случае мощность, затрачиваемую на чистое бурение (без учета затрат мощности на боковое трение коронки, колонковой трубы и т. д.), можно выразить следующим выражением:

$$N_{\text{бур}} = a + v_m K, \quad (34)$$

где K — коэффициент пропорциональности, который на графиках $N(v_m)$ можно определить как $\operatorname{tg} \varphi$ (угла наклона линий зависимости).

Нетрудно заметить, что в выражении (34) свободный член a выражает мощность, затраченную на трение, а $v_m K$ — мощность на разрушение горной породы.

Факторы, характеризующие процесс бурения, находили по следующим известным формулам:

$$h = v_m / n; \quad (35)$$

$$M_{\text{тр}} = N_{\text{тр}} 975 / n; \quad (36)$$

$$M_{\text{разр}} = N_{\text{разр}} 975 / n; \quad (37)$$

$$\mu_{\text{тр}} = 2 M_{\text{тр}} / P d; \quad (38)$$

$$\mu_{\text{разр}} = 2 M_{\text{разр}} / P d; \quad (39)$$

$$\mu_{\text{бур}} = \mu_{\text{тр}} + \mu_{\text{разр}}; \quad (40)$$

$$\varepsilon = A_1 / V; \quad (41)$$

$$A_1 = N_{\text{общ}} t K_1; \quad (42)$$

$$N_{\text{общ}} = N_1 + (N_{\text{г.у}} \eta_1 - N_{\text{вр}} \eta_2); \quad (43)$$

$$V = v_m t S; \quad (44)$$

$$N_{\text{тр}} = N_{\text{общ}} - v_m \operatorname{tg} \varphi, \quad (45)$$

где h — проходка за один оборот, см; $M_{\text{тр}}$ и $M_{\text{разр}}$ — момент трения и момент сопротивления породы разрушению, Н·м; $N_{\text{тр}}$ и $N_{\text{разр}}$ — значения соответствующих мощностей, кВт; $\mu_{\text{тр}}$; $\mu_{\text{разр}}$; $\mu_{\text{бур}}$ — коэффициенты трения, сопротивления породы разрушению и сопротивления породы бурению; ε — энергоемкость; d — диаметр коронки, см, м; A_1 — вся работа с учетом сил трения, Дж; V — объем разрушения породы, см³; $N_{\text{общ}}$ — мощность на бурение, кВт; t — время на бурение, ч; K_1 — переводной коэффициент кВт·ч в Дж; N_1 — мощность на вращение бурового снаряда, кВт; $N_{\text{г.у}}$ — мощность на двигателе насоса при гидроударном бурении, кВт; $N_{\text{вр}}$ — мощность на двигателе насоса при вращательном бурении, кВт; η_1 и η_2 — к. п. д. двигателя в зависимости от его загрузки; S — площадь кольцевого забоя, см²; φ — угол наклона графика $N(v_m)$.

В табл. 11 и 12 приведены значения мощностей на бурение, порядок вычисления их составных частей и другие результаты

исследований, полученные при вращательном и вращательно-ударном способах.

Анализируя показатели каждого из видов бурения, можно отметить следующее.

Более высокие значения углубки за один оборот, полученные при вращательно-ударном бурении алмазными и твердосплавными коронками, по сравнению с вращательным бурением при одинаковых технологических режимах, убедительно свидетельствуют об интенсификации процесса разрушения горной породы вследствие наложения ударных импульсов.

С увеличением частоты вращения снаряда разница в величинах углубки за один оборот между вращательно-ударным и вращательным способами уменьшается, что говорит о снижении эффекта от наложения ударных импульсов. Это можно объяснить уменьшением числа ударов, приходящихся на один оборот коронки (частота ударов в эксперименте была постоянной и равна 2500 1/мин).

Несмотря на снижение проходки за один оборот с увеличением частоты вращения снаряда, механическая скорость бурения растет, что объясняется более высоким приростом частоты вращения.

Поэтому увеличение частоты вращения в исследуемых пределах целесообразно при вращательно-ударном бурении как твердосплавными, так и алмазными коронками.

С увеличением осевой нагрузки интенсивность роста углубки за один оборот у вращательного бурения выше, чем у вращательно-ударного, что свидетельствует о меньшем влиянии этого фактора.

Крутящий момент, необходимый на преодоление сил трения алмаза о породу, и коэффициент трения, полученный на одинаковых режимах, при вращательно-ударном и вращательном бурении одинаковы. Сила трения твердого сплава о породу и коэффициент трения при вращательно-ударном бурении несколько ниже, чем при вращательном.

Сравнительные значения момента и коэффициента трения, полученные на различных режимах бурения, говорят о том, что как при алмазном, так и при твердосплавном бурении их значения снижаются с увеличением частоты вращения. Значения момента на преодоление сопротивления породы разрушению и коэффициента сопротивления породы разрушению при одних и тех же режимах для вращательно-ударного бурения ниже, чем для вращательного.

Следовательно, наложение ударных импульсов на породоразрушающий инструмент способствует снижению сопротивления породы разрушению в результате усталостного разупрочнения породы под действием ударных нагрузок и увеличения в ней усталостных напряжений.

При увеличении осевой нагрузки момент и коэффициент на

Сравнительные показатели процесса бурения алмазными коронками

Частота вращения, об/мин	Осевая нагрузка P , Н	Вид бурения	Начальная механическая скорость v_m , см/мин	Углубка за один оборот h , см/об	Общая мощность $N_{\text{общ}}$, кВт	Мощность холостого хода станка $N_{\text{хол}}$, кВт	К. п. д. двигателя η	Мощность на бурение $N_{\text{бур}}$, кВт	K (tg ϕ)	Мощность на трение $N_{\text{тр}}$, кВт	Мощность на разрушение породы $N_{\text{разр}}$, кВт	Момент трения $M_{\text{тр}}$, Н·м	Момент сопротивления породы разрушению $M_{\text{разр}}$, Н·м	Коэффициент трения $\mu_{\text{тр}}$	Коэффициент сопротивления породы разрушению $\mu_{\text{разр}}$	Коэффициент сопротивления породы бурению $\mu_{\text{бур}}$	Удельная энергоёмкость с учетом мощности на привод $N_{\text{г.у.}} \cdot 10^3$, Дж/см ³
420	8800	Г.у	7,5	0,018	10,2	3,4	0,91	6,2	0,507	2,4	3,8	56	88	0,17	0,26	0,43	3,76
		Вр.	5,0	0,012	10,7	3,4	0,91	6,7	0,880	2,3	4,4	53	102	0,16	0,30	0,46	4,06
	13800	Г.у	9,2	0,022	11,8	3,9	0,91	7,2	0,520	2,4	4,8	56	111	0,11	0,21	0,32	3,38
		Вр.	7,0	0,016	13,2	3,9	0,91	8,5	0,842	2,6	5,9	60	137	0,11	0,25	0,36	3,38
625	8800	Г.у	8,7	0,014	12,2	3,6	0,91	7,8	0,597	2,6	5,2	41	81	0,12	0,23	0,35	3,79
		Вр.	6,2	0,010	12,8	3,6	0,91	8,4	0,935	2,6	5,8	41	91	0,12	0,28	0,39	4,11
	13800	Г.у	10,9	0,017	14,1	4,1	0,91	9,1	0,596	2,6	6,5	41	101	0,08	0,18	0,27	3,39
		Вр.	8,9	0,014	16,08	4,1	0,91	10,9	0,910	2,8	8,1	44	126	0,08	0,24	0,31	3,71
	8800	Г.у	10,2	0,010	16,0	3,9	0,91	11,0	0,813	2,7	8,3	26	79	0,07	0,24	0,32	4,2
		Вр.	8,2	0,08	16,8	3,9	0,91	11,0	1,110	2,7	9,1	26	87	0,07	0,25	0,34	4,36
1020	13800	Г.у	12,2	0,012	18,68	4,4	0,91	13,0	0,820	2,9	10,1	28	97	0,05	0,18	0,23	3,87
		Вр.	11,2	0,011	20,66	4,4	0,91	14,8	1,062	2,9	11,9	28	105	0,05	0,20	0,25	4,01

Примечание: Г.у — гидроударный; Вр — вращательный

Сравнительные показатели процесса разрушения при бурении твердосплавными коронками

Частота вращения, сб/мин	Осевая нагрузка Р, Н	Вид бурения	Начальная механическая скорость v_m , см/мин	Углубка за один оборот h , см/об	Мощность общая $N_{общ}$, кВт	Мощность холостого хо- да станка $N_{хол}$, кВт	К.п.д. двигателя η	Мощность на бурение $N_{бур}$, кВт	K (1g Φ)	Мощность на трение $N_{тр}$, кВт	Мощность на разруше- ние $N_{разр}$, кВт	Момент трения $M_{тр}$, Н·м	Момент сопротивления породы разрушению $M_{разр}$, Н·м	Коэффициент трения $\mu_{тр}$	Коэффициент сопротив- ления разрушению $\mu_{разр}$	Коэффициент сопротивления бурению $\mu_{бур}$	Удельная энергоем- кость с учетом мощности на привод $N_{г.у'}$ $\text{е} \cdot 10^3$, Дж/см ³
150	4100 8800 13800	Г.у.	4,05	0,027	3,55	1,8	0,85	1,52	0,26	0,48	1,04	31,22	67,6	0,18	0,22	0,40	14,56
		Вр.	2,20	0,015	3,80	1,8	0,85	1,73	0,55	0,53	1,20	34,45	78,00	0,20	0,26	0,46	9,83
		Г.у.	4,45	0,030	5,99	2,5	0,86	3,06	0,46	1,02	2,04	66,30	132,60	0,19	0,20	0,39	17,58
		Вр.	2,85	0,019	7,03	2,5	0,86	3,98	1,02	1,07	2,91	69,55	189,15	0,20	0,24	0,44	17,45
		Г.у.	5,15	0,034	8,14	3,5	0,87	4,11	0,55	1,29	2,82	83,85	183,30	0,16	0,19	0,36	17,74
		Вр.	3,15	0,021	8,77	3,5	0,87	4,66	0,99	1,53	3,13	99,45	203,45	0,19	0,21	0,40	17,92
300	4100 8800 13800	Г.у.	5,80	0,019	5,40	2,4	0,86	2,63	0,31	0,86	1,77	28,93	57,53	0,16	0,18	0,34	12,56
		Вр.	3,20	0,010	5,64	2,4	0,86	2,84	0,62	0,86	1,98	28,93	64,35	0,16	0,22	0,38	11,09
		Г.у.	6,95	0,023	8,81	3,1	0,87	5,86	0,50	1,61	3,45	52,33	112,12	0,15	0,17	0,33	14,85
		Вр.	5,10	0,017	9,17	3,1	0,87	5,37	0,74	1,61	3,76	52,33	122,20	0,15	0,21	0,36	13,16
		Г.у.	8,15	0,027	11,01	3,9	0,91	7,44	0,58	2,74	4,70	89,05	152,75	0,17	0,13	0,30	16,30
		Вр.	6,75	0,022	12,70	3,9	0,91	8,07	0,77	2,90	5,17	94,25	168,03	0,18	0,15	0,33	14,94
450	4100 8800 13800	Г.у.	7,20	0,16	6,94	3,2	0,87	3,31	0,30	1,12	2,19	24,27	47,45	0,14	0,14	0,28	11,30
		Вр.	5,10	0,10	7,31	3,2	0,87	3,64	0,48	1,21	2,43	26,22	52,65	0,15	0,16	0,31	8,92
		Г.у.	9,63	0,20	10,62	4,1	0,91	5,98	0,42	1,90	4,08	41,16	88,40	0,12	0,13	0,26	11,9
		Вр.	7,60	0,17	11,68	4,1	0,91	6,95	0,62	2,25	4,70	48,75	101,83	0,14	0,16	0,30	11,4
		Г.у.	10,8	0,24	15,37	5,3	0,91	9,24	0,52	3,60	5,64	78,00	122,20	0,15	0,09	0,24	14,28
		Вр.	9,15	0,20	16,69	5,3	0,91	10,45	0,72	3,86	6,59	83,63	142,78	0,16	0,12	0,28	14,28

Примечание. Обозначения те же, что в табл. 11.

преодоление породы разрушению возрастают, а при повышении частоты вращения снижаются, что можно объяснить увеличением и уменьшением углубки за один оборот.

Полученные авторами данной работы значения коэффициента сопротивления породы бурению согласуются с данными, определенными другими исследователями [8, 9, 11, 22, 25].

Несмотря на дополнительные затраты мощности на привод гидроударной машины, значения общей энергоемкости вращательно-ударного бурения алмазными коронками более низкие, чем вращательного. Энергоемкость вращательно-ударного бурения твердосплавными коронками находится на уровне с вращательным бурением.

С увеличением осевой нагрузки показатели энергоемкости снижаются, а с увеличением частоты вращения повышаются. Следовательно, целесообразнее увеличивать осевые нагрузки, а не частоту вращения снаряда.

Также надо отметить, что с ростом частоты вращения снаряда как энергоемкость, так и проходка за один оборот сравниваемых способов сближаются, что, как указывалось выше, свидетельствует о снижении эффекта наложения ударных импульсов, генерируемых гидроударной машиной с постоянной частотой, вследствие уменьшения числа ударов, приходящихся на один оборот коронки.

Таким образом, еще раз подтверждается сделанный ранее вывод, что для полной реализации преимуществ вращательно-ударного бурения необходимо создать специальные технические средства — породоразрушающий инструмент и гидроударные машины с максимально возможной частотой характеристик и оптимальными значениями энергии ударов, установленными исходя из прочностных свойств горных пород.

РАЦИОНАЛЬНЫЕ ЗНАЧЕНИЯ ЭНЕРГИИ УДАРА В ПРОЦЕССЕ БУРЕНИЯ

В опытах бурили осадочные и магматические породы VI—X категорий твердосплавными микрорезцовыми и однослойными алмазными коронками 07АЗД30К40. Выбор самозатачивающихся коронок обусловлен тем, что их износ в течение рейса практически не влияет на показатели бурения.

Однослойные алмазные коронки выбрали, исходя из предположения что вследствие большей величины алмазов они менее устойчивы к ударным нагрузкам.

Для оценки процесса бурения в качестве основного критерия оптимизации была принята стоимость одного метра, приведенная к определенной глубине. В качестве исходных данных для определения стоимости приняли механическую скорость, проходку на коронку и проходку за рейс. Энергия ударника изменялась от 5,0 до 50,0 Дж в результате изменения расхода

промывочной жидкости от 80 до 300 л/мин и хода клапана макета гидроударной машины.

Остальные параметры выдерживали постоянными:

Осевая нагрузка, Н	10,000
Частота вращения снаряда, об/мин	450
Расход очистного агента, л/мин	50—80
	(остальная жидкость сбрасывалась после гидроударника)
Частота ударных импульсов, 1/мин	2300—2500

Использование одновременно нескольких критериев оптимизации позволило дать достаточно детальную оценку методу бурения по следующим позициям:

- 1) интенсивность процесса разрушения — по механической скорости;
- 2) стойкость породоразрушающего инструмента — по проходке на коронку;
- 3) эффективность метода — по стоимости одного метра бурения.

Стоимость 1 м бурения определяли по выражению

$$A = C/P + B/l_{\text{кор}}, \quad (46)$$

где C — стоимость станко-смены без учета истирающихся деталей, руб.; P — производительность за станко-смену, м; B — стоимость коронки, руб.; $l_{\text{кор}}$ — проходка на коронку, м.

Если

$$P = T/(1/v_m + t_1/l_p), \quad (47)$$

то

$$A = \frac{C}{T} (1/v_m + t_1/l_p) + B/l_{\text{кор}}, \quad (48)$$

где $T = 7$ ч — общее время станко-смены; t_1 — затраты времени на операции, сопутствующие бурению.

На заданной условно глубине бурения (700 м) стоимость станко-смены C (без учета затрат на истирающиеся) и время на вспомогательные работы t_1 будут постоянными и, исходя из СУСН и ЕНВ, равными соответственно 39,0 руб. и 1,984 ч. Переменные факторы, определяющие стоимость бурения на данной глубине, — механическая скорость и проходка на коронку. Проходку за рейс принимали равной проходке на коронку. Показатели скорости и проходки использовали для расчетов после статистической обработки результатов не менее чем по пяти опытам на каждом значении энергии удара.

Критерием окончания рейса служило падение механической скорости бурения до 1/3 от начальной.

При обработке материалов коэффициент вариации составил 27—35, а относительная погрешность — не более 17%.

Для проведения экспериментальных работ был спроектиро-

ван и изготовлен специальный стенд СВУБ-3 с гидроприводом, позволяющий плавно регулировать параметры режима бурения в следующих пределах:

Осевая нагрузка, Н	0—25 000
Частота вращения шпинделя, об/мин	30—1500
Крутящий момент, Н·м	400
Скорость подачи шпинделя, см/мин	30

Стенд оснащен электроизмерительными приборами МКН-1, ОМ-40, ЭМР-2, ИСБ, МИД-1, а также пятиканальным регистрирующим прибором, записывающим значения параметров на общую диаграммную ленту.

Результаты исследований влияния ударных импульсов на механическую скорость бурения и проходку на твердосплавные коронки приведены в табл. 13 и на рис. 10.

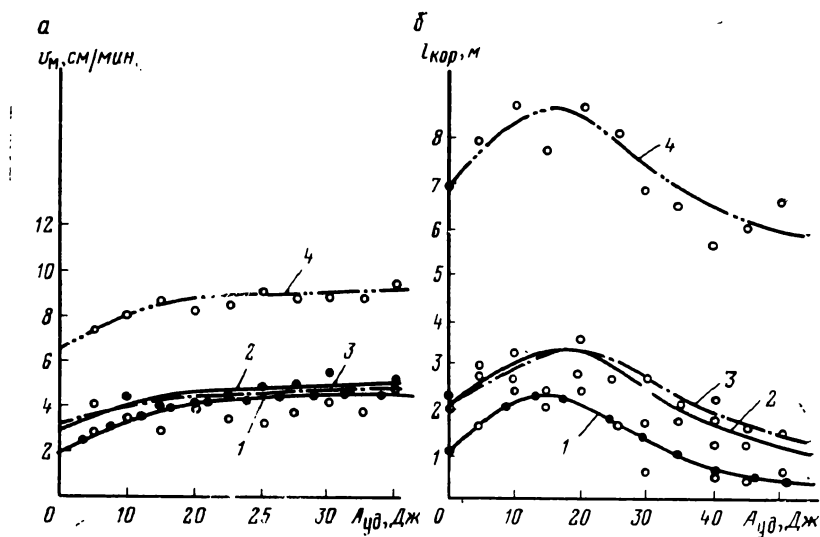


Рис. 10. Графики зависимости показателей бурения твердосплавной коронкой СА от энергии единичного удара:

а — механическая скорость v_m ; б — проходка на коронку $l_{кор}$;
1 — гранит; 2 — габбро; 3 — лабрадорит; 4 — известняк

Анализ графиков показывает, что кривые зависимости механической скорости бурения и проходки на коронку от величины энергии ударных импульсов аналогичны для всех типов пород, за исключением гранитов, и свидетельствуют о следующих зависимостях:

1) левые ветви кривых проходок на коронку и механической скорости — о резком увеличении интенсивности разрушения горных пород с увеличением энергии ударных импульсов от 0 до 10—15 Дж;

Показатели бурения твердосплавными коронками диаметром 59 мм

Порода	Объединенный показатель ρ_m	Категория породы	Показатели бурения при энергии ударов, Дж															
			0		5		10		15		20		25		30		50	
			v_m , см/мин	$l_{кор}$, см	v_m , см/мин	$l_{кор}$, см	v_m , см/мин	$l_{кор}$, см	v_m , см/мин	$l_{кор}$, см	v_m , см/мин	$l_{кор}$, см	v_m , см/мин	$l_{кор}$, см	v_m , см/мин	$l_{кор}$, см	v_m , см/мин	$l_{кор}$, см
Гранит	28,2	IX	2,9	25	3,8	20	3,2	23	4,1	10	3,4	15	2,9	16	3,1	20	2,1	11
Габбро	24,0	IX	9,2	110	9,5	190	12,2	170	10,8	100	12,0	50	12,1	40	12,8	45	13,7	30
Лабрадорит	15,2	VII	10,8	300	13,2	370	13,5	420	14,0	330	14,3	310	15,5	210	16,9	200	17,0	120
Известняк	8,0	VI	12,5	660	13,7	700	16,2	850	15,1	840	17,0	610	17,4	580	17,5	640	18,8	560
Песчаник	11,6	VII	9,9	610	11,5	680	13,2	730	13,8	720	14,3	650	14,7	470	15,1	420	15,6	360

Таблица 14

Стоимость 1 м при бурении твердосплавными коронками диаметром 59 мм

Порода	ρ_m	Категория породы	Стоимость 1 м в руб. при энергии ударов в Дж							
			0	5	10	15	20	25	30	50
Гранит	28,2	IX	63,4	77,8	74,2	63,0	129,7	97,3	98,3	141,4
Габбро	24,0	IX	17,6	16,5	15,9	18,4	19,90	19,7	10,1	50,8
Лабрадорит	15,2	VII	5,9	4,8	3,8	5,9	5,5	7,8	8,1	13,1
Известняк	8,0	VI	3,0	2,8	2,3	2,9	3,0	2,9	2,9	3,2
Песчаник	11,6	VII	5,2	4,6	3,5	5,4	5,7	7,2	7,8	11,9

2) замедление роста механической скорости в пределах 7—15 Дж — об оптимизации процесса разрушения в этом интервале энергий, что вполне согласуется с результатами, полученными при разрушении пород единичным индентором;

3) резкое падение правых ветвей кривых проходок на коронку при энергии ударов свыше 10—15 Дж — о быстром износе твердосплавных вставок от действия ударных нагрузок;

4) с увеличением крепости пород оптимальные значения величины энергии ударника по проходке на коронку смещаются в левую сторону (в сторону меньших значений по энергии), а при бурении пород со значениями $\rho_m > 25$ (выше VIII категории) левая часть кривой вообще отсутствует, что тоже связано с увеличением износа резцов;

5) меньшие величины оптимальных значений энергии ударника при проходке на коронку по сравнению с оптимумом по механической скорости — о целесообразности оснащения коронок для вращательно-ударного бурения пород средней крепости более стойкими режущими элементами, например вставками из синтетических материалов АСПК, СВС и др.

