

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ УКРАИНЫ
ГОСУДАРСТВЕННОЕ ВЫСШЕЕ УЧЕБНОЕ ЗАВЕДЕНИЕ
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ГОРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»



А.Н. Давиденко, А.А. Игнатов

АБРАЗИВНО-МЕХАНИЧЕСКОЕ УДАРНОЕ БУРЕНИЕ СКВАЖИН

Монография

Днепропетровск
НГУ
2013

УДК 622.243.95

ББК 33.131

Д 13

Рекомендовано до видання вченою радою Державного вищого навчального закладу «Національний гірничий університет» (протокол № 6 від 02.07.2013).

Рецензенти:

І.О. Садовенко, д-р техн. наук, проф. кафедри гідрогеології та інженерної геології (Державний вищий навчальний заклад «Національний гірничий університет»);

В.Ф. Ганкевич, канд. техн. наук, доц. кафедри гірничих машин та інжинірингу (Державний вищий навчальний заклад «Національний гірничий університет»).

Давиденко А.Н.

Д 13 Абразивно-механическое ударное бурение скважин: монография / А.Н. Давиденко, А.А. Игнатов; М-во образования и науки Украины, Нац. горн. ун-т. – Д. : НГУ, 2013. – 110 с.

ISBN 978 – 966 – 350 – 449 – 0

Рассмотрены основные физические способы разрушения горных пород. Детально проанализирован гидромеханический метод сооружения скважин как базовый для дальнейшего совершенствования и модернизации.

Показаны перспективные направления развития абразивно-механического ударного способа сооружения скважин как наименее энергоемкого.

Изучены особенности конструкции и принципа действия проектируемых снарядов гидромеханического, в том числе дробового, бурения.

Освещены технологические аспекты разработки программы очистки скважины от продуктов разрушения с учетом особенностей механо-гидравлических и механо-пневматических взаимодействий на забое.

Для специалистов, которые занимаются буровыми работами, а также будет полезна студентам технических вузов, в частности геологоразведочного профиля.

© О.М. Давиденко, А.О. Игнатов, 2013

© Державний ВНЗ «Національний гірничий університет», 2013

ISBN 978 – 966 – 350 – 449 – 0

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
РАЗДЕЛ1 ОСНОВЫ ТЕХНОЛОГИИ И ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ГИДРОМЕХАНИЧЕСКОГО РАЗРУШЕНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД.....	7
1.1 Физические способы разрушения горных пород.....	7
1.2 Практическое применение гидромеханического разрушения в горном деле.....	13
1.3 Возможности гидромеханического способа бурения.....	15
ОБЩИЕ ВЫВОДЫ ПО РАЗДЕЛУ1.....	17
РАЗДЕЛ2 ИЗУЧЕНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ И УСЛОВИЙ ФОРМИРОВАНИЯ ЗАБОЯ И СТВОЛА СКВАЖИНЫ ПРИ ШАРОСТРУЙНОМ БУРЕНИИ.....	19
2.1 Шароструйный способ бурения скважин.....	19
2.2 Механика процессов разрушения горных пород ударами шаров.....	28
2.3 Обзор существующих конструкций реализующих принципы гидромеханического бурения.....	32
2.4 Исходные конструктивно-технологические требования к шароструйным снарядам.....	40
ОБЩИЕ ВЫВОДЫ ПО РАЗДЕЛУ2.....	42
РАЗДЕЛ3 СНАРЯДЫ ГИДРОМЕХАНИЧЕСКОГО БУРЕНИЯ ВРАЩАТЕЛЬНОГО ТИПА.....	43
3.1 Шароструйный снаряд с эффектом механического разрушения.....	43
3.2 Снаряд шароструйно-абразивного бурения.....	46
3.3 Расчет основных рабочих параметров привода снарядов вращательного типа.....	50
ОБЩИЕ ВЫВОДЫ ПО РАЗДЕЛУ3.....	54
РАЗДЕЛ4 КОНСТРУКТИВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ГИДРОМЕХАНИЧЕСКИХ СНАРЯДОВ УДАРНОГО ТИПА...	55
4.1 Шароструйный снаряд с гидроударным приводом.....	55
4.2 Ударно-пневматический снаряд абразивного бурения.....	57

4.3	Методика расчета машин ударного действия.....	60
4.4	ОБЩИЕ ВЫВОДЫ ПО РАЗДЕЛУ4.....	64
РАЗДЕЛ5	ИЗУЧЕНИЕ МЕХАНИЗМА РАЗРУШЕНИЯ ПОРОД ПРИ АБРАЗИВНО-МЕХАНИЧЕСКОМ УДАРНОМ БУРЕНИИ.....	65
5.1	Общие вопросы физики разрушения пород.....	65
5.2	Силловые отношения в паре «породоразрушающий орган – забой скважины».....	71
5.3	Теоретические основы процесса абразивно-механического разрушения породы под торцом снаряда.....	74
5.4	ОБЩИЕ ВЫВОДЫ ПО РАЗДЕЛУ5.....	84
РАЗДЕЛ6	НЕКОТОРЫЕ НОВЫЕ КОНСТРУКТИВНО- ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ ДРОБОВОГО СПОСОБА БУРЕНИЯ СКВАЖИН.....	85
6.1	Общие сведения о дробовом способе бурения скважин.....	85
6.2	Пути совершенствования технологии дробового бурения...	89
6.3	ОБЩИЕ ВЫВОДЫ ПО РАЗДЕЛУ6.....	94
РАЗДЕЛ7	ЦИРКУЛЯЦИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ ПРИ АБРАЗИВНО- МЕХАНИЧЕСКОМ УДАРНОМ БУРЕНИИ СКВАЖИН.....	96
7.1	Особенности режима очистки при абразивно- механическом ударном бурении скважин.....	96
7.2	Определение скорости относительного движения шлама и истирающих материалов.....	97
7.3	ОБЩИЕ ВЫВОДЫ ПО РАЗДЕЛУ7.....	104
	ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ.....	105
	СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	107

ВВЕДЕНИЕ

Развитие и совершенствование любой из отраслей промышленности в современных условиях практически невозможно без широкого анализа и обобщения накопившегося опыта, а также глубокого научно-практического изучения технологических процессов. Только такой подход позволит наиболее эффективно и в сжатые сроки решать вопросы повышения производительности труда, улучшения качества работ и снижения их стоимости. Сказанное, несомненно, в полной мере относится и к строительству скважин.

Роль буровых работ без преувеличения огромна. Скважины являются самым надежным источником информации о наличии в недрах полезных ископаемых и их запасах, и также единственно возможным каналом связи между глубокозалегающими продуктивными горизонтами и дневной поверхностью. Бурение скважин всегда было и сегодня остается чрезвычайно капиталоемким. По этой причине поиск резервов сокращения затрат средств и времени на буровые работы – важнейшая проблема, актуальность которой непрерывно возрастает.

Решение указанной задачи, бесспорно, лежит в плоскости совершенствования технологических процессов, связанных непосредственно с бурением скважин. К ним можно отнести, прежде всего, разрушение массива пород и удаление продуктов разрушения с забоя и ствола, закрепление стенок скважин при бурении в неустойчивых породах, получение качественных проб полезных ископаемых или образцов пород, бурение скважин в заданном направлении. Вместе с тем, что очевидно, технология бурения практически целиком определяется техническими средствами ее реализующими; поэтому, вести разговоры о совершенствовании процессов строительства скважин без рассмотрения всех их составляющих не имеет смысла.

Как известно, основным фактором, влияющим на прочностные показатели и состояние любого материала, в том числе и горных пород, является среда; решающим образом влияет она и на протекание любого процесса. Изменение среды, или иначе окружающих полей, ведет к изменению состояния тел, находящихся в ней, а также влечет за собой замедление или ускорение всех процессов, протекающих в материале. Этими обстоятельствами обусловлено появление целого ряда новых способов разрушения пород, основанных на использовании различных физических полей.

Эффективность любого из физических способов разрушения заключается в значительной величине скорости приложения разрушающей нагрузки, которая в данном случае поддается варьированию в широких пределах. Очевидно, что повышение производительности буровых работ может быть достигнуто и путем совершенствования других факторов, сопровождающих процессы разрушения пород при использовании физических способов.

Величина и скорость приложения нагрузок является решающим в процессах разрушения; они не могут быть произвольными. В рационально организованных процессах они должны быть увязаны со свойствами обрабатываемого материала. Как малые, так и большие внешние нагрузки могут быть вредными. В первом случае они могут быть недостаточными для преодоления сопротивле-

ния материала разрушению, во втором – оказаться больше допустимых. Для того чтобы правильно подбирать их величину, необходимо учесть всю сумму факторов, участвующих в процессах разрушения в комплексном действии.

Наличие тесной связи между всеми отмеченными выше обстоятельствами, определяющими эффективность разрушения пород именно физическими способами, делает невозможным дальнейшее усовершенствование процессов бурения без достаточно полного и последовательного изучения всех явлений, происходящих на забое.

Из сказанного следует, что одним из практически возможных и технически осуществимых является путь создания устройств, реализующих физические способы разрушения, комплексирующих или комбинирующих в себе наиболее производительные и эффективные методы воздействия на породный массив. Такая задача в течение нескольких лет решается специалистами кафедры техники разведки месторождений полезных ископаемых Национального горного университета. В результате широкого анализа и обобщения научного и практического материалов был создан ряд кардинально новых снарядов гидромеханического бурения, использование которых приведет к кратному повышению производительности буровых работ, сокращению времени на вспомогательные операции, общему росту эффективности и экономичности процесса сооружения скважин.

Изучение работы новых устройств позволяет с уверенностью говорить об особенном механизме разрушения пород, реализуемом с их помощью, и названным – абразивно-механическим ударным.

Новизна и технический уровень проектируемых устройств подтверждены серией патентов Украины. Материалы работ периодически докладывались на целом ряде Международных научных и практических конференций, где они получали положительные отзывы.

Разработанные технические решения могут быть внедрены на основных объектах ведения буровых работ, как в Украине, так и за рубежом.

Данная монография является первой попыткой обобщения работ в направлении обоснования абразивно-механического ударного способа бурения. Поэтому авторы надеются на то, что книга будет воспринята с интересом, и готовы принять соответствующие отзывы и замечания по ее содержанию, которые обязательно учтут в своей последующей работе.

Также авторы считают своим долгом выразить благодарность студентам специальности «Бурение скважин» за активную помощь в подготовке рукописи монографии к изданию.

Использование материалов других исследователей, занимавшихся изучением вопросов теории и практики гидромеханического способа бурения, отражено в списке литературы.

РАЗДЕЛ I. ОСНОВЫ ТЕХНОЛОГИИ И ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ГИДРОМЕХАНИЧЕСКОГО РАЗРУШЕНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД

1.1 Физические способы разрушения горных пород

Главнейшим недостатком всех механических способов разрушения горных пород при бурении является быстрый износ резцов коронок, зубьев долот и прочих истирающих материалов даже при их изготовлении из сверхтвердых сплавов. Кроме того, на собственно разрушение породы затрачивается не более 8 – 10% от всей расходуемой энергии, иными словами коэффициент полезного действия механического разрушения довольно мал [1].

В мировой практике ведутся большие научно-исследовательские работы по изысканию новых высокоэффективных способов бурения, позволяющих с одной стороны сократить затраты энергии, а с другой повысить уровень реализуемой на забое мощности [1 – 3]. В качестве альтернативы вращательному механическому способу рассматриваются методы, использующие новейшие достижения физики, химии, геологии и др.

Способы разрушения горных пород при бурении по видам энергии, подаваемой в зону забоя, можно условно разделить на [4]: 1) термические, 2) взрывные, 3) гидравлические, 4) электрофизические, 5) химические, 6) комплексные (рис. 1.1). Ниже приводится сжатое описание каждого из указанных способов.

Термодинамический способ разрушения пород осуществляется при помощи струи раскаленных газов, получаемых в газовых горелках-термобурах. Температура газов в камере сгорания, может достигать 3200 °С при давлении до 2 – 4 МПа. Газовые струи вылетают из такой горелки со сверхзвуковой скоростью (1800 – 2000 м/с), что обеспечивает мгновенную передачу тепла породе. В результате неравномерного нагрева порода на поверхности растрескивается и происходит отслоение её элементов: чешуек, пластинок и кусочков размером от 1,5 до 2,5 см. Динамическое воздействие струи газов способствует отделению частиц породы, подхватываемых потоком продуктов горения и паров, движущихся вверх по стволу скважины. Разрушение породы в зависимости от ее минералогического состава может происходить без плавления с незначительными изменениями свойств и с плавлением, сопровождающимся существенным видоизменением состава.

Термоэлектрический способ разрушения осуществляется при нагревании пород в высокочастотном электрическом поле, что создает разрушающее напряжение за счет увеличения размеров отдельных минералов, способных поглощать электромагнитную энергию. Кроме того, прочность пород уменьшается еще и за счет расплавления, испарения и выгорания некоторых минералов с образованием газов и пара внутри породы. Предполагается, что нагрев может происходить в породах с плохой проводимостью тока (диэлектриках) за счет взаимного трения смежных полярных молекул при их поворачивании в быстропеременном электрическом поле вслед за направлением этого поля, или за

счет образования вихревых токов (токи Фуко) в породах, обладающих проводимостью.

Термоиндукционный способ разрушения осуществляется при нагревании пород, обладающих высокой магнитной чувствительностью к индукционному нагреву под действием высокочастотного магнитного поля.

Плазменный способ разрушения пород осуществляется с помощью газов сверхвысокой температуры или плазмой. Разрушение пород происходит за счет плавления породообразующих минералов. Нагрев газов до критической температуры возможен при электрическом разряде, который вызывает их ионизацию. Ионизируясь, газ переходит в особое состояние – плазму. Такая высокотемпературная плазма способна расплавлять и испарять породы. При этом происходит не только плавление и испарение породообразующих минералов, но и возникают термические напряжения, вызывающие растрескивание породы и отслаивание частиц.

