Установление рациональных параметров, разработка и создание инструментов для гидроабразивного резания твердых материалов

В.Г. Мерзляков, проф., докт. техн. наук (Генеральный директор ООО «МОГОРМАШ»), В.Е.Бафталовский, к.т.н, зав. лабораторией, (ННЦ ГПИГД им. А.А. Скочинского)

В статье приведены результаты экспериментальных и аналитических исследований формирования гидроабразивных струй в режущем инструменте с учетом влияния геометрических параметров его проточной части, динамических и структурных характеристик водяных струй высокого давления. На основе комплексного анализа результатов исследований получены расчетные зависимости, позволяющие определять рациональные параметры струеформирующих элементов гидроабразивного инструмента.

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 на шахтах вопросы повышения производительности и безопасности проведения очистных, подготовительных и вспомогательных работ. В РФ ведущей научно-исследовательской организацией по вопросам гидравлического разрушения горных пород до последнего времени являлся ИГД им. А.А.Скочинского. Начиная с 1993 года, работы проводятся совместно с ТулГУ и ООО «НИТЭП», а с 2006 года при участии ООО «МОГОРМАШ» [1].

Основными направлениями совместных НИОКР являются:

- исследования комбинированного 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 проходческих комбайнов избирательного действия;

- разработка технологии и технических средств повышения разрушающей способности струй высокого давления и снижение энергоемкости гидравлического разрушения твердых материалов (крепких горных пород, бето-

на, металлических конструкций и т.д.) за счет использования гидроабразивных струй.

В настоящей статье приводятся основные результаты НИОКР, выполненных в ИГД им. А.А.Скочинского и направленных на создание эффективных гидроабразивных средств разрушения угля, горных пород и других твердых материалов.

Исследования и конструктивные разработки, выполненные в России и промышленно-развитых странах, убедительно показывают, что гидроабразивная струя является уникальным инструментом для эффективного разрушения горных пород любой крепости и резания твердых материалов, включая различные композиты, металлы и сплавы [2].

Анализ публикаций зарубежных исследований в области разработки и создания гидроабразивных режущих инструментов показал, что большинство из них имеет следующие параметры: давление воды – 200 - 250 МПа, диаметр насадок – 0.4 - 0.6 мм и расход абразива – 0.5 - 1.0 кг/мин.

Несмотря на высокие эксплуатационные качества, указанные разработки не приспособлены к выполнению специфических задач механизации вспомогательных работ в шахтных условиях. Кроме того, к стоимости этих установок, которая составляет 200-300 тыс. долларов, необходимо добавить высокую стоимость их обслуживания и ремонта.

При выполнении различных работ в шахтных условиях необходимо эффективно резать не только уголь и горные породы, но также и металлы (крепи, рештаки, цепи и т.д.), бетон, железобетон и другие твердые материалы различной прочности. Для этого необходимо иметь возможность изменять исходные параметры формирования гидроабразивной струи в широком диапазоне. В этой связи представляют интерес комплексные исследования процесса гидроабразивного резания крепких горных пород, выполненные в ННЦ ГП -ИГД им. А.А.Скочинского [2].

Существующие в настоящее время теоретические модели формирова-

ния абразивной струи базируются на представлении, что формирование гидроабразивной струи происходит только в коллиматоре гидроабразивного инструмента [1]. При этом с помощью уравнений гидродинамики описывается разгон в коллиматоре смеси воздуха и абразивных частиц как течения двух параллельных осесимметричных потоков (водяной струи и смеси воздуха с абразивными частицами), взаимодействие которых обусловлено силами трения. Решение этих уравнений позволяет авторам связать характеристики гидроабразивной струи с исходными параметрами водяной струи. При этом в большинстве случаев не принимается в расчет влияние параметров камеры смешивания, а также изменение динамических и структурных характеристик водяных струй высокого давления при их движении в проточной части гидроабразивного инструмента. Кроме того, в известных теоретических и экспериментальных исследованиях формирования абразивных струй учитываются только такие исходные гидравлические параметры водяных струй, как диаметр насадки и давление воды.