В связи с тем что оптимальные значения механической скорости и проходки на коронку не совпадают, процесс оценивали по критерию стоимости бурения.

В табл. 14 представлены результаты расчета стоимости 1 м бурения, выполненные по данным табл. 13. Из данных табл. 14 следует, что для твердосплавных коронок диаметром 59 мм оптимальные значения энергии удара составляют 5—10 Дж.

Результаты экспериментальных работ по исследованию рациональных значений ударных импульсов на твердосплавные коронки диаметром 59 мм подтвердили рекомендации по оптимальной энергии единичного удара, полученные при разрушении породы единичным резцом. Расхождения не превышают 10—15%. Поэтому для коронок диаметром 76 мм значение оптимальной энергии ударника также взято по данным, полученным при разрушении породы единичным резцом.

Таким образом, рациональные значения энергии ударника для вращательно-ударного бурения твердосплавными коронками следующие:

Диаметр, мм	76	59
А, Дж	15	10

Результаты исследований влияний ударных импульсов на показатели бурения алмазными коронками диаметром 59 мм приведены в табл. 15, а графики зависимости — на рис. 11.

Как следует из графиков, зависимости изменения механической скорости и проходки на коронку аналогичны зависимостям, полученным при твердосплавном бурении. Однако кривые проходки на коронку имеют оптимум при больших значениях энергии ударника (15—20 Дж). Рост механической скорости также замедляется в пределах энергии 15—20 Дж, что свиде-

тествует об оптимизации процесса разрушения крепких пород типа гранита и кварцита в этом интервале энергий.

С увеличением крепости пород оптимальные значения величины энергии ударника по проходке на коронку, как и при бурении твердыми сплавами, смещаются в сторону меньших значений энергии. Резкое падение правых ветвей кривых проходок

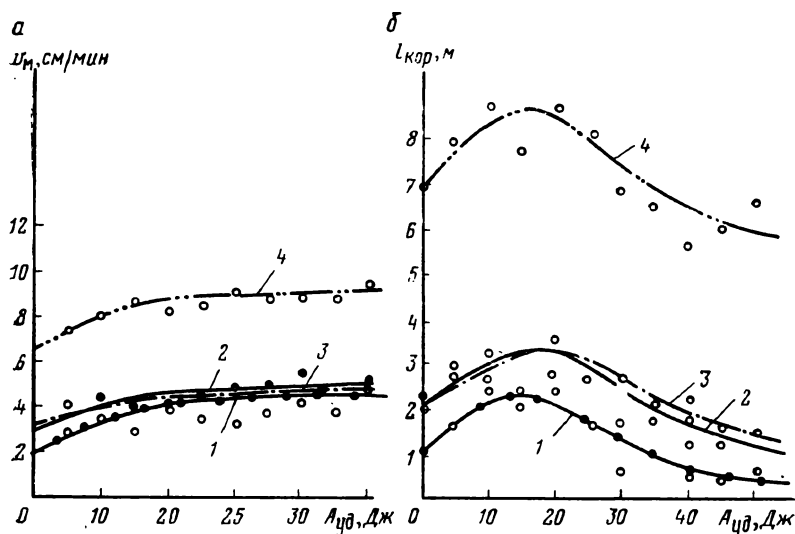


Рис. 11. Графики зависимости показателей бурения алмазной коронкой 01АЗ от энергии единичного удара:

а — механическая скорость v_m ; б — проходка на коронку $l_{кор}$; 1 — кварцит; 2 — гранит; 3 — лабрадорит; 4 — песчаник

Показатели бурения алмазными

Порода	ρ_m	Категория пород	Показатели бурения при							
			0		5		10		15	
			v_m , см/мин	$l_{кор}$, см	v_m , см/мин	$l_{кор}$, см	v_m , см/мин	$l_{кор}$, см	v_m , см/мин	$l_{кор}$, см
Кварцит	39,0	X	2,1	110	2,8	140	3,4	220	2,9	180
Гранит	28,2	IX	3,1	210	4,0	280	4,4	310	4,0	260
Габбро	24,0	IX	5,1	340	5,9	460	6,2	370	5,9	440
Лабрадорит	15,2	VII	3,3	210	3,4	260	3,9	240	4,4	210
Песчаник	11,6	VII	6,9	710	7,3	800	8,0	860	8,6	760

на коронку показывает, что произошел быстрый износ алмазов от действия ударных нагрузок.

Осмотр алмазных коронок под микроскопом выявил, что износ алмазов носит фрагментарный характер — на поверхности алмазов под микроскопом видны следы отрыва микроскопических частиц; с увеличением крепости пород и энергии ударника интенсивность износа увеличивается, что и приводит к снижению проходки на коронку.

По критерию стоимости 1 м бурения (табл. 16) рациональная величина энергии ударника для алмазных коронок диаметром 59 мм составляет 15 Дж, что соответствует значениям, полученным при исследовании процесса разрушения единичным алмазом.

На основании тех же данных для коронок диаметром 76 мм в качестве оптимальной величины энергии ударника было принято значение 20 Дж.

СУЩНОСТЬ ВРАЩАТЕЛЬНО-УДАРНОГО БУРЕНИЯ И ЕГО ОСОБЕННОСТИ

Проведенные в СКБ ВПО «Союзгеотехника» исследования по разработке оптимальных параметров ударных систем для ударно-вращательного и вращательно-ударного бурения, а также исследования эффективности методов разрушения горных пород с различными типами породоразрушающих наконечников позволяют дать четкое их определение и классифицировать характеризующие их основные параметры.

Ударно-вращательный и вращательно-ударный способы бурения скважин представляют собой комбинацию двух основных способов механического разрушения горных пород — вра-

Таблица 15

коронками диаметром 59 мм

энергии ударов, Дж

20		25		30		35		40		45		50	
v_m , см/мин	$l_{кор}$, см	v_m , см/мин	$l_{кор}$, см	v_m , см/мин	$l_{кор}$, см	v_m , см/мин	$l_{кор}$, см	v_m , см/мин	$l_{кор}$, см	v_m , см/мин	$l_{кор}$, см	v_m , см/мин	$l_{кор}$, см
3,8	230	3,4	140	3,1	40	3,7	90	4,2	50	3,7	30	4,8	60
4,0	340	4,4	250	4,8	150	4,9	200	5,5	110	4,4	130	4,9	160
7,4	370	7,0	390	7,4	260	6,9	160	7,7	230	7,9	150	7,6	150
4,0	230	4,1	260	4,7	290	4,6	160	4,6	200	4,5	160	4,9	160
8,1	820	8,5	790	9,0	690	8,9	650	8,8	540	8,7	600	9,4	670

щательного и ударного. Каждый из этих способов характеризует конкретный метод разрушения горных пород, параметры удара и режима бурения и конструктивные параметры породоразрушающего инструмента, главные из которых:

Стоимость 1 м при бурении алмазными коронками

Порода	ρ_m	Категория породы	Стоимость 1 м в руб. при энергии						
			0	5	10	15	20	25	30
Кварцит	39,0	X	50,9	39,9	30,0	24,7	31,6	39,3	130,7
Гранит	28,2	IX	27,4	20,6	22,2	16,0	22,0	22,6	36,9
Габбро	24,0	IX	16,9	12,7	15,5	13,2	15,1	14,4	20,9
Лабрадорит	15,2	VII	24,5	22,4	23,7	26,4	24,5	21,8	19,5
Песчаник	11,6	VII	8,5	7,7	7,0	7,7	4,9	7,5	8,3

1) преобладающий метод разрушения породы; 2) энергия единичного удара; 3) частота ударов; 4) осевая нагрузка на забой; 5) частота вращения снаряда; 6) геометрическая форма резцов породоразрушающего инструмента.

Ударно-вращательный способ бурения — это метод разрушения забоя ударными нагрузками, под действием которых происходит скалывание или дробление породы. Образующиеся выступы срезаются инструментом при поворотах между ударами. Способ характеризуется высокими значениями энергии единичного удара (40 Дж и более), достаточными для эффективного разрушения пород средней и высокой крепости, и сочетанием частоты ударов и частоты вращения снаряда, обеспечивающим создание расстояний между насечками, в зависимости от крепости пород, 3—15 мм. Расстояние между выступами также может быть срезано при повороте породоразрушающего инструмента между ударами.

Осевая нагрузка при этом способе носит вспомогательный характер и должна обеспечивать не внедрение резцов в породу, а постоянный плотный контакт инструмента с забоем. Породоразрушающий инструмент армируют крупными вставками твердого сплава с углом заострения при вершине 90—110°, с отрицательным передним углом 30—45°. При этом способе преобладает ударное разрушение горных пород, а вращательное разрушение носит вспомогательный характер.

Вращательно-ударный способ бурения — это метод разрушения пород забоя, главным образом, вследствие суммарного воздействия статических, постоянно действующих осевой и окружной нагрузок, в результате которых происходит резание, смятие, раздавливание или истирание породы. Также периодически действует динамическая нагрузка, обеспечивающая разупрочнение породы и создание в ней дополнительных усталостных напряжений.

Способ характеризуется высокими осевыми нагрузками и частотами вращения снаряда (так как они создают основные условия для разрушения породы) и невысокими значениями энергии единичного удара (вставки породоразрушающего инструмента должны иметь прямые или положительные углы резания и, следовательно, не могут выдерживать больших ударных нагрузок). В связи с большой частотой вращения, частота ударов также должна быть велика. При этом способе вращательное разрушение основное, а ударное — вспомогательное.

Таблица 16
диаметром 59 мм

ударов в Дж				
35	40	45	50	
59,3	104,3	172,7	87,1	
27,4	48,1	41,4	33,8	
33,3	23,4	35,2	35,3	
34,0	27,6	34,0	33,8	
8,8	10,5	9,5	8,5	

РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИЙ ГИДРОУДАРНЫХ МАШИН ДЛЯ ВРАЩАТЕЛЬНО-УДАРНОГО БУРЕНИЯ

ИССЛЕДОВАНИЯ ВОЗМОЖНОСТИ ПОВЫШЕНИЯ ЧАСТОТЫ УДАРОВ

Исследования возможности увеличения частоты ударов проводили при съемках рабочих характеристик гидроударников большого диаметра Г-3А и ГМД-2.

Анализ работы машины Г-3А при различных параметрах регулировки показывает, что частота ударов возрастает с увеличением количества промывочной жидкости (табл. 17), с уменьшением хода клапана (рис. 12), свободного хода бойка, с возрастанием натяга и жесткости пружин клапана и бойка (рис. 13), а также с уменьшением массы бойка.

Таблица 17
Зависимость частоты ударов гидроударника Г-3А от расхода жидкости

Количество рабочей жидкости, л/мин	Энергия единичного удара, Дж	Частота ударов, 1/мин	Перепад давления в гидроударнике, МПа
130	0	700	0,5
150	9,7	820	0,7
200	45	1070	0,9
240	63	1100	1,1
250	66	1150	1,1
300	76	1210	1,4
320	81	1240	1,7

Примечание. Параметры регулировки гидроударника:

Ход клапана, мм	15
Свободный ход, мм	5
Натяг пружины бойка, мм	30
Натяг пружины клапана, мм	7

Из данных, приведенных в табл. 17 и на рис. 12, 13, вытекает, что в исследуемых пределах частота ударов гидроударника прямого действия изменяется от 700 до 1400 1/мин.

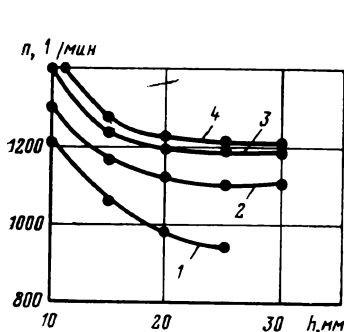


Рис. 12. График зависимости частоты ударов машины Г-ЗА от хода клапана при различных расходах жидкости:
1 — 200 л/мин; 2 — 250 л/мин; 3 — 300 л/мин; 4 — 350 л/мин

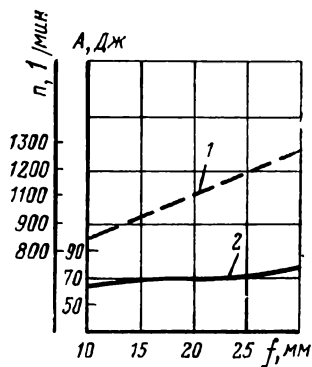


Рис. 13. График зависимости частоты (1) и энергии (2) ударов гидроударника Г-ЗА от натяга пружины

Из данных, приведенных в табл. 18 и на рис. 14, видно, что частота ударов у машин двойного действия увеличивается с уменьшением массы бойка, хода клапана и увеличением расхода промывочной жидкости и колеблется в пределах от 1200 до 2000 1/мин.

Таблица 18

Зависимость частоты ударов гидроударника ГМД-2 от расхода промывочной жидкости

Количество рабочей жидкости, л/мин	Энергия единичного удара, Дж	Частота ударов, 1/мин	Перепад давления в гидроударнике, МПа
250	73	1660	2,8
195	60	1360	2,0
160	41	1300	1,8
150	35	1150	1,7
210	70	1450	2,4
230	76	1580	2,5
320	100	2000	3,5

Примечание. Параметры регулировки гидроударника:

Ход бойка, мм	16
Ход нижнего клапана, мм	10,5
Ход верхнего клапана, мм	10
Диаметр верхнего и нижнего цилиндров, мм	50
Масса бойка, кг	30

Таким образом, исследования показали, что у серийных гидроударных машин прямого и двойного действия частота ударов вследствие изменения массы бойка, расхода промывочной

жидкости и регулировочных параметров может быть доведена до 1500—2000 1/мин. Вместе с тем для увеличения частоты ударов у гидроударников большого диаметра необходим расход промывочной жидкости около 300 л/мин.

Исследования выявили также основные требования, которыми следует руководствоваться при создании высокочастотных гидроударных машин малого диаметра: легкий боек, минимально возможные ходы клапанов и свободный ход, жесткие пружины клапана и бойка или их большой натяг.

Кроме того, при создании машин необходимо учитывать, что при бурении пород средней крепости эксплуатировать их будут на глинистом растворе. Поэтому конструкция их должна быть предельно простой. Особенно простым, с целью обеспечения стойкости и износоустойчивости, должен быть наиболее ответственный узел гидроударников (узел распределения и отбора мощности), роль которого в существующих гидроударниках выполняет клапан.

В то же время клапаны у гидроударных машин прямого действия типа 1-3А и двойного действия типа ГМД-2 с трудом обеспечивают минимально необходимый ресурс работы 60—70 ч при бурении с промывкой водой.

Клапаны и другие элементы малых диаметров для работы на глинистом растворе изготовить невозможно, так как нельзя обеспечить нужные параметры удара и необходимую износоустойчивость.

Поэтому для проведения исследований с использованием приведенных выше рекомендаций были созданы оригинальные схемы гидроударников прямого и двойного действия с простейшими элементами распределения и отбора мощности:

- 1) двойного действия диффузорного типа с распределением жидкости шарами-дебалансами или профилированным бойком;
- 2) прямого действия с оригинальной конструкцией плавающего клапана.

Кроме того, к исследованию была принята известная схема гидроударника двойного действия клапанно-дростельного типа

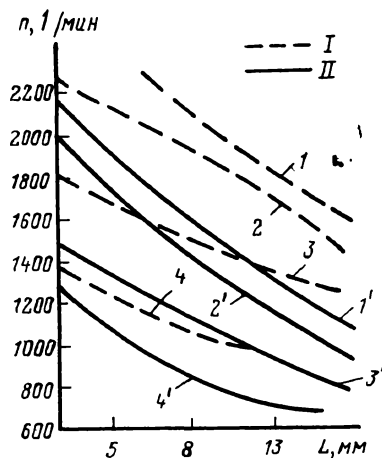


Рис. 14. График зависимости частоты ударов машины ГМД-2 от хода клапана при различных массе и расходе жидкости (диаметр 45 мм):

I — 30 кг; *II* — 50 кг; *1, 1'* — 300 л/мин; *2, 2'* — 250 л/мин; *3, 3'* — 200 л/мин; *4, 4'* — 150 л/мин

(КУВ-22), как наиболее простая из существующих по конструкции.

Для выявления наиболее рациональной конструкции высокочастотного гидроударника предложенные схемы исследовали по следующей методике:

- а) расчет возможных параметров энергии и частоты ударов;
- б) разработка макетов с учетом проведенных расчетов;
- в) исследование рабочего процесса макетов с целью проверки расчетных данных энергии и частоты ударов;
- г) разработка рекомендаций по конструированию высокочастотных гидроударных машин.

Рассмотрим основные схемы гидроударных машин.

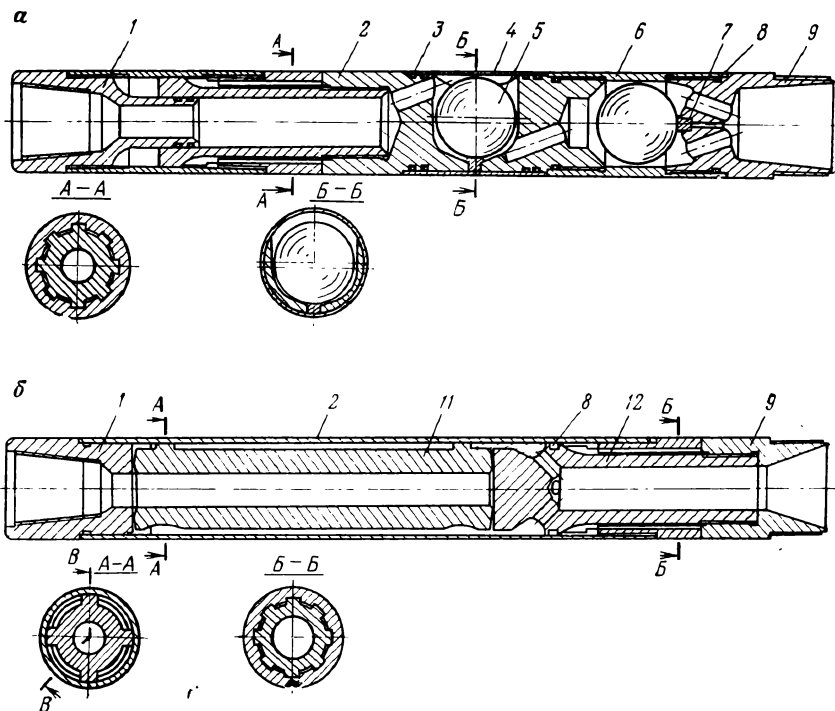


Рис. 15. Гидроударные машины двойного действия диффузорного типа:

а — с шаровым бойком; б — с профилированным бойком: 1 — переходник верхний и шлицевой разъем; 2, 6 — корпуса; 3, 8 — уплотнения; 4 — патрубок; 5 — шар-дебаланс; 7 — штифты; 9 — переходник нижний; 10 — переходник верхний; 11 — профилированный боек; 12 — шлицевой разъем

В схеме на рис. 15,а роль распределительного устройства выполняют один или два шара-дебаланса. Промывочная жидкость, проходя по каналам корпуса 2 и переходника 9, обтекает шар или шары и создает между ними и соответствующими внутренними поверхностями корпуса зоны диффузионного раз-

режения, перемещающиеся перед шарами, вследствие чего они перекатываются и наносят скользящие удары по корпусу. Причем в схеме с двумя шарами верхний шар осуществляет удары в вертикальной плоскости относительно своего штифта, а нижний — в горизонтальной.