Разрушение пород с помощью луча лазера является весьма перспективным. Температура, достигаемая в пульсирующем пучке лучей света рубинового лазера, как показывают исследования, может превышать почти в 20 раз температуру Солнца, а сконцентрированная на площадь 1 см^2 энергия достигает 1 млн. Вт.

Делаются попытки использовать для разрушения пород электрическую дугу, процесс расщепления водорода, теплоядерного распада и другие физические процессы.

Огневой способ разрушения пород осуществляется при нагревании последних до температуры плавления, испарения или горения. При этом используются кислородное копье, термит и другие средства. Разрушение пород кислородным копьем заключается в том, что в кислородной среде сжигается железо (трубка, проволока, стружка) аналогично процессу газовой (кислородной) резки металлов. При этом происходит расплавление, сжигание и испарение минералов. Продукт расплава выбрасывается струей газов и паров. Разрушение пород термитом происходит при сжигании на забое смеси порошков алюминия и железной окалины. Под действием выделяемого тепла порода плавится и нагревается. Практически этот способ применяется только для дробления глыб крепких пород. При быстром нагревании породы в значительном объеме глыбы возникает напряжение, превышающее прочность породы, и она раскалывается. Наконец, разрушение может наступить при горении самой породы, например, каменного угля.

Взрывной способ заключается в разрушении пород действием взрывной волны. Осуществляется он с помощью управляемого взрывного процесса. Проходка скважин достигается путем серии последовательных взрывов зарядов ВВ (взрывчатого вещества) той или иной формы. При этом применяются так называемые кумулятивные заряды ВВ направленного действия, ампулы с жидким ВВ или специальные дозаторы, вводящие периодически на забой порции ВВ и инициирующего вещества.

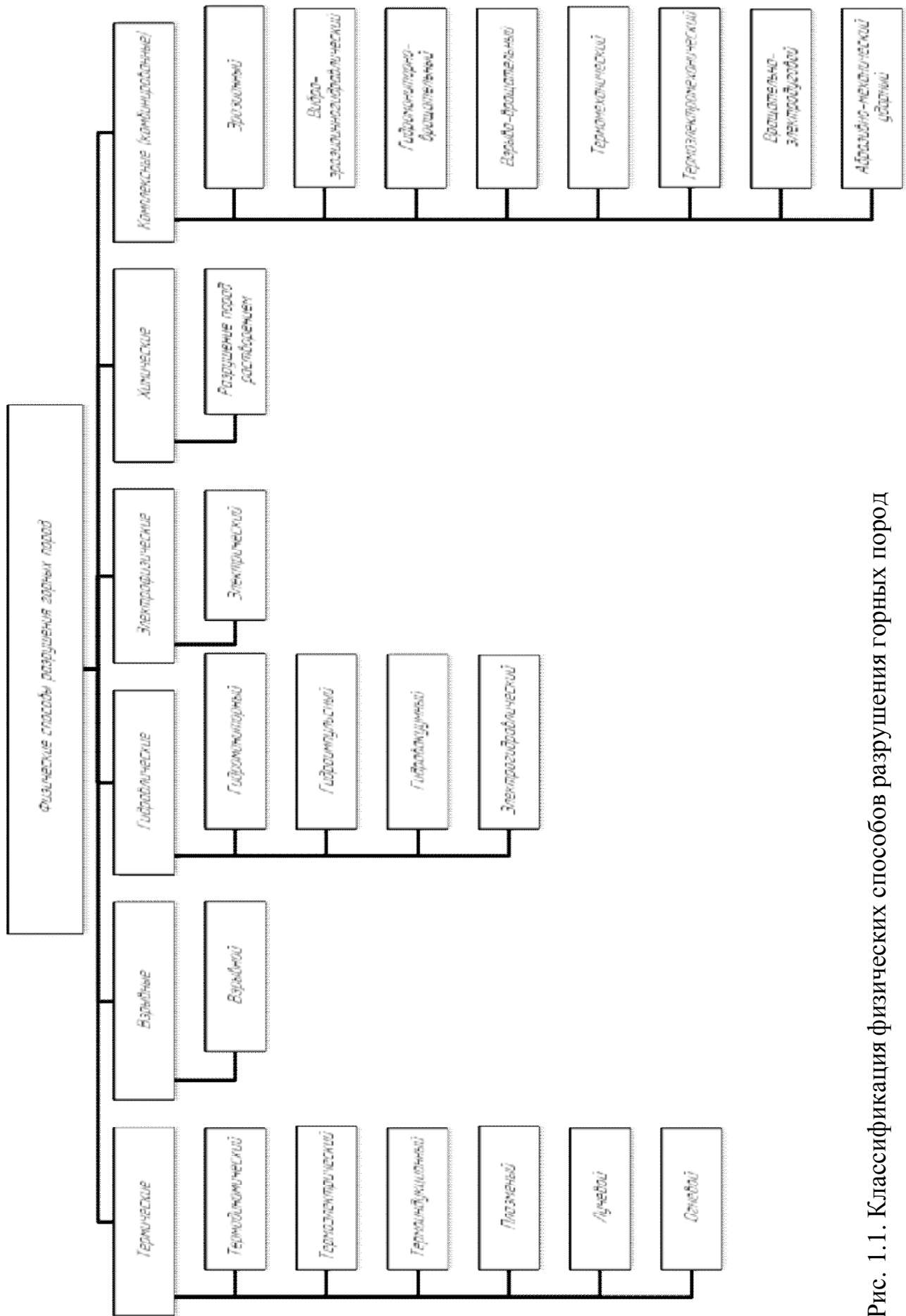


Рис. 1.1. Классификация физических способов разрушения горных пород

Гидравлические способы во всем своем многообразии основаны на использовании энергии высоконапорных скоростных струй жидкости.

Гидромониторный способ базируется на механическом воздействии непрерывных высоконапорных струй жидкости, движущихся со скоростью порядка 100 м/с и выше.

Гидроимпульсный способ разрушения осуществляется при кратковременных действиях на породу импульсными струями жидкости высокого давления. Величина давления струи достигает нескольких десятков мега Паскалей. Под действием импульсных струй однородная твердая порода скалывается с образованием конусообразной формы углублений.

Гидровакуумный способ разрушения пород осуществляется действием гидравлических ударов, возникающих в жидкости, заполняющей скважину, при замыкании вакуумных полостей (способ А.Н. Островского и Е.Б. Когана). С этой целью в скважину подаются специальные ампулы-оболочки, из которых предварительно удаляется воздух. Встречаясь с забоем, ампула разрушается и происходит замыкание (захлопывание) вакуумной полости с образованием гидравлического удара (импульса высокого давления). При непосредственном контакте вакуумной полости с породой вследствие мгновенной разгрузки поверхности забоя в зоне контакта порода разрушается под действием внутренних напряжений (горного давления) в некотором объеме. Последовательным разрушением ампул получают определенный эффект при бурении скважин. Подобное явление известно в технике и носит название кавитации жидкости (кавитационная эрозия). Разрушается порода при этом способе дроблением и отрывом частиц.

Электрогидравлический способ разрушения пород основан на эффекте Л.А. Юткина. Сущность этого эффекта сводится к трансформации электрической энергии в механическую в жидкости. Если к электродам, помещенным в жидкость, подвести очень кратковременный, но достаточно мощный электрический импульс высокого напряжения, то произойдет разряд электрического тока. Согласно теории Леба в момент развития разряда происходят соударения отдельных ионов с нейтральными молекулами, в результате чего энергия электрического поля преобразуется в кинетическую энергию молекул и в канале разряда резко возрастает давление. Жидкости, соприкасающейся с каналом разряда, сообщаются огромные радиальные ускорения, благодаря чему происходит разрыв ее толщи по пути следования разряда с образованием полости и последующим смыканием ее. Этот процесс сопровождается образованием ударных волн (высоких импульсных давлений типа кавитации – аналогично гидровакуумному способу разрушения пород). В результате действия мощных гидравлических ударов, величина которых может мгновенно достигать десятков тысяч мега Паскаль, происходит механическое разрушение породы, находящейся в контакте с жидкостью вблизи разряда, вследствие возникновения напряжений, превышающих предел ее прочности.

Акустический или ультразвуковой способ разрушения горных пород осу-

ществляется за счет действия ультразвуковых волн, распространяющихся непосредственно в породе и нарушающих связь между частицами. Предполагают, что разрушение будет возникать в момент прохождения волны растяжения, так как сопротивление пород при разрыве меньше, чем при сжатии. При этом интенсивность ультразвуковых волн должна достигать тысяч Вт/см². Разрушение породы в конечном итоге будет сводиться к механическому разделению ее на мелкие элементы (частицы).

Электрический способ разрушения пород основан на явлении электрического пробоя диэлектриков и полупроводников, возникающего при действии электрических импульсных разрядов большой мощности в очень короткий промежуток времени. Если к поверхности образца подвести электрический ток высокого напряжения в виде короткого мощного импульса, то разряд при определенных условиях может пойти в породу. Происходит пробой твердого тела при наличии второго электрода. В этом случае создается электрический мостик (токопроводящий канал) за счет повышения температуры, испарения, ионизации газов и других электрических изменений в теле. При разряде электрического тока возникает ударная волна, распространяющаяся в твердом теле. В результате место пробоя характеризуется механическим, термическим и даже химическим разрушением. Преобладание того или иного вида разрушения определяется составом и свойствами пород, а также характером импульсов тока. В конечном итоге может происходить механическое разрушение образца или отделение от его поверхности довольно значительных объемов породы.

Разрушение пород растворением происходит с использованием высокоактивных химических веществ и определенных свойств пород – растворимости. Область применения такого способа весьма ограничена.

Довольно обширна группа комбинированных методов, среди которых выделен ряд наиболее важных и эффективных.

Эрозионный или пескоструйный (шароструйный) способ разрушения пород заключается в действии высоконапорной струи жидкости и песчаных частиц (металлических шариков), бомбардирующих поверхность забоя. В результате от породы отрываются частицы, удаляемые потоком жидкости.

Вибро-эрозионногидравлический способ разрушения пород осуществляется колебанием (вибрацией) забойного инструмента и импульсами высокого давления жидкости. Этот способ обычно называют «ультразвуковым» бурением, что никак не отражает его сущности. Исследованиями установлено, что при этом способе разрушение породы происходит вследствие колебаний частиц абразивного материала, возникающих в результате возвратно-поступательных движений специального инструмента – стержня в жидкости, с частотой ультразвука. Частицы абразивного материала бомбардируют поверхность твердого образца и вклиниваются между зернами, слагающими породу. В результате от поверхности образца отрываются мельчайшие частицы породы. При этом осуществляется подача инструмента с небольшим усилием и происходит его незначительный износ. Другие исследователи считают, что разрушение породы в

этом случае происходит за счет кавитационного эффекта, возникающего в жидкости при определенной частоте и интенсивности колебаний специального инструмента. Известно, что при прохождении интенсивных ультразвуковых колебаний в жидкости возникают волны сжатия и растяжения с частотой колебаний вибратора. С этим связаны периодически возникающие импульсы давления и растяжения. Падение давления до критической величины может вызвать разрыв сплошности жидкости и образование большого количества пузырьков (пустот). При действии волны сжатия пузырьки сокращают свои размеры до полного захлопывания. В момент полного исчезновения пузырьков, образующихся на границе жидкости и твердого тела, возникают мощные гидравлические удары, концентрирующиеся на очень малых площадках. Частое повторение этих ударов и приводит к разрушению твердого материала. При этом вначале наблюдается разрушение более мягкой части породы (цемента), затем появляются микротрещины между отдельными зернами и кристаллами, после чего они скалываются с образованием мелкодисперсных частиц.

Гидромониторно-вращательный способ разрушения представляет собой комбинацию механического способа разрушения с помощью забойного инструмента и бездолотного (гидромониторного). Осуществляется с помощью специальных долот дробящего или режущего действия.

Взрыво-вращательный способ заключается в том, что по колонне бурильных труб вместе с потоком промывочной жидкости подаются к забою заряды ВВ кумулятивного действия, которые при ударе о забой взрываются, разрушая и ослабляя прочность породы. В момент взрыва инструмент (долото) поднимается над забоем, а между взрывами опускается и разрушает породу с ослабленной прочностью более эффективно при вращении и действии осевой нагрузки.

Термомеханический способ разрушения пород заключается в том, что при вращении забойного инструмента порода за счет трения нагревается, в связи, с чем ослабляется ее прочность. При этом существенно облегчается механическое разрушение массива коронкой или металлическим диском.

Термоэлектромеханический способ разрушения пород осуществляется забойным инструментом и действием электромагнитных волн. Исследованиями установлено, что при действии на породу электромагнитных волн существенно ослабляется сила сцепления между частицами, слагающими породу. Это облегчает механическое отделение значительных объемов породы от массива. Такой принцип практически используется при сооружении горных выработок с помощью специальных проходческих комбайнов. Путем облучения породы электромагнитными волнами ослабляют ее прочность, а отбойка и выравнивание забоя осуществляется механическими органами ударного действия.

Вращательно-электродуговой способ разрушения горных пород осуществляется вращением специального породоразрушающего инструмента с осевой нагрузкой и действием высокой температуры электрической дуги, образующейся между двумя электродами у забоя.

К числу комбинированных способов следует отнести разрушение породы

забойными инструментами механическим способом при действии ПАВ (поверхностно-активных веществ). В этом случае может быть комбинация механического и физико-химического процессов. Причем ПАВ играют роль понизителя твердости, ослабляющего прочность породы.

Абразивно-механический ударный способ [5], предложенный и разрабатываемый специалистами кафедры техники разведки МПИ (НГУ); его суть и технико-технологические аспекты реализации будут подробно рассмотрены далее.