В ННЦ ГП - ИГД им. А.А. Скочинского была разработана расчетная математическая модель, позволяющая определять рациональные параметры струеформирующих элементов гидроабразивного инструмента и учитывающая три группы факторов (см. рис. 1) [3].

К первой группе относятся динамические и структурные характеристики водяной струи высокого давления, влияющие на эффективность формирования гидроабразивной струи. К ним относятся исходные гидравлические параметры (диаметр насадки d_o и давление воды перед насадкой P_o), зависимость изменения диаметра струи $D_{стр}$ по ее длине, зависимость длины начального участка струи от конструкции струеформирующего устройства и качества изготовления струеформирующей насадки, зависимость для определения силы воздействия струи на преграду от расстояния до насадки.

Вторая группа факторов включает геометрические параметры проточной части гидроабразивного инструмента (диаметр D и длина $l_{кам}$ камеры

смешивания) и геометрические параметры переходника (диаметр d и длина $l_{кол}$ коллиматора) (рис. 1).

К третьей группе факторов относятся параметры разомкнутой самовсасывающей системы дозированной подачи абразива в режущий инструмент, при которой истечение абразива из бункера происходит только за счет гравитационных сил, а его подача в инструмент осуществляется самовсасыванием за счет разряжения в камере смешивания. При этом расход абразива $Q_а$ зависит только от диаметра $d_ш$ дозирующей шайбы.

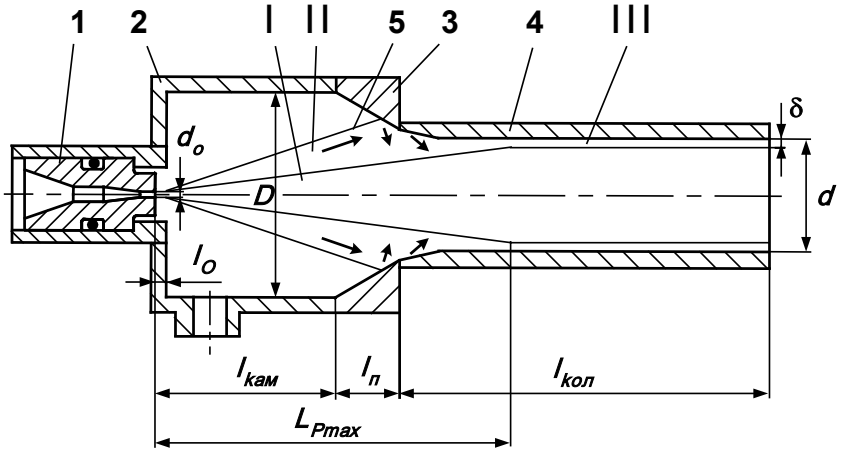


Рис.1. Геометрические параметры проточной части гидроабразивного инструмента:

I - компактная часть струи; II - воздушно-капельная часть струи; III - трехфазный поток низкой плотности;
1 - струеформирующая насадка; 2 - камера смешивания; 3 - переходный конфузор; 4 - коллиматор; 5 - граница капельной струи;
d_o - выходной диаметр струеформирующей насадки; d - диаметр коллиматора; D - диаметр камеры смешивания; l_o - смещение насадки относительно камеры смешивания; $l_{кам}$ - длина камеры смешивания; $l_п$ - длина переходного конфузора; $l_{кол}$ - длина коллиматора; L_{pmax} - расстояние максимальной силы воздействия струи; δ - толщина трехфазного потока низкой плотности

В результате выполненных исследований разработан и запатентован оригинальный гидроабразивный режущий инструмент, представленный на рисунке 2, позволяющий изменять конфигурацию его проточной части в зависимости от исходных гидравлических параметров высоконапорной водяной струи [4].

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.