В схеме на рис. 15,б распределение жидкости осуществляет непосредственно боек. Макет состоит из бойка с центральным отверстием и двумя профилированными ударными торцами. Боек помещен в корпусе между переходником и штоком разьема, с рабочими торцами которых он образует верхние и нижние кольцевые диффузоры.

В схеме на рис. 16 распределение жидкости осуществляется плавающим клапаном, представляющим собой втулку, установленную непосредственно на пружину.

Отличительные особенности этой схемы — простота конструкции, небольшое число соударяющихся деталей за счет создания плавающего клапана, который при ходе вверх тормозится не упором, а жидкостью, а также возможность получения высокого числа ударов в результате уменьшения величины хода и исключения отскоков в цикле, что неизбежно при жестком клапане.

На рис. 17 представлена схема гидроударника двойного действия клапанно-дроссельного типа, выполненного по типу гидроударника КУВ-22 конструкции Ф. Ф. Воскресенского и усовершенствованного КАЗИМСом [5].

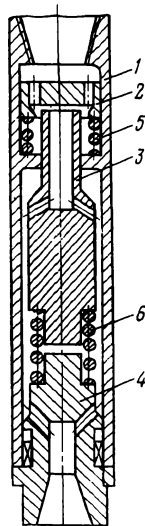


Рис. 16. Гидроударник прямого действия:

1 — корпус; 2 — клапан; 3 — боек; 4 — наковальня; 5 — пружина клапана; 6 — пружина бойка

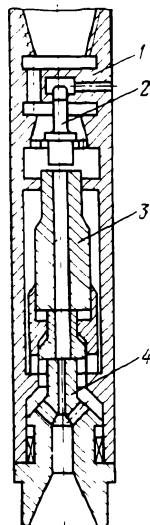


Рис. 17. Гидроударник двойного действия клапанно-дроссельного типа:

1 — корпус; 2 — клапан; 3 — боек; 4 — наковальня

АНАЛИТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ МАКЕТОВ

Расчеты макетов гидроударных машин прямого и двойного действия проводили по методике, разработанной совместно Днепропетровским горным институтом им. Артема, Казахским институтом минерального сырья и Специальным конструкторским бюро Мингео СССР. При разработке методики использовали теоретические и экспериментальные работы, проведенные

Е. Ф. Эпштейном, В. Б. Соколинским, В. Г. Ясовым, А. М. Ашавским, В. В. Цаем, Г. И. Неудачиным, Л. Э. Графом, Б. Е. Скобочкиным и Т. И. Чекаевой, Л. Г. Шолоховым, И. Н. Буяновским и другими исследователями.

Макеты гидроударных машин диффузорного типа рассчитывали по методике, разработанной в СКБ ВПО «Союзгеотехника» [15].

Расчеты диффузорных гидроударников и машин прямого действия проведены для корпуса диаметром 73 мм (диаметр скважины 76 мм) и расхода очистного агента 150 л/мин, определенного как максимально возможного при бурении на глинистом растворе.

Исходные данные для расчетов выбирали исходя из изложенных выше рекомендаций, сводящихся к уменьшению массы, рабочего и свободного ходов бойка и увеличению жесткости пружин. Рабочие площади поршней и клапанов выбирали из конструктивных возможностей размещения их в диаметре корпуса 73 мм с учетом обеспечения необходимых зазоров для прохода жидкости и износоустойчивости при работе в абразивной среде.

Исходные данные для расчета диффузорного гидроударника с профилированным поршнем-бойком следующие:

Площадь проходного сечения трубопровода, см ²	6,16
Масса бойка, кг	2; 4; 6
Рабочая площадь, см ² :	
бойка	22,5
щели	13
Средняя длина кольцевой щели, см ²	9,4
Ход бойка, мм	1,3

Исходные данные для расчета гидроударников прямого действия с плавающей втулкой-клапаном и двойного действия клапанно-дроссельного типа приведены в табл. 19.

Таблица 19

Исходные данные для расчета гидроударников прямого и двойного действия

Тип гидроударника	Площадь проходного сечения трубопровода, см ²	Масса бойка, кг	Рабочая площадь поршня, см ²		Площадь дросселя, см ²	Ход клапана, мм	Свободный ход, мм
			верхнего	нижнего			
Прямого действия с плавающей втулкой-клапаном	6,16	6; 8; 10	8,05	—	—	10	3
Двойного действия дроссельный	5,16	6; 8	9,6	20,4	1,01	7	1,5

Результаты расчетов сведены в табл. 20.

Расчеты показали, что обеспечить установленные параметры энергии и частоты ударов могут гидроударники, разработанные

по схеме прямого действия с плавающим клапаном и двойного действия клапанно-дроссельного типа. Гидроударник диффузорного типа хотя и обеспечивает высокую частоту (до 140 Гц), но обладает недостаточной энергией удара.

Т а б л и ц а 20

Результаты расчетов гидроударных машин

Тип гидроударника	Масса бойка, кг	Ударная скорость, м/с	Энергия удара, Дж	Время цикла, с	Частота ударов, Гц	Мощность удара, Дж/с
Двойного действия диффузорный	2	0,75	0,52	0,007	140	740
	4	0,54	0,58	0,0098	102	590
	6	0,45	0,61	0,01221	83	504
Двойного действия дроссельный	6	2,04	12,4	0,024	42	5150
	8	2,06	17,0	0,029	34	5780
	10	2,17	23,5	0,038	26	6120
Прямого действия с плавающей втулкой-клапаном	6	1,810	9,8	0,0205	49	4800
	8	1,865	13,9	0,0234	43	5950
	10	1,860	17,3	0,0304	33	5650

Расчеты также подтвердили выявленные зависимости влияния массы, рабочего и свободного ходов ударника (при расчете они были взяты минимальными) на частоту ударов. Для всех типов машин наибольшая частота ударов получена при наименьшей массе бойка. Уменьшение хода клапана и свободного хода бойка нецелесообразно, так как снижение хода клапана приведет к падению энергии удара, а уменьшение свободного хода (менее 3,0 мм у машин прямого действия и 1,5 мм у машин двойного действия) — к трудностям регулировки их на производстве, возможностям подпрессовки и т. д.

В связи с этим при проектировании макетов диффузорного гидроударника массу бойка принимали равной 2 кг; у гидроударников прямого и двойного действия — 6 кг, а ходы клапана и бойка — минимальные.

Несмотря на то, что согласно расчету диффузорный гидроударник не обеспечивает энергию удара, определенную выше как рациональную, решили провести макетирование по всем трем схемам, так как результаты расчетов по методике отличаются от фактических данных на 15—25%, а предложенная методика расчета машин диффузорного типа не была апробирована и, следовательно, нуждалась в экспериментальной проверке.

Поэтому для окончательного выбора схемы высокочастотного гидроударника с целью дальнейшей конструкторской разработки и промышленного внедрения необходимо было изготовить макеты машин и исследовать их рабочие процессы, а также про-

вести сравнительное бурение в стендовых условиях для определения показателей бурения и надежности.

СТЕНДОВЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИСПЫТАНИЯ МАКЕТОВ

Основные цели стендовых исследований и испытаний макетов:

1) проверка принципиальной работоспособности; 2) исследование оптимальных технических параметров; 3) определение показателей бурения; 4) определение показателей надежности; 5) анализ результатов и выбор схемы высокочастотной гидроударной машины для дальнейшей разработки.

При исследовании рабочего процесса параметры расхода жидкости и регулировки гидроударников изменялись в соответствии с данными, приведенными в табл. 21.

Таблица 21

Переменные параметры, принятые при съемке макетов гидроударников

Тип гидроударников	Расход жидкости, л/мин	Масса бойка, кг	Ход клапана, мм	Ход бойка, мм	Свободный ход бойка, мм	Площадь дроссельных отверстий, см ²
Диффузорный	100; 120; 150; 180; 240	2, 4, 6	—	0,8; 1,3; 1,8	—	—
Клапанный	120; 150; 180	6	5; 8; 11	—	1,5; 2,5; 4,0	0,91; 1,01; 1,13; 1,27
С плавающим клапаном	60; 120; 150; 180	8	5; 8; 11	—	3,5; 4,0; 5,0	2,5; 3,5; 6,5

ДИФфузорный ГИДРОУДАРНИК

Визуально установили, что макет работает стабильно и бесперебойно при следующих параметрах:

Расход жидкости, л/мин	100÷240
Ход бойка, мм	0,8÷1,8
Масса бойка, кг	2, 4, 6

При уменьшении расхода жидкости до 100 л/мин и увеличении хода бойка до 2 мм и более гидроударник прекращает работать.

Результаты съемки рабочего процесса, полученные путем обработки 60 осциллограмм, приведены в табл. 22.

Рассмотрим влияние каждого из исследуемых параметров на характеристику макета.

Влияние массы бойка. Из данных табл. 22 видно, что, как и по расчетным данным, частота ударов с уменьшением массы бойка возрастает. Так, при ходе бойка 1,3 мм и расходе 150 л/мин частота ударов возрастает при бойке массой 6 кг до 83,5 Гц, при бойке массой 2 кг — до 130 Гц. В то же время съемки показали, что, несмотря на максимальную частоту ударов

при массе бойка 2 кг, для проектирования макета следует брать массу бойка, равную 4 кг, так как в противном случае макет работает в узких пределах регулировки хода и расхода промывочной жидкости.

Как видно из табл. 22, при ходе бойка 0,8 мм и расходе 180 л/мин, а также при ходе 1,8 мм и расходе 120 л/мин гидроударник работает нестабильно.

Из графика зависимости ударной мощности от массы бойка при расходе 150 л/мин и ходах бойка 0,8; 1,3 и 1,8 мм видно, что масса бойка 4 кг оптимальна не только по частоте ударов, но и по ударной мощности (рис. 18).

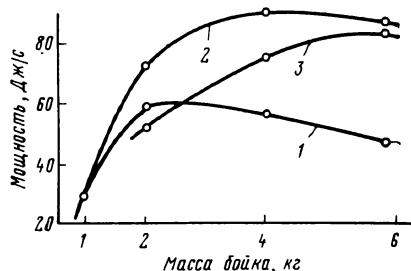


Рис. 18. График зависимости ударной мощности от массы бойка диффузорного гидроударника при расходе промывочного раствора 150 л/мин и при различных ходах бойка:

1 — 0,8 мм; 2 — 1,3 мм; 3 — 1,8 мм

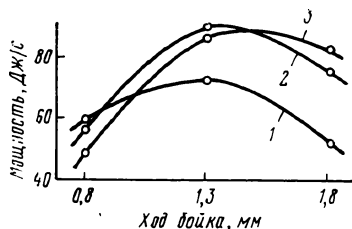


Рис. 19. График зависимости ударной мощности от хода бойка диффузорного гидроударника при расходе промывочной жидкости 150 л/мин и при различных массах бойка:

1 — 2 кг; 2 — 4 кг; 3 — 6 кг

Таким образом, оптимальным для диффузорного гидроударника является боек массой 4 кг.

Влияние хода бойка. Из анализа полученных ранее осциллограмм видно, что при увеличении хода бойка частота ударов падает от 130 до 76 Гц, а предупредная скорость возрастает от 0,47 до 0,74 м/с.

Из рис. 19 видно, что из условия получения максимальной ударной мощности оптимальным является ход бойка 1,3 мм. И несмотря на то что максимальная частота получена при ходе 0,8 мм, для разработки конструкции был принят ход 1,3 мм, так как при ходе 0,8 мм гидроударник часто засоряется и возникают трудности регулировки.

Влияние расхода промывочной жидкости. На рис. 20 приведен график влияния расхода жидкости при оптимальном ходе 1,3 мм и массе бойка 4 кг на рабочую характеристику машины.

Из данных графика видно, что увеличение расхода жидкости приводит к росту частоты и энергии удара, а также мощности бойка. В то же время при увеличении расхода перепад давления в гидроударнике возрастает, а к. п. д. падает.

Таким образом, исследования рабочего процесса показали,

что лучшая по ударной мощности и близкая к расчетной характеристика макета получена при массе бойка 4 кг, ходе 1,3 мм и расходе промывочной жидкости 150 л/мин.

Расчетные и фактические значения параметров диффузорного гидроударника следующие:

Результаты съемок диффузорного

Масса бойка, кг	Расход жидкости, л/мин	Показатели при ходе									
		0,8					1,3				
		п. Гц	v, м/с	A, Дж	N, Дж/с	ΔH , МПа	п. Гц	v, м/с	A, Дж	N, Дж/с	ΔH , МПа
2,0	120	165	0,4	0,16	26,0	1,6	105	0,47	0,22	23,0	0,4
	150	180	0,57	0,32	59,0	3,6	130	0,75	0,56	73,0	1,0
	180	—	—	—	—	—	180	0,84	0,71	128,0	1,9
4,0	120	100	0,36	0,26	26,0	1,8	63,5	0,50	0,50	32,0	0,3
	150	130	0,47	0,44	57,0	3,0	91,5	0,70	0,98	90,0	1,0
	180	165	0,55	0,60	99,0	3,8	132,0	0,77	1,20	170,0	1,5
6,0	120	83,5	0,22	0,14	117,0	1,6	52,0	0,43	0,56	29,0	0,5
	150	100	0,40	0,48	48,0	2,5	83,5	0,59	1,05	865,0	1,1
	180	125	0,52	0,81	101,0	3,3	101,0	0,74	1,60	161,0	1,7

Показатели	Расчетные	Фактические
Предударная скорость, м/с	0,54	0,70
Частота ударов, Гц	102	90
Энергия единичного удара, Дж	0,58	0,98
Мощность удара, Дж/с	59,0	90,0

Фактические данные превышают расчетные не более чем на 15—20%, что свидетельствует о правильности разработанной методики расчета диффузорных машин.

клапанно-дроссельный гидроударник двойного действия

Визуально было установлено, что макет работает стабильно и бесперебойно в границах следующих параметров.

Расход жидкости, л/мин	80÷180
Ход клапана, мм	5; 8; 1,1
Площадь дроссельного отверстия, см ²	0,91; 1,01; 1,13; 1,27
Свободный ход, мм	1,5; 2,5; 4,0

При изменении указанных параметров в большую и меньшую сторону стабильность работы нарушается.

В процессе исследований было снято около 50 осциллограмм, результаты обработки которых приведены ниже.

Влияние хода клапана. Ход клапана влияет на рабочую характеристику макета при свободном ходе бойка 1,5 мм, площа-

ди дросселя 1,01 см² и расходе жидкости 150 л/мин следующим образом:

Ход бойка, мм	5	8	11
Скорость движения бойка, м/с	1,32	1,45	1,8
Частота ударов, Гц	50	40	25

Т а б л и ц а 22

гидроударника

бойка, мм				
1,8				
п, Гц	υ, м/с	А, Дж	Н, Дж/с	ΔН, МПа
77	0,83	0,68	52,0	0,3
110	0,98	0,96	105,0	0,5
47,5	0,47	0,44	20,5	0,1
76	0,74	1,10	76,0	0,7
100	0,90	1,60	160,0	1,1
47,5	0,44	0,58	27,5	0,3
66,5	0,65	1,25	83,0	0,9
81	0,80	1,90	155,0	1,6

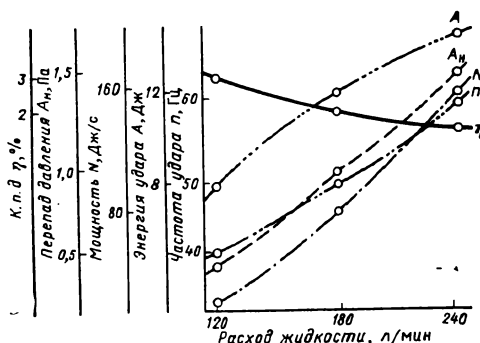


Рис. 20. График зависимости рабочей характеристики диффузорного гидроударника от расхода очистного агента

Из приведенных данных видно, что с ростом хода клапана частота ударов резко падает, а скорость движения бойка увеличивается незначительно. Это говорит о нецелесообразности повышения хода клапана более 5 мм.

Влияние свободного хода. Свободный ход влияет на рабочую характеристику макета при постоянном ходе клапана 5 мм, площади дросселя 0,91 см² и расходе жидкости 150 л/мин следующим образом:

Свободный ход бойка, мм	1,5	2,5	4,0
Скорость движения бойка, м/с	1,25	1,2	0,35
Частота ударов, Гц	55	45	33

Из приведенных данных видно, что оптимальным свободным ходом является ход в 1,5 мм. При его увеличении частота ударов и скорость падают.

Влияние площади дросселя. Площадь дросселя при ходе клапана 5 мм и расходе жидкости 150 л/мин влияет на рабочую характеристику макета следующим образом (рис. 21):

Площадь дросселя, см ²	0,91	1,01	1,13	1,27
Скорость движения, м/с	1,25	1,8	1,5	1,35
Частота ударов, Гц	55	50	45	36

Из приведенных сведений видно, что оптимальная площадь дросселя равна 1,01 см².

Влияние расхода жидкости. Данные о влиянии расхода жидкости на рабочую характеристику макета, полученные при обработке осциллограмм, при постоянном свободном ходе 1,5 мм, ходе клапана 5 мм и площади дросселя 1,01 см² приведены в табл. 23.

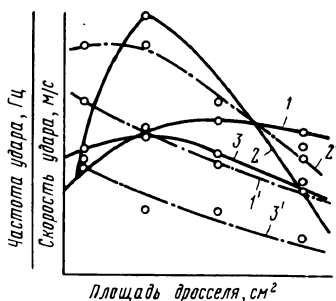


Рис. 21. График зависимости частоты (1, 2, 3) и скорости ударов (1', 2', 3') от площади дросселя при различных ходах клапана

1, 1' — 8 мм; 2, 2' — 5,5 мм; 3, 3' — 11 мм

Таблица 23

Влияние расхода жидкости на характеристику гидроударника двойного действия

Расход жид- кости, л/мин	Скорость удара, м/с	Частота удара, 1/с	Энергия удара, Дж	Мощность удара, Дж/с	Перепад дав- ления, МПа	К. п. д., %
180	2,0	55	12,0	670,0	3,0	7,5
150	1,8	50	9,7	475,0	2,5	7,1
120	1,32	33	5,2	175,0	1,7	5,1

Из табл. 23 видно, что с увеличением расхода жидкости возрастают все показатели характеристики (рис. 22). Допустимым перепадом давления можно считать 2,0—2,5 МПа, что соответствует расходу жидкости 150 л/мин.

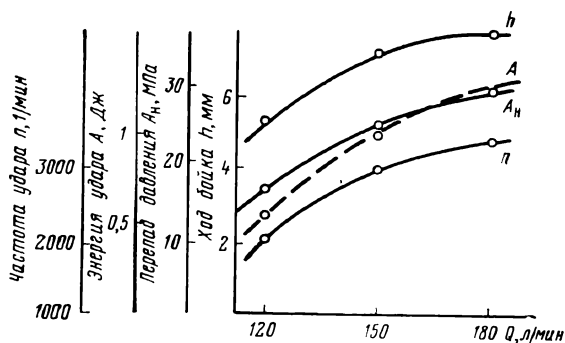


Рис. 22. График зависимости параметров клапанно-дроссельного гидроударника двойного действия от расхода жидкости

Таким образом, проведенные исследования рабочего процесса макета дроссельного гидроударника двойного действия показали, что лучшая характеристика получена при расходе промывочной жидкости 150 л/мин, свободном ходе бойка 1,5 мм, ходе клапана 5 мм и площади дросселя 1,01 см².