1.2 Практическое применение гидромеханического разрушения в горном деле

Среди многочисленных новых нетрадиционных способов разрушения горных пород и бурения скважин, отличающихся от классического механического способа, все большее распространение получает бурение с использованием высоконапорных струй жидкости; до настоящего времени при бурении этим способом были получены обнадеживающие результаты [6 – 7]. Действие высоконапорных струй аналогично действию инструмента для механического разрушения горных пород: они дезинтегрируют породу, на которую воздействуют путем создания в ней напряжений, превышающих сопротивление породы растяжению или сдвигу.

Этот способ уже применяется в горном деле [8] при разработке угольных пластов, строительстве туннелей раскалывании блоков породы в карьерах, разрушении бетона, перфорировании обсадных колон и т. д.

Высоконапорные струи можно разделить на две категории [9]:

эрозионные – струи чистой воды, реже облегченного бурового раствора;

абразивные – струи, состоящие из жидкости, в которой во взвешенном состоянии содержатся абразивные частицы: кварцевый песок, стальная дробь и т.д.

В связи с такой классификацией очень часто гидромониторный и пескоструйный (шароструйный) способы бурения объединяют под общим названием – гидромеханический, относя к нему и все прочие, основывающиеся в той или иной мере на использовании высоконапорных струй жидкости (газа).

Изучение литературных источников и фактического материала, посвященных вопросам гидромеханического разрушения позволяет сделать вывод, что на сегодняшний день в подавляющем большинстве случаев применяются именно эрозионные струи [10 – 15].

Разработкой теории и практики эрозионного разрушения пород занимались многочисленные научные и исследовательские организации, среди которых необходимо отметить МГИ (Московский горный институт), ВНИИГидроуголь (Всесоюзный научно-исследовательский институт добычи угля гидравлическим способом), ВНИИБТ (Всесоюзный научно-исследовательский институт буровой техники), ДонНТУ (Донецкий национальный технический университет), ИГТМ (Институт геотехнической механики), ТГТУ (Тульский государственный университет).

ственный технический университет), НГУ (Национальный горный университет); весом вклад и зарубежных ученых (США, ФРГ, Великобритании и Польши). В результате весьма масштабных работ определены научные основы процесса разрушения горных пород струями жидкости, разработаны рациональные конструктивные соотношения для рабочих органов установок, реализующих эрозионное разрушение, установлены фундаментальные гидравлические характеристики напорных струй применительно к различным физико-механическим свойствами горных пород.

Проведенные исследования позволили сформулировать методику определения силы удара струи и ее расхода, как основных параметров процесса разрушения пород.

В ТГТУ на основе фактических материалов определены характеристики пород по степени трудности для эрозионного разрушения. Детальному исследованию были подвергнуты вопросы изменения силы удара струи с расстоянием, изучен механизм разрушения горных пород с учетом энергии деформации [9].

Довольно широко использование высоконапорных струй в процессах скважинно-гидравлической добычи. Поток напорной жидкости размывает породные пласты мягкого и рыхлого комплекса, которые затем транспортируются на поверхность в виде пульпы с помощью эрлифтных установок. Следует отметить, что для эффективной реализации указанного метода были проведены теоретические исследования и разработаны категории трудности гидродобычи в зависимости от геолого-технических условий месторождений [8].

С применением струйных мониторов (водяных и водовоздушных) осуществляется строительство и ремонт водозаборных скважин, расширяются, в интервале продуктивного пласта, стволы нефтяных и гидрогеологических скважин, возводятся изоляционные оболочки [3, 16].

Гидромеханический способ разрушения пород успешно используется для поиска и разведки морских россыпей. Создана гидромеханическая установка, разрушающая породу на забое скважины струями жидкости с помощью эрлифта и гидроэлеватора, выдающая пробу в виде гидросмеси [17].

Сотрудниками кафедры техники и технологии геологоразведочных работ ДонНТУ, в результате довольно детальных исследований, установлены закономерности формирования скважин потоком жидкости и на их основе разработаны технологические параметры процесса сооружения скважин при использовании погружных буровых установок. Также получены пригодные для практических расчетов математические зависимости, определяющие динамику движения шламовой смеси с учетом увеличения ее плотности в процессе углубки скважины [18].

Эффективным средством отбора проб песчаных осадков и россыпей в прибрежной зоне шельфа являются пробоотборники гидравлического типа. В таких устройствах осуществляется гидравлический подмыв грунта, который со-

здает возможность отбирать колонки песка, заключенные в полиэтиленовый рукав [17].

Исследованиями доказано, что в мягких породах струи жидкости улучшают работу долота, поскольку оказывают на породу разрушающее воздействие. Выявлено, что максимальным поражающее действие оказывается в случае перпендикулярности струи забою, любое другое направление приводит к потерям гидравлической энергии [19 – 20].

В НГУ разработан и исследован ряд новых образцов породоразрушающего инструмента [21], использующего энергию струй жидкости: буровая коронка с кольцевым размывом породы, лопастное долото со встроенным гидродинамическим излучателем, алмазное долото с эффектом кавитации.

Теоретические исследования и практика работ показали, что эффект эрозионного разрушения достигает своего максимума при скоростях истечения струи жидкости порядка 200 – 1000 м/с [11]. Это требует наличие насосов, гибких шлангов, труб, вертлюгов, насадок, рассчитанных на давление вплоть до 105 МПа. Наиболее весомым аргументом в пользу абразивного разрушения пород является необходимость создания значительно меньших скоростей истечения несущих струй (100 – 200 м/с). Важно и то, что реализация некоторых разновидностей эрозионного способа требует сложных конструктивных решений в рабочих устройствах. Средства абразивного способа отличаются как простотой конструкции, так и несложностью исполнения. Позитивные технико-экономические показатели эрозионного способа в основном ограничиваются мягкими и средними породами; абразивный же способ в целом можно считать производительным во всем диапазоне физико-механических характеристик горных пород.

1.3 Возможности гидромеханического способа бурения

Способ разрушения горных пород ударами шаров, приводимых в движение струйным аппаратом, был предложен группой американских исследователей нефтяной фирмы «Carter Oil Co». Участники этой группы в течение нескольких лет проводит обширные опытные работы по созданию и разработке способа бурения нефтяных скважин, в корне отличающегося от вращательного бурения (в США под этим термином объединены роторный и турбинный способы). Исследования показали, что принципиально возможным является способ разрушения горных пород ударами быстродвижущихся шаров. В качестве устройства обеспечивающего разгон шаров в жидкости был взят водоструйный насос [3].

В качестве основного направления исследовательских работ было выбрано выяснение физической сущности работы шароструйных аппаратов. Вопросы механики взаимодействия в паре «шары – горная порода» внимание практически не уделяли. Результатом проведенных лабораторных исследований было формулирование следующих выводов. Наибольшая механическая скорость

проходки может быть достигнута, при прочих равных условиях, в случае использования шаров максимально возможного диаметра, не заклинивающихся в камере смещения струйного аппарата. Наилучшим считается максимально возможный расход рабочей жидкости, при котором не происходит вынос шаров из скважины.

Опытное бурение осуществлялось в блоках горных пород различной крепости, при этом использовались 9-ти дюймовые шариковые буры, а скорость вылета шаров из струйного аппарата поддерживалась на уровне порядка 23 м/с. При бурении известняка была достигнута максимальная скорость проходки, составившая около 7 м/ч. Конечным итогом исследований стал ряд практических рекомендаций по технологии бурения, а именно: расход шаров, скорость их вылета из аппарата, скорость движения жидкости в аппарате и за его пределами.

На основе тщательно проведенных теоретических и экспериментальных работ было сделано заключение о возможности производить разрушение массива пород со значительной механической скоростью, что является доказательством реальности принципов бурения ударами шаров.

Однако в дальнейшем работы по исследованию шароструйного способа бурения были приостановлены. Главными причинами этого были низкие технико-экономические показатели процесса в сравнении с обычным вращательным способом. При этом перспективность указанного метода рассматривалась лишь в аспектах бурения глубоких нефтегазовых скважин.

Первые попытки применения этого способа в бывшем СССР потерпели неудачу. Но в середине 60-х годов минувшего столетия метод начал разрабатываться в ином русле использования [22].

Если американские исследователи предполагали применение шароструйного способа для бурения пород слагающих разрезы нефтяных и газовых месторождений, т. е. пород небольшой крепости, то отечественными исследователями была показана возможность его использования в породах средней крепости и крепких.

Проведенный цикл теоретических и опытных работ выявил ряд важных преимуществ, среди которых можно выделить.

1. Возможность реализации на забое гораздо больших мощностей в сравнении с другими способами бурения.
2. Значительность продолжительности рейса, ограничиваемая лишь износостойкостью струйного аппарата и простота его конструкции.
3. Частичное упрощение и облегчение схемы поверхностного оборудования.
4. Надежность управления трассой скважины.

Вместе с тем, были обозначены и основные недостатки, к которым следует отнести как технические, а именно необходимость наличия мощного насоса и малая стойкость снаряда для бурения скважины с отбором керна, так и технологические – отсутствие единой методики определения рациональных парамет-

ров процесса и значительная зависимость механической скорости от формы забоя [23].

В настоящее время область применения шароструйного способа в основном свелось лишь к искусственному искривлению геологических скважин.

Одним из важных преимуществ шароструйного способа является отсутствие в конструкции бурового снаряда типичного для всех механических методов породоразрушающего инструмента, что практически не ограничивает длину рейса [24].

Особенности механизма разрушения горных пород на забое позволяют спускать снаряд, как на колонне бурильных труб, так и на гибком кабеле.

Реализация в конструкции снаряда комплексного метода разрушения горных пород может быть достигнута за счет применения, например, механических породоразрушающих органов с рабочими элементами в виде шаров. Причем, конструкция таких органов предусматривает довольно продолжительный срок работы на забое, и даже возможность их выполнения в виде съемной модификации.

Создание вращения для шароструйного снаряда можно осуществлять посредством внедрения в его конструкцию любого из забойных двигателей. В свою очередь осевую нагрузку можно передавать как весом бурового инструмента, так и забойным механизмом подачи.

Конструктивное исполнение шароструйных снарядов позволяет бурить скважины бескерновым и колонковым способом, а в последнем случае возможна и гидравлическая транспортировка керна на поверхность по каналу, соединяющему забойный снаряд с поверхностным оборудованием.

Приведенными техническими решениями далеко не исчерпываются все возможные варианты технологической схемы бурения шароструйным способом.

1.4 ОБЩИЕ ВЫВОДЫ ПО РАЗДЕЛУ I

1. На ряде конкретных работ и исследований показана перспективность разработки методов гидромеханического бурения, эффективных как с позиций механики разрушения, так и энергоемкости процесса.

2. Приведенный выше обзор и анализ научной и технической литературы, а также данных производственных организаций доказывает то, что по ряду рассматриваемых вопросов в области теории гидромеханического (и как основного объекта разработок – шароструйного) способа бурения и процессов формирования скважины необходимы дополнительные исследования.

3. Целью исследований должно явиться установление закономерностей формирования скважины несущим шары потоком жидкости в некоторых его механических аспектах и формулирование на их основе технико-технологических мероприятий бурения скважин гидромеханическими снарядами.

ми, обеспечивающими существенное повышение производительности и экономичности буровых работ.

4. Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- Установить закономерности образования ствола и забоя скважины при гидромеханическом бурении, на основе которых определить главные параметры, характеризующие указанный процесс.
- Изучить основные конструкции и технологические особенности гидромеханических снарядов, в результате чего сформулировать руководящие принципы совершенствования названного способа бурения.
- Разработать рациональные модели снарядов ударно-механического абразивного бурения, в которых органически сочетаются все положительные конструктивные решения.
- Выбрать и обосновать технологическую схему и режимы бурения усовершенствованными снарядами.

РАЗДЕЛ2 ИЗУЧЕНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ И УСЛОВИЙ ФОРМИРОВАНИЯ ЗАБОЯ И СТВОЛА СКВАЖИНЫ ПРИ ШАРОСТРУЙНОМ БУРЕНИИ

2.1 Шароструйный способ бурения скважин

В настоящее время известны две группы принципиально отличающихся методов бурения скважин. К первой группе можно отнести те методы, при которых разрушение породы забоя осуществляется инструментом, которому сообщаются удары, вращение либо их комбинация. В соответствии с чем различают способы бурения: ударный, вращательный и ударно-вращательный. Вторую группу составляют методы, при которых разрушение происходит за счет различных физико-химических эффектов. Подавляющее большинство скважин сооружается с помощью методов первой группы [25 – 26].

Методы безинструментального разрушения горных пород находятся в основном в стадии изучения и экспериментирования. Вместе с тем, один из методов этой группы, а именно гидромеханический (шароструйный), получил уже применение при бурении скважин – в основном верхних непродуктивных интервалов разведочных и наклонно-направленных [22].

При шароструйном бурении для разрушения горных пород используется энергия большого количества стальных или твердосплавных шаров, многократно соударяющихся с забоем с большой скоростью. Шары приводятся в движение специальным жидкостным аппаратом.

Хотя различные струйные аппараты находят широкое применение в современной технике, вопросу применения их для разрушения горных пород, тем более использования их для искривления геологоразведочных скважин, не было уделено должного внимания.