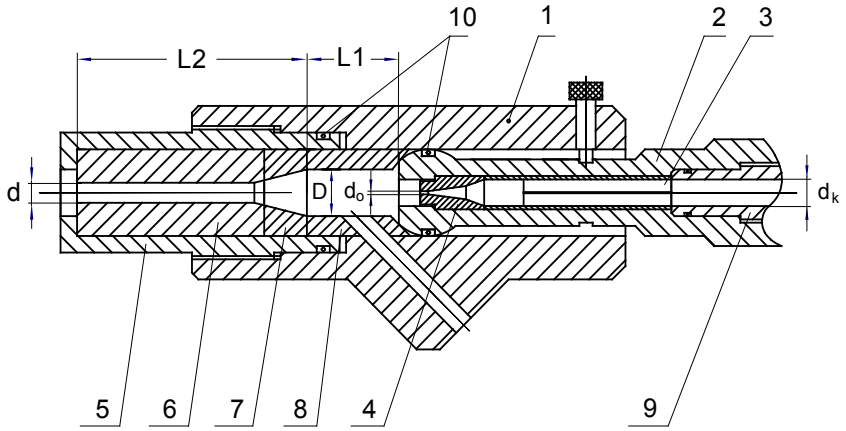


Рис.2. Гидроабразивный инструмент с переменной геометрией проточной части:

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

С целью повышения качества формирования абразивной струи, снижения потерь гидравлической энергии и обеспечения оптимальной фокусировки струи инструмент снабжен струеформирующим устройством с крестообразным успокоителем 3 и системой центровки водяной струи по оси коллиматора, которая осуществляется посредством углового смещения струеформирующего устройства 2 относительно точки, являющейся центром выходного сечения канала струеформирующей насадки.

Для изучения закономерностей формирования гидроабразивных струй в режущем инструменте были проведены комплексные экспериментальные исследования [3], включающие в себя:

- изучение влияния геометрических параметров проточной части гидроабразивного инструмента на компактность и разрушающую способность водяных струй высокого давления;

- установление рациональных соотношений геометрических параметров гидроабразивного инструмента, обеспечивающих эффективное формирование гидроабразивной струи.

Изучение влияния условий формирования водяных струй в гидроабразивном инструменте на эффективность формирования водяных и гидроабразивных струй высокого давления было проведено при различных давлениях в камере смешивания и различных сочетаниях геометрических параметров проточной части гидроабразивного инструмента.

Анализ результатов экспериментов (рис.3) показал, что глубина резания свободной струей воды составляет 35÷40% от глубины гидроабразивного резания. При этом, чем большей компактностью обладает водяная струя, используемая в гидроабразивном инструменте, тем большей разрушающей способностью будет обладать гидроабразивная струя.

С учетом автомодельности всего диапазона водяных струй, используемых для формирования гидроабразивных струй и обобщения данных экспериментальных исследований, расчетная зависимость для определения безразмерной длины начального участка водяной струи с d_o=0,4÷1,2 мм:

$$\frac{l_н}{d_o} = 25\left(\frac{d_o}{R_{za}}\right)^{0,17} \lg K_п \left(1 - 1,3\, e^{-0,1\frac{l_к}{d_к}}\right), \qquad (1)$$

где $l_н/d_o$ - безразмерная длина начального участка водяной струи;

R_{za}, мкм - параметр шероховатости внутренней поверхности струеформирующей насадки по ГОСТ 2789-73 и ГОСТ 2.309-73. Для классов шероховатости внутренней поверхности струеформирующей насадки с 1 по 6 принимается параметр R_z, для последующих классов принимается параметр R_a;

$K_п = d_к/d_o$ - коэффициент поджатия потока в струеформирующей насадке (при $l_к/d_o > 10$ принимается $K_п$=10);

$l_к/d_к$ - отношение длины канала струеформирующего устройства гидроабразивного инструмента к его диаметру, причем

$$l_к \geq (30 \div 35) d_к \; ; \qquad (2)$$

$$d_к = K_п (d_о)_{max} \; , \qquad (3)$$

где $(d_о)_{max}$ - максимальный диаметр струеформирующей насадки, мм.

Для определения диаметра водяной струи высокого давления ($D_{стр}$, мм) по ее длине, была предложена зависимость, учитывающая длину начального участка, характеризующую качество формирования струи:

$$D_{стр} = \frac{2{,}73\,(d_о)^{2{,}5}\left(\frac{l}{d_о}\right)^{0{,}65}}{l_н} + d_о, \qquad (4)$$

где $l_н$ - длина начального участка струи, мм;

$l/d_о$ - безразмерное расстояние от насадки до рассматриваемого сечения.