Фактические данные параметров гидроударника оказались близкими к расчетным:

Показатели	Расчетные	Фактические
Предударная скорость, м/с	2,0	1,8
Частота ударов, м/с	42	50
Энергия единичного удара, Дж	12,4	9,7
Забойная мощность, Дж/с	515,0	475,0

ГИДРОУДАРНИК ПРЯМОГО ДЕЙСТВИЯ С ПЛАВАЮЩИМ КЛАПАНОМ

Визуально установлено, что макет с массой бойка 6 кг работает стабильно и бесперебойно в границах следующих параметров:

Расход жидкости, л/мин	60 ÷ 240
Ход клапана, мм	5; 8; 11
Свободный ход, мм	3,5; 4,0; 5,0
Площадь отверстий клапана, см ²	2,5; 3,5; 6,5

При изменении указанных параметров в большую или меньшую сторону стабильность работы макета нарушается.

Рациональные площади отверстий клапана, ход клапана и свободный ход определяли при расходе промывочной жидкости 150 л/мин.

Влияние площади отверстий клапана. Площади отверстий, полученные при обработке осциллограмм, при свободном ходе 4,0 мм, ходе клапана 5 мм и расходе жидкости 150 л/мин влияют на характеристику гидроударника следующим образом:

Площадь, см ²	2,5	3,5	6,5
Скорость удара, м/с	1,4	1,8	1,6
Частота удара, 1/с	62	58	53

Из приведенных данных видно, что максимальная частота при оптимальной энергии единичного удара (предударная скорость 1,8 м/с) обеспечивается при расходе промывочной жидкости 150 л/мин и площади отверстий клапана 3,5 см².

Влияние свободного хода. В процессе исследований было установлено, что оптимальным свободным ходом бойка является ход, равный 4 мм. При меньшем ходе происходит подпрессовка, при большем — снижаются частота и энергия единичного удара.

Свободный ход при площади отверстий клапана 3,5 см², ходе клапана 8 мм и расходе жидкости 150 л/мин влияет на характеристику гидроударника прямого действия следующим образом:

Свободный ход, мм	3,5	4,0	5,0
Скорость удара, м/с	2,1	2	1,7
Частота удара, 1/с	58	57	49

Влияние хода клапана. Ход клапана влияет на рабочую характеристику макета при расходе жидкости 150 л/мин, площади отверстий клапана 3,5 см² и свободном ходе 4 мм следующим образом (по результатам обработки осциллограмм):

Ход клапана, мм	6	8	11
Скорость удара, м/с	1,8	2,0	2,1
Частота удара, 1/с	58	57	50

Из приведенных данных видно, что максимальная частота при оптимальной энергии единичного удара (предударная скорость 2,0 м/с) обеспечивается при ходе клапана 8 мм.

Влияние расхода промывочной жидкости. Данные о влиянии расхода жидкости на рабочую характеристику макета, полученные при обработке осциллограмм, при постоянном ходе клапана 8 мм, свободном ходе 4 мм и площади отверстий клапана 3,5 см² приведены в табл. 24.

Таблица 24

Влияние расхода промывочной жидкости на рабочую характеристику гидроударника прямого действия

Расход жид- кости, л/мин	Скорость удара, м/с	Частота удара, 1/с	Энергия удара, Дж	Забойная мощность, Вт	Перепад дав- ления, МПа	К. п. д. %
180	2,2	62	19,0	1200	2,8	14,2
150	2,0	57	16,0	920	2,3	16,0
120	1,5	43	9,0	390	1,6	12,2

Данные табл. 24 являются исходными для определения технической характеристики макета, поэтому в ней приведены энергия единичного удара, перепад давления на макете, ударная мощность и к. п. д.

Из таблицы видно, что с увеличением расхода жидкости возрастают все показатели. В то же время при расходе 180 л/мин перепад давления чрезмерно высок и снижается к. п. д.

Наилучшая характеристика обеспечивается при расходе 140—150 л/мин (рис. 23).

Сходимость фактических и расчетных данных параметров макета свидетельствует о корректности методики расчета и качестве проведения опытных работ:

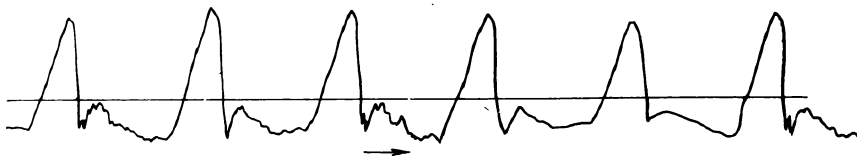


Рис. 23. Типичная осциллограмма рабочего процесса гидроударника прямого действия при площади отверстий клапана 3,5 мм², ходе клапана 8 мм и свободном ходе бойка 4 мм

Показатели	Расчетные	Фактические
Предударная скорость, м/с	1,865	2,0
Частота ударов, 1/с	43	57
Энергия единичного удара, Дж	13,9	16,0
Забойная мощность, Вт	595,0	920,0

В табл. 25 приведена техническая характеристика трех исследуемых макетов гидроударных машин при выявленных оптимальных регулировочных параметрах и расходе жидкости 150 л/мин.

Т а б л и ц а 25

Параметры макетов гидроударных машин при оптимальных регулировках и расходе промывочной жидкости

Тип гидроударника	Предударная скорость бойка v , м/с	Энергия единичного удара A , Дж	Частота удара n , 1/с	Забойная мощность A , Вт	Перепад давления, МПа	К.п.д., %
Диффузорный	0,70	0,98	108	90	1,0	5
Клапанный-дроссельный	1,8	9,7	50	475	3,0	7,5
С плавающим клапаном	2,0	16	57	920	2,3	16

Таким образом, проведенные исследования показывают, что требованиям эффективного бурения пород средней крепости твердосплавными коронками и высокой крепости алмазными коронками удовлетворяют макеты гидроударных машин, выполненные по схеме двойного действия клапанный-дроссельного типа и прямого действия с плавающим клапаном. Лучшие параметры обеспечивают машины прямого действия с плавающим клапаном.

Макеты машины диффузорного типа обладают низкой энергией единичного удара, но наиболее высокой частотой. Для окончательного выбора схемы машины с целью дальнейшей разработки конструкции было проведено сравнительное бурение макетами гидроударных машин в стендовых условиях.

ИСПЫТАНИЯ МАКЕТОВ В ПРОЦЕССЕ БУРЕНИЯ

Макеты испытывали в процессе бурения по породным блокам габбро и гранита соответственно твердосплавными коронками СА-2 и алмазными коронками 01А3.

Режимы бурения были приняты одинаковыми.

Осевая нагрузка, Н	10 000;
Частота вращения, об/мин	450;
Расход промывочной жидкости, л/мин	150;
Длина рейса, см	50.

На каждом режиме макетом каждого типа было пробурено по пять рейсов. Результаты бурения приведены в табл. 26.

Полученные результаты подтвердили мнение многих исследователей, что резкое увеличение частоты ударов целесообразно

только при достижении определенного для каждой породы значения энергии единичного удара.

Показатели надежности макетов находили путем кругло-суточной работы их на выявленных рациональных параметрах технической характеристики, на металлической подушке с промывкой глинистым раствором плотностью 1,5—1,20 г/см³, вязкостью 18—20 с и содержанием песка до 5—6% (для создания условий интенсивности износа).

Т а б л и ц а 26

Результаты бурения в стендовых условиях макетами гидроударных машин

Вид бурения	Средняя механическая скорость в см/мин при бурении коронками	
	твердосплавными СА-2 по габбро	алмазными 01А3 по граниту
Вращательное	8,5	0,613
Вращательно-ударное		
Гидроударниками:		
диффузорным	11,5	0,95
клапанно-дроссельным	15,2	1,9
с плавающим клапаном	16,0	2,02

Данные о работоспособности исследуемых макетов, определенные в соответствии с общепринятой методикой, приведены в табл. 27.

Т а б л и ц а 27

Ресурс макетов гидроударных машин

Тип гидроударника	Ресурс, ч	Наработка на отказ, ч	Время восстановления, ч	Коэффициент готовности
Диффузорный	72	6	0,1	0,983
Клапанно-дроссельный	52	4	0,35	0,920
С плавающим клапаном	80	8	0,23	0,972

Из табл. 27 следует, что наибольшую износостойкость при промывке глинистым раствором обеспечивают макеты диффузорного гидроударника и гидроударника прямого действия. У макета гидроударника клапанно-дроссельного типа быстро выходят из строя головка клапана и выключающая втулка.

Таким образом, на основании комплекса исследований к конструкторской разработке высокочастотного гидроударника для вращательно-ударного бурения был принят макет гидроударной машины прямого действия с плавающим клапаном.

Вероятность возникновения кавитации под клапаном гидроударника впервые была высказана В. Б. Соколинским при анализе осциллограмм рабочего процесса машин Р-3М, а применительно к машинам двойного действия теоретически и экспериментально изучена Б. Е. Скобочкиным и Т. И. Чекаевой. Прямое измерение кавитационной полости проведено на макете машины, подобной гидроударнику ГМД-2, Л. С. Бахановичем, В. Г. Ясовым и Ю. Д. Дьяченко.

Впервые экспериментальное подтверждение наличия кавитации в машинах прямого действия Г-3А и Г-5А получено в КАЗИМСе при исследовании рабочего процесса в скважинах глубиной 200 и 500 м.

Экспериментальное подтверждение наличия кавитации получено при исследовании в скважине рабочего процесса машин. Проведенный КАЗИМСом совместно с СКБ ВПО «Союзгеотехника» комплекс скважинных исследований подтвердил наличие кавитационного разрыва жидкости под клапаном гидроударника.

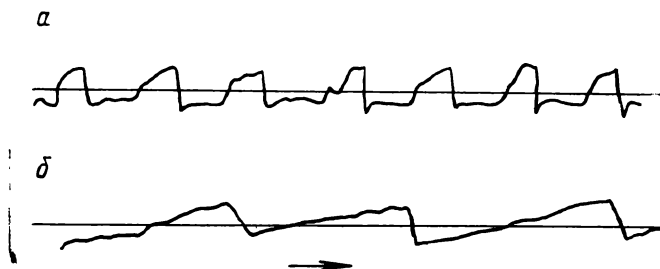


Рис. 24. Осциллограммы рабочего процесса гидроударника Г-5А на глубине 178 (а) и 459 м (б)

Если сравнить осциллограммы работы машин Г-5А на глубине 178 и 459 м (рис. 24), то можно отметить, что в первом случае скорость бояка достигает максимума до отсечки клапана. Во втором случае отсечка происходит раньше, в процессе интенсивного набора скорости, а ускорение прямого хода бояка на участке разгона выше, чем в первом случае. Причем преждевременная отсечка клапана происходит тем раньше, чем меньше расход жидкости.

Рост ускорения движения и преждевременная отсечка подтверждают наличие кавитационного разрыва жидкости в канале бояка. Это также подтверждают и следы эрозионного износа поверхности головки торца клапана.

Детальное экспериментальное исследование явления кавитации было проведено в ДГИ им. Артема при исследовании гидроударника Г-3А на стенде и в скважине глубиной 101 м по спе-

циально разработанной методике [27]. Эти исследования позволили экспериментально определить длину, объем и полное время кавитации и окончательно подтвердили необходимость учета этого явления при создании гидроударных машин.

Условие возникновения кавитации при единичном гидроударе можно определить согласно неравенству

$$v_0 \geq p/\rho c, \quad (49)$$

где v_0 — мгновенная скорость течения жидкости на участке отводящего трубопровода; p — избыточное давление на том же участке; ρ — плотность жидкости; c — скорость распространения упругих волн в жидкости, находящейся в скважине.

Это же выражение можно записать в виде

$$S_k \leq \rho c Q/p, \quad (50)$$

где S_k — площадь сечения канала бойка (отводящего трубопровода); Q — расход жидкости.

Из этого выражения следует, что кавитационный разрыв жидкости возможен не только под клапаном гидроударника, но и в любом сечении, где выполняются эти условия.

Предельную глубину скважины, на которой возможна кавитация при единичном гидроударе, с учетом выражения (49) можно найти по формуле

$$L = \frac{\rho c (Q - p_c S_k)}{\rho g S_k}, \quad (51)$$

где p_c — потери давления на гидросопротивление на участке от клапана до устья скважины; g — ускорение свободного падения.

Время образования кавитационной полости

$$t_k = \frac{\gamma l_k [Q + v_{об} (S_n - S_k)]}{g S_k (p_{ст} - \gamma l_k - p_{зат})}, \quad (52)$$

где γ — удельный вес жидкости; l_k — длина канала бойка; $v_{об}$ — скорость обратного хода бойка; S_n — площадь сечения потока; $p_{ст}$ — статическое давление столба жидкости на забое скважины; $p_{зат}$ — понижение давления в затрубном пространстве после перекрытия канала бойка клапаном.

Расчетное время образования кавитационной полости у гидроударника Г-3А, определенное по этой формуле при глубине скважин 101 м и расходе промывочной жидкости 250 л/мин (условия экспериментального изучения кавитации в ДГИ им. Артема), соответствует экспериментально полученному значению t_k и не превышает 0,02 с.

Длина кавитационной полости

$$l_{к.п} = \frac{3 t_k}{2 S_k} [Q + v_{об} (S_n - S_k)]. \quad (53)$$

Величина совместного хода системы клапан — боек до заполнения полости

$$l_c = l_{к.п} S_k / S_{п}. \quad (54)$$

Скорость бойка к моменту закрытия кавитационной полости

$$v_1 = \frac{2 (\rho c \eta K_1 Q - p S_k)}{\rho c S_{п}}, \quad (55)$$

где η — коэффициент утечек.

Тогда ход клапана, соответствующий кавитационному режиму, или величина совместного хода системы клапан — боек до заполнения полости

$$x_k = l_c = \frac{(\rho c \eta K_1 Q - p S_k) t_k}{\rho c S_{п}}. \quad (56)$$

Расчет величины фактического хода клапана по указанной методике дал результаты, близкие к экспериментальным.

Вследствие наличия кавитации рабочий процесс машины прямого действия в скважине можно представить в следующем виде.

После смыкания клапана с бойком в конце обратного хода поток жидкости в канале бойка по инерции двигается вниз, образуя разрежение — кавитационную полость. Величина ее, как видно из формул (52) — (56), определяется расходом жидкости Q , глубиной и диаметром скважины, параметрами канала бойка, скоростью подъема бойка и площадью поршня. Влияние последних двух факторов заключается в создании дополнительного потока вытесняемой жидкости, который также проходит по каналу, суммируясь с основным потоком.

Кавитационная полость разобщает столб жидкости в трубах и затрубном пространстве. Поэтому разгон бойка на прямом ходу происходит под суммарным давлением на поршень гидравлического удара и гидростатического столба в трубах и характерен большими ускорениями. Навстречу клапану, заполняя кавитационную полость, движется поток по каналу бойка. Если полость достаточно велика, то клапан отсоединяется от поршня ограничителем и поток сверху пойдет на заполнение полости. Встреча двух потоков вызывает повышение давления жидкости, четко фиксируемое на осциллограммах датчиком давления.

При недостаточной величине полости поток снизу ударит по клапану, замедлив движение бойка. Сила этого удара зависит (по формуле Н. Е. Жуковского) от скорости соударения, а в данном случае — от алгебраической суммы скоростей потока (снизу) и бойка (сверху).

Если удар снизу превосходит силы прижатия, то происходит преждевременная отсечка клапана (см. рис. 24,б) и снижение скорости движения бойка. Контактный датчик четко фиксирует этот момент. При ранней отсечке клапана возрастает свободный ход бойка и сокращается путь его активного разгона. Когда же эта величина становится равной или меньшей половины хода бойка, наступает вообще безударный режим работы.

Экспериментальные исследования показали, что повышения забойной мощности машин прямого действия с увеличением глубины можно добиться, например, за счет увеличения кавитационной полости. Достигается это или сужением канала бойка, или увеличением расхода промывочной жидкости до 400—500 л/мин. Производственники интуитивно применяли второе, увеличивая подачу насосов на глубинах более 500—600 м, считая, что на этих глубинах происходит большая потеря жидкости вследствие неплотности соединения бурильной колонны. Однако применение обоих этих методов нерационально.

Поэтому на основании исследований был предложен способ сохранения устойчивости рабочего процесса машин прямого действия, заключающийся в резком сокращении объема кавитационной полости за счет соединения верхней части канала бойка с затрубным пространством с помощью отверстий.

Отверстия можно делать в поршне, насадках бойка и накопальне. Если соединить через сечение канала боек и полости между поршнем-бойком и корпусом отверстиями, то сечение канала для прохода жидкости резко расширится и скорость потока в нем соответственно снизится. Следовательно, кавитационная полость под клапаном будет значительно меньших размеров, она в самом начале прямого хода бойка быстро заполнится и не будет заметно влиять на рабочий процесс гидроударной машины.

Исследования кавитации в гидроударных машинах и мер по борьбе с ней позволили улучшить рабочий процесс гидроударников, особенно в глубоких скважинах (500—600 м и более).

Метод исключения вредных последствий кавитации путем расширения и сокращения каналов для прохода жидкости использован и при конструировании высокочастотных гидроударных машин.

ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ РАЗРАБОТКИ КОНСТРУКЦИЙ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ ГИДРОУДАРНЫХ МАШИН

Конструкции гидроударных машин разработаны на основании исследований по рациональным параметрам ударников и повышения эффективности рабочего процесса, изложенных в предыдущих разделах. Как следует из этих исследований, за основное направление при конструировании машин для вращательно-ударного бурения было принято получение максимальной частоты ударов при определенном рациональном значении энергии.

Повышение забойной мощности гидроударника в корпусе малого диаметра и необходимость работы на глинистом растворе неизбежно повлекли за собой упрощение и усовершенствование конструкции его узлов и деталей с целью обеспечения надежности и долговечности работы машин.

В связи с этим была разработана принципиально новая, по

отношению к гидроударникам большого диаметра, компоновка узлов и деталей, основные принципы которой следующие.

1. Пружины бойка расположены вокруг насадок ударника. При этом пружина поддерживает ударник на определенном расстоянии относительно шлицевого разъема, вследствие чего нет необходимости во втором шлицевом разъеме. При постановке на забой клапан опускается до соприкосновения с бойком, в результате запуск гидроударника и предотвращение распространения ударного импульса вверх по колонне успешно выполняет один шлицевой разъем.

2. Все соударяющиеся детали (клапан-поршень; боек-наковальня) быстроразъемные благодаря конусному сочленению с основными деталями.

3. Клапан выполнен без жесткого ограничения хода вверх, что предотвращает его износ и распространение вибрации на колонну бурильных труб.

4. Насадки бойка и наковальни сплошные, что увеличивает соударяющиеся поверхности и уменьшает износ.

5. Корпус машины упрочнен твердосплавными пластинами марки ВК.8В, запаянными в верхний, средний и нижний переходники.

Разработанные высокочастотные гидроударные машины ГВ-5 (диаметр 76 мм) и ГВ-6 (диаметр 59 мм) применяют с серийными коронками и кернорвателями для вращательного бурения.

УЗЕЛ КЛАПАНА

При конструировании узла клапана машины ГВ-5 было поставлено основное условие: надежное и эффективное выполнение функции отбора мощности при максимальной простоте, так как машине приходится работать на загрязненном глинистом растворе.

Узел клапана гидроударника ГВ-5 (рис. 25) состоит из втулки клапана 2 со сменной насадкой 1, пружины 3, опирающейся на цилиндр гидроударника 4, и корпуса клапана. Он же служит верхним переходником гидроударника. Практически непосредственно узел клапана состоит из трех деталей. Ограничителем хода клапана является сама пружина, сжатая до соприкосновения витков.

Такая конструкция узла отбора мощности позволила впервые в отечественной и мировой практике создать гидроударную машину, обеспечивающую стабильную и эффективную работу на глинистом растворе в течение 200—250 ч.

В связи с тем что в меньшем диаметре машины (59 мм) не удалось добиться удовлетворительной стойкости и износоустойчивости пружины при сжатии ее до соприкосновения витков, узел клапана гидроударника ГВ-6 при сохранении основных

требований — отсутствия жесткого ограничения при ходе вверх и простоты — имеет некоторое отличие, заключающееся в ограничении хода вниз (пружина не сжимается до соприкосновения витков) и введении в конструкцию гидротормоза хода вверх (для сокращения плавания и увеличения частоты ударов).