Принципиальная схема шароструйного аппарата показана на рис. 2.1

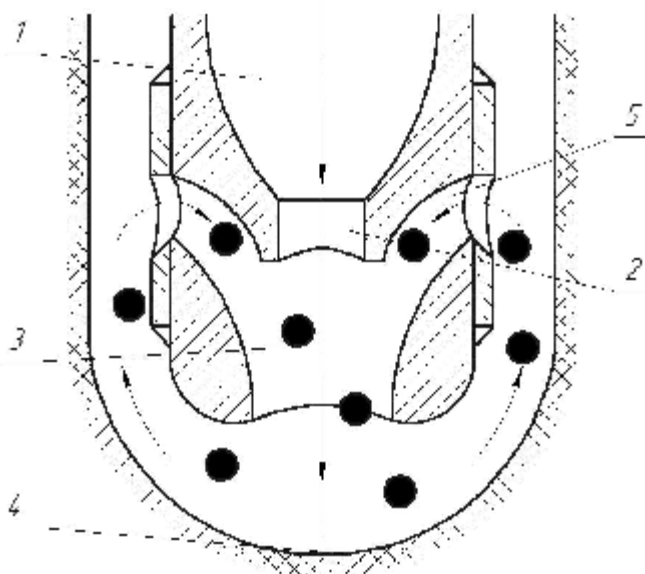


Рис. 2.1. Принципиальная схема устройства и работы шароструйного аппарата

Основным элементом аппарата являются: корпус 1, сопло 2, камера смешения 3, породоразрушающие шары 4, циркуляционные окна 5.

При прокачивании через бурильные трубы промывочная жидкость, выходя из сопла с большой скоростью, создает разрежение, вследствие чего происходит дополнительное всасывание (инжекция) промывочной жидкости из затрубного пространства в камеру смешения. Жидкость, прокачиваемая через сопло, называется рабочей жидкостью, подсасываемая – инжектируемой. Оба потока этих жидкостей смешиваются в камере смешения. В зависимости от величины коэффициента инжекции (отношения расходов инжектируемой и рабочей жидкостей) расход жидкости в камере смешения может быть в несколько раз больше, чем в рабочем сопле. Потоки рабочей и инжектируемой сред поступают в камеру смешения, где происходит выравнивание скоростей, сопровождающееся повышением давления. Из камеры смешения поток поступает в диффузор, где происходит дальнейший рост давления. Давление смешанного потока на выходе из диффузора выше давления инжектируемого потока, поступающего в приемную камеру. Повышение давления инжектируемого потока без непосредственной затраты механической энергии является основным качеством струйных аппаратов [27 – 28].

Для бурения с помощью такого аппарата на забой скважины засыпается определенная порция стальных или твердосплавных шаров. Затем по бурильным трубам подается расчетное количество промывочной жидкости.

Поток смешанной жидкости, выходя из диффузора, поднимается с большой скоростью по кольцевому зазору между аппаратом и стенками скважины и увлекает находящиеся на забое шары. Последние поднимаются до уровня рабочего сопла и несколько выше, где останавливаются из-за резкого падения скорости восходящей струи жидкости вследствие увеличения кольцевого сечения и уменьшения количества жидкости за счет частичной рециркуляции. Затем шары вместе с потоком инжектируемой жидкости попадают в камеру смешения аппарата, где они разгоняются до определенной скорости. Выходя из диффузора с большой скоростью, шары ударяются о забой, производя разрушение породы, и снова поднимаются вверх, увлекаемые восходящим потоком жидкости. Цикл рециркуляции жидкости и шаров в указанной последовательности многократно повторяется.

При соударении шаров, движущихся со скоростью порядка нескольких десятков метров в секунду, с горной породой последняя интенсивно разрушается. Продукты разрушения частично рециркулируют с инжектируемой жидкостью, измельчаясь при этом, вследствие чего шлам, образующийся при шароструйном бурении, легко выносится из скважины восходящим потоком очистного агента [22].

В основу расчета шароструйных аппаратов может быть положена теория струйных (инжекторных) аппаратов [27, 29].

В ВТИ (Всесоюзный технический институт) было проведено теоретическое и экспериментальное исследование большинства типов струйных аппаратов, применяющихся на практике, с целью разработки методики расчета основ-

ных размеров и вывода уравнений характеристик, описывающих их работу при переменном режиме [29].

Полученные результаты показывают, что на базе современной гидромеханики и газовой динамики может быть поставлена задача разработки общей методики расчета струйных аппаратов. Решению этой задачи способствует использование газодинамических функций, широко применяемых в современной газовой динамике.

Процессы, происходящие в шароструйном аппарате, могут быть описаны:

- 1) законом сохранения массы

$$G_c = G_p + G_n, \quad (2.1)$$

где G_p, G_n, G_c – весовые расходы рабочего, инжектируемого и смешанного потоков;

- 2) законом импульсов, который для расчета шароструйных аппаратов может быть представлен в следующем виде:

$$\frac{1}{g} [G_p u_{p2} + G_n u_{n2} - (G_p + G_n) u_3] = p_3 f_3 - (p_{p2} f_{p2} + p_{n3} f_{n3}), \quad (2.2)$$

где u_{p2}, u_{n2}, u_3 – скорости рабочего и инжектируемого потоков во входном сечении цилиндрической камеры смешения и смешанного потока в выходном сечении этой камеры; p_{p2}, p_{n2}, p_3 – статические давления рабочего и инжектируемого потоков во входном сечении цилиндрической камеры смешения и смешанного потока в выходном сечении этой камеры; f_{p2}, f_{n2}, f_3 – сечение рабочего и инжектируемого потока при выходе в камеру смешения и смешанного потока на выходе.

Рабочая жидкость с давлением p_p , выходящая из сопла со скоростью u_{p1} , подсасывает из камеры разрежения жидкость, которая подводится в камеру разрежения с давлением p_n (рис. 2.2).

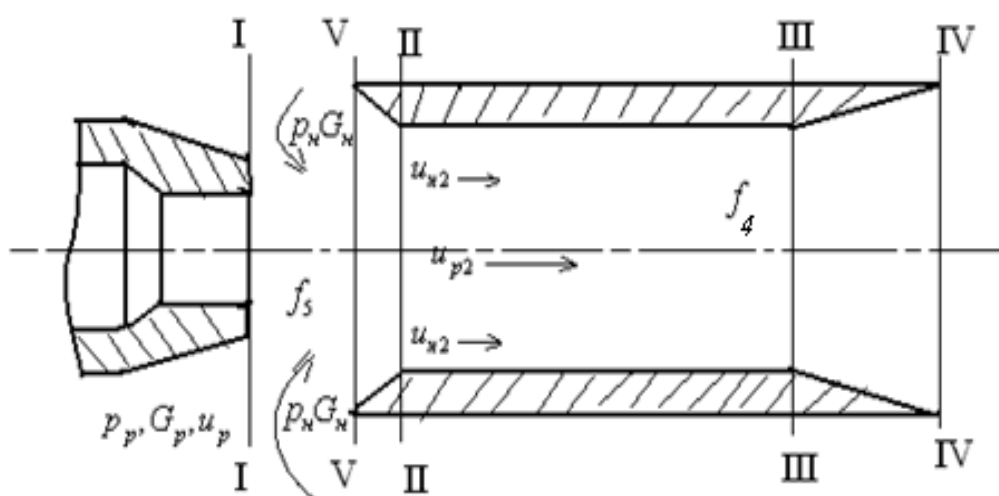


Рис. 2.2. Гидродинамическая схема работы шароструйного аппарата

По мере удаления от сопла весовой расход движущегося потока непрерывно увеличивается за счет инжектируемой среды, а поперечное сечение дви-

жущегося потока непрерывно растет. На некотором расстоянии от выходного сечения сопла поток, движущийся по направлению к камере смешения, заполняет все сечение f_4 приемной камеры.

Весовой расход движущегося потока достигает в этом сечении величины $G_p + G_n$.

Профиль скоростей в этом сечении имеет большую неравномерность по радиусу. На границе струи скорость мала. На оси струи скорость потока близка к скорости истечения рабочего потока из сопла u_{p1} . Сечение f_4 является конечным сечением приемной камеры и начальным сечением камеры смешения. Во входном сечении II – II цилиндрического участка камеры смешения давления потока равно p_2 .

По мере удаления от сопла давления рабочего и инжектируемого потоков выравниваются и на некотором расстоянии от сопла делаются одинаковыми.

Во входном сечении камеры смешения профиль скоростей весьма неравномерен. Можно условно представить себе поток во входном сечении состоящим из двух соосных потоков: центрального с весовым расходом G_p и большой средней скоростью u_{p2} и периферийного с весовым расходом G_n и значительно меньшей скоростью u_{n2} .

В выходном сечении камеры смешения поток имеет достаточно ровный профиль скоростей.

Основная потеря в струйных аппаратах – потеря на удар, связанная со смешением двух соосных потоков с разными начальными скоростями.

Удельная потеря на удар, отнесенная к единице расхода смеси равна

$$E = \frac{1}{2g} \frac{n^2}{(1+n)^2} (u_p - u_{n2})^2, \quad (2.3)$$

где n – коэффициент инжекции.

Согласно уравнению (2.3) определяются потери при изобарическом процессе, когда давления потоков в процессе смешения остаются постоянными, а выравниваются только скорости потоков.

В действительности в камере смешения происходит более сложный процесс, сопровождающийся изменением давления в процессе выравнивания скоростей потоков.

Как видно из (2.3), потеря на удар пропорциональна квадрату разности скоростей потоков в начале смешения. Поэтому увеличение скорости инжектируемого потока при входе в камеру смешения снижает потерю на удар.

При постоянном по сечению значении скоростей рабочего и инжектируемого потоков в начале смешения удельная потеря на удар зависит от коэффициента инжекции аппарата n . Максимум удельной потери на удар отмечается при $n = 1$. Удельная потеря на удар равна нулю при $n = 0$.

Процесс выравнивания скоростей в камере смешения струйных аппаратов сопровождается изменением давления.

Теоретические методы выбора оптимальной формы камеры смешения пока не разработаны. Экспериментально установлено, что цилиндрическая ка-

мера смешения дает большую степень восстановления давления по сравнению с камерами другого профиля. Поэтому такая форма камеры смешения получила в струйных аппаратах основное применение.

В цилиндрической камере смешения процесс выравнивания скоростей сопровождается ростом давления. При этом давление растет от p_2 на входе до p_3 на выходе из камеры. Далее поток поступает в диффузор, где давление его растет от p_3 до p_c , а скорость падает от u_3 до u_4 . При давлении p_c со скоростью u_4 смешанный поток выходит из струйного аппарата.

Принимая статическое давление p_2 и p_3 постоянными по сечению при расчетном режиме и зная, что изменение количества движения равно импульсу силы, можно уравнение импульсов для цилиндрического участка камеры смешения между сечениями II – II и III – III привести к следующему виду:

$$j_2(G_p u_{p2} + G_n u_{n2}) - (G_p + G_n)u_3 = (p_3 - p_2)f_3 g, \quad (2.4)$$

где j_2 – коэффициент скорости камеры смешения.

Введением коэффициента j_2 учитывается потеря количества движения в камере смешения из-за трения.

На основе закона сохранения массы [уравнение (2.1)] сечение камеры смешения может быть определено по формуле

$$f_3 = \frac{G_p(1+n)g_c}{u_3}, \quad (2.5)$$

где g_3 – удельный объем смешанного потока в выходном сечении камеры смешения.

Коэффициент инжекции n является одним из основных показателей эффективности работы аппарата. Из совместного решения (2.1), (2.4), (2.5) находим

$$n = \frac{j_2 u_{p2} - u_3 \left[1 + \frac{(p_3 - p_2)g_c}{u_3^2} \right]}{u_3 \left[1 + \frac{(p_3 - p_2)g_c}{u_3^2} \right] - j_2 u_{p2}}. \quad (2.6)$$

От величины коэффициента инжекции при заданном режиме работы аппарата зависит скорость вылета шаров из диффузора, которая, в конечном счете, определяет скорость углубки скважины. Скорость соударения шара с забоем скважины должна подбираться с учетом основных физико-механических свойств разрушаемых горных пород. Следовательно, при расчете основных геометрических параметров шароструйного аппарата, прежде всего, необходимо исходить из оптимальной скорости вылета шара из диффузора [16].

В связи с тем, что кроме жидкостной рабочей среды в струйных аппаратах возможно использование, например, и воздушной, полезно также рассмотреть теоретические основы их работы при циркуляции газа.

На рис. 2.3 представлена принципиальная схема струйного компрессора с цилиндрической камерой смешения (а); под ней на эюре (б) показано изменение статических давлений. Рабочий газ с давлением p_p и скоростью w_p подво-

дится к рабочему соплу. Поскольку скорость газа w в подводящем трубопроводе, как правило, невелика, давление газа p_p практически равно давлению торможения.

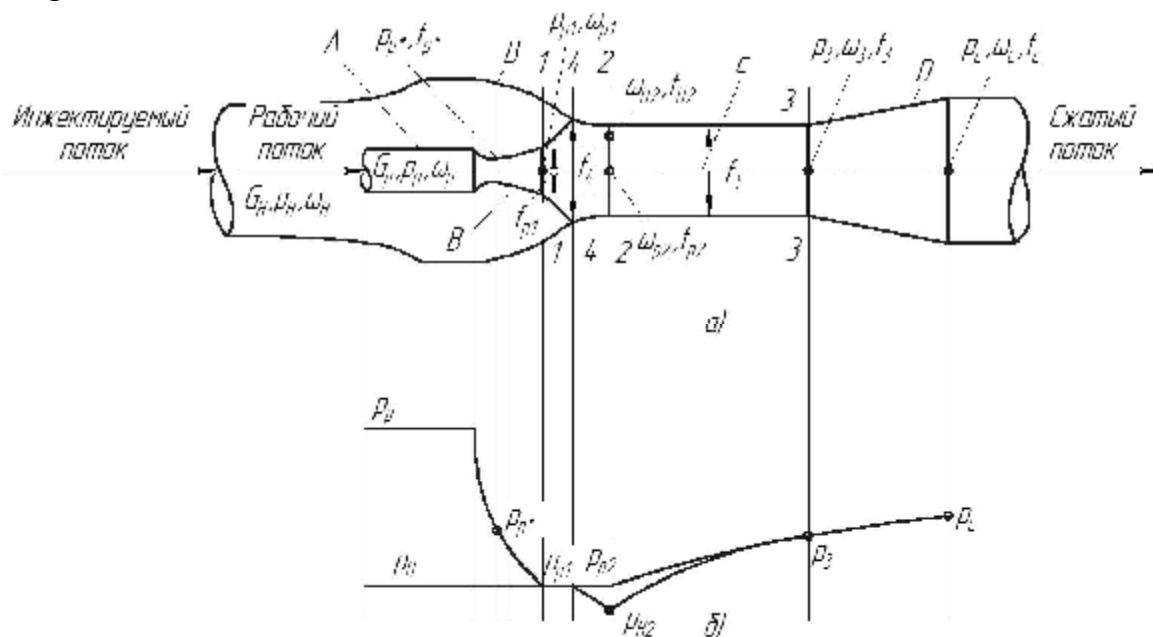


Рис 2.3. Принципиальная схема струйного компрессора с эapurой давлений

Давление газа в сопле снижается от p_p до $p_{p1} = p_n$, а скорость увеличивается от w_p до w_{p1} . Скорость газа w_{p1} в сечении f_{p1} на выходе из сопла больше критической скорости a_{p*} , которую газ имеет в критическом сечении сопла f_{p*} . Рабочий газ, выходящий из сопла в приемную камеру со скоростью w_{p1} , подсасывает из приемной камеры газ, который поступает в приемную камеру с давлением p_n .