Построение математической модели формирования гидроабразивной струи в режущем инструменте было выполнено исходя из решения задачи обеспечения условий для максимально эффективного захвата и разгона абразива в камере смешивания и условий его внедрения в водяную струю непосредственно на входе в коллиматор.

Указанные требования выполняются, если диаметр коллиматора d определяется с учетом диаметра струи на безразмерном расстоянии от насадки $(l/d_о)_{p_{max}}$, при котором сила воздействия струи на преграду достигает максимума ($P = P_{max}$):

$$d = \frac{2{,}73\,(d_о)^{2{,}5}\left(\frac{l}{d_о}\right)^{0{,}65}_{p_{max}}}{l_н} + d_о + 2\,d_a, \qquad (5)$$

где d_a - крупность абразива (средняя величина диаметра абразивных частиц), мм. При использовании струеформирующих насадок $d_о$=0,4÷1,2 мм рекомендуется применять абразив крупностью d_a=0,2÷0,5 мм;

$(l/d_о)_{p_{max}}$ - безразмерное расстояние от насадки до сечения струи, где ($P = P_{max}$) определяется по эмпирической зависимости, полученной в результате

обобщения результатов ранее выполненных экспериментальных исследований:

$$(l/d_o)_{p_{max}} = 42{,}3 + 10{,}7\, d_o\,. \qquad (6)$$

Последнее слагаемое в формуле (5) обеспечивает в коллиматоре минимальную толщину слоя δ для выноса из инструмента смеси воздуха, капельной жидкости и абразива, не внедрившегося в струю.

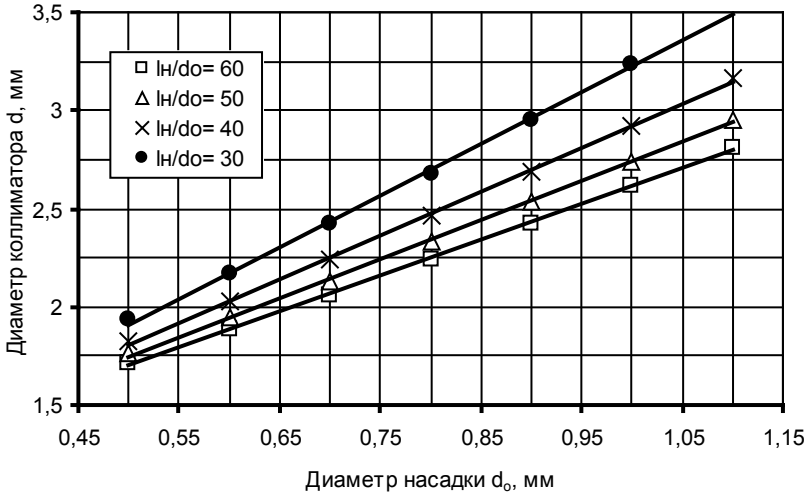


Рис. 3. Зависимость рациональных значений диаметра коллиматора от диаметра насадки и качества формирования водяной струи

На рис. 3 представлены расчетные графические зависимости, построенные с использованием зависимости (5). Из графиков следует, что повышение качества формирования водяных струй позволяет существенно уменьшить диаметр коллиматора и тем самым повысить концентрацию гидравлической энергии и удельное содержание абразивных частиц в высокоскоростной части струи. Рациональное значение длины коллиматора может быть определено из экспериментально полученного соотношения:

$$l_{кол} = (25 \div 30)d\,. \qquad (7)$$

Аналитическая зависимость для определения диаметра камеры смешивания была получена при допущении подобия процессов формирования абразивных струй в камерах смешивания при использовании различных диаметров струеформирующих насадок [3]:

$$D = 7{,}6\left(\frac{d_o}{0{,}35}\right)^{0{,}5} + d_o\,. \qquad (8)$$

Достоверность расчетов по формуле (8) была подтверждена результатами экспериментальных исследований с использованием струеформирующих насадок d_o=0,6 мм и d_o=0,9 мм, выполненных при шести значениях расхода абразива в диапазоне Q_a=0,25÷2,0 кг/мин.