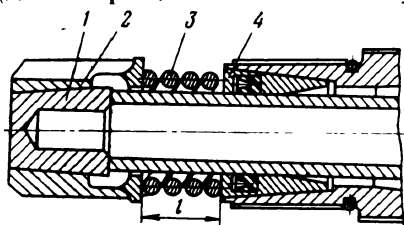


Рис. 25. Узел клапана гидроударника ГВ-5

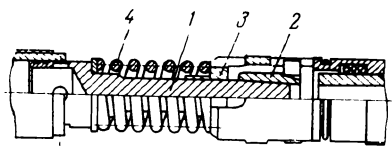


Рис. 26. Узел клапана гидроударника ГВ-6

Узел клапана гидроударника ГВ-6 (рис. 26) состоит из клапана 1, насадки 2, втулки 3 и пружины 4. Ограничителями хода клапана вниз служат буртики насадки при соприкосновении с цилиндром. Ход вверх ограничивается моментом перекрытия отверстий клапана при входе его в верхний переходник — гидроторможение.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЛОЩАДИ ПОРШНЯ

Анализ работы большинства исследователей, посвященных методике расчета гидроударных машин, дает возможность определить величину текущего давления в камере гидроударника по сумме величин давления гидравлического удара и среднего давления в трубопроводе

$$p_t = \rho c \left(\frac{Q_0}{F_T} - X' \frac{F_{\Pi}}{F_T} \right) + p_0, \quad (57)$$

где Q_0 — расход жидкости; F_T — площадь трубопровода; X' — скорость бойка; F_{Π} — площадь поршней; p_0 — среднее давление.

Из этого выражения определим площадь поршня. Приняв для конечной стадии хода клапана $p_t = 0,5p_0$, что близко к фактическим данным, можно записать зависимость

$$\rho c \left(\frac{Q_0}{F_T} - X' \frac{F_{\Pi}}{F_T} \right) + 0,5 p_0 = 0. \quad (58)$$

Исходные данные для расчета площади поршня гидроударников ГВ-5 и ГВ-6: $X' = 1,7—2,1$ м/с; $p_0 = 1,0$ МПа; $F_T = 12,55$ см².

Из выражения (58) площадь поршней F_{Π} для машин диаметрами 76 и 59 мм находится в пределах 7,7—8,8 см². Соответственно диаметры поршней для гидроударников ГВ-6 и ГВ-5 должны быть равными 30,5 и 35,5 мм.

Для получения большей силы, разгоняющей боек, площадь поршня следует принимать большей, но, учитывая ограничен-

ные поперечные размеры гидроударников малого диаметра, принимаем диаметр поршня для машин ГВ-5 — 35 мм, для машин ГВ-6 — 30 мм.

КОНСТРУКЦИЯ, ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ И ТЕХНИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ГИДРОУДАРНЫХ МАШИН ГВ-5 И ГВ-6

Гидроударник ГВ-5 (рис. 27) состоит из следующих узлов: клапана; поршня-бойка; цилиндра; шлицевого разъема; пружины бойка и корпуса с регулировочными кольцами.

Гидроударник ГВ-6 (рис. 28) состоит из узла клапана; узла поршня ударника; узла цилиндра; узла шлицевого разъема и корпуса с регулировочными шайбами.

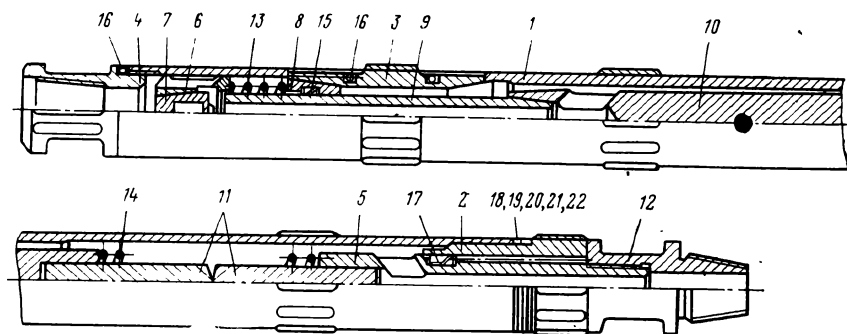


Рис. 27. Высокочастотная гидроударная машина ГВ-5:

1 — корпус; 2 — шлицевой стакан; 3 — корпус цилиндра; 4 — переходник; 5 — шлицевой шток; 6 — клапан; 7 — вставка клапана; 8 — цилиндр; 9 — шток; 10 — бокс; 11 — насадка; 12 — переходник; 13 — пружина клапана; 14 — пружина бойка; 15 — манжета; 16 — уплотнительное кольцо; 17 — манжета шлицевого разъема; 18—22 — регулировочные кольца

При спуске и подъеме машина находится в подвешенном состоянии, нижняя часть ее с колонковым снарядом спускается под действием собственной массы на величину хода шлицевого разъема (30 мм). При этом шлицевой шток перемещается до упора в стакан, а ударник с пружиной под действием собственной массы опускается.

Между клапаном и поршнем образуется щель, через которую промывочная жидкость, нагнетаемая насосом через колонну бурильных труб, свободно проходит через машину и колонковую трубу в скважину, что необходимо для промывки скважины при постановке снаряда на забой (особенно при наличии шлама) и для слива жидкости из бурильных труб во время подъема. В необходимых случаях эта особенность конструкции машин прямого действия может быть использована также для подачи на забой заклиночного материала. Кроме того, подобное устройство облегчает запуск гидроударной ма-

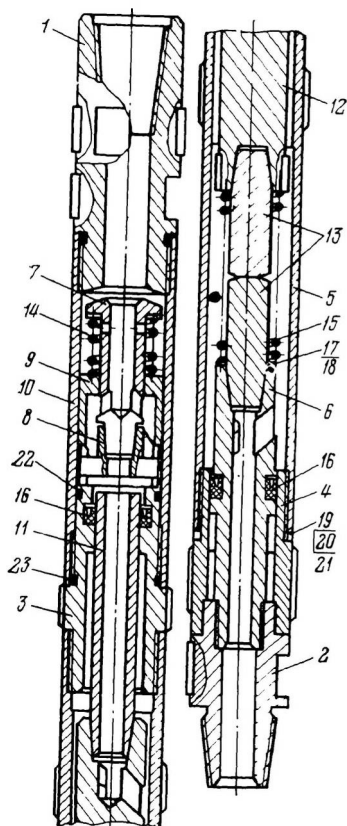


Рис. 28. Схема высокочастотной гидроударной машины ГВ-6:

1, 2 — переходники; 3 — корпус цилиндра; 4 — шлицевой стакан; 5, 10 — корпуса; 6 — шлицевой шток; 7 — клапан; 8 — насадка клапана; 9 — втулка клапана; 11 — шток; 12 — боек; 13 — насадка; 14 — пружина клапана; 15 — пружина бойка; 16 — манжета; 17—21 — регулировочные шайбы; 22—23 — уплотнительные кольца

шины, так как дает возможность создавать мгновенное перекрытие потока промывочной жидкости с возбуждением гидравлического удара.

Пуск гидроударной машины осуществляется постановкой ее на забой скважины, при этом клапан опускается и перекрывает отверстие в поршне-бойке. Проход жидкости мгновенно прекращается, возбуждается гидравлический удар, под действием которого система клапан — ударник с нарастающей скоростью перемещается вниз, сжимая бойковую и клапанную пружины. В конце рабочего хода клапан останавливается ограничителем, между клапаном и поршнем возникает щель, и жидкость получает возможность свободного прохода через машину на забой. В этот момент давление падает, однако ударник в результате приобретенной кинетической энергии продолжает движение вниз (свободный ход) и наносит удар по наковальне.

Клапан и ударник под действием сжатых при рабочем ходе пружин возвращаются в исходное положение, причем клапан движется с некоторым опережением, так как его обратный ход начинается сразу же после остановки ограничителем. При встрече поршня с клапаном в верхнем положении вновь перекрывается проход промывочной жидкости, возникает гидравлический удар и цикл повторяется.

Техническая характеристика гидроударных машин ГВ-5 и ГВ-6

Шифр	ГВ-5	ГВ-6
Диаметр скважины, мм	76 и 93	59
Диаметр корпуса, мм	73	57
Рабочий агент	Вода и глинистый	рас-
		твор

Расход рабочего агента, л/мин	140—160	110—120
Перепад давления в машине, МПа	0,8—1,5	0,6—1,0
Ресурс рабочего времени в ч при промывке:		
водой	400	400
глинистым раствором	250	250
Масса ударника, кг	6,0	6,0
Скорость удара, м/с	1,6—1,95	1,3—1,8
Энергия единичного удара, Дж	10—15	5—10
Частота ударов, 1/с	47—60	42—53
Длина гидроударника, мм	1280	1580
Масса гидроударника, кг	28	25

Графики зависимости рабочих параметров гидроударников от расхода промывочной жидкости приведены на рис. 29.

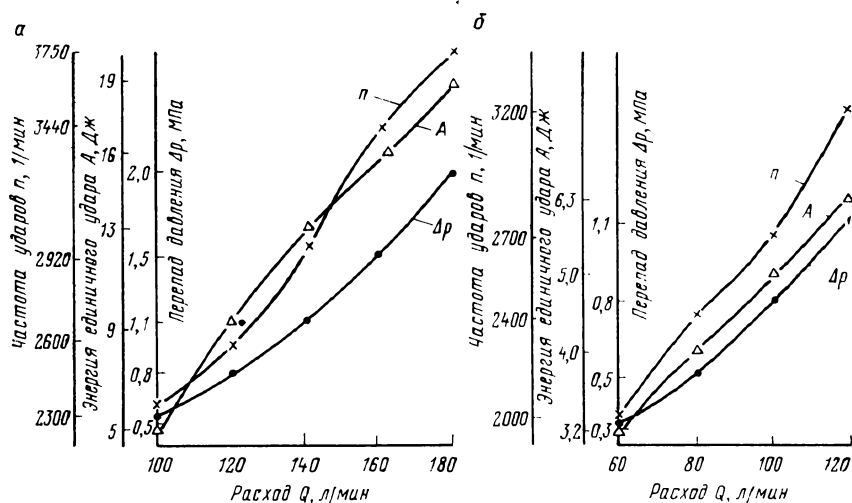


Рис. 29. Графики зависимости параметров гидроударников ГВ-5 (а) и ГВ-6 (б) от расхода рабочего агента

СТЕНДОВЫЕ ИСПЫТАНИЯ ГИДРОУДАРНИКОВ ГВ-5 И ГВ-6 В ПРОЦЕССЕ БУРЕНИЯ

В стендовых условиях гидроударниками ГВ-5 и ГВ-6 бурили блоки габбро твердосплавными коронками при частоте вращения 420 об/мин и блоки гранита алмазными коронками при частоте вращения 620 об/мин. Осевая нагрузка оставалась постоянной 10 000 Н, а расход очистного агента для ГВ-5 составлял 150 л/мин и для ГВ-6 — 80 л/мин.

В качестве породоразрушающего инструмента применяли коронки СА-2 и 01АЗ.

Результаты бурения приведены в табл. 28 и аналогичны данным, полученным при определении оптимальных параметров гидроударных машин.

Сравнительные показатели бурения

Гидроударник	Коронка	Начальная скорость, см/мин	Проходка за рейс, см
ГВ-5	Твердосплавная Алмазная	11,6 3,5	730 170
ГВ-6	Твердосплавная Алмазная	13,2 4,8	960 260

Лучшие результаты при вращательно-ударном бурении как твердосплавными, так и алмазными коронками дала машина ГВ-6. Это объясняется меньшим расстоянием между лунками разрушения при бурении с помощью машин диаметром 59 мм. Причем при бурении алмазными коронками рост показателей при уменьшении диаметра выше, чем при бурении твердосплавными. Это подтверждает сделанное ранее аналитическое обоснование, что для дальнейшего повышения показателей бурения необходимо, при сохранении рациональной энергии ударника, форсировать характеристику гидроударников за счет увеличения частоты ударов.

ИССЛЕДОВАНИЯ ГИДРОУДАРНЫХ МАШИН В СКВАЖИНАХ

Основная цель исследований гидроударных машин в скважине — подтверждение стендовых характеристик при работе на различных глубинах, подтверждение принятых и реализованных в конструкциях направлений по совершенствованию рабочего процесса машин, а также выявление возможностей дальнейшего улучшения их рабочей характеристики.

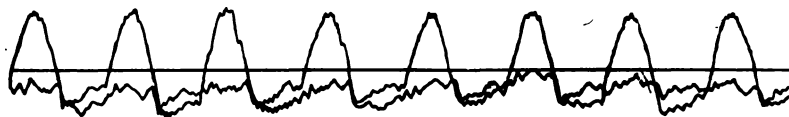


Рис. 30. Осциллограмма рабочего процесса гидроударника ГВ-5 в скважине на глубине 200 м при оптимальной регулировке

В табл. 29 приведены параметры гидроударной машины ГВ-5 при работе в скважине на глубине 250—300 м при различных расходах промывочной жидкости, а на рис. 30 — осциллограмма рабочего процесса машин на той же глубине.

Как видно из табл. 29, рабочий процесс гидроударников в скважине отличается устойчивостью и стабильностью параметров цикла, что говорит о правильности рекомендаций по конструктивным и регулировочным параметрам, определен-

ным в процессе макетирования и стендовых исследований, а также подтверждает правильность выбранного способа борьбы с кавитацией.

Т а б л и ц а 29

Параметры гидроударной машины ГВ-5

Расход жид- кости, л/мин	Установочный ход клапана, мм	Фактический ход, мм	Предудар- ная ско- рость бой- ка, м/с	Энергия единичного удара, Дж	Частота ударов, 1/мин	Перепад давления, МПа
100—110	8,5	12,7	0,80	0,55	2060	14
140—150	8,5	12,2	0,90	0,60	2250	14
180	8,5	10,1	1,43	0,64	2800	18
200	8,5	9,8	1,55	0,79	2840	19
240—250	8,5	10,3	1,93	1,15	3100	21

Таким образом, результаты исследований подтвердили работоспособность машин и эффективность реализации заложенных при проектировании решений и дали основание перейти к полевым испытаниям для оценки технико-экономической эффективности их серийного производства.

ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ

Разработанные гидроударные машины испытывали в производственных условиях на плановых скважинах в партиях и экспедициях, имеющих большой объем бурения в породах, соответствующих области применения разработанных гидроударников, и геолого-технических условиях, характерных для многих регионов СССР.

Для сравнения использовали наиболее прогрессивные в настоящее время виды бурения — твердосплавное (в породах V и VII и частично VIII категорий) и высокооборотное алмазное (в породах IX—XII категорий).

Бурение во всех случаях проводили бригадами приблизительно равной квалификации в аналогичных геолого-технических условиях на режимах, лучших для способов сравнения и эффективных для гидроударников на скважинах одинаковой глубины. Критерием однотипности проходимых пород являлось сравнение их физико-механических свойств по ГОСТ 41-89—74 и категорий по рм.

Гидроударник каждого типа испытывали не менее чем на двух объектах с различными геолого-техническими условиями. Объем бурения для каждого гидроударника и базы сравнения был не менее 1000 м проходки, в том числе для определения механических скоростей и проходок за рейс проходило не менее 30 рейсов по каждой разности пород. Для определения показателей надежности одну из машин обрабатывали до полного износа.

Процесс бурения фиксировали хронометражисты или самопишущие приборы МКН-1 или МКН-2.

Полученные механическую скорость и проходку за рейс обрабатывали с использованием методов математической статистики в соответствии с требованиями типовой программы и методики.

Показатели надежности гидроударников определяли, исходя из требований программ и методик испытаний, и обрабатывали в соответствии с требованиями ГОСТ 17509—72. Затем находили экономическую эффективность.

Результаты производственных

Вид бурения	Порода	Физико-механические свойства горных пород			Категория пород
		F_d	$K_{абр}$	ρ_m	
Гидроударное (ГВ-5) твердосплавное	Сланцы с прослоями песчаника	3,1—8,6	0,5—0,9	4,8—10,10	V—VI
Вращательное твердосплавное					
Гидроударное (ГВ-5) твердосплавное	Песчаники	4,2—11,7	0,6—1,5	6,7—15,2	VI—VII
Вращательное твердосплавное					
Гидроударное (ГВ-6) твердосплавное	Сланцы с прослоями песчаников	3,4—9,5	0,6—1,5	4,50—11,50	V—VI
Вращательное твердосплавное					
Гидроударное (ГВ-6) алмазное	Песчаники	5,4—13,9	0,9—1,31	22—34	IX
Вращательное алмазное					
Гидроударное (ГВ-6) алмазное	Ийолит-уртитовые, трактондные	5,6—12,1 < 28	0,8—1,3 < 2,6	22—26 < 52	IX—X
Вращательное алмазное					

Анализ полученных результатов (табл. 30) показывает, что применение гидроударников ГВ-5 и ГВ-6 с твердосплавными коронками в породах V—VI категорий обеспечивает рост механической скорости бурения в 1,3—1,5 раза; проходки за рейс в 1,17—1,7 раза, а в песчаниках VI—VII категорий — рост механической скорости в 1,5 раза, проходки за рейс в 1,4 раза. Применение гидроударников ГВ-6 с алмазными коронками в породах IX категории обеспечивает рост механической скорости в 1,25—1,3 раза, а проходки за рейс в 1,13—1,15 раза.

Таблица 30

испытаний

Среднестатистическое значение механической скорости v , м/ч	Среднестатистическое значение проходки за рейс L , м	Рост механической скорости, раз	Рост проходки за рейс, раз
1,78	9,5	1,35	1,17
1,33	8,13	—	—
2,08	9,6	1,46	1,43
1,42	6,70	2	—
2,36	6,74	1,54	1,74
1,54	3,87	—	—
1,62	5,30	1,24	1,13
1,32	4,70	—	—
2,02	3,73	1,30	1,15
1,56	3,24	—	—

В процессе испытаний более крепкие породы не бурили. Однако по данным М. Г. Глазова [4], при вращательно-ударном бурении гидроударниками ГВ-5 и ГВ-6 в породах X—XII категории механическая скорость, по сравнению с вращательным бурением, возрастает в 2—3 раза, т. е. с увеличением крепости пород эффективность увеличивается.

Ресурс работы гидроударной машины ГВ-5 при использовании глинистого раствора составил 200 ч, воды — 400 ч; машины ГВ-6 соответственно 233,5 и 444,5 ч. Межремонтный период — 31,7 ч для ГВ-5, 33,3 ч для ГВ-6, время восстановления — 11,5 мин.

Экономический эффект от применения комплекта гидроударных машин ГВ-5 составил 1398 руб., ГВ-6 — 1785 руб. Производительность вращательно-ударного бурения с твердосплавными коронками возросла на 20—25%, стоимость 1 м снизилась на 10—15%; с алмазными коронками производительность увеличилась на 25—35%, а стоимость 1 м уменьшилась на 15—20%.

Областью эффективного применения высокочастотных гидроударных машин ГВ-5 и ГВ-6 является проходка скважин глубиной до 1200 м (диаметр 76 мм) и 700 м (диаметр 59 мм) с промывкой забоя водой и глинистым

раствором в широком диапазоне пород со значениями ρ_m от 4,5 до 115, что соответствует по ОСТ 41-89—74 породам от V до XII категории включительно.

Таким образом, проведенные исследования показали, что впервые в практике созданы высокочастотные гидроударные машины с параметрами удара, необходимыми для вращательно-ударного бурения серийными твердосплавными и алмазными коронками.

ТЕХНОЛОГИЯ БУРЕНИЯ

КРИТЕРИИ ОПТИМИЗАЦИИ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Правильный выбор критериев оптимизации процесса бурения — одна из важнейших задач, непосредственно связанная с теоретическим поиском зависимостей между параметрами режима бурения и их практической реализацией для достижения максимального эффекта. Е. А. Козловский [10] подразделяет критерии оптимизации на глобальные и локальные.

Глобальные критерии характеризуют законченный процесс бурения — это стоимость, время проходки скважин, коммерческая скорость бурения.

Локальные критерии характеризуют протекание процесса бурения или законченную его часть. Процесс бурения скважин носит дискретный характер, поэтому их используют на втором этапе оптимизации непосредственно при выборе оптимальных режимных параметров бурения. К локальным критериям относятся мгновенная и средняя механическая скорости бурения, интенсивность износа инструмента, рейсовая скорость, проходка на коронку и т. д.

В работах Е. А. Козловского, Ф. А. Шамшева, Е. Ф. Эпштейна и других показано, что в том случае, когда механическая скорость в течение рейса изменяется незначительно, она может быть принята в качестве критерия оптимизации, так как от ее значения непосредственно зависит эффективность бурения. В работах тех же авторов показано, что в случае значительного падения скорости в течение рейса, а это наблюдается при твердосплавном бурении затупляющимся породоразрушающим инструментом или при алмазном бурении в породах, вызывающих заполирование алмазов, для оценки процесса бурения следует применять два критерия оптимизации — среднюю механическую скорость и проходку за рейс.

Однако использовать два указанных критерия можно только при отбраковке режимов бурения с полным окончанием

рейса, что связано с большим объемом работ. Кроме того, изменение от рейса к рейсу физико-механических свойств пород, нестабильность качества и количества подаваемого очистного агента и влияние других факторов снижают достоверность результатов исследований, а использование двух критериев затрудняет правильную оценку процесса и выбора наилучших вариантов.

В связи с изложенным для исследования процесса бурения с интенсивным падением механической скорости предложена и апробирована методика [11], в которой в качестве критерия оптимизации принято отношение начальной механической скорости бурения к ее декременту ($K=v_0/\alpha$).

Справедливость принятой методики подтверждена анализом известного экспоненциального уравнения связи между начальной v_0 и текущей v скоростью в течение рейса при бурении затупляющимся породоразрушающим инструментом [5]

$$v = v_0 e^{-\alpha t}; \quad (59)$$

$$H = \int_0^t v_0 e^{-\alpha t} dt; \quad (60)$$

$$H = v_0/\alpha (1 - e^{-\alpha t}) \quad (61)$$

где t — текущее время бурения; H — проходка за рейс; e — непериодическое число.

Из уравнения (61) видно, что при бесконечном увеличении длительности рейса t проходка за рейс стремится к пределу v_0/α .

Отсюда следует, что отношение $v_0/\alpha = K$ характеризует производительность бурения и может служить критерием оптимизации. Физический смысл этого отношения следующий: начальная механическая скорость v_0 характеризует интенсивность процесса разрушения породы, а декремент скорости α — интенсивность воздействия породы и выбуренного шлама на коронку.

В качестве управляемых факторов, по которым оптимизируется процесс бурения, обычно принимают основные режимные параметры: осевую нагрузку, частоту вращения и расход очистного агента. При этом на первом этапе процесс бурения удобнее оптимизировать по расходу очистного агента, так как этот параметр в меньшей степени взаимосвязан с другими и непосредственно влияет на энергетические показатели гидроударной машины.

Таким образом, оптимизация процесса вращательно-ударного бурения сводилась к определению математической модели связи между критерием оптимизации (механической скоростью), осевой нагрузкой и частотой вращения снаряда при постоянных значениях расхода очистного агента, энергии и час-

тоты ударов. По максимальному значению критерия выбирали рациональные режимы бурения.

Исходя из характера изменения скорости бурения в рейсе и выбранных критериев, можно принять два метода проведения исследований.

При бурении самозатачивающимися твердосплавными коронками и алмазными коронками в породах, не вызывающих заполирование алмазов, параметры P_{oc} и n изменяли внутри рейса через интервалы бурения 5—10 см с фиксацией значения механической скорости. При этом, с целью исключения влияния на показатели механической скорости гидродоупора в колонковом снаряде, подклинок жерна, зашламования коронки наблюдения проводили на первых 1,5 м бурения в рейсе после приработки коронки.

При бурении алмазными коронками пород, вызывающих заполирование алмазов, параметры p_{oc} и n изменяли от рейса к рейсу. Значения v_0 и α определяли после приработки коронки в начале рейса.

Параметры режима бурения как на стенде, так и на производственных буровых агрегатах регистрировали и регулировали с помощью комплекта контрольно-измерительной аппаратуры.

Возможный предел изменения нагрузки на забой и частоты вращения, особенно в производственных условиях, определялся рядом взаимосвязанных факторов, таких, как мощность привода бурового станка, прочность бурильного вала, интенсивность искривления скважины, требования к сохранности и выходу жерна и т. д.

Степень изменения осевых нагрузок увязывалась с погрешностью приборов и ощутимым влиянием на критерий оптимизации и составляла 2500—5000 Н. Шаг варьирования частоты вращения принимали соответственно частотам вращения бурового станка. Число повторных опытов на каждом режиме, исходя из рекомендаций работы [1], принимали равным пяти.

Исходя из принятых методик проведения работ для анализа результатов исследований и установления рациональных значений параметров режима бурения, выбраны следующие математические методы:

- 1) вид связи механической скорости с параметрами режима бурения пород средней крепости твердосплавными коронками и крепких пород, не вызывающих заполирование алмазов, устанавливался методом множественного корреляционного анализа;

- 2) вид связи механической скорости и времени бурения в рейсе алмазными коронками по породам, вызывающим заполирование алмазов, устанавливался методом регрессивного анализа.

Наиболее рациональный породоразрушающий инструмент

выбирали непосредственным сравнением максимальных значений механической скорости и проходки на коронку.

БУРИМОСТЬ И ГРУППЫ ПОРОД

Область эффективного применения вращательно-ударного бурения включает породы V—XII категорий по буримости. Поэтому для обобщения рекомендаций по выбору технологических режимов проведено деление горных пород на группы, имеющие общие особенности бурения вращательно-ударным способом. При разработке классификации в основу положена буримость горных пород в зависимости от их физико-механических свойств, по ОСТ 41-89—74, характер процесса разрушения, а также характер износа породоразрушающего инструмента и его взаимодействия с горной породой и выбуренным шламом.

Буримость горных пород изучали в стендовых условиях с использованием серийных твердосплавных и алмазных коронок диаметром 59 мм и гидроударных машин ГВ-6. Результаты исследований представлены в табл. 31. При этом приведенную к глубине 700 м стоимость 1 м бурения определяли по методике, изложенной на стр. 40.

Из данных табл. 31 видно, что при бурении пород со зна-

Таблица 31

Эффективность бурения твердосплавными и алмазными коронками

Порода	Физико-механические свойства породы			Категория породы	Стоимость 1 м, руб.			
	F_d	$K_{абр}$	ρ_m		Вращательное		Вращательно-ударное	
					твердосплавное	алмазное	твердосплавное	алмазное
Известняк	10,55	0,40	8,0	VI	3,0	—	2,3	—
Песчаник полимиктовый	7,14	0,81	11,6	VII	5,2	8,5	3,5	7,7
Лабрадорит	6,7	1,1	15,2	VII	5,9	24,5	3,8	26,4
Песчаник среднезернистый	6,45	1,25	17,2	VIII	11,5	12,1	8,3	9,4
Габбро	4,5	2,5	24,0	IX	17,6	16,9	15,9	13,2
Песчаник донецкий	10,0	1,5	29,0	IX	26,2	17,1	23,8	15,6
Гранит лезниковский	5,0	2,6	28,2	IX	63,4	27,4	74,2	22,8
Кварцит шокшинский	7,14	2,8	39,0	X	—	50,9	—	31,6

Примечание. 1. При бурении известняка применение алмазных коронок оказалось явно неэффективным в результате низких механических скоростей по сравнению с твердосплавными коронками; бурение кварцита твердосплавными коронками не могло быть проведено вследствие почти мгновенных поломок резцов.

2. Данные по бурению среднезернистого и полимиктового песчаников получены на основании обработки материалов Томского политехнического института.

чениями объединенного показателя ρ_m от 8 до 17,5 (VI—VII категории по ОСТ 41-89—74) стоимость 1 м вращательно-ударного бурения твердосплавными коронками ниже, чем алмазными, в 2—6 раз. К породам этой группы отнесены известняк, песчаник полимиктовый, лабрадорит и песчаник среднезернистый на известковом цементе.

В породах, имеющих значение объединенного показателя ρ_m от 20 до 40, что соответствует IX—X категориям по ОСТ 41-89—74, лучшие результаты получены при вращательно-ударном бурении алмазными коронками. Стоимость 1 м при алмазном бурении в 1,5—3 раза ниже, чем при твердосплавном.

Следует отметить, что песчаники попали в область эффективного применения как алмазных, так и твердосплавных коронок. При значениях ρ_m до 17,5 они лучше бурятся вращательно-ударным способом твердосплавными коронками, при больших значениях ρ_m — алмазными. Это может быть объяснено особенностями бурения песчаника [22], заключающимися в разрушении цемента и отрыве зерен кварца.

Буримость песчаника зависит от прочности связывающего эти зерна цемента. Косвенным показателем прочности цемента является коэффициент динамической прочности F_d , который у песчаников VII и IX категорий отличается незначительно (7,14; 10). В то же время отрывающиеся при бурении зерна кварца оказывают абразивное воздействие на породоразрушающий инструмент. У песчаника VII категории $K_{абр}=0,81$, и он хорошо бурится твердосплавными коронками; у песчаника IX категории $K_{абр}=1,50$, и твердосплавные вставки при его бурении быстро изнашиваются, несмотря на высокую начальную механическую скорость.

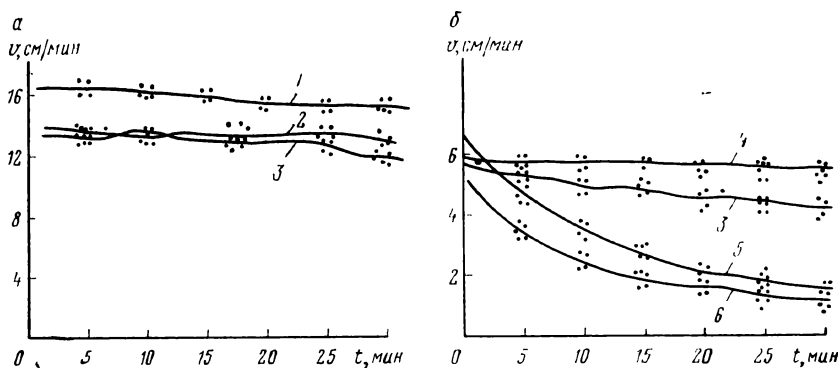


Рис. 31. Графики изменения механической скорости в рейсе:

а — твердосплавные коронки СА-2; б — однорядные алмазные коронки; 1 — известняк; 2 — лабрадорит; 3 — песчаник; 4 — габбро; 5 — гранит; 6 — кварцит; $\rho=18000$ Н; $n=420$ об/мин

Рассмотрим характер механической скорости вращательно-ударного бурения в течение рейса при проходке горных пород, типичных для выделенных областей (рис. 31).

Из рис. 31,а видно, что изменение механической скорости в течение рейса для всех пород имеет одинаковый характер: скорость в течение рейса приблизительно стабильна.

Из рис. 31,б видно, что при бурении пород типа песчаников и габбро механическая скорость в течение рейса относительно стабильна. Падение механической скорости в рейсе при бурении пород типа гранита и кварцита объясняется интенсивным заполированием алмазов.

Вследствие изложенного область, эффективную для вращательно-ударного бурения алмазными коронками, необходимо разделить еще на две группы: породы, не вызывающие заполирование алмазов, и породы, вызывающие интенсивное заполирование алмазов.

В отдельную группу также следует выделить трещиноватые породы — все породы перечисленных групп, разбитые тектоническими нарушениями или интенсивной трещиноватостью, так как бурение этих пород имеет свои отличительные особенности.

Таким образом, зная наименование и характер сплошности горной породы, характер износа породоразрушающего инструмента и значения физико-механических свойств по ОСТ 41-89—74, который в настоящее время введен во всех геологических управлениях, легко определить, к какой группе относится горная порода, и использовать технологические рекомендации, разработанные для этой группы.

1 ГРУППА — УПРУГО-ПЛАСТИЧНЫЕ ПОРОДЫ (ОБЛАСТЬ ТВЕРДОСПЛАВНОГО БУРЕНИЯ)

Рациональный тип коронок выбирали в полевых условиях при бурении сланцев гидроударником ГВ-5 в экспедициях Донецкого и Кузнецкого угольных бассейнов (табл. 32 и 33).

Анализ таблиц показывает, что наиболее эффективной в данных условиях является коронка СА-2.

Расход очистного агента играет при гидроударном бурении особую роль, так как поток промывочной жидкости служит носителем энергии для работы гидроударной машины и его количество определяет основные параметры ее рабочей характеристики, что в конечном счете влияет на механическую скорость. Поэтому сущность исследований сводилась к выявлению взаимного влияния на механическую скорость изменения в некоторых незначительных пределах параметров энергии, частоты ударов и таких технологических факторов, как подпор в колонковой трубе, подклинка керна, степень очистки забоя от шлама, перепад давления в системе (рис. 32).

Результаты исследований по выбору рациональных типов твердосплавных коронок при вращательно-ударном бурении в Донбассе

Коронка	Сланец песчаный VII категории				Переслаивание сланцев и песчаников VII—VIII категорий				Сланец глинистый VI—VII категорий			
	$v_{м.ср'}$ м/ч	$v_{м'}$ %	$L_{р.ср'}$ м	$L_{р'}$ %	$v_{м.ср'}$ м/ч	$v_{м'}$ %	$L_{р.ср'}$ м	$L_{р'}$ %	$v_{м.ср'}$ м/ч	$v_{м'}$ %	$L_{р.ср'}$ м	$L_{р'}$ %
Краснодонская ГРЭ, участок Краснодонский Южный № 1												
CA-1	1,89	100	3,38	116	0,79	100	3,24	100	—	—	—	—
CA-3	1,37	—	3,15	—	—	—	—	—	—	—	—	—
CA-2	2,08	110	3,77	100	1,03	130	3,58	110	—	—	—	—
Краснодонская ГРЭ, участок Ново-Анновский												
CA-3	1,26	100	5,22	100	1,19	100	5,53	100	1,01	100	4,88	100
CA-2	1,45	115	7,1	136	1,54	129	6,32	114	1,4	139	6,37	131
Лутугинская ГРЭ, участок Грабовский рудник												
CA-1	1,38	100	5,09	100	—	—	—	—	—	—	—	—
CA-2	1,2	—	4,7	—	—	—	—	—	—	—	—	—
CA-3	1,41	102	5,57	109	—	—	—	—	—	—	—	—
Красноармейская ГРЭ, участок Красноармейский Западный № 2—3												
CA-3	2,19	100	6,65	100	—	—	—	—	—	—	—	—
CA-2	2,57	117	6,83	103	—	—	—	—	—	—	—	—

Примечание. Проходку на коронку принимали равной проходке за рейс, так как коронку повторно не использовали.

Таблица 33

Результаты исследований по выбору рациональных типов твердосплавных коронок при вращательно-ударном бурении в Кузбассе

Порода	Категория породы	Коронка	Средняя механическая скорость, м/ч	Средняя проходка за рейс, м
Алеврит	IV—V	CM-5	3,29	3,39
		CA-2	3,41	3,49
		CA-1	2,72	3,56
Аргиллит	V—VI	CM-5	3,12	4,22
		CA-2	3,20	4,25
		CA-1	2,83	4,40
Песчаник	VI—VII	CM-5	3,03	3,03
		CA-2	4,10	4,10
		CA-1	3,23	3,23

Примечание. Проходку на коронку принимали равной проходке за рейс, так как коронку повторно не использовали.

Из графика (рис. 32) видно, что механическая скорость в исследуемых пределах с увеличением расхода возрастает. Наиболее интенсивный рост наблюдается в диапазоне расхода 120—140 л/мин, т. е. в диапазоне, когда рабочие параметры гидроударника приближаются к оптимальным. Следовательно, при бурении пород I группы в условиях скважины оптимальными остаются параметры расхода 140—150 л/мин, которые обеспечивают энергию удара гидроударника ГВ-5 10—15 Дж и частоту ударов 3000—3500 1/мин.

Очевидно, такой расход не приводит к чрезмерному подпору в колонковой трубе, подклинке керна, скоплению шлама, несмотря на высокие механические скорости бурения.

Соответственно при бурении скважин гидроударником ГВ-6 пород этой группы рекомендуемый расход составит 120 л/мин (2 л/мин на 1 мм диаметра коронки).

Опытные работы по определению рациональных значений частоты вращения и осевой нагрузки проводили при бурении алевролитов, аргиллитов и переслаивающихся пород (алевролитов, аргиллитов, песчаников) на месторождениях Донецкого бассейна.

Результаты обобщали с помощью математической статистики и последующим анализом методом корреляции, что позволило получить математическую модель в виде полинома первой степени, адекватно описывающую зависимость механической скорости от режимных параметров в исследуемых пределах (рис. 33). Уравнения связи приведены в табл. 34.

Анализируя полученные графики и уравнения, можно сделать следующие выводы.

Таблица 34

Уравнения связи механической скорости бурения с осевой нагрузкой (x) и частотой вращения (y) для пород Донбасса

Порода	Категория пород по ОСТ 41-86-74	Уравнение связи
Аргиллит	VI	$y = 2,0x + 2,0 \cdot 10^{-4}x^2 + 14,7 \cdot 10^{-4}x + 0,5$
Алевролит	VII	$y = 0,7x + 1 \cdot 10^{-4}x^2 + 10 \cdot 10^{-4}x + 0,3$
Переслаивающиеся породы	VI—VII	$y = 0,001x + 10^{-4}x^2 + 14,7 \cdot 10^{-4}x + 0,7$

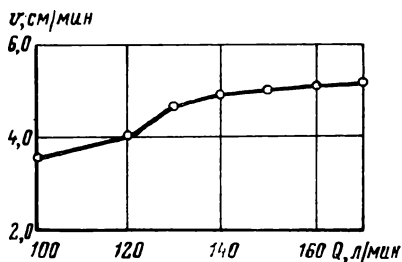


Рис. 32. График влияния расхода очистного агента на механическую скорость при бурении машинами ГВ-5 песчано-глинистых сланцев

1. Функции связи механической скорости с режимными параметрами имеют линейный характер (уравнения высших порядков оказались неадекватными). Это говорит о том, что оптимальные значения факторов находятся вне области исследований. Установление этих значений обусловлено техническими возможностями применяемого в настоящее время оборудования и инструмента.

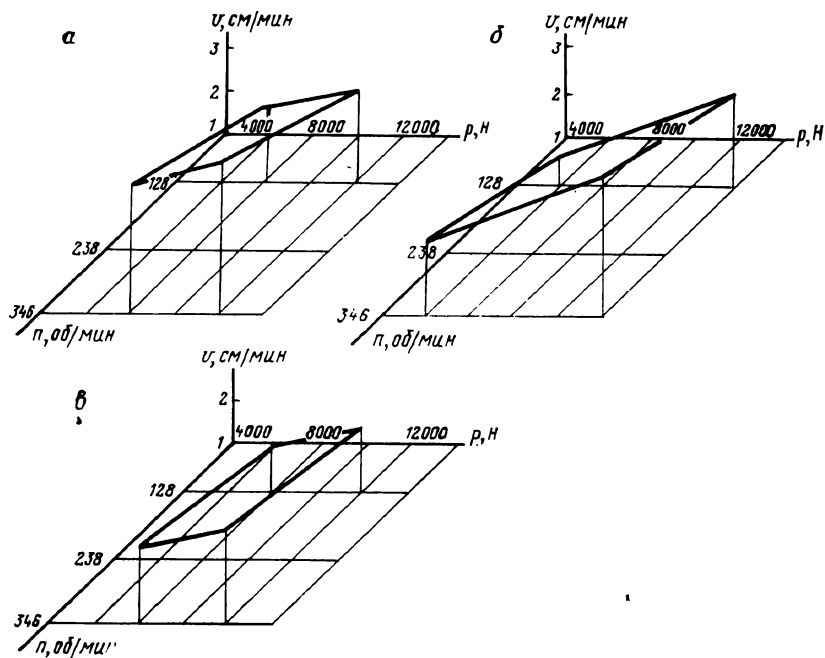


Рис. 34. Графики зависимости механической скорости от осевой нагрузки и частоты вращения при алмазном вращательно-ударном бурении:

a — габбро $\rho=24$ (IX категория); *б* — песчаник $\rho=12$ (VII категория); 1, 3 — вращательное бурение; 2, 4 — вращательно-ударное бурение; I — 500 об/мин; II — 1000 об/мин

2. Знаки при коэффициентах уравнения положительные. Это говорит о том, что увеличение механической скорости возможно за счет более высоких осевых нагрузок и частот вращения снаряда.

3. Наибольшее влияние на величину механической скорости бурения оказывает изменение частоты вращения снаряда:

4. Линейный характер связи говорит об имеющихся на производстве резервах повышения механической скорости вследствие улучшения общей технологии бурения скважин и технического оснащения буровых агрегатов; применения качественных растворов и смазывающих добавок к ним, утяжеленных бурильных труб и т. д.

II ГРУППА — УПРУГО-ХРУПКИЕ ПОРОДЫ, НЕ ВЫЗЫВАЮЩИЕ ЗАПОЛИРОВАНИЯ АЛМАЗОВ

Исследования по выбору рациональных типов алмазных коронок проводили при бурении песчаников различной крепости в Краснодарской и Лутугинской экспедициях треста «Воршиловградгеология».

Результаты исследований после отбраковки сомнительных опытов по методу Башинского представлены в табл. 35, 36.

Анализ таблиц показывает, что наиболее высокие показатели механической скорости обеспечивают применение однослойных алмазных коронок с нормальной матрицей и наиболее крупными алмазами. С увеличением твердости матрицы и уменьшением крупности алмазов значения механической скорости снижаются. Это можно объяснить спецификой механизма разрушения песчаников, заключающейся в отрыве зерен кварца и разрушении связывающего их цемента.

Таблица 35

Показатели работы алмазных коронок в Краснодарской ГРЭ

Коронка	Расход коронок	Проходка на коронку, м	Проходка за рейс, м	v_m , м/ч	Расход алмазов на 1 м бурения, кар/м	Средняя категория породы
01АЗД10К10	10	53,5	4,6	1,23	0,466	8,98
01АЗК20К10	12	27,2	4,3	1,14	0,758	8,97
01АЗД20К10	12	41,6	4,8	1,22	0,529	8,5
01А4Д20К10	9	27,3	3,9	1,01	0,805	8,65
01АЗД60К30	13	27,0	3,8	0,95	0,728	8,70

Таблица 36

**Показатели работы алмазных коронок в Лутугинской ГРЭ
(трещиноватые породы)**

Коронка	Расход коронок	Проходка на коронку, м	Проходка за рейс, м	v_m , м/ч	Расход алмазов на 1 м бурения, кар/м	Средняя категория породы
01А4Д40К40	10	14,7	2,9	0,98	1,36	8,7
01А4Д30К20	11	11,7	1,68	1,34	1,71	9
14АЗ	8	20,9	1,83	1,43	0,749	9
АКМ	9	5,5	1,39	1,27	1,755	9

Увеличение размеров алмазов ведет к росту числа контактирующих с ними за один оборот зерен породы, что и приводит к повышению скорости бурения. Как видно из табл. 35 и 36, наибольшую проходку на коронку также обеспечивают коронки типа 01АЗД10К10, т. е. имеющие наиболее крупные алмазы и наименее твердую матрицу.

Проходка за рейс в данном случае не определяется конструкцией коронки, в результате чего получены стабильные показатели по всем типам коронок.

При бурении трещиноватых пород в Лутугинской ГРЭ наиболее высокие показатели по средней механической скорости и проходке на коронку получены с применением коронок типа 14А3.

Влияние расхода очистного агента на механическую скорость исследовали в полевых условиях Коммунарской ГРЭ при бурении песчаников X категории на одной из скважин при проходке одной и той же толщи пород с чередованием рейсов вращательным и вращательно-ударным способом. Частота вращения снаряда при этом составляла 328 об/мин, осевая нагрузка — 15 000 Н. Использовали глинистый раствор на базе УЦР вязкостью 18—22 с по СПВ-5 (табл. 37).

Таблица 37

Влияние расхода очистного агента на механическую скорость

Расход очистного агента, л/мин	Средняя механическая скорость бурения, м/ч		Прирост механической скорости бурения		Давление жидкости, МПа
	вращательно-ударного	вращательного	м/ч	%	
100	1,12	1,12	—	—	1,9
120	1,21	1,14	0,07	7,0	2,4
140	1,38	1,12	0,26	23,2	3,2
160	1,40	1,12	0,28	25,0	5,1
180	1,41	1,13	0,28	25,0	7,5

Данные табл. 37 показывают, что изменение расхода очистного агента в широких пределах (от 100 до 180 л/мин) при вращательном бурении практически не влияет на показатели механической скорости бурения. При вращательно-ударном бурении наблюдается интенсивный рост механической скорости с увеличением расхода до 140—160 л/мин. Это объясняется тем, что только при расходе 140—160 л/мин ударник обеспечивает оптимальную энергию удара 1,5—2,0 Дж, необходимую для эффективного разрушения крепких пород. При увеличении расхода жидкости свыше 160 л/мин механическая скорость практически не растет, но резко увеличивается перепад давления.

Таким образом, оптимальным расходом очистного агента при бурении коронок диаметром 76 мм пород II группы следует считать 140—150 л/мин, или около 2,0 л/мин, на 1 мм диаметра коронки. Для коронок диаметром 59 мм оптимальным расходом будет 110—120 л/мин, что соответствует паспортным данным гидроударника ГВ-6.

Рациональные значения частоты вращения и осевых нагруз-

зок определяли в стендовых условиях при проходке блоков габбро и песчаника и в полевых условиях при бурении песчаников Донбасса и роговиков Кривбасса.

Бурение проводили с использованием однослойных алмазных коронок типа 01АЗД10К20 (песчаники) и импрегнированных коронок типа 02ИЗТ200К35 (роговики) диаметром 76 мм с гидроударником ГВ-5.

Из результатов стендовых исследований (рис. 34) видно, что превышение показателей механической скорости вращательно-ударного бурения над вращательным в исследуемых пределах сохраняется при бурении обоих типов пород.

При бурении габбро с ростом нагрузки наблюдается увеличение разности между показателями бурения. Это может быть вызвано улучшением очистки забоя под торцом коронки от выбуриваемого шлама при работе гидроударника. Этим же можно объяснить и тот факт, что при бурении габбро вращательным способом отмечается оптимальное значение осевой нагрузки в пределах 23 000—27 000 Н, в то время как при вращательно-ударном бурении оптимальные значения не достигнуты.

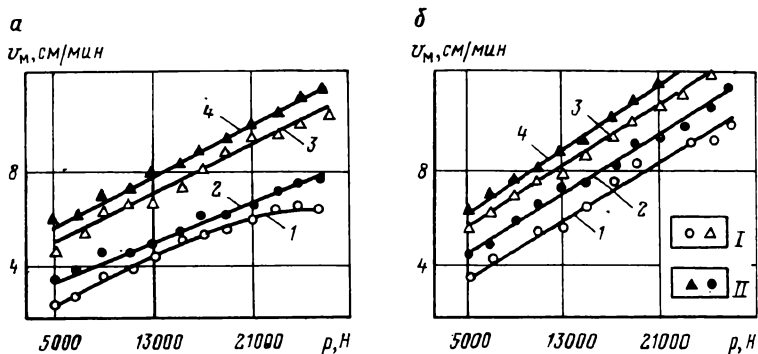


Рис. 33. Графики зависимости механической скорости от частоты вращения и осевой нагрузки:

а — аргиллиты; б — алевролиты; в — пересланывающиеся породы

Результаты полевых исследований представлены на графиках (рис. 35) и в виде уравнений связи механической скорости бурения с частотой вращения и осевой нагрузкой (табл. 38).

Анализируя графики и уравнения, можно отметить следующее:

1) исследуемый участок факторного пространства для всех типов исследуемых пород линеен и описывается уравнением первого порядка (уравнения высших порядков оказались неадекватными);

2) влияние факторов положительно, что свидетельствует об их прямой связи с параметром оптимизации;

3) область максимальных значений параметров оптимизации не достигнута и лежит за пределами изучаемого пространства.

Таким образом, рациональными параметрами режима бурения для исследуемых типов пород следует считать мак-

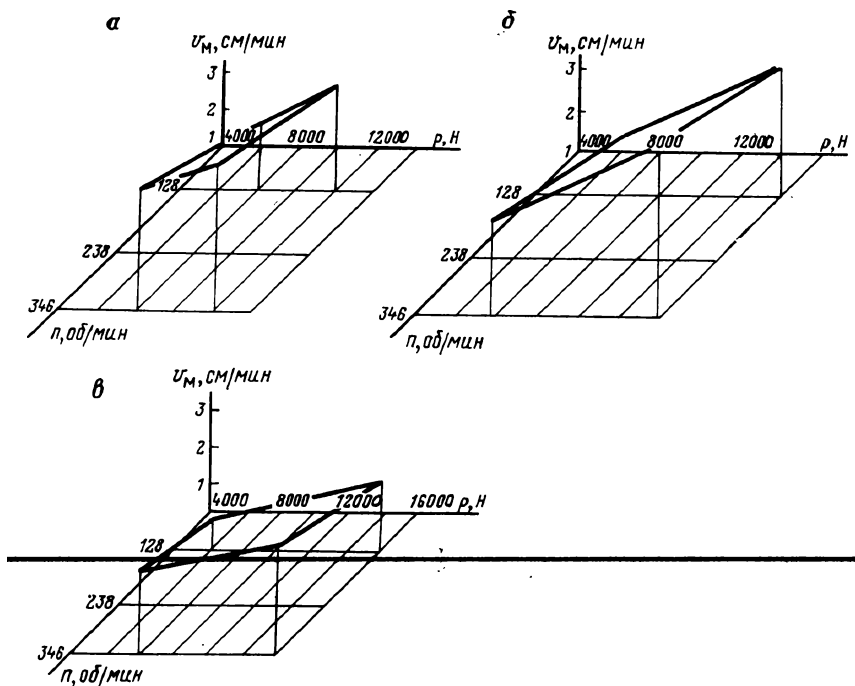


Рис. 35. Графики зависимости механической скорости от частоты вращения и осевой нагрузки (алмазная коронка 01АЗД40К40):

а — песчаники VII—VIII категорий; б — песчаники IX—X категорий; в — роговики IX—X категорий

Таблица 38

Уравнения связи механической скорости бурения, осевой нагрузки (x) и частоты вращения для песчаников Донбасса и роговиков Кривбасса

Порода	Категория породы по ОСТ 41-89-74	Уравнение связи
Песчаник	VII—VIII	$y = -0,29 + 2,4 \cdot 10^{-4} x + 5,10^{-3} z \pm \pm 0,58$
Песчаник	IX—X	$y = -0,98 + 1,1 \cdot 10^{-4} x + 6,9 \cdot 10^{-3} z \pm \pm 0,56$
Роговик	IX—X	$y = -0,87 + 1,2 \cdot 10^{-4} x + 5,4 \cdot 10^{-3} z \pm \pm 0,60$

симально возможные в каждом конкретном случае значения осевой нагрузки и частоты вращения.

Линейный характер зависимости свидетельствует о резервах исследуемого способа, реализация которых возможна вследствие улучшения ющей технологии и повышения технических характеристик буровых станков и прочности буровых труб.

III ГРУППА — ПОРОДЫ, ВЫЗЫВАЮЩИЕ ЗАПОЛИРОВАНИЕ АЛМАЗОВ

В практике разведочного бурения наибольшие трудности вызывает бурение пород, приводящих к заполированию алмазов. Так, при бурении некоторых типов криворожских джеспитов проходка на алмазную коронку составляет 0,60—1,3 м [17]. По данным [4], при бурении яшм в Центральном Казахстане в результате заполирования алмазов проходка на коронку составляет 0,2—0,6 м. В зарубежной литературе также приводятся сведения о низкой буримости этих пород. Так, Л. Армстронг отмечал, что при бурении среднезернистых гранитов проходка на коронку составляет 0,1—1,0 м.

Основными мероприятиями по борьбе с заполированием алмазов являются применение коронок с более мелкими алмазами, увеличение осевых нагрузок, снижение частоты вращения снаряда и уменьшение до минимального значения расхода очистного агента, а также применение эмульсий. По данным работы [4], при бурении пород, вызывающих заполирование алмазов, расход очистного агента не должен превышать 0,5—1,0 л/мин на 1 мм диаметра коронки. Примерно такие же значения рекомендуют С. А. Волков, Н. Н. Корнилов и другие исследователи [6, 17, 18, 22].

Из перечисленных факторов наибольшее влияние на процесс заполирования оказывает частота вращения снаряда. С увеличением частоты вращения резко увеличивается интенсивность заполирования алмазов.

Вследствие изложенного основной целью исследований являлось изучение влияния ударных импульсов на процесс заполирования алмазов и определение возможности снижения интенсивности этого процесса при повышенных частотах вращения снаряда.

Опытные работы проводили в стендовых условиях при бурении блоков лезниковского гранита ($\rho_m=28$; IX категория). При этом применяли алмазные коронки диаметром 76 мм типа 01АЗД20К20 исходя из предположения, что более крупные алмазы в большей степени подвержены заполированию.

Осевая нагрузка на забой составляла 15 000 Н, расход очистного агента 40 л/мин на коронку и 150 л/мин на гидроударник. С целью сокращения подачи очистного агента на алмазную коронку между колонковой трубой и гидроударной

машиной устанавливали переходник со сбрасывающим калибровочным отверстием. В процессе исследований фиксировали механическую скорость через 1 мин бурения.

По результатам исследований после их статистической обработки составляли уравнения регрессии (рис. 36):

Обозначения на рис. 36		Уравнение регрессии
<i>a</i>	<i>1</i>	$v = 7,4 \cdot t^{-0,06t}$
	<i>2</i>	$v = 5,4 \cdot t^{-0,1t}$
<i>б</i>	<i>1</i>	$v = 8,8 \cdot t^{-0,045t}$
	<i>2</i>	$v = 6,99 \cdot t^{-0,118t}$
<i>в</i>	<i>1</i>	$v = 12,67 \cdot t^{-0,08t}$
	<i>2</i>	$v = 8,72 \cdot t^{-0,168t}$

значения показателей начальной механической скорости v_0 , ее декремента α и их отношения (критерий оптимизации), вычисленные для различных режимов бурения, представлены в табл. 39.

Таблица 39

Значения начальной механической скорости и ее декремента при бурении гранита IX категории алмазными коронками

Вид бурения	Сравниваемые показатели	Частота вращения снаряда, об/мин		
		420	625	1020
Вращательный	v_0 , см/мин	5,4	6,99	8,72
	α	0,100	0,118	0,168
	v_0/α	54,0	59,2	51,9
Вращательно-ударный	v_0 , см/мин	7,34	8,83	12,67
	α	0,06	0,045	0,08
	v_0/α	122,3	196,2	158,37

На основании данных исследований можно сделать следующие выводы.

Более высокие значения начальной механической скорости бурения при использовании гидроударников и более низкие значения ее декремента свидетельствуют о том, что наложение на алмазную коронку ударных импульсов интенсифицирует процесс разрушения породы (v_0) и снижает процесс заполирования алмазов (α).

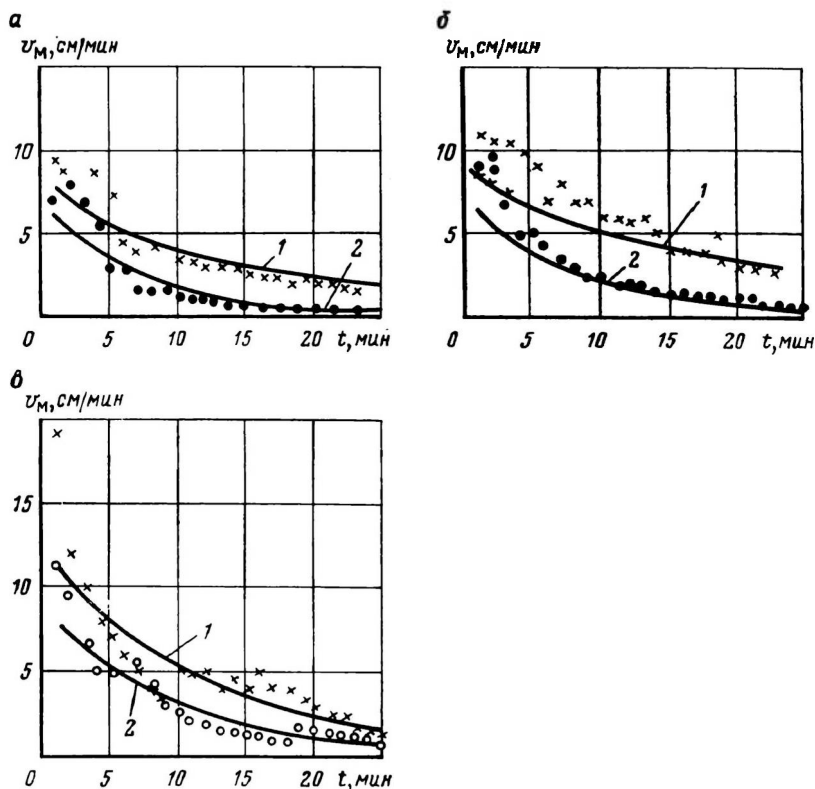


Рис. 36. Графики зависимости механической скорости от времени при бурении пород, вызывающих заполирование алмазов:

а — 420 об/мин; б — 620 об/мин; в — 1025 об/мин; 1 — вращательно-ударное бурение; 2 — вращательное бурение алмазной коронкой 01АЗД20К20

Оптимальной частотой вращения снаряда при применении гидроударников является 625 об/мин. Несмотря на то что механическая скорость бурения при 1020 об/мин продолжает расти, интенсивное падение ее в течение рейса свидетельствует о том, что

этот режим может быть оправдан только на небольших глубинах скважины.

Сравнивая значения начальных механических скоростей и их декрементов, полученных при вращательном и вращательно-ударном способах, можно сделать вывод о том, что вращательно-ударное бурение при частотах вращения около 600 об/мин обеспечивает более высокие показатели, чем вращательное бурение при частотах вращения 1000 об/мин.

При бурении пород, вызывающих заполирование алмазов, следует рекомендовать использовать делители потока жидкости посредством которых регулируется поступление определенного количества промывочного агента к алмазной коронке, а излишек его после использования в гидроударнике сбрасывается в затрубное пространство.

IV ГРУППА — ТРЕЩИНОВАТЫЕ ПОРОДЫ

В процессе проведения стендовых и полевых исследований вращательно-ударного бурения как твердосплавными, так и алмазными коронками при проходке трещиноватых пород также получен большой рост показателей. Это вызвано, главным образом тем, что наложение ударных импульсов уменьшает подклинку керна. Наиболее низкий рост показателей получен при бурении трещиноватых пород с углом падения, близким к горизонтальному.

В работе [11] низкий рост показателей при горизонтальной трещиноватости объясняется тем, что в этом случае могут образовываться обломки горной породы по длине, примерно равной их диаметру. В результате поворота такого обломка он может плотно расклиниться в колонковой трубе. В этом случае наложение ударных импульсов может способствовать большому повороту обломка керна и, следовательно, большому его самозаклиниванию.

Однако в подавляющем большинстве случаев наложение ударных импульсов при бурении трещиноватых пород надежно снижает самозаклинивание керна.

При проходке трещиноватых пород вращательным способом особо низкие показатели бывают при алмазном бурении, так как в результате возникновения беспорядочных ударных нагрузок, вызванных самозаклиниванием керна, происходит повышенный износ алмазов и матриц коронок. До последнего времени не имелось эффективных средств для устранения отмеченных явлений. В связи с этим проведены исследования по определению эффективности проходки трещиноватых пород алмазными коронками с гидроударной машиной ГВ-5.

Исследования проводили в Лутугинской экспедиции треста «Ворошиловградгеология» при бурении песчаников IX катего-

при путем чередования рейсов вращательного и вращательно-ударного способов. Осовая нагрузка составляла 10 000 Н, частота вращения снаряда — 238 об/мин, расход очистного агента — 130 л/мин.

Результаты исследований следующие:

Способ бурения	Вращатель- но-ударный	Вращатель- ный
Пробурено, м	362,5	233,5
Средняя механическая скорость, м/ч	1,43	0,94
Средняя проходка за рейс, м	1,83	13,7
Средняя проходка на коронку, м	20,9	1,05
Среднее число оставшихся в коронке алмазов	78	42

На рис. 37 представлен график изменения механической скорости в течение рейса, снятый при бурении трещиноватых песчаников в Краснодонской ГРЭ, из которого видно, что механическая скорость при вращательно-ударном бурении стабильна, а при вращательном резко падает. Следовательно, наложение ударных импульсов на алмазную коронку при проходе трещиноватых пород резко повышает все показатели бурения.

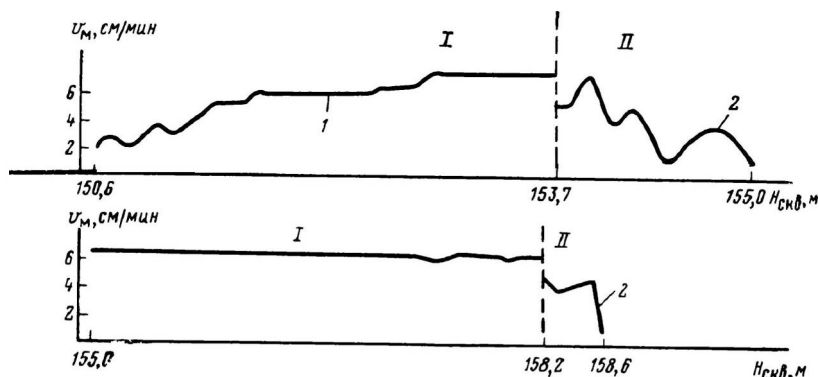


Рис. 37. График изменения механической скорости в рейсе при алмазном бурении трещиноватых песчаников:

I — алмазная коронка с ГВ-5; II — то же без ГВ-5; 1 — приработка новой алмазной коронки; 2 — самозаклинивание керна

Рекомендации по параметрам режима бурения в трещиноватых породах, по данным исследований и на основании анализа литературных источников, приведены в табл. 40.

Таблица 40

Рекомендации по выбору параметров режима вращательно-ударного бурения

Группа горной породы	Наиболее типичные породы	Физико-механические свойства			Характер разрушения
		F_d	$K_{абр}$	ρ_m	
I. Упруго-пластичные	Известняки; песчано-глинистые сланцы; лабрадориты; гранодиориты; песчаники с глинистым цементом и т. п.	1,7—14,8	0,4—2,28	8—20 (V—VIII категории)	Превалирует смятие — резание
II. Упруго-хрупкие, вызывающие заполирование алмазов	Габбро*; диориты; сyenиты; порфириты; базальты; песчаники*; некоторые типы гранитов и т. п.	4,0—15	0,8—2,5	20—70 (IX—XI категории)	Хрупкий: скол, образование трещин, раздавливание, частичное резание
III. Вызывающие заполирование алмазов	Граниты; кварциты; джеспилиты; яшмы; таккониты; некоторые типы песчаников и роговиков	6—20	1,5—3,0	20—90 (IX—XII категории)	Микрорезание, царапание породы, обусловленные шероховатостью поверхности алмаза
IV. Трещиноватые	Породы I—III групп, разбитые интенсивной трещиноватостью или тектоническими нарушениями	1,7—20	0,4—3	8—90 (V—XII категории)	Скол, резание, микрорезание и т. д. Самозаклинивание керна

* Максимально возможные значения осевых нагрузок и частот вращения надо выбирать, исходя из условий скважины, наличия колонн обсадных труб и т. п.

Таблица 40 (продолжение)

Коронка	Осевая нагрузка H при диаметре в мм		Частота вращения в об/мин при диаметре в мм		Расход очистного агента в л/мин при диаметре в мм		Примечания
	59	76	59	76	59	76	
СА-2	1100	14000	450	346	100—120	140—150	
01А3 01А4 07А3 04ДП 06ДП 02И3	max*	max*	max*	max*	110—120	140—150	С увеличением крепости пород применять более мелкозернистые коронки, вплоть до импрегнированных; с увеличением абразивности пород применять коронки с более твердой матрицей
02И3 02И4 03И5 01А3 01А4	max*	max*	200—800	150—600	40 (на коронку) 120 (на гидроударник)	80 (на коронку) 150 (на гидроударник)	Применять делители потока жидкости. Осевую нагрузку увеличивать постепенно в течение 10—15 мин бурения до максимальных возможных значений
СА-2 (для пород до VII категории); 14А3 02И3 02И4 (для более крепких пород)	3500—13500	5000—18000	200—300	150—240	40 (на коронку) 120 (на гидроударник)	80 (на коронку) 150 (на гидроударник)	Бурение производить без рвательных колец, породы высокой крепости бурить импрегнированными коронками. Применять делитель потока жидкости

исходя из прочности бурящего вала и технологических ограничений по выходу керна,

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Дальнейшее развитие вращательно-ударного бурения для повышения его эффективности и расширения сфер применения проводится как в области совершенствования технических средств непосредственно для гидроударного бурения, так и в направлении сочетания его с другими прогрессивными методами бурения скважин.

Основные направления исследовательских и конструкторских работ сводятся к следующему:

1) совершенствование метода с использованием в качестве породоразрушающего инструмента специальных алмазных коронок, армированных сверхтвердыми синтетическими материалами (СТМ);

2) совершенствование техники и технологии проходки направленных скважин и их опробования с применением гидроударных машин как средства, повышающего качество буровых работ;

3) модернизация и унификация гидроударных машин;

4) создание съемных гидроударных машин для работы в составе комплексов снарядов со съемными керноприемниками КССК и ССК;

5) создание гидроударных машин для бурения скважин диаметром 46 мм;

6) дальнейшее совершенствование рабочего процесса машин.

Изложенные выше исследования по разработке вращательно-ударного бурения с применением серийных твердосплавных и алмазных коронок являются первым шагом в его создании. Использование серийного породоразрушающего инструмента позволило быстро и широко, с высокими технико-экономическими показателями внедрить способ в производство.

Вместе с тем серийный породоразрушающий инструмент, применяемый при вращательном бурении, разрабатывался и совершенствовался в направлении максимального использования эффекта резания, истирания или раздавливания горной породы. Использование его в новом качестве — для вращательно-ударного бурения — не позволяет в полной мере реализовать эффект ударного разрушения горных пород. Уже имеющиеся результаты свидетельствуют о значительных резервах исследуемого метода вследствие создания специальных или совершенствования существующих коронок. Проводятся исследования по эффективности наложения ударных импульсов на коронки, армированные искусственными алмазами, типа АСПК и СВС-СП. Комплекс исследований, проведенный в стендовых и полевых условиях по наложению ударных импульсов генерируемых гид-

роударником ГВ-5 на коронку КСК.01 диаметром 76 мм, показал, что механическая скорость возрастает в 1,2—1,4 раза, а проходка на коронку — в 1,3—1,5 раза.

Завершение этих работ позволит повысить технико-экономические показатели вращательно-ударного бурения колонковым способом в широком диапазоне пород IV—XII категорий.

Продолжается совершенствование техники и технологии проходки направленных скважин гидроударными машинами. Последние работы КАЗИМСа говорят о том, что при специальной компоновке снаряда с гидроударником можно бурить в самих сложных геологических условиях без исправления траектории скважины.

В СКБ завершились работы по созданию снарядов УКН-76 и УКН-59, применение которых с гидроударниками обеспечит лучший выход керна, чем в случае использования эжекторных снарядов и двойных колонковых труб при вращательном бурении.

Расширение объемов гидроударного бурения связано также и с происходящей в настоящее время заменой глинистых растворов на маловязкие полимерные, с внедрением ПАВ и совершенствованием методов борьбы с поглощением промывочной жидкости.

Одним из направлений дальнейшего развития вращательно-ударного бурения является также модернизация и унификация гидроударных машин.

Основная цель этой работы — создание унифицированных гидроударных машин для бурения скважин диаметром 76 и 59 мм в породах IV—XII категорий с различным типом породоразрушающего инструмента, работающих как в ударном, так и в высокочастотном режимах только за счет изменения регулировочных параметров и расхода жидкости. В настоящее время в СКБ ВПО «Союзгеотехника» созданы две машины: Г-76 — для замены гидроударников Г-7 и ГВ-5 и Г-59 — для замены гидроударников Г-9 и ГВ-6. Каждая из них может работать как в ударном, так и в высокочастотном режимах.

Унифицированные гидроударные машины модернизированы на основании результатов последних исследований по совершенствованию рабочего процесса и ряда авторских свидетельств, что позволило повысить их забойную мощность на 15—20% по сравнению с аналогами.

Унификация гидроударных машин (создание двух типов вместо четырех) значительно облегчит их серийное производство и повысит качество изготовления, а модернизация (повышение забойной мощности) приведет к росту объемов и повышению технико-экономической эффективности вращательно-ударного бурения.

Другим путем улучшения энергетических показателей работы гидроударника является уменьшение рассеивания волновой

энергии за счет создания специальных компоновок: гидроударник — отражатель гидравлических волн.

В последние годы в СКБ ВПО «Союзгеотехника» в содружестве с ДГИ им. Артема и КАЗИМСом проведен ряд исследований по эффективности работы пневматических (с ДГИ), жестких (с КАЗИМСом) и эластичных (СКБ) отражателей, которые показали перспективность работы в этом направлении.

Погружной пневматический отражатель представляет собой трубу, с помещенным в ней упругим элементом, аккумулирующим энергию отраженных волн и возвращающим их в систему.

Результаты испытаний пневматического погружного отражателя ППО-70, по данным Днепропетровского горного института (ДГИ) им. Артема, показывают, что применение отражателей позволяет повысить энергию и частоту ударных импульсов и значительно снизить виброперемещение бурильной колонны.

В последние годы в практику разведочного бурения интенсивно внедряется бурение со съемными керноприемниками и с выносом керна обратным потоком промывочной жидкости.

В настоящее время ВИТром разработаны и сданы в серийное производство три снаряда для бурения в крепких породах ССК-76, ССК-59 и ССК-46, в СКБ ВПО «Союзгеотехника» сдан в серийное производство комплекс КССК-76, предназначенный для проходки пород средней крепости, склонных к кавернообразованию, главным образом на угольных месторождениях. Также сдан в серию комплекс КГ.100 для бурения в мягких и средних породах на глубину 100 м с выносом керна обратным потоком промывочной жидкости.

Эффективность бурения со съемными керноприемниками обеспечивается главным образом вследствие сокращения времени на спуско-подъемные операции. Однако она могла бы быть выше при условии обеспечения высоких механических скоростей, которые в реальных комплексах ниже, чем при обычном бурении, так как применение съемных керноприемников сопряжено с необходимостью увеличения ширины торца алмазной коронки. Кроме того, в результате подклинок керна эффективность комплексов снижается за счет увеличения времени на подъем керноприемника.

В СКБ проведены исследовательские работы по выявлению целесообразности и возможности применения гидроударных машин в составе снарядов КССК и ССК.

Первым этапом этой работы было исследование целесообразности и установление предельных значений величины энергии удара на серийную коронку К. 14 снаряда КССК-76 в условиях стенда.

Результаты исследований показали, что наложение на алмазную коронку К. 14 ударных импульсов с энергией 20—25 Дж приводит к увеличению механической скорости на 30—70 %; при этом износ алмазной коронки не увеличился.

Второй этап работы — выявление возможности создания съемной гидроударной машины, работающей в составе снаряда КССК-76. Проведенный комплекс опытно-конструкторских работ показал, что эта задача разрешима.

В результате впервые в отечественной и мировой практике создан снаряд ССГ-1, представляющий собой съемную гидроударную машину со специальными элементами для работы ее в составе снаряда КССК-76.

Применение снаряда ССГ-1 в Шахтинской ГРЭ обеспечило рост механической скорости и проходки за рейс на 30—40 %, при небольшом увеличении стойкости коронки.

Учитывая, что планом развития отрасли предусмотрен объем бурения снарядами со съемными керноприемниками в несколько миллионов метров в год, создание съемных гидроударников для этих комплексов позволит значительно расширить область эффективного применения вращательно-ударного бурения.

В СКБ ВПО «Союзгеотехника» также ведутся работы по установке в серийном комплексе КГ-100 и разрабатываемом КГ-300 (с выносом керна обратным потоком промывочной жидкости) кольцевых вибраторов и волновых гидроударников, вызывающих поперечные и продольные колебания внутренней колонны труб и улучшающих условия прохождения по ней керна.

Исследования и опытно-конструкторские работы в этом направлении открывают еще одну область эффективного применения вращательно-ударного бурения.

Учитывая тенденцию уменьшения диаметров бурения, в СКБ проводятся работы по созданию гидроударной машины для бурения скважин диаметром 46 мм. Макет машины создан по аналогии с унифицированными гидроударниками Г-76 и Г-59.

Исследования, проведенные в стендовых условиях, показали, что при расходе 40—50 л/мин гидроударник обеспечивает энергию единичного удара 3,0—5,0 Дж и частоту ударов 2000—2300 1/мин.

Создание и широкое внедрение в практику разведочного бурения на твердые полезные ископаемые таких прогрессивных технологических методов, как высокооборотное алмазное бурение с использованием легкосплавных бурильных труб и съемных керноприемников, не приведет в ближайшие 10—15 лет к снижению объемов гидроударного бурения. Проанализировав на основе обобщения большого фактического материала рациональные области применения гидроударников и указанных выше способов, Л. Н. Гаврилов и Б. В. Мурзаков [3] убедительно доказали, что, несмотря на близкую эффективную область применения прогрессивных методов бурения (породы VII—XII категорий), все эти методы имеют свои преимущества и недостатки и будут развиваться параллельно или, как было показано выше, совместно.

Расширению объемов внедрения гидроударного бурения и областей его эффективного применения будут способствовать также завершение работ по исследованию гидроударного бескернового бурения серийными шарошечными и лопастными долотами, увеличение объемов бурения горизонтальных и восстанавливающих скважин, а также расширение глубин эффективного применения гидроударников вследствие использования насосов с давлением 10,0 МПа.

Таким образом, результаты работ по совершенствованию гидроударных машин и расширению областей их рационального применения свидетельствуют о том, что резервы вращательно-ударного бурения далеко не исчерпаны и этот способ как самостоятельный или в сочетании с другими прогрессивными способами будет развиваться и содействовать прогрессу разведочного бурения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Блинков В. Г. Обобщение и распространение передового опыта в бурении. М., Недра, 1978.
2. Владиславлев В. С., Дуплик-Выдра К. С., Яфаров А. У: Исследования сил сопротивления при бурении твердосплавными коронками. — Изв. вузов. «Геология и разведка», 1970, № 2, с. 35—41.
3. Гаврилов Л. Н., Мурзаков Б. В., Усков Ю. Б. Рациональные области применения прогрессивных методов бурения разведочных скважин. М., ВИЭМС, 1977.
4. Глазов М. Г. Исследование и разработка технологии алмазного бурения горных пород, вызывающих заполирование алмазов буровых коронок. — Дис. на соиск. уч. степени канд. техн. наук: Днепропетровск, Днепропетровский горный институт, 1979.
5. Граф Л. Э., Киселев А. Т., Коган Д. И. Техника и технология гидроударного бурения. М., Недра, 1975.
6. Исаев М. И., Пономарев П. В. Основы прогрессивной технологии алмазного бурения геологоразведочных скважин. М., Недра, 1975.
7. Калинин В. Д., Спицин А. И. Прочность алмазов на удар. — Алмазы, 1971, № 5, с. 15—20.
8. Кардыш В. Г. Исследование и разработка технологических основ оптимизации параметров и требования к конструктивному устройству станков для геологоразведочного бурения — Дис. на соиск. уч. степени д-ра техн. наук. М., МГРИ, 1978.
9. Кожевников А. А. Исследование процесса разрушения горных пород при колонковом бурении. — Дис. на соиск. уч. степени канд. техн. наук. Днепропетровск. Днепропетровский горный институт. 1974.
10. Козловский Е. А. Оптимизация процесса разведочного бурения, Недра, М., 1975.
11. Киселев А. Т., Крусир И. Н. Исследование и разработка рекомендаций по бурению гидроударными машинами с применением алмазного породоразрушающего инструмента. — Экспресс-информация. 1975. № 18, с. 12—16.
12. Любимов Н. И. Классификация горных пород и рациональное применение буровой техники. М., Недра, 1977.
13. Любимов Н. И. Рациональный породоразрушающий инструмент и способы бурения скважин при разведке месторождений полезных ископаемых. М., ВИЭМС, 1971.
14. Мавлютов М. Р. Разрушение горных пород при бурении скважин. М., Недра, 1978.
15. Матвеев Ю. А. Исследование и разработка технических средств для гидроударного бурения разведочных скважин в породах средней крепости. — Дис. на соиск. уч. степени канд. техн. наук. М., МГРИ, 1972.
16. Механическое разрушение горных пород комбинированным способом / Кичигин А. Ф., Игнатов С. И., Лазуткин А. Г. и др. М., Недра, 1972.
17. Некоторые особенности разрушения горных пород Кривбасса при алмазном бурении / М. И. Исаев, Г. И. Ширко, В. Я. Кушков и др. — Методика и техника разведки, 1971, № 74, с. 20—23.
18. Справочник по алмазному бурению геологоразведочных скважин / Г. А. Блинов, В. И. Васильев, О. С. Головин и др. М., Недра, 1975.
19. Оношко Ю. А., Плавский Д. И. Сравнительные результаты бурения алмазными и твердосплавными коронками на высоких скоростях вращения снаряда. — Методика и техника разведки, 1973, № 88, с. 17—22.
20. Опыт применения погружных пневматических отражателей / Е. Ф. Эпштейн, В. В. Черненко, А. Т. Киселев, и др. — Изв. Днепропетровского горного института, 1978, кн. XXI.

21. *Ступкина Л. М.* Влияние полирования поверхности алмазов на их прочность при одноосном сжатии. — Методика и техника разведки, 1975, № 96, с. 10—15.
22. *Сулашкин С. С.* Практическое руководство по геологоразведочному бурению. М., Недра, 1978.
23. *Сулашкин С. С.* Технология бурения геологоразведочных скважин. М., Недра, 1973.
24. *Шамшев Ф. А., Тараканов С. Н., Кудряшов Б. Б.* Технология и техника разведочного бурения. М., Недра, 1973.
25. *Эйгелес Р. М.* Разрушение горных пород при бурении. М., Недра, 1971.
26. *Эйгелес Р. М., Стрекалова Р. М.* Расчет и оптимизация процесса бурения скважин. М., Недра, 1977.
27. *Ясов В. Г.* Теория и расчет рабочих процессов гидроударных буровых машин. М., Недра, 1977.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение (А. Т. Киселев)	3
Исследование процесса бурения (А. Т. Киселев, И. Н. Крусир)	7
Основные направления применения гидроударных машин	7
Наложение ударных импульсов на породоразрушающий инструмент, работающий во вращательном режиме	16
Противоречие между наложением ударных импульсов на алмазный породоразрушающий инструмент и технологическими требованиями о снижении вибрации и ударов	21
Разрушение горных пород единичным индентором	22
Частота наложения ударных импульсов	27
Исследование процесса бурения	32
Рациональные значения энергии удара в процессе бурения	39
Сущность вращательно-ударного бурения и его особенности	45
Разработка конструкций гидроударных машин для вращательно-ударного бурения (А. Т. Киселев)	47
Исследования возможности повышения частоты ударов	47
Аналитические исследования параметров макетов	51
Стендовые исследования и испытания макетов	54
Явление кавитации и разработка рекомендаций, исключающих ее влияние	63
Основные принципы разработки конструкций высокочастотных гидроударных машин	66
Узел клапана	67
Определение площади поршня	68
Конструкция, принцип действия и техническая характеристика гидроударных машин ГВ-5 и ГВ-6	69
Стендовые испытания гидроударников ГВ-5 и ГВ-6 в процессе бурения	71
Исследования гидроударных машин в скважинах	72
Технико-экономическая эффективность	73
Технология бурения (А. Т. Киселев, И. Н. Крусир)	76
Критерии оптимизации и методы исследований	76
Буримость и группы пород	79
Заключение (А. Т. Киселев)	96
Список литературы	101

Андрей Тимофеевич Киселев
Игорь Николаевич Круси

ВРАЩАТЕЛЬНО-УДАРНОЕ БУРЕНИЕ ГЕОЛОГОРАЗВЕДОЧНЫХ СКВАЖИН

Редактор издательства Е. И. Брагина
Обложка художника А. Е. Григорьева
Художественный редактор В. В. Шутько
Технический редактор Т. А. Герчикова
Корректор Л. А. Столярова
ИБ № 3225

Сдано в набор 13.04.82.	Подписано в печать 30.06.82.	T-13447
Формат 60X90/16	Бумага типогр. № 2	Гарнитура Литературная Печать высокая
Усл.-печ. л. 6,5	Усл. кр.-отг. 6,87	Уч.-изд. л. 6,7 Тираж 3550 экз.
Заказ 188/7536-5	Цена 35 коп.	

~~Ордена «Знак Почета» издательство «Недра» 103633 Москва К-12 Третьяковский
проезд, 1/19~~

Подольский филиал ПО «Периодика» Союзполиграфпрома
при Государственном комитете по делам издательств,
полиграфии и книжной торговли
г. Подольск, ул. Кирова, 25