По мере удаления от сопла массовый расход движущегося потока непрерывно увеличивается за счет присоединения массы инжектируемой среды, а поперечное сечение движущегося потока непрерывно растет. На некотором расстоянии от выходного сечения сопла поток, движущийся по направлению к камере смешения, заполняет все сечение f_4 приемной камеры.

Массовый расход движущегося потока достигает в этом сечении значения $G_p + G_n$, где G_p – расход рабочего газа; G_n – расход инжектируемого газа. Профиль скоростей в этом сечении имеет большую неравномерность по радиусу. На границе струи скорость потока мала. На оси струи скорость потока близка к скорости истечения рабочего потока из сопла.

Сечение, занимаемое потоком, при дальнейшем движении определяется профилем проточной части струйного аппарата, так как любое сечение струйного аппарата правее сечения f_4 заполнено движущимся потоком. Сечение f_4 является конечным сечением приемной камеры и начальным сечением камеры смешения. В большинстве случаев, когда основная часть камеры смешения

имеет цилиндрическую форму с сечением $f_3 < f_4$ и движущийся поток проходит через входной участок камеры смешения, на котором его сечение уменьшается от f_4 до f_3 , скорость потока на этом участке растет, а давление падает. Во входном сечении 2 – 2 цилиндрического участка камеры смешения давление инжектируемого потока равно p_2 .

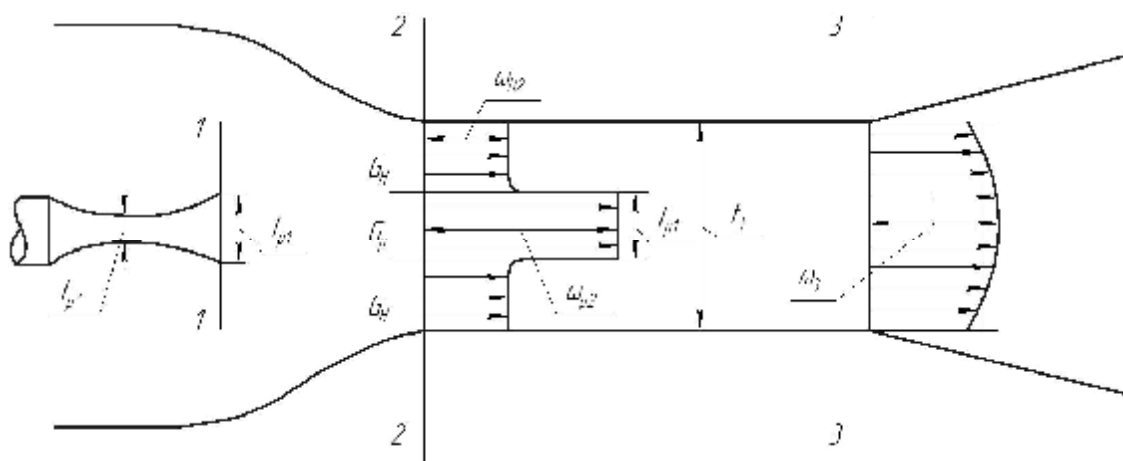


Рис. 2.4. Эпюры скоростей во входном и выходном сечениях камеры смешения

На рис. 2.4 схематически показан профиль скоростей в двух крайних сечениях цилиндрической камеры смешения: входном и выходном. Во входном сечении камеры смешения профиль скоростей весьма неравномерен. Можно условно представить поток во входном сечении состоящим из двух соосных потоков: центрального с массовым расходом G_p и большой средней скоростью w_{p2} и периферийного с массовым расходом G_n и значительно меньшей скоростью w_{n2} . В выходном сечении камеры смешения поток имеет достаточно равномерный профиль скоростей.

В цилиндрической камере смешения процесс выравнивания скоростей потоков сопровождается также выравниванием их давления и повышением его до p_3 . Далее поток поступает в диффузор, где давление его растет от p_3 до p_c , а скорость снижается от w_3 до w_c .

При давлении p_c со скоростью w_c смешанный поток выходит из струйного аппарата.

В результате превращения теплоты в кинетическую энергию скорость инжектируемого потока во входном сечении цилиндрической камеры смешения достигает w_{n2} . Коэффициентом скорости j_4 учитываются потери при расширении инжектируемого потока.

В камере смешения происходит выравнивание скоростей и повышение давления перемешиваемых потоков. Поток имеет среднюю скорость w_3 и статическое давление p_3 .

Далее поток поступает в диффузор. В последнем происходит преобразование кинетической энергии в потенциальную и тепловую.

В большинстве случаев при расчете струйных компрессоров решаются следующие две задачи:

1) определение достижимого коэффициента инжекции u компрессора при заданных параметрах рабочего (p_p, T_p или p_p, h_p) и инжектируемого (p_n, T_n или p_n, h_n) потоков перед аппаратом и заданном давлении сжатия p_c ;

2) определение достижимого давления сжатия компрессора p_c при заданных параметрах рабочего и инжектируемого потоков перед аппаратом и заданном коэффициенте инжекции u .

Скорость рабочего потока во входном сечении

$$w_{p2} = j_1 a_{p^*} I_{p2} = j_1 a_{p^*} I_{p,n}. \quad (2.7)$$

При $p_{p2} = p_n \Pi_{p2} = p_{p2} / p_p = p_n / p_p = \Pi_{p,n}$, откуда $I_{p2} = I_{p,n}$

Скорость инжектируемого потока во входном сечении

$$w_{n2} = j_4 a_{n^*} I_{n2}. \quad (2.8)$$

Аналогично, пренебрегая скоростью w_c сжатого потока на выходе из диффузора, можно написать выражение для скорости смешанного потока в выходном сечении камеры смешения:

$$w_3 = (a_{c^*} I_{c3}) / j_3. \quad (2.9)$$

В (2.7) – (2.9) j_1, j_3, j_4 – коэффициенты скорости рабочего сопла, диффузора, входного участка камеры смешения; $a_{p^*}, a_{n^*}, a_{c^*}$ – критические скорости рабочего, инжектируемого и сжатого потоков:

$$a_{p^*} = \sqrt{2 \frac{k_p}{k_p + 1} p_p v_p}; \quad a_{n^*} = \sqrt{2 \frac{k_n}{k_n + 1} p_n v_n}; \quad a_{c^*} = \sqrt{2 \frac{k_c}{k_c + 1} p_c v_c}; \quad (2.10)$$

где p^* – давление среды; v – удельный объем; k_p, k_n, k_c – показатели адиабаты рабочего, инжектируемого и сжатого потоков; $I_{p2} = I_{p,n}, I_{n2}, I_{c3}$ – приведенные изоэнтропные скорости рабочего и инжектируемого потоков в сечении 2 – 2 и сжатого потока в сечении 3 – 3; $a_{c^*} I_{c3}$ – скорость на входе в диффузор, необходимая для изоэнтропного сжатия потока в диффузоре от давления p_3 до давления p_c .

В цилиндрической камере смешения

$$f_{p2} + f_{n2} = f_3. \quad (2.11)$$

Критическое сечение любого потока

$$f_* = \frac{G a_*}{k \Pi_* p_0}, \quad (2.12)$$

где G – расход; a_* – критическая скорость; p_0 – давление торможения; Π_* – относительное давление в критическом сечении; k – показатель адиабаты.

Площадь любого сечения потока f может быть выражена через площадь критического сечения f_* по формуле

$$f = f_* / q, \quad (2.13)$$

где q – приведенная массовая скорость.

На основе (2.12) и (2.13) площадь рабочего потока в сечении 2 – 2

$$f_{p2} = \frac{G_p a_{p^*}}{k_p \Pi_{p^*} p_p q_{p2}} = \frac{G_p a_{p^*}}{k_p \Pi_{p^*} p_p q_{p.n}}. \quad (2.14)$$

В (2.14) принято $q_{p2} = q_{p.n}$, поскольку при расчетном режиме $p_{p2} = p_n$ и, следовательно, $\Pi_{p2} = \Pi_{p.n}$.

Площадь инжектируемого потока в сечении 2 – 2

$$f_{n2} = \frac{G_n a_{n^*}}{k_n \Pi_{n^*} p_n q_{n2}}. \quad (2.15)$$

Площадь смешанного потока в сечении 3 – 3

$$f_3 = \frac{G_c a_{c^*}}{k_c \Pi_{c^*} p_c q_{c3}}, \quad (2.16)$$

где G_c – расход смешанного потока.

В (2.14) – (2.16) $q_{p2} = q_{p.n}$, q_{n2} , q_{c3} – приведенные массовые скорости рабочего и инжектируемого потоков в сечении 2 – 2 и сжатого потока в сечении 3 – 3.

На основе (2.11) при цилиндрической камере смешения

$$f_3 = \frac{G_p a_{p^*}}{k_p \Pi_{p^*} p_p q_{p.n}} + \frac{G_n a_{n^*}}{k_n \Pi_{n^*} p_n q_{n2}} = \frac{G_c a_{c^*}}{k_c \Pi_{c^*} p_c q_{c3}}. \quad (2.17)$$

На основе закона сохранения массы

$$G_c = G_p + G_n = G_p (1 + u), \quad (2.18)$$

где $u = G_n / G_p$ – коэффициент инжекции.

После подстановки в (2.2) выражений для скоростей по (2.3) – (2.5), выражений для сечений по (2.14) – (2.17), выражений для расходов по (2.18) и соответствующих преобразований выводится следующее уравнение для расчета коэффициента инжекции газоструйного компрессора:

$$u = \frac{K_1 \frac{a_{p^*}}{a_{c^*}} I_{p.n} - K_3 I_{c3}}{K_4 I_{c3} - K_2 \frac{a_{n^*}}{a_{c^*}} I_{n2}}, \quad (2.19)$$

где K_1 – коэффициент скорости рабочего потока; K_2 – коэффициент скорости инжектируемого потока:

$$K_1 = j_1 j_2 j_3; \quad (2.20)$$

$$K_2 = j_1 j_2 j_4; \quad (2.21)$$

$$K_3 = 1 + j_3 \frac{a_{p^*}}{a_{c^*}} \frac{p_c}{p_p} \frac{\left(\Pi_{c3} - \frac{p_n}{p_c} \right)}{k_p \Pi_{p^*} I_{c3} q_{p.n}}; \quad (2.22)$$

$$K_4 = 1 + j_3 \frac{a_{n^*}}{a_{c^*}} \frac{p_c}{p_n} \frac{\left(\Pi_{c3} - \Pi_{c2} \right)}{k_n \Pi_{n^*} I_{c3} q_{n2}}; \quad (2.23)$$

$$\Pi_{c2} = \frac{p_{n2}}{p_c} = \Pi_{n2} \frac{p_n}{p_c}. \quad (2.24)$$

Газодинамические функции инжектируемого потока во входном сечении 2 – 2 цилиндрической камеры смешения (I_{n2} , Π_{n2} , q_{n2}) и смешанного потока в

выходном сечении $3 - 3$ камеры смешения (I_{c3}, P_{c3}, q_{c3}) не могут выбираться произвольно, так как они взаимно связаны уравнением (2.17). Задача заключается в выборе таких взаимосвязанных между собой значений газодинамических функций взаимодействующих потоков, при которых достижимый коэффициент инжекции компрессора имеет максимальное значение.

Под массовой расходной концентрацией понимается отношение массового расхода твердого тела или жидкости к массовому расходу газа. Если инжектируемая среда является смесью твердого тела или жидкости с газом, то удельный объем инжектируемой среды, определяется по формуле

$$v_n = v_{n.g} \frac{u_g}{u_g + u_t} + v_t \frac{u_t}{u_g + u_t}, \quad (2.25)$$

где $u_g = G_{n.g}/G_p$ – коэффициент инжекции по газу; $u_t = G_t/G_p$ – коэффициент инжекции по твердому телу или жидкости; $G_{n.g}$, $v_{n.g}$ – расход и удельный объем инжектируемого газа; G_t , v_t – расход и удельный объем инжектируемого твердого тела или жидкости; G_p – расход рабочего газа.

В частном случае, когда инжектируемой средой является твердое тело или жидкость без смеси с газом, $u_g = 0$, $v_n = v_t$. В том случае, когда $v_t u_t$ – величина очень малая по сравнению с $v_{n.g} u_g$, нею можно пренебречь и принимать

$$v_n = v_{n.g} u_g / (u_g + u_t). \quad (2.26)$$

Удельный объем смешанного потока на выходе из струйного аппарата

$$v_c = v_{c.g} \frac{1 + u_g}{1 + u_g + u_t} + v_t \frac{u_t}{1 + u_g + u_t}, \quad (2.27)$$

где $v_{c.g}$ – удельный объем сжатого газа на выходе из аппарата.