В соответствии с концепцией модели уравнений формирования гидроабразивной струи, изложенной выше, уравнения (6), а также геометрических параметров переходника и коллиматора зависимость для определения рациональной длины камеры смешивания $l_{кам}$ (мм) имеет следующий вид:

$$l_{кам} = (10{,}7d_o + 42{,}3)\,d_o - l_o - \frac{d_1 - d}{0{,}432} - l_п\,, \qquad (9)$$

где d_1 - диаметр переходного конфузора.

При расчетном значении длины камеры смешивания $l_{кам}$<12 мм, с учетом диаметра шланга подачи абразива $d_ш$=8 мм принимается $l_{кам}$=12 мм.

Полученные нами математические зависимости позволили разработать метод расчета рациональных параметров гидроабразивного инструмента для резания горных пород и других твердых материалов [3,5].

Таблица 1. **Рекомендуемые параметры проточной части режущего инструмента и системы дозированной подачи абразива**

Диаметр насадки d_o, мм	Диаметр камеры смешения D, мм	Переходный диаметр d_1,мм	Диаметр коллиматора $d_{кол}$, мм	Длина коллиматора $l_{кол}$, мм
0,4÷0,6	10	4,0	1,8÷2,4	60÷65
0,7÷0,9	10	6,0	2,5÷2,7	65÷70
1,0÷1,2	10	8,0	2,8÷3,5	85÷90

Исходные данные для расчета включают установленную мощность насосной установки N_y и давление воды перед насадкой P_o, выбираемые в соответствии с решаемыми технологическими задачами, а также количество

одновременно работающих водяных струй n и коэффициент полезного действия насоса η (η=0,6÷0,8). В результате расчета определяются: технологически обоснованный диаметр выходного сечения струеформирующей насадки d_o, длина проточного канала ствола инструмента $l_к$ и его диаметр $d_к$, а также длина начального участка водяной струи $l_н$, характеризующие рациональные

Таблица 2. **Оборудование для гидроабразивного резания твердых материалов**

Стационарная установка длягидроабразивного резания

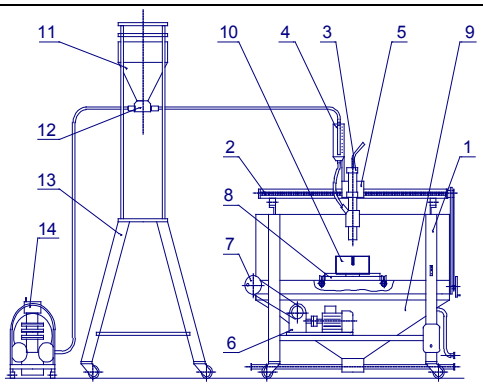
Давление воды,- МПа 10-250

Скорость резания, мм/мин 0-300

Диаметры насадок, мм.....0.4-1.5

Максимальный вес образца, кг.....500

Емкость бункера абразива, кг.....50



1 - рама
2 - суппорт
3 - гидроабразивный режущий инструмент
4 - стабилизатор
5 - каретка
6 - привод
7 - винтовая передача
8 - грузовая тележка
9 - поддон
10 - образец
11 - бункер
12 - дозатор эжекционный
13 - стойка бункера
14 - компрессор

Гидроабразивный агрегат на раздвижной стойке

Давление воды, МПа 70-200

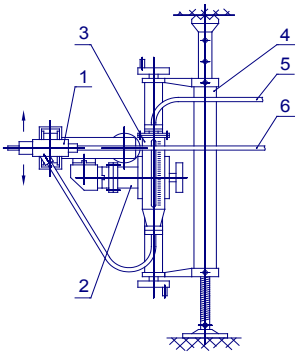
Диаметры насадок, мм.....4-1.5

Диаметры коллиматоров, мм 2.5-5

Скорость резания, мм/мин.....0-300

Ход винта манипулятора, мм.....400

Емкость бункера абразива, кг.....50



1 - исполнительный орган
2 - кронштейн
3 - стабилизатор
4 - раздвижная стойка
5 - шланг подачи абразива
6 - шланг подачи воды

Ручной инструмент для гидроабразивного резания

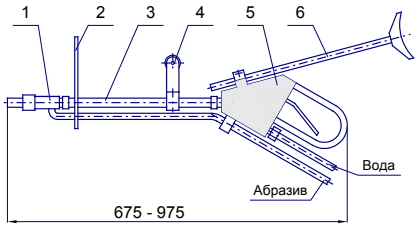
Максимальное рабочее давление воды, МПа.....100

Диаметры насадок, мм.....0.4-1.2

Максимальный расход воды Q, для насадок диаметром d_0:

d_0=0.4мм	Q= 3.2 л/мин
d_0=0.6мм	Q= 7.2 л/мин
d_0=0.8мм	Q=12.8 л/мин
d_0=1.0мм	Q= 18 л/мин
d_0=1.2мм	Q= 24 л/мин

Максимальная сила реакции водяной струи, Н 200



1 - гидроабразивный инструмент;
2 - защитный экран;
3 - ствол;
4 - рукоятка;
5 - запорный механизм;
6 - приклад.

параметры формирования водяной струи в гидроабразивном инструменте (рис.2). Далее определяются рациональные значения диаметра d и длины $l_{кол}$ коллиматора, а также значения диаметра D и длины $l_{кам}$ камеры смешивания гидроабразивного инструмента (рис.1).

Результаты выполненных исследований позволили разработать рекомендации (таблица 1) по выбору рациональных параметров проточной части режущего инструмента и системы дозированной подачи абразива в зависимости от диапазона используемых струеформирующих насадок.

Испытания гидроабразивного режущего инструмента, представленного на рис.2, были проведены в ННЦ ГП-ИГД им. А.А. Скочинского на специальной стендовой установке с использованием образцов горных пород (гранит, песчаник, известняк), железобетона, пластин стального проката, конструкционных стальных профилей и труб.

Результаты экспериментов показали, что увеличение диаметра насадки до 1 мм при одновременном снижении исходного давления воды до 80-100 МПа позволило в пределах аналогичной гидравлической мощности струи достигать эффективности резания, сопоставимой с показателями, полученными зарубежными фирмами, использующими струеформирующие насадки диаметром 0,4-0,6 мм и давления воды 200-250 МПа [2]. Использование указанной конструкции гидроабразивного режущего инструмента позволяет увеличить производительность и снизить энергоемкость процесса гидроабразивной обработки твердых материалов, снижает время простоя при вынужденной замене коллиматора и стоимость необходимых для этого расходных материалов, а также обеспечивает безопасное ведение работ при экстремальных режимах подачи абразива в инструмент.

В результате выполненного комплекса научно-исследовательских работ в ННЦ ГП - ИГД им. А.А.Скочинского при участии ООО "НИТЕП " была разработана технология резания твердых материалов (горных пород, бетона,

железобетона, стали и т.д.), а также разработана техническая документация на изготовление опытных образцов оборудования для гидроабразивного резания крепких горных пород и других твердых материалов, основные конструктивные и технические характеристики которого представлены в табл. 2.

Разработанные виды безопасного, экологически чистого оборудования для гидроабразивного резания имеют широкую область применения. Они позволяют механизировать значительный спектр трудоемких вспомогательных работ при строительстве, эксплуатации и ремонтных работах на объектах ТЭК, включая: оконтуривание забоя и ремонт горных выработок; ослабление горного массива нарезанием разгрузочных щелей; резание металлических конструкций при монтажных и демонтажных работах, а также резание горных пород и твердых материалов в экстремальных условиях.

Использованная литература

1. Бреннер В.А., Мерзляков В.Г. Научно-исследовательские и проектно-конструкторские работы в области гидроструйных технологий, выполняемые в России. Труды 1-ой Международной конференции «Проблемы создания экологически чистых и ресурсосберегающих технологий добычи полезных ископаемых и переработки отходов горного производства». Тула, ТГТУ, 1996

2. Бреннер В.А., Жабин А.Б., Пушкарев А.Е.. Щеголевский М.М. Гидроабразивное резание горных пород. -М.: Издательство Московского государственного горного университета, 2003, - 279 с.

3. 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.

4. 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; Опубл. 27.04.98.

5. Бафталовский В.Е. Выбор рациональных параметров малогабаритных струеформирующих устройств. В сб: Разрушение углей и горных пород: Науч. сообщ. /Ин-т горн. дела - М., 1989. - С. 55-63.