

Опыт применения гидравлических струй высокого давления при создании эффективных средств разрушения горных пород

В.Г. Мерзляков, проф., докт. техн. наук (Генеральный директор ООО «МО-ГОРМАШ»), В.Е.Бафталовский, к.т.н, зав. лабораторией, В.Н.Байдинов, аспирант (ННЦ ГП- ИГД им. А.А. Скочинского)

Представлены результаты исследований в области разработки и использования в горном деле гидроструйных технологий. Разработаны эффективные средства гидравлического, гидроабразивного и гидромеханического разрушения горных пород. Особое внимание уделено совершенствованию разрушающей способности струй высокого давления с целью повышения эффективности резания горных пород и других твердых материалов.

Использование энергии высокоскоростных струй воды для резания горных пород и твердых материалов (гидроструйные технологии) получило признание во всем мире, как одно из перспективных направлений развития техники и технологии, способное решать вопросы повышения производительности и безопасности проведения очистных, подготовительных и вспомогательных работ на шахтах.

Отсутствие контакта режущего инструмента (струи воды) с разрушаемым массивом, возможность снижения металлоемкости забойного оборудования при одновременном увеличении его энерговооруженности за счет дистанционного расположения энергетического оборудования, эффективное обеспечение пылевзрывозащиты являются основными преимуществами этого способа разрушения. С другой стороны, высокая энергоемкость гидравлического разрушения является фактором, сдерживающим его широкое внедрение для создания исполнительных органов породоразрушающих машин.

В Национальном Научном центре горного производства (ННЦ ГП -ИГД им. А.А. Скочинского), являющегося ведущей научно-исследовательской организацией РФ по вопросам гидравлического разрушения горных пород, были проведены исследования [1,2], направленные на:

- разработку технологии и технических средств повышения разрушающей способности струй высокого давления и снижение энергоемкости гидравлического разрушения твердых материалов (крепких горных пород, бетона, металлических конструкций и т.д.), за счет оптимизации параметров средств формирования водяных струй и изменения свойств рабочей жидкости при введении в неё полимерных и абразивных добавок;

- исследования комбинированного способа воздействия на разрушаемый массив механического инструмента и высокоскоростной струи воды и создание на его основе гидромеханических исполнительных органов очистных и проходческих комбайнов;

- разработка систем высоконапорного орошения для очистных и проходческих комбайнов.

Совместно с научно-конструкторской фирмой "НИТЕП" и ОАО "Скуратовский экспериментальный завод" был выполнен комплекс опытно-конструкторских работ, позволивший создать типовой ряд надежных источников высокого (до 250 МПа) давления воды (ИВД), конструкция которых предусматривает возможность как автономного использования, так и размещение их непосредственно в исполнительных органах горных машин. Параметрический ряд ИВД (см. табл. 1) образован из восьми исполнений преобразователей давления (по признаку кратности преобразуемого низкого давления масла в высокое давление воды - коэффициенту мультипликации) и шести типоразмеров приводных насосных станций (в зависимости от мощности привода).

Таблица 1. Параметрический ряд источников воды высокого давления

Насосный блок			Тип исполнения преобразователя давления							
Номер типоразмера	Мощность привода, кВт	Подача, л/мин	1	2	3	4	5	6	7	8
			Давление номинальное, МПа							
			20	65	95	120	150	180	260	300
			Производительность, л/мин							
1	17	43	40	11	7,5	6	-	-	-	-
2	35	85	75	22	15	12	9,5	7,5	5	-
3	50	120	110	31	22	17	13	11	7,5	6,5
4	70	170	150	44	30	24	19	15	10	9
5	110	265	230	70	45	35	30	22	15	12
6	140	340	300	88	60	48	38	30	20	18

При выборе мощности привода для указанных типоразмеров были проанализированы различные варианты водоструйных технологий, в которых параметры струй воды изменялись в широких пределах. Полученный диапазон мощностей был условно разбит на шесть интервалов и составил параметрический ряд ИВД [1]. Реализованный блочный принцип позволяет достигнуть требуемых значений выходных параметров за счет сочетания различных типоразмеров приводных насосных станций и преобразователей давления, которые выполнены с возможностью блочной замены гидромultiпликаторов. Общий вид автономного ИВД представлен на рис.1.



Рис.1. Автономный источник высокого давления воды типоразмера 3 на давление воды до 120 МПа (исполнение 4)

Для снижения энергоемкости гидравлического разрушения и обеспечения рационального использования энергии высокоскоростных струй воды создан типовой ряд высокоэффективных конструкций малогабаритных струеформирующих устройств и насадок, позволяющих получать водяные струи высокой компактности, обеспечивающие максимальную концентрацию энергии в зоне гидравлического резания. На рис. 2 представлен один из типов малогабаритных устройств, использованных в гидромеханическом исполнительном органе проходческого комбайна КПА-150, разработанного совместно с институтом ЦНИИподземмаш.

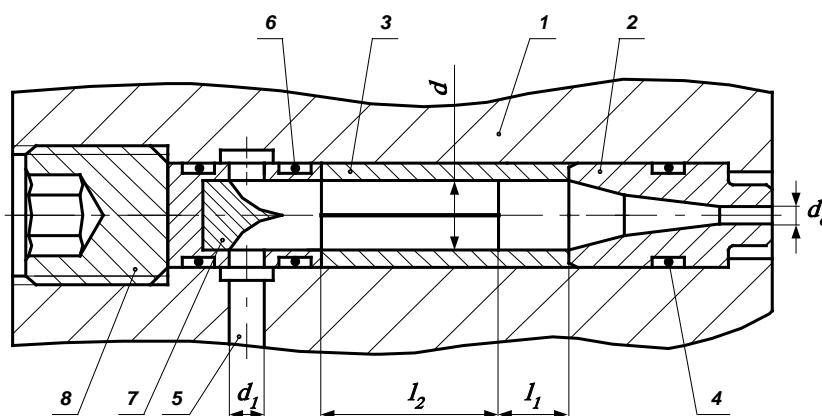


Рис.2. Струеформирующее устройство с радиальным подводом воды для комбайна КПА-150:

1- коронка, 2- насадка, 3- успокоитель, 4 и 6- уплотнения, 5- подводящий канал, 7- направляющий конус

Выполненные экспериментальные исследования позволили разработать инженерные методы расчета конструктивных параметров струеформирующих устройств и определять для любого их сочетания динамические и структурные характеристики формируемых в них высокоскоростных струй воды [1].

Компактные водяные струи высокого давления являются высокоэффективным средством резания угля, горных пород и других твердых материалов. Установлено [1], что в зависимости от прочности и структуры разрушаемого материала, критическое давление водяной струи, при котором начинается разрушение, может быть с достаточно высокой достоверностью представлено соотношением

$$p_{кр} = (0,5 \div 1,2) \sigma_{сж} \quad (1)$$

где $p_{кр}$ - критическое давление водяной струи, МПа;

$\sigma_{сж}$ - временное сопротивление на сжатие разрушаемого материала, МПа.

В результате обобщения многолетних исследований гидравлического разрушения горных пород, выполненных в ИГД им. А.А. Скочинского и за рубежом, была получена расчетная зависимость [1], позволяющая определять глубину щели, прорезаемую тонкими высокоскоростными струями воды в породах прочностью $\sigma_{сж} = 9 \div 200$ МПа в достаточно широком диапазоне основных влияющих факторов (давление воды $p_o = 13 \div 1050$ МПа, диаметр насадок $d_o = 0,2 \div 2,8$ мм, скорость перемещения $V_p = 0,014 \div 3,13$ м/с).

$$h_{щ} = 0,11 d_o \left(\frac{p_o}{\sigma_{сж}} \right)^{0,75} \cdot \left(\frac{V_o}{V_p} \right)^{0,5} \quad (2)$$

где $h_{щ}$ - глубина щели, прорезаемая высокоскоростной струей воды, мм;

p_o - давление воды, МПа;

$\sigma_{сж}$ - временное сопротивление на сжатие разрушаемого материала, МПа;

V_o - скорость истечения водяной струи, м/с;

V_p - скорость перемещения инструмента (скорость резания), м/с.

На рисунках 3 и 4 приведены типичные графики, характеризующие эффективность разрушения породы с разными значениями показателя сопротивляемости.

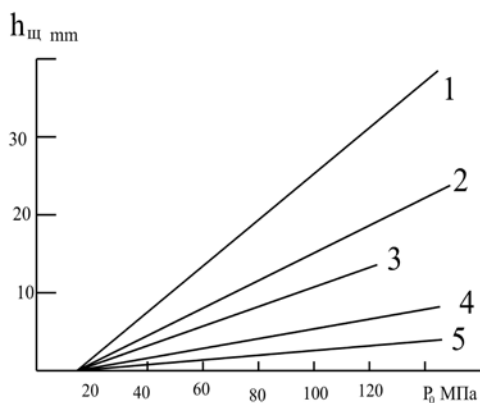


Рис.3. Изменение глубины щели $h_{щ}$ в горной породе ($\sigma_{сж} = 55$ МПа) в зависимости от давления P_o для скоростей перемещения:
 1 - 1,3 см/с; 2 - 6,5 см/с; 3 - 29 см/с;
 4 - 135 см/с; 5 - 310 см/с.

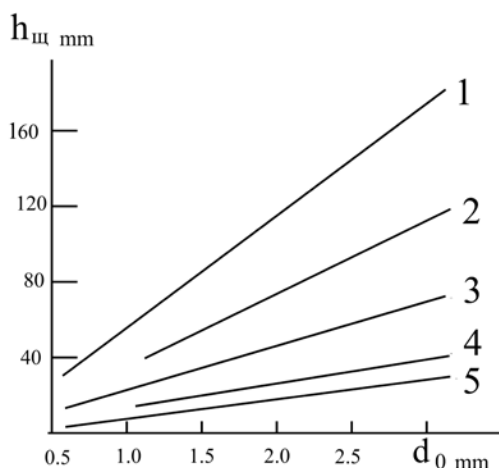


Рис.4. Зависимость глубины щели $h_{щ}$, нарезаемой в горной породе ($\sigma_{сжк} = 25$ МПа), от диаметра насадки d_0 для скоростей перемещения:
 1 - 3 см/с; 2 - 10 см/с; 3 - 23 см/с;
 4 - 65 см/с; 5 - 117 см/с.

Как известно, наибольшая производительность резания достигается при использовании участка струи, длина которого не превышает длину ядра постоянных скоростей струи (длины начального участка). Для выполнения этого условия необходимо обеспечить поддержание в процессе работы минимального расстояния между насадкой и забоем путем введения насадки в глубь прорезаемой щели по мере ее заглубления. Ширина щели зависит главным образом от диаметра насадки, и для насадок, применявшихся при исследованиях ($d_0 \leq 3,5$ мм), не превышает 15-17 мм. Поскольку габарит насадки и струеформирующего устройства значительно (в 2-3 раза) превышает ширину получаемой щели, вводить ее свободно в прорезаемую щель невозможно. В НИЦ ГП-ИГД им. А.А. Скочинского разработана конструкция многоструйных гидравлических резаков способных прорезать щели, ширина которых позволяет погружать режущий инструмент на глубину до 1,5 м и более. Принципиальная конструкция головных частей многоструйных погружных резаков приведена на рис. 5. [1].

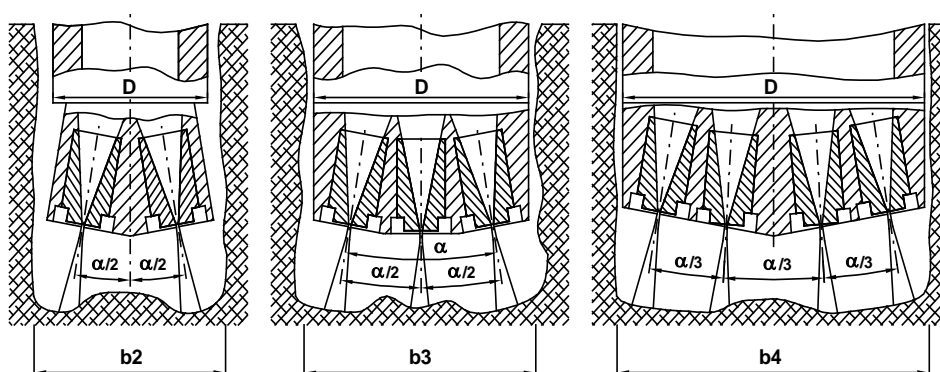


Рис. 5. Схема конструкций многоструйных погружных резаков:
 b_2, b_3, b_4 - ширина врубовой щели; α - угол между осями насадок

Таблица 2. Параметры разрушения угля многоструйными резаками

Коэффициент крепости угля f	Давление воды, МПа	Диаметр насадки, мм	Скорость перемещения, м/с	Скорость щелеобразования, мм/с	Гидравлич. мощность струй, кВт	Энергоемкость разрушения, кВт ч/т
Двухструйный резак						
1,79	20	1,2	1,4	3,76	8,2	5,36
1,79	25	1,2	1,4	5,70	11,4	4,92
1,79	30	1,2	1,4	7,48	14,9	4,90
1,96	35	1,2	1,4	8,30	18,3	5,27
1,82	40	1,2	1,4	11,10	23,1	5,12
Трехструйный резак						
1,96	20	1,2	1,4	4,34	12,2	6,92
1,96	30	1,2	1,4	4,94	22,3	6,90
1,96	35	1,2	1,4	10,30	28,2	6,75
2,17	35	1,2	1,4	9,90	28,2	7,00
2,17	40	1,2	1,4	11,70	34,5	7,26

Струи в резаках направлены относительно друг друга под некоторым углом α и каждая из них нарезает щели глубиной $h_{щ}$, между которыми образуются небольшие межщелевые целики. Под воздействием динамического давления и трёх плоскостей обнажения они дробятся и скалываются, образуя широкую щель, в которую по мере ее углубления подается многоструйный гидравлический резак. При этом максимальная глубина погружения резака зависит только от его длины и прочности конструктивного исполнения. Некоторые результаты исследований, полученные с использованием установки, обеспечивающей движение погружных резаков по круговым траекториям, представлены в табл. 2

Данные табл. 2 показывают, что интенсивность разрушения определяется гидравлическими параметрами струй и увеличивается с ростом давления для всех многоструйных резаков, принятых к исследованию. Кроме того, с увеличением числа насадок в резаке эффективность разрушения также пропорционально увеличивается.

На основе анализа изменения удельной энергоемкости разрушения установлено, что для принятых к исследованию параметров струй и режимов разрушения наиболее эффективным и менее энергоемким является двухструйный резак. С использованием гидравлических погружных резаков предложено несколько вариантов многоструйных исполнительных органов для нарезных комбайнов, предназначенных для разрушения угля при проведении нарезных выработок сечением 2,5-3,0 м² в пологих пластах с углом падения до 18°, мощностью 0,9-1,2 м и коэффициентом крепости угля f до 3 по шкале проф. М.М. Протодяконова [1]. Погружные резаки могут также быть использованы для нарезания глубоких врубовых щелей в угольном или породном массиве при проведении горных выработок, проходке ниш и монтажных камер, посадке лав, восстающих и охраны горных выработок, дегазации угольных пластов на шахтах, проведении горных выработок на рудниках, оконтуривании забоя при проведении выработок различного назначения, а также при транспортном и гидротехническом строительстве. Их использование позволяет обеспечить безопасное проведение работ в условиях опасных по взрыву газа и пыли.

Отсутствие контакта гидравлического резака с разрушаемым массивом обеспечивает их высокую надежность и низкую эксплуатационную стоимость проведения работ.

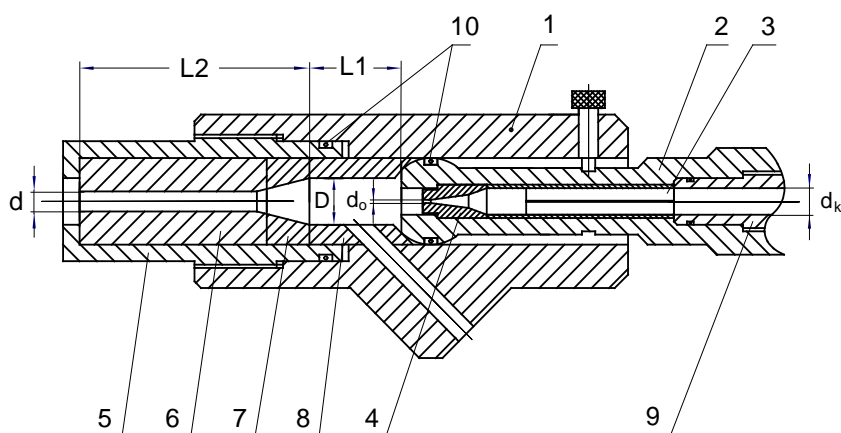


Рис. 5. Гидроабразивный инструмент с переменной геометрией проточной части:

1 – корпус; 2 -струеформирующее устройство; 3 – успокоитель; 4 – насадка; 5 - корпус коллиматора; 6 – коллиматор; 7 – переходник; 8 - камера смешивания; 9 - подводящий водовод; 10 - уплотнение

Одним из наиболее эффективных способов увеличения разрушающей способности водяных струй высокого давления является технология введения в струю абразивных добавок.

В результате выполненных исследований разработан и запатентован оригинальный гидроабразивный режущий инструмент, представленный на рисунке 5, позволяющий изменять конфигурацию его проточной части в зависимости от исходных гидравлических параметров высоконапорной водяной струи [5].

Преимущество новой конструкции режущего инструмента заключается в том, что в отличие от известных отечественных и зарубежных аналогов его проточная часть (камера смешивания 8, коллиматор 6, переходник 7) выполнена с возможностью изменения геометрических размеров в зависимости от выбора исходных технологических параметров гидроабразивного резания.

Высокая эффективность технологии гидроабразивного резания может быть проиллюстрирована приведенными на рисунках 6 и 7 результатами резания гранита абразивной струей.

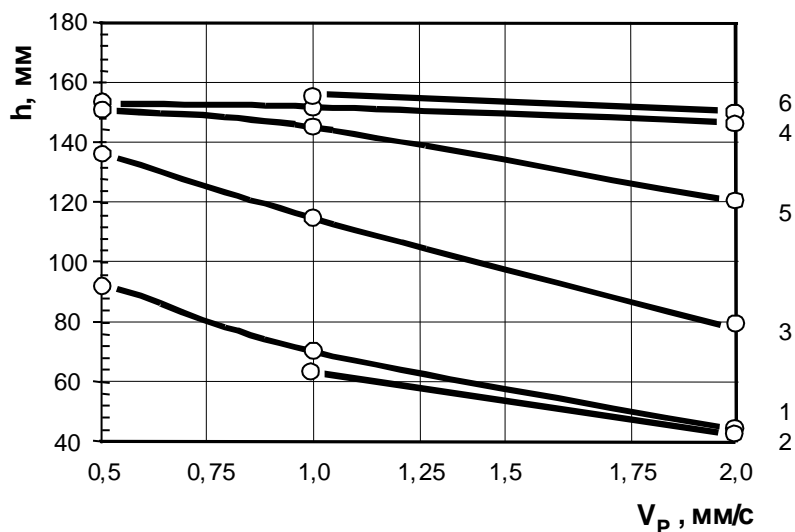


Рис.6. Зависимость глубины щели гидроабразивного резания гранитного блока от скорости резания

1 - $d_o=0,8$ мм; $p_o=150$ МПа; $n=1$;

2 - $d_o=1,0$ мм; $p_o=100$ МПа; $n=1$;

3 - $d_o=0,8$ мм; $p_o=150$ МПа; $n=2$;

4 - $d_o=0,8$ мм; $p_o=150$ МПа; $n=6$;

5 - $d_o=0,8$ мм; $p_o=150$ МПа; $n=4$;

6 - $d_o=1,0$ мм; $p_o=100$ МПа; $n=4$

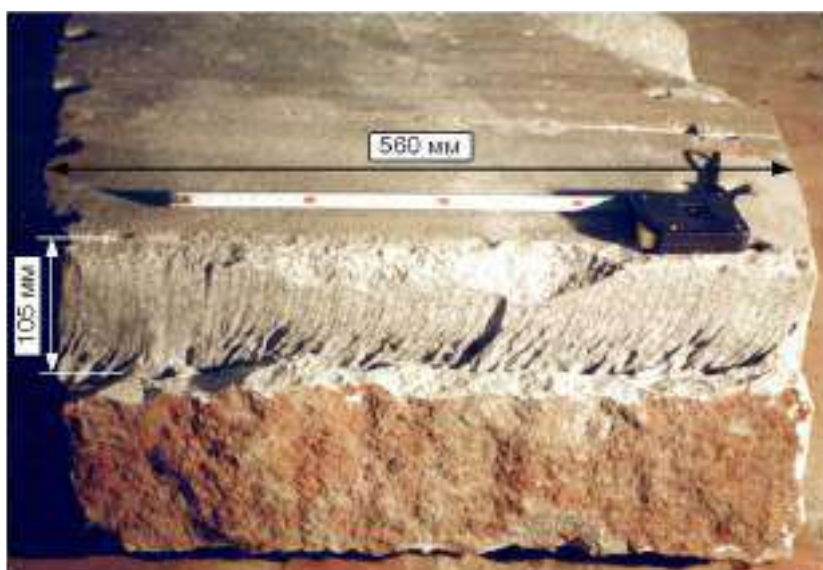


Рис.7. Профиль щели при гидроабразивном резании гранитного блока прочностью $\sigma_{сжс}=160$ МПа

В результате выполнения в 1993-2001 гг. комплекса НИОКР, ИГД им. А.А. Скочинского была разработана технология резания твердых материалов (горных пород, бетона, железобетона, стали и т.д., и в сотрудничестве с ООО фирмой "НИТЕП" разработан и изготовлен "Мобильный агрегат гидроабразивный" (МАГ), предназначенный для механизации монтажных, демонтажных и других вспомогательных работ в шахтных условиях, а также для использования в строительстве при выполнении работ, связанных с резанием крепких абразивных горных пород, бетона, железобетона, металлоконструкций и других твердых материалов [3]

Технология гидроабразивного резания и разработанное оборудование имеют обширную область применения. Их использование позволяет механизировать значительный спектр трудоемких вспомогательных работ при строительстве, эксплуатации и ремонтных работах на объектах ТЭЖ:

- оконтуривание забоя подготовительных выработок;
- ремонт горных выработок, восстановления их сечения;
- ослабление горного массива нарезанием разгрузочных щелей;
- производство монтажных и демонтажных работ, включая резание металлических конструкций,
- бронированного кабеля, резинокросовой ленты и т.д.;
- резание горных пород и твердых материалов в экстремальных условиях;
- очистку металла от ржавчины, краски и покрытий;
- резание бетона и железобетона;
- резание резины, стекла керамики и других трудно обрабатываемых материалов;
- очистку тоннелей, зданий и сооружений;
- очистку судовой поверхности;
- очистку литейных форм;
- очистку транспортных тележек и решеток окрасочных цехов.

В настоящее время в ННЦ ГП-ИГД им. А.А. Скочинского выполнен большой объем НИОКР по созданию гидромеханических исполнительных органов для очистных и проходческих комбайнов и систем высоконапорного орошения как для серийных и для вновь разработанных комбайнов.

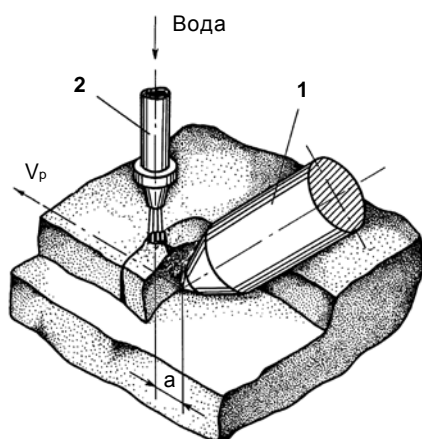


Рис.8. Схема гидромеханического разрушения горных пород высокоскоростной струей воды и резовым инструментом:

- 1 - поворотный резец типа РКС или РГ;
- 2 - струеформирующее устройство с насадкой

V_p - скорость резания; a - опережение

Сущность гидромеханического способа (рис.8) заключается в одновременном воздействии на разрушаемый массив высокоскоростных струй воды и механического инструмента (резцов или дисковых шарошек). При этом высокоскоростная струя воды давлением до 100 МПа и более подается через специальное струеформирующее устройство 2, расположенное с опережением a в непосредственной близости от механического инструмента 1.

Использование в конструкциях указанных комбайнов гидромеханических исполнительных органов обеспечивает повышение производительности и расширение области их применения на более крепкие и абразивные породы практически без увеличения массы комбайна. Важнейшим социально значимым результатом этих исследований является кардинальное решение проблемы взрывозащиты исполнительных органов и снижение запыленности в забое до уровня ПДК. В частности, при испытании очистного комбайна 1КШЭГ в комплексе с высоконапорной насосной установкой было получено снижение запыленности воздуха в рабочей зоне до $10 \div 20$ мг/м³ при эффективности пылеподавления 98,7-99%. [1]

Отсутствие контакта режущего инструмента (струи воды) с разрушаемым массивом, возможность снижения металлоемкости забойного оборудования при одновременном увеличении его энерговооруженности за счет дистанционного расположения энергетического оборудования, исключение воспламенения пылеметановоздушной смеси от искр трения в зоне контакта разрушающего инструмента с породой, снижение запыленности рудничной атмосферы до предельно допустимых концентраций являются основными преимуществами этого способа разрушения.

Особо необходимо отметить большие перспективы использования гидромеханического способа при разрушении крепких и абразивных горных пород. Отсутствие до настоящего времени высокопроизводительного, доступного по цене, надежного отечественного проходческого комбайна, способного проходить горные выработки по породам с прочностью на одноосное сжатие до 100 МПа и более и абразивностью более 18 мг по Л.И.Барону и А.В. Кузнецову является одним из главных факторов, сдерживающих высокие темпы проведения подготовительных работ в горнорудных отраслях промышленности. Легкие проходческие комбайны типа ГПКС не способны решать указанные задачи, а более тяжелые комбайны типа КП-25, КП-200, 4ПП-2М и др., несмотря на многочисленные попытки их модернизации, не соответствуют мировому уровню как по производительности и надежности, так и по уровню пылевзрывозащиты.

В тоже время необходимо отметить, что на шахтах РФ одной из основных причин взрывов метана и угольной пыли в очистных и проходческих забоях является фрикционное искрение. Увеличение мощности приводов горных машин, а также переход к отработке нижележащих горизонтов, еще более усугубляют эту проблему. Указанные тенденции также отмечаются в зарубежной практике.

Комплексным решением обеих проблем является создание проходческого комбайна нового технического уровня, осуществляющим гидромеханическое разрушение породного массива.

Результаты проведенных исследований процесса комбинированного разрушения горных пород позволили ННЦ ГП - ИГД им. А.А. Скочинского совместно с институтами ЦНИИподземмаш, ТулГУ и фирмой НИТЭП разработать экспериментальные и опытные образцы гидромеханических исполнительных органов для разных вариантов проходческих комбайнов избирательного действия. При этом были разработаны две схемы размещения источников воды высокого давления ИВД (давление воды до 120МПа, суммарный расход до 60л/мин) на проходческом комбайне: схема гидромеханического рабочего органа со встроенным в него ИВД и традиционная схемы компоновки ИВД (рис. 9), когда преобразователь давления "выносится" на корпус комбайна, а подвод воды высокого давления к коронке производится через специальный гидросъемник.

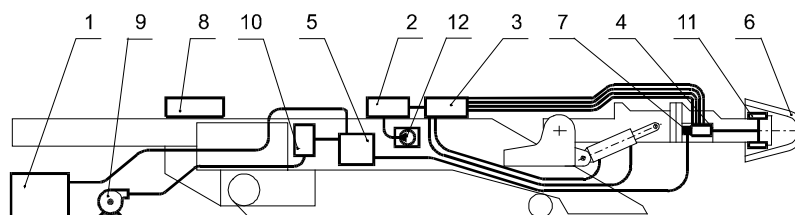


Рис. 9. Схема компоновки комбайна с гидромеханическим рабочим органом с автономным ИВД:
 1 - насосный блок; 2 - гидрооборудование; 3 - блок управления зонами; 4 - гидросъемник; 5 - автономный преобразователь давления; 6 - коронка; 7 - водосъемник высокого давления; 8 - дополнительное электрооборудование; 9 - подпиточный насос; 10 - фильтр тонкой очистки; 11 - гидрорегулируемые клапаны; 12 - дополнительный насос управления



Рис.10. Промышленные испытания гидромеханического исполнительного органа со встроенным ИВД на проходческом комбайне ПК-9Р в условиях каменного карьера Ново-Александровского месторождения Тульской области

Испытания гидромеханических исполнительных органов проводились как в стендовых, так и в промышленных (рис.10) условиях при разрушении песчаников, известняков искусственных породных блоков с пределом прочности на одноосное сжатие $70\div 110$ МПа.

В разработанной нами для условий шахт Российского Донбасса технологической схеме комбайновой проходки показано [4], что при использовании комбайна КП25 с гидромеханическим исполнительным органом скорость проведения выработок по сравнению с БВР возрастает в 2,4 раза, а производительность труда в 2 раза. При этом, область применения комбайна КП25 расширяется на породы прочностью до 100-110 МПа, что позволяет значительно сократить объем работ, выполняемый с использованием БВР, и тем самым снизить затраты на борьбу с пылью и обеспечить безопасность ведения горных работ. По выполненной оценке, производительность комбайна ГПКС с гидромеханическим исполнительным органом увеличится на 25-30%, а его область применения расширится по крепости разрушаемых пород на 30-40%.

Анализ результатов НИОКР по созданию гидромеханических исполнительных органов для проходческих комбайнов, проводимых как в России, так и за рубежом, позволяет заключить следующее. Применение струй воды давлением от 70МПа и выше с общим расходом $45\div 80$ л/мин способствует уменьшению минимум в $1,5\div 1,6$ раз усилия резания на резцовом инструменте и снижению в отдельных случаях почти в 2 - 3 раза энергоемкости механического разрушения. Применение гидромеханических исполнительных органов на проходческих комбайнах также способствует существенному повышению износостойкости резцового инструмента и резкому снижению пылеобразования в рудничной атмосфере. При этом увеличение стоимости

гидравлических систем высокого давления составляет 12÷25% от стоимости проходческого комбайна

Литература

1. Мерзляков В.Г., Бафталовский В.Е. Физико-технические основы гидроструйных технологий в горном производстве. М.: ФГУП ННЦ ГП - ИГД им. А.А. Скочинского, 2004, - 645 с.
2. Гидроструйные технологии на очистных, подготовительных и вспомогательных работах/ В.Г. Мерзляков, И.А. Кузьмич., В.Е. Бафталовский, И.В. Иванушкин, Ю.А. Гольдин / Издательство "Берг Инфо", "Глюкауф на русском языке", № 1, 2000.
3. Мерзляков В.Г., Бафталовский В.Е., Иванушкин И.В. Испытания опытного образца комплекса оборудования МАГ для гидроабразивной резки твердых материалов //Проблемы разработки угольных месторождений: Науч. сообщ. /Ин-т горн. дела им. А.А.Скочинского. Вып. 320. - М. 2001. -С. 124-132.
4. Мерзляков В.Г., Бафталовский В.Е., Иванушкин И.В. Оценка эффективности технологии проходки горных выработок комбайнами с гидромеханическими исполнительными органами избирательного действия// Науч. сообщ. //Ин-т горн. дела им. А.А.Скочинского. Вып..322 - М.2002. -С55-65. .
5. Патент 2109950 РФ. Инструмент для гидроабразивной обработки твердых материалов /В.Е. Бафталовский, И.А. Кузьмич, В.Г. Мерзляков. - Заявлено 16.10.95; Приоритет 16.10. 95; Оpubл. 27.04.98.