При $u_g = 0$

$$v_c = v_{c.g} \frac{1}{1 + u_t} + v_t \frac{u_t}{1 + u_t}. \quad (2.28)$$

В том случае, когда $v_t u_t$ очень мало по сравнению с $v_{c.g} (1 + u_g)$, ним можно пренебречь и принимать

$$v_c = v_{c.g} \frac{1 + u_g}{1 + u_g + u_t}. \quad (2.29)$$

Суммарный коэффициент инжекции

$$u = u_g + u_t. \quad (2.30)$$

Приведенные зависимости являются базисными при проектировании и конструировании струйных аппаратов с различными рабочими средами.

2.2 Механика процессов разрушения горных пород ударами шаров

Механизм разрушения твердых тел при вдавливании сферических и линзообразных инденторов подробно изучен Л.А. Шрейнером [30]. Некоторые представления о механизме возникновения и распределения различного рода напряжений при соударении шаров с плоскостью дает также работа А.Н. Динника [31].

На основе указанных исследований разработана схема последовательности этапов нагружения и разрушения пород при ударе шара по забой скважины (рис. 2.5).

При взаимодействии шара с забоем происходит формирование начальной контактной поверхности в основном за счет пластических деформаций (область 1, рис. 2.5, а). Этот этап непродолжителен, после чего начинается упругое деформирование шара и горной породы (рис. 2.5, б). Величина упругих деформаций шара a_1 и горной породы a_2 в сумме составляют величину сближения соударяющихся тел a . Учитывая, что скорость шаров в момент соударения могут достигать 40 – 70 м/сек и что при таких скоростях приложения нагрузки горные породы теряют пластические свойства, можно предположить, что они до самого момента хрупкого разрушения будут деформироваться упруго.

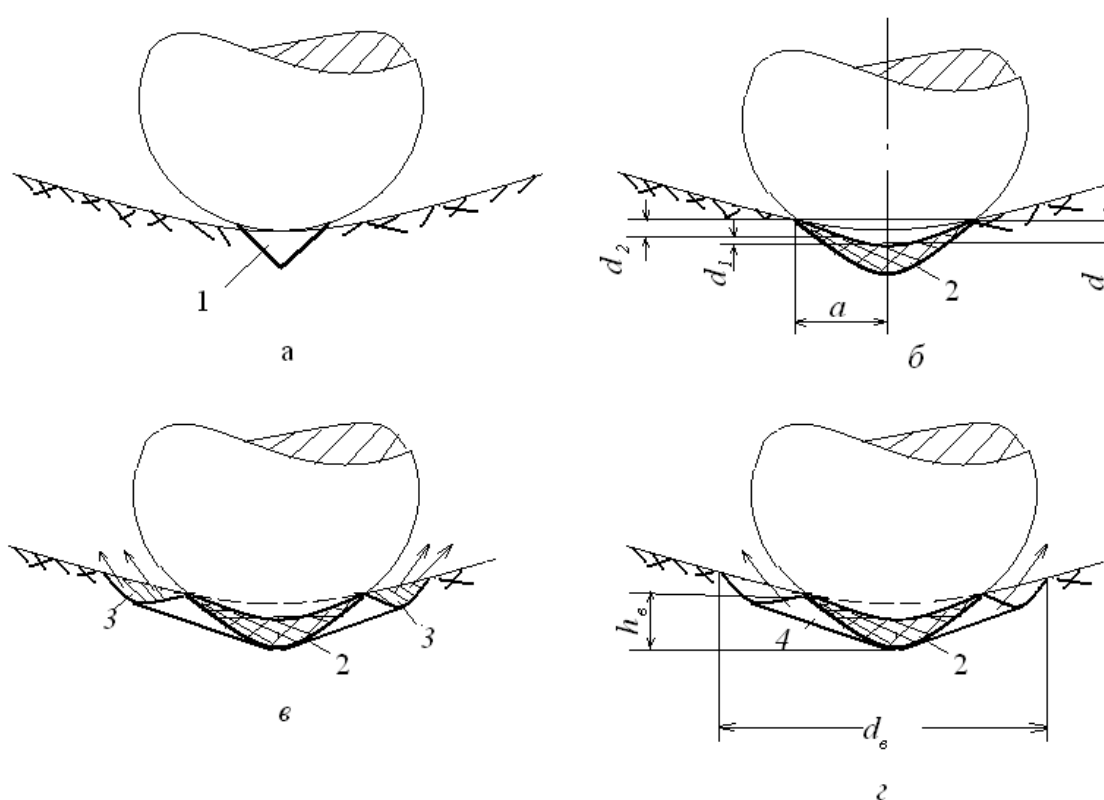


Рис. 2.5. Механизм образования элементарной воронки разрушения при соударении шара с забоем

Перед самым моментом хрупкого разрушения радиус контактной площадки максимален и равен a . Непосредственно под контактной поверхностью порода находится в условиях сильного всестороннего сжатия и представляет собой как бы нарост на вдавливаемой части шара, раздвигающий прилегающие к нему объемы породы в сторону обнаженных поверхностей – это «уплотненное ядро» 2.

Горная порода разрушается при достижении растягивающими напряжениями своих предельных значений в окрестностях контактного контура. Проявляется это путем выкалывания кольцевых объемов 3 по концентрическим трещинам за пределами контура давления (рис. 2.5, в). Общей закономерностью

разрушения хрупких тел при вдавливании сферических инденторов является то, что нормальные напряжения разрыва на поверхности тел достигают своих максимальных значений раньше, чем касательные напряжения внутри тела.

Вследствие расклинивающего воздействия «уплотненного ядра» на окружающую породу при наличии обнаженных поверхностей происходит заключительный акт процесса образования воронки разрушения – скалывание породы в кольцевой зоне 4 (рис. 2.5, *г*). Почти одновременно с этим материал «уплотненного ядра» дробится в тонкий порошок. Образуется воронка разрушения диаметром d_6 и глубиной h_6 .

Если к моменту хрупкого разрушения кинетическая энергия, запасенная шаром, исчерпана полностью, т. е. перешла в потенциальную энергию упругой деформации шара и горной породы, то в результате скачкообразного разрушения сплошности породы под контактной поверхностью шар внезапно «теряет опору» и потенциальная энергия его упругой деформации затрачивается на звук и теплообразование.

Если же энергия удара не исчерпана, произойдет следующий цикл нагружения горной породы. При этом контактная площадка значительно увеличится и потребуется намного больше энергии для второго скачка в разрушении.

В случае, когда энергия удара оказывается недостаточной для образования лунки (например, соударение закончится на моменте *б*, рис. 2.5), большая часть потенциальной энергии упругой деформации шара и горной породы восстановится в виде кинетической энергии отскока шара.

Из рассмотрения механизма соударения шара с забоем следует, что существует оптимальное значение энергии удара, обеспечивающее минимальную удельную энергоемкость процесса разрушения. Момент образования воронки разрушения будет характеризоваться зависимостью

$$P_c = \frac{P}{\rho a^2}, \quad (2.31)$$

где P_c – динамическая твердость породы при вдавливании сферы; P – контактная сила; a – радиус круга давления.

Установлено, что при статическом вдавливании штампа и сферы значения твердости приблизительно одинаковы. Прослежены также идентичные закономерности роста значений твердости по штампу и по сфере с увеличением скорости нагружения. Поэтому для практических расчетов процессов разрушения пород при вдавливании шаров можно пользоваться величинами статической и динамической твердости пород по штампу.

Если напряжение под контактной поверхностью будет меньше динамической твердости породы, то необходимо повторное нанесение определенного количества ударов по одному и тому же месту забоя для достижения эффекта разрушения. Разрушение может быть поверхностным, когда реальные контактные напряжения намного меньше динамической твердости горной породы и происходит ее истирание, и объемным, когда указанные напряжения близки по значению к твердости, но все же меньше ее.

Для достижения минимальной энергоемкости процессов разрушения горных пород при динамическом вдавливании необходимо знать и обеспечивать оптимальное значение энергии удара. В случае разрушения горных пород ударами шаров при сохранении характеристик последних постоянными, определяющую роль играет скорость соударения шаров с горной породой.

Скорость соударения, при которой энергия, запасенная шаром данного размера и удельного веса, равна необходимой для образования воронки в результате первого скачка разрушения, назовем оптимальной скоростью соударения шара с забоем и обозначим v_{onm} .

Введем аналитическую зависимость для определения v_{onm} .

$$n_{onm} = \frac{1,56(Q_1 + Q_2)^2 P_c^{5/2}}{\sqrt{m_1(2K_1 - K_{21} - K_{22})^3}}, \quad (2.32)$$

где Q_1, Q_2 – коэффициенты упругости, определяемые выражениями

$$Q_1 = \frac{4(1 - m_1^2)}{E_1}, \quad (2.33)$$

$$Q_2 = \frac{4(1 - m_2^2)}{E_2}, \quad (2.34)$$

где m_1, m_2 – коэффициенты Пуассона, характеризующие материалы соударяющихся тел; E_1, E_2 – модули упругости этих тел; P_c – удельное ударное давление

$$P_c = \frac{P}{\rho a^2}, \quad (2.35)$$

где P – контактная сила в момент удара

$$P = \sqrt[5]{\frac{1000}{9c_1^3(J_1 + J_2)^2(K_{11} + K_{12} + K_{21} + K_{22})}} u^{6/5}, \quad (2.36)$$

где c_1 – коэффициент учитывающий массу соударяющихся тел

$$c_1 = \frac{m_1 + m_2}{m_1 m_2}, \quad (2.37)$$

где m_1, m_2 – масса первого и второго соударяющихся тел соответственно, K_{11}, K_{12} – кривизна главных нормальных сечений поверхности первого тела; K_{21}, K_{22} – кривизна главных нормальных сечений поверхности второго тела; J_1, J_2 – коэффициенты упругости соударяющихся тел; a – полуось эллипса давления

$$a = \sqrt[5]{\frac{15(J_1 + J_2)}{16c_1(K_{11} + K_{12} + K_{21} + K_{22})^2}} u^{2/5}, \quad (2.38)$$

где K_1 – кривизна шара

$$K_1 = \frac{2}{d_u}, \quad (2.39)$$

где d_u – диаметр шара;

$$K_{21} = \frac{f''(x)}{\sqrt{\{1 + [f'(x)]^2\}^3}}, \quad (2.40)$$

где $f'(x)$ – первая производная уравнения $y = f(x)$, $f''(x)$ – вторая производная уравнения $y = f(x)$

$$K_{22} = \frac{x}{\sin j}, \quad (2.41)$$

где j – угол между касательной к кривой $y = f(x)$ в рассматриваемой точке забоя и положительным направлением оси; x – абсцисса рассматриваемой точки.

Более подробно необходимо остановиться на характеристике величин m_1, m_2 . Масса шара m_1 равна

$$m_1 = 0,523 \frac{r_u d_u^3}{g}, \quad (2.42)$$

где r_u – плотность материала шара; g – ускорение силы тяжести.

В связи с тем, что под m_2 понимается массив горных пород, то $m_2 = \infty$, тогда для коэффициента c_1 учитывающего массу соударяющихся тел запишем следующее

$$\lim_{m_2 \rightarrow \infty} c_1 = \lim_{m_2 \rightarrow \infty} \frac{m_1 + m_2}{m_1 m_2} = \lim_{m_2 \rightarrow \infty} \frac{\frac{m_1}{m_2} + 1}{m_1} = \frac{1}{m_1}. \quad (2.43)$$

Следовательно, c_1 определится как

$$c_1 = \frac{1}{m_1} \quad (2.44)$$

Знание значений v_{onm} очень важно на этапах выбора и расчета основных конструктивных размеров шароструйных аппаратов, а также выборе технологического оборудования (насос, компрессор, двигатель), которые должны соответствовать определенным физико-механическим свойствам буримых пород [32 – 33].

2.3 Обзор существующих конструкций реализующих принципы гидромеханического бурения

В мировой практике для бурения гидромеханическим способом в широком диапазоне глубин, горно-геологических условий и назначений скважин используется значительное число конструкций снарядов и устройств [2 – 3, 6, 12, 15].

Наибольшим количеством технических решений, бесспорно, обладает гидромеханический эрозионный способ. В связи с тем, что основная направленность исследований это все же гидромеханический абразивный способ, на конструкциях снарядов его реализующих необходимо остановиться более подробно. Начиная со середины 50-х годов минувшего столетия (времени возникновения и промышленного внедрения шароструйного способа) было разработано довольно большое количество устройств, одни из которых были вытеснены более технологичными, другие подвергнуты частичной или коренной модернизации. Рамки и концепция данной работы не позволяют и не требуют широкого освещения всех конструктивных разработок; однако дальнейшее обоснование

шароструйного способа невозможно без анализа наиболее принципиальных и специализированных конструкций.

Классическая схема снаряда шароструйного бурения [34] (предложенная фирмой Carter Oil Co) представлена на рис. 2.6. Снаряд состоит из верхнего сопла 1 и нижнего сопла 2. Расстояние между нижним соплом и забоем l , поддерживаемого при помощи автоматического регулятора подачи, должно быть в пределах $2,8 - 3,4 D$, где D – внутренний диаметр отверстия нижнего сопла. Практически это достигается тем, что к нижнему соплу присоединяются три лапы 3, высота которых определяется эмпирическим путем. Если буровая головка подается регулятором подачи, то штанги неподвижны, в случае, когда буровая головка покоится на лапах, то инструмент медленно вращается ($10 - 20 \text{ мин}^{-1}$).

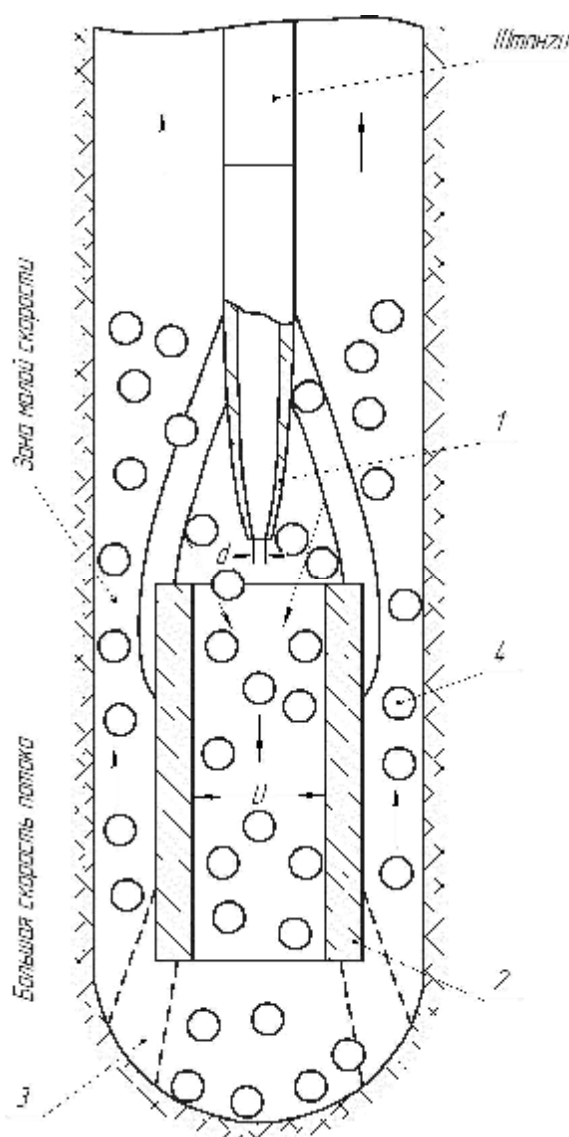


Рис. 2.6. Классическая схема снаряда шароструйного бурения

Опытами установлено, что длина нижнего сопла l_1 должна быть равна $8 - 10$ диаметрам буровой головки. Диаметр верхнего сопла d должен быть в $5 - 6$

раз меньше, чем диаметр нижнего сопла D . Диаметр стальных шариков 4 (дробь) подбирается равным $\sim 0,3 D$.

Во всех позднейших разработках была использована описанная выше принципиальная схема.

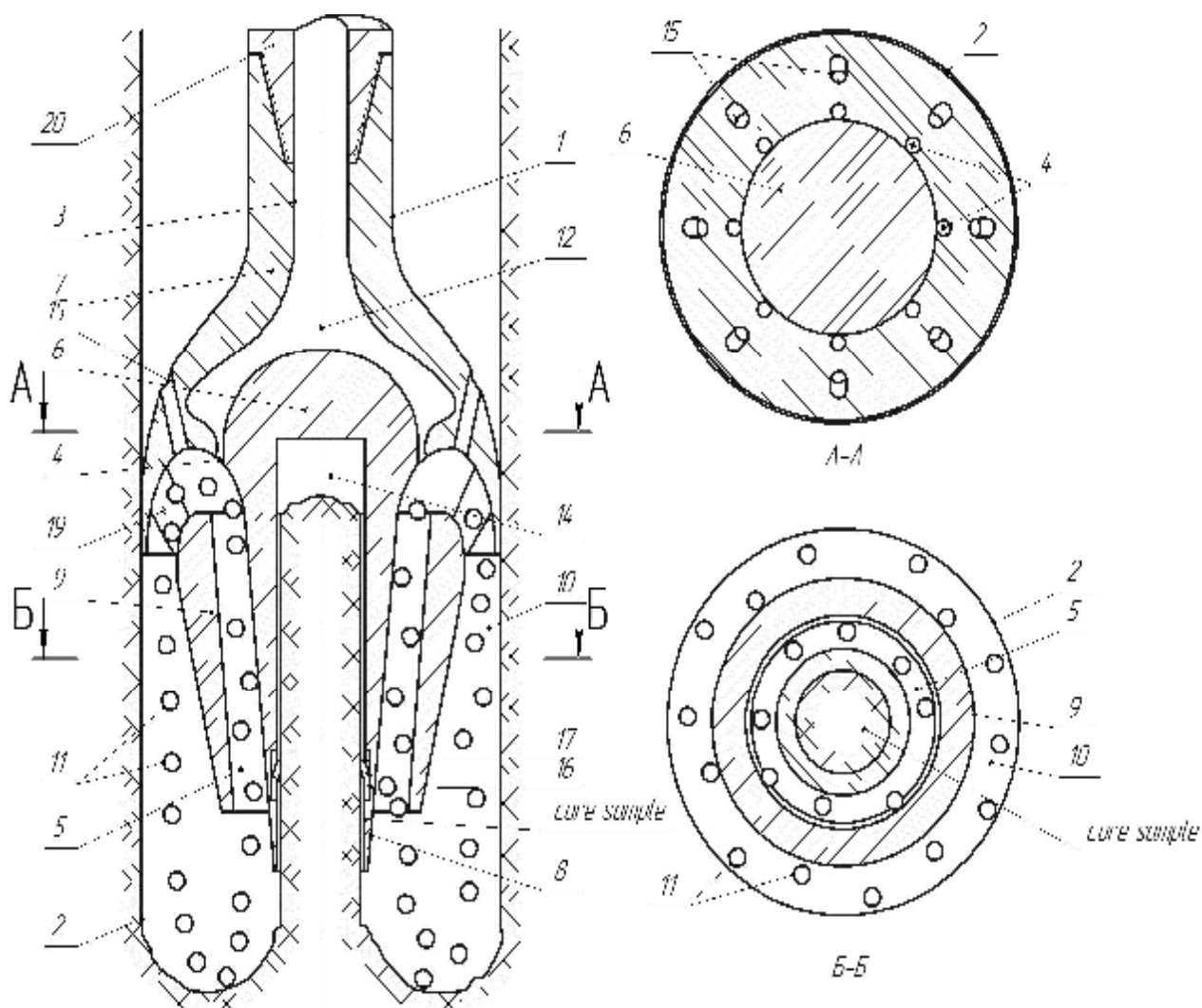


Рис. 2.7. Схема прибора для бурения с отбором керна

Первой работоспособной и довольно эффективной конструкцией шароструйного прибора является заявленная в США модель, позволяющая сооружать скважины с отбором керна [35]. Такой прибор (рис. 2.7), содержит корпус 1, ребристую насадку 2 и керноприемную трубу 3 с коронкой 4, которая при работе постоянно упирается в столбик керна 5 на забое скважины. Между насадкой 2 и керноприемной трубой 3 расположен струйный аппарат, образованный соплами 6, закрепленными над всасывающими окнами 7 камеры смешения 8, выполненной в виде прямого кольцевого цилиндра, образованного насадкой 2 и керноприемной трубой 3. Нижняя часть камеры смешения 8 по ходу движения породоразрушающих шаров (не показаны) выполнена в виде расширяющегося конуса 9. Полости сопел 6 посредством каналов 10 гидравлически соединены с внутренним каналом бурильных труб. В верхней части керноприемной трубы 3 выполнено гнездо 11 для установки съемной кассеты 12 с

кернарвателем; насадка 2 в зоне окон 7 имеет меньший диаметр, чем в нижней части.

Снаряд работает следующим образом. После спуска последнего на бурильных трубах до забоя, в скважину засыпают породоразрушающие шары, а затем вбрасывают через колонну труб съемную кассету 12, которая закрывает проходкой канал керноприемной трубы 3. Подаваемая промывочная жидкость проходит через каналы 10 сопла 6 в камеру смешения 8, где в зоне всасывающих окон создается разрежение, благодаря чему шары попадают в циркуляционный поток (на рисунке показан стрелками).

В результате этого начинается призабойная циркуляция шаров, которые при прохождении через камеру смешения 8 разгоняются и производят разрушение забоя. Благодаря конической форме нижней части 9 камеры смешения 8 исключается непосредственный контакт шаров с керноприёмной трубой 3 и насадкой 2. Над всасывающими окнами 7, где наружный диаметр насадки меньше, чем в нижней части, происходит торможение шаров и накопление их перед струйным аппаратом. Это предохраняет насадку 2 от износа и способствует более равномерной подаче шаров в камеру смешения 8. Съемная труба 12 после заполнения керном извлекается овершотом на поверхность, а вместо нее через колонну бурильных труб вбрасывается новая съемная труба, после фиксации которой в гнезде 11 процесс бурения возобновляется до заполнения вновь спущенной трубы 12. Для извлечения шаров с забоя используют обратную циркуляцию, при которой шары промывочной жидкостью через керноприемную трубу 3 и полость бурильных труб выносятся на поверхность.

Применение предлагаемого снаряда позволяет значительно увеличить продолжительность его работы без подъема на поверхность.

При замене коронки 4 на долото данный снаряд может быть использован для бурения без отбора керна.

Рассмотренная схема снаряда впоследствии была изменена с целью обеспечения надежной работы его при бурении мерзлых пород (рис. 2.8). Это достижимо за счет того, что разработанная конструкция снаряда содержит [36]: цилиндрический полый корпус 1, соединенный в верхней части с колонной бурильных труб (не показана) и снабженный в нижней части опорным башмаком 2; породоразрушающие шары 3 и концентрично расположенный в корпусе 1, выше его нижнего торца, струйный аппарат 4, соединенный с ним при помощи герметизированного гнезда 5 и включающий головку 6 для захвата овершотом; сопло 7 и камеру смешения 8 с окнами 9 для прохода породоразрушающих шаров 3.

Для повышения надежности работы при бурении мерзлой породы, в частности льда, взаимодействующие с герметизированным гнездом 5 боковые стенки 10 струйного аппарата 4 имеют сквозные капиллярные отверстия 11, соединяющие между собой капиллярно-пористые слои 12 и 13, смонтированные соответственно на внутренней поверхности 14 цилиндрического полого корпуса 1 и на стенках рабочей камеры 15, выполненной в верхней части струйного аппарата 4, соединенной с соплом 7 и снабженной нагревателем 16, установленным на наружной поверхности рабочей камеры 15.

Породоразрушающие шары 3 могут быть выполнены из капиллярно-пористого материала, например пенокерамики.

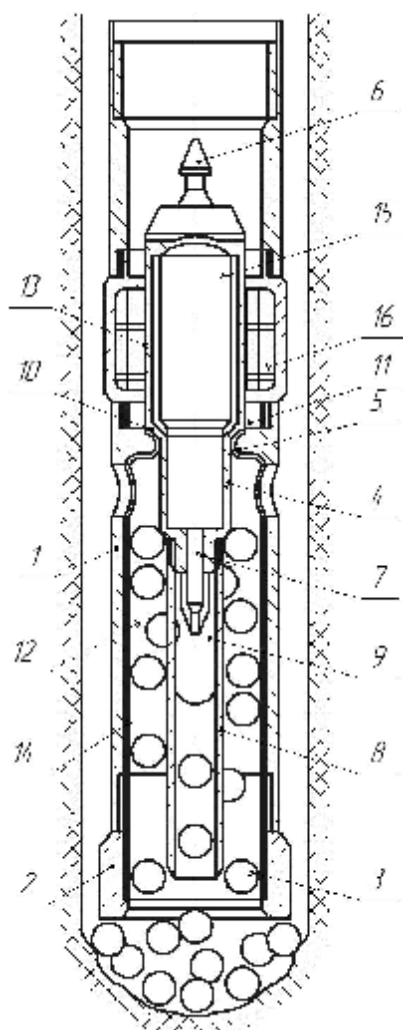


Рис. 2.8. Снаряд для бурения в мерзлых породах

При встрече с мерзлой горной породой, преимущественно льдом, пропитанный водой капиллярно-пористый слой 13 нагревается посредством нагревателя 16. Вода закипает и, отбирая от нагревателя 16 теплоту парообразования, превращается в перегретый пар, высокоскоростная струя которого, истекая из сопла 7, разгоняет породоразрушающие шары 3 в камере смешения 8, которые вместе с горячим паром взаимодействуют с забоем скважины и разрушают его. Нагретые в камере смешения 8 породоразрушающие шары 3, попадая на забой, разогревают его и обеспечивают дополнительное парообразование, в результате чего устанавливается циркуляционное течение пара, способствующее инжектированию породоразрушающих шаров 3 в окна 9 струйного аппарата. При этом часть пара конденсируется и оседает на капиллярно-пористом слое 12, в котором существует градиент давления, направленный через капиллярные отверстия 11 в зону нагревателя 16, обусловленный капиллярными силами капиллярно-пористых слоев 12 и 13 и непрерывным высыханием капиллярно-пористого слоя 13 за счет тепла, выделяемого нагревателем 16. Это обеспечива-

ет непрерывную транспортировку конденсата в зоне нагрева и интенсивное парообразование; при этом система в целом действует подобно открытой тепловой трубе и обладает свойством сверх-теплопроводности, что обеспечивает наряду с механическим действием породоразрушающих шаров 3, также и тепловое воздействие на забой. Дополнительная транспортировка конденсата может осуществляться шарами 3 при их выполнении из капиллярно-пористого материала. В обычной породе струйный аппарат заменяется, для обеспечения возможности использования промывочной жидкости. Нагреватель может быть ядерным.

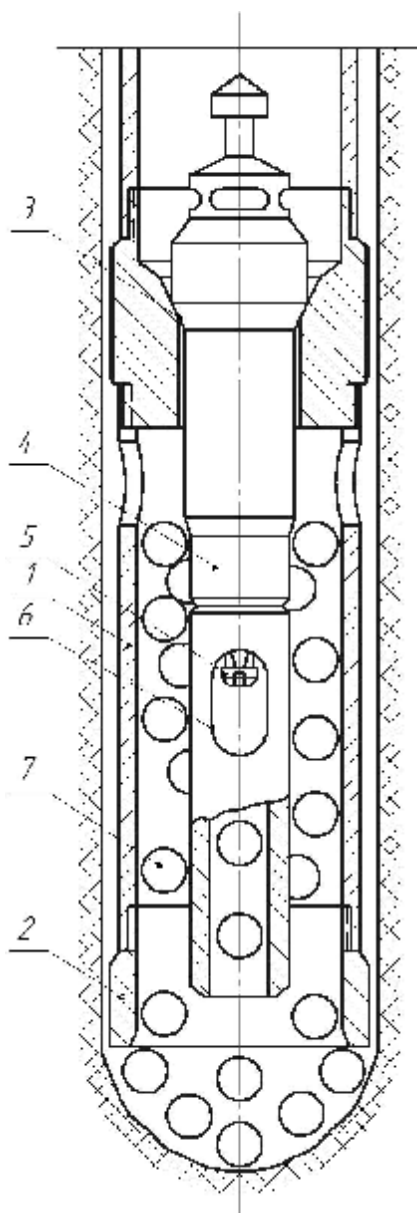


Рис. 2.9. Снаряд с породоразрушающим башмаком

Применение предлагаемого снаряда позволяет избежать возникновения аварийных ситуаций при бурении по мерзлым породам, путем устранения возможности замерзания промывочной жидкости на забое скважины.

Известна также конструкция шароструйного снаряда, которая кроме собственно гидравлического органа разрушения включает механический породоразрушающий башмак (рис. 2.9) [37].

Снаряд представлен корпусом 1 с породоразрушающим опорным башмаком 2, окнами для выхода промывочной жидкости, содержащей шлам, и гнездом 3 для герметизированной посадки струйного аппарата 4.

Струйный аппарат 4 расположен выше нижнего торца корпуса, имеет головку для захвата овершотом, сопло 5 и камеру смешения с окнами 6 для прохода шаров 7 и подсасываемой жидкости.

Для бурения корпус 1 снаряда присоединяют к бурильным трубам и спускают на забой. Затем в колонну бурильных труб забрасывают рейсовую порцию шаров 7 и по достижении ими забоя опускают струйный аппарат 4. Включением циркуляции промывочной жидкости вовлекают снаряд в работу. При этом шары 7, рециркулируя в зоне забоя вместе с инжектируемой струйным аппаратом жидкостью, ускоряются в камере смешения и взаимодействуют с забоем, разрушая его. Формирование периферийной части забоя осуществляется путем обрушения в результате воздействия на нее башмака 2, нагруженного весом бурильной колонны. Для смены изношенного струйного аппарата его извлекают из скважины овершотом или обратной промывкой. Частицы раздробленных шаров транспортируются из скважины вместе со шламом. Их запас возобновляется перед спуском в скважину нового струйного аппарата. Для смены износившегося опорного породоразрушающего башмака бурильную колонну поднимают из скважины.

Применение этого устройства показало определенную его эффективность для проходки скважин в сравнительно однородных крепких породах; однако при повышении крепости и неоднородности пород наблюдается его заклинивание в скважине, что связано с невозможностью разрушения породы опорным башмаком.

Модернизация такого устройства [38] привела к его оснащению сопловой насадкой 1 (рис. 2.10), служащей для формирования струи рабочего агента, например газа, генерируемого в камере сгорания 2, и расположенной соосно ей разгонной камере 3, которая имеет окна 4 для эжектирования породоразрушающих элементов в виде шаров 5 из призабойного пространства 6 в истекающую струю рабочего агента.

Сопловая насадка 1 и разгонная камера 3 соединены между собой с помощью шарнира 7 так, что последняя может поворачиваться в вертикальной плоскости относительно насадки 1.

Насадка 1 и разгонная камера 3 размещены внутри цилиндрического кожуха 8, имеющего окна 9 для выхода продуктов разрушения и опорный башмак 10, опережающий разгонную камеру.

Цилиндрический кожух 8 соединен с сопловой насадкой 1 посредством подшипника 11 и благодаря ему он может вращаться относительно насадки 1. Кроме того, кожух 8 установлен с возможностью продольного перемещения относительно насадки 1 за счет наличия направляющего паза 12 в ней.

Для отклонения разгонной камеры 3 от вертикали служит тяга 13, прикрепленная к кожуху 8 и связанная с боковым упорным элементом 14 разгонной камеры 3. Тяга 13 перемещается вместе с кожухом 8, причем для его воз-

РАЗДЕЛ 2 Изучение закономерностей формирования скважины при шароструйном бурении

вращения в исходное первоначальное положение служит пружина 15, помещенная в расточке насадки 1.

Охлаждение сопловой насадки 1 и разгонной камеры 3 достигается за счет воды, подаваемой по каналам 16.

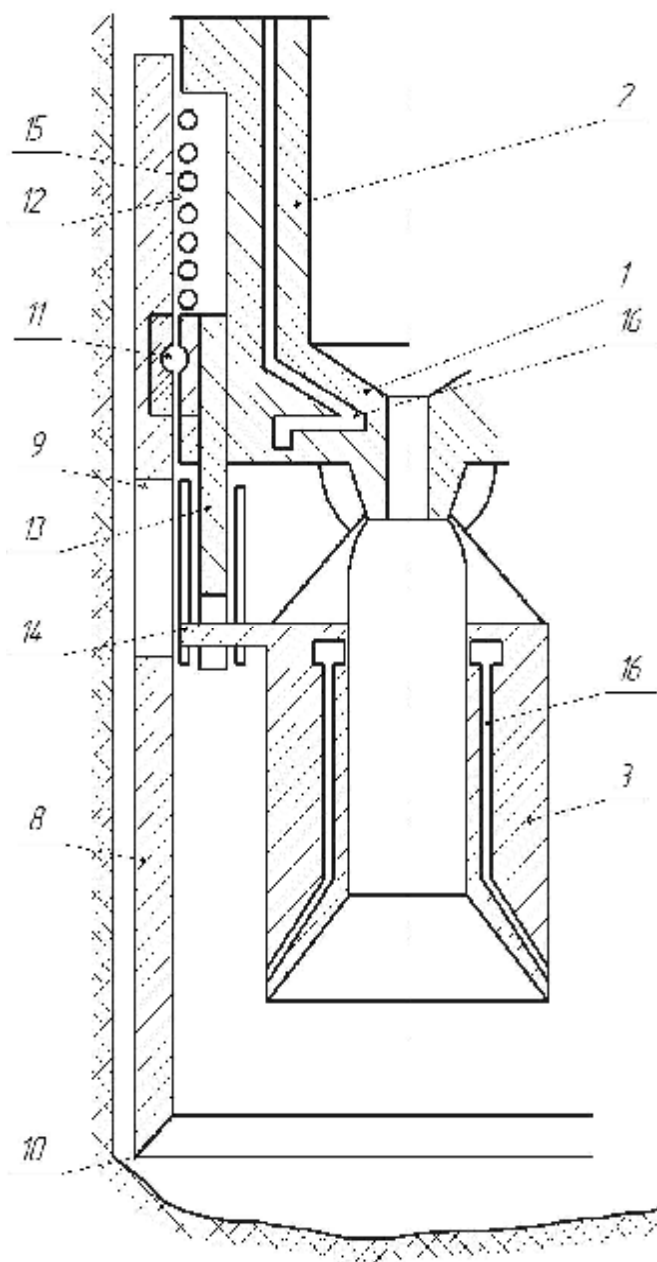


Рис. 2.10. Шароструйный снаряд с камерой сгорания

Работа устройства заключается в следующем. Струя рабочего агента истекает из сопловой насадки 1 в разгонную камеру 3, откуда из пространства между кожухом 8 и ею эжектируются породоразрушающие шары 5 через окна 4.

Разогнанные до высокой скорости струей рабочего агента породоразрушающие шары 5 и истекающая струя рабочего агента разрушают забой скважины. Сбрасываемая из каналов 16 в пространство между кожухом 8 и камерой 3 вода охлаждает шары 5. При этом жидкость испаряется, и образующийся па-

рогозовый поток поднимает шары 5 вместе с продуктами разрушения до эжекционных окон 4 в камере 3 для нового цикла разгона. Тем самым осуществляется циркуляция шаров 5.

Крупная фракция продуктов разрушения также участвует в процессе циркуляции вплоть до переизмельчения, а мелкая фракция вместе с отраженным от забоя парогозовым потоком выходит через окна 9 кожуха 8 в затрубное пространство и выносится на поверхность.

При нормальном процессе формирования проходного сечения скважины опорный башмак 10 кожуха 8 не застревает при опускании устройства. При встрече с труднобуримыми пропластками происходит сужение скважины, башмак 10 взаимодействует со стенками скважины и процесс нормального спуска устройства затрудняется. Расширение сечения скважины до проходного в этом случае осуществляется путем обработки ее периферийной части непосредственно под опорным башмаком 10 струей рабочего агента с шарами 5. Для этого разгонная камера 3 отклоняется от оси скважины посредством тяги 13, взаимодействующей с ее упорным элементом 14 по следующей схеме. Под действием осевого усилия подачи происходит продольное смещение сопловой насадки 1 относительно кожуха 8, при этом тяга 13 вызывает отклонение упорного элемента 14 и связанной с ним камеры 3. В результате вращения разгонной камеры 3 совместно с сопловой насадкой 1 происходит обработка периферийной зоны скважины непосредственно под опорным башмаком 10. После восстановления требуемого проходного сечения скважины цилиндрический кожух 8 под действием пружины 15 возвращается в исходное положение. Одновременно разгонная камера 3 также возвращается в исходное положение под действием тяги 13.

В связи с незначительной промышленной пригодностью, рассмотрение прочих конструкций снарядов и принципа их действия практического интереса не представляет.

2.4 Исходные конструктивно-технологические требования к шароструйным снарядам

Как показывает теория, а в большей степени практика бурения, любое из технических решений оказывается технологически и экономически оправданным, если оно отличается сравнительной несложностью [39].

Говоря о шароструйном способе и технологических средствах для его реализации, несомненно, их можно охарактеризовать как достаточно простые, что является одним из главных преимуществ данного метода. Именно названное обстоятельство определяет практически неограниченность рейсов при гидромеханическом бурении, а это, как было показано ранее, главный резерв повышения производительности. Выявившейся недостаток шароструйного способа (параболическая форма забоя) предопределил направленность всех последующих конструктивных разработок. Анализ условий формирования профиля скважины позволяет с уверенностью сказать, что образование периферийной части забоя является подчиненным фактором, определяемым самим исполнени-

ем снаряда, и не подлежащим корректировке только с помощью конструктивных изменений. Иными словами, эффективное профилообразование возможно только за счет введения в состав снаряда гидромеханического бурения дополнительных узлов, комплексирующих или комбинирующих определенные технологические методы и приемы.

Предложенный в работе [38] подход импонирует тем, что органу формирования профиля скважины придали возможность поочередной обработки различных участков забоя. Последнее является и главным недостатком устройства, который заключается в сложности самого механизма привода поворотной камеры смещения, кроме того вызывает сомнения работоспособность узла регулировки и невозможность оперативного «управления» профилем скважины в зависимости от геолого-технических условий. Совершенно очевидным стает то, что гидравлический принцип обработки периферийной части забоя является неприемлемым, по крайней мере, в предложенном виде.

Переходя к устройству с механическим органом формирования стенок скважины обратимся к основам физики горных пород [40]. Пределом прочности или разрушающим напряжением горной породы называется величина напряжения, при котором порода разрушается при данном виде деформации (сжатию, растяжению, изгибе, сдвиге).

Относительная прочность пород к различным видам деформации различна (табл. 2.1)

Таблица 2.1

Основные механические закономерности деформации горных пород

Горные породы	Относительная прочность пород при деформации			
	Одноосное сжатие	Растяжение	Изгиб	Сдвиг
Магматические	1	0,02-0,04	0,08	0,09
Метаморфические	1	0,02-0,1	0,06-0,1	0,1-0,15

Данные табл. 2.1 свидетельствуют о весьма важном в отношении механики разрушения факте: прочность пород на скалывание и разрыв значительно меньше, чем на сжатие; сказанное является основным критерием определения конструктивных параметров как породоразрушающего инструмента, так и специальных забойных снарядов и двигателей. Поэтому, любые технические решения, игнорирующие указанные обстоятельства можно заведомо считать малоэффективными и эксплуатационно непригодными. Именно это было подтверждено при использовании шароструйного снаряда со специальным опорным башмаком [37]. Последний практически не справлялся с возложенными на него функциями по формированию периферийной зоны забоя, что приводило к постоянной его заклинке в массиве пород; вместе с тем данные факты вовсе не отменяют, а лишь позволяют корректировать технологические подходы к формированию забоя все же механическим способом. В свете сказанного работа механического породоразрушающего органа шароструйного снаряда должна реализовать принципы наименее энергоемких и эффективных способов разрушения массива (табл. 2.1). Руководясь тем, что любое конструктивное усовершенствование шароструйного снаряда не должна привести к существенному

усложнению его гидравлической и механической частей, можно наметить несколько возможных схем разрушения породы забоя.

1. Обработка периферийной зоны забоя непосредственно стальными породоразрушающими шариками.

2. Формирование профиля скважины за счет воздействия на массив осколков породоразрушающих шаров и даже самих пород.

3. Комбинированная схема разрушения, включающая в той или иной мере принципы первых двух.

Не затрагивая вопросов механики разрушения, которые будут рассмотрены в соответствующих разделах, необходимо заметить, что предложенные схемы формирования забоя скважины требуют определенных как конструктивных, так и технологических изменений; причем они должны быть комплексными, иными словами выполнять не только непосредственно возложенные на них функции, но и по возможности способствовать достижению прочими сопутствующими процессами своих максимальных технико-экономических показателей. Все это требует всестороннего изучения и анализа довольно широкого ряда технико-экономических аспектов механики разрушения пород и работы забойных машин.

2.5 ОБЩИЕ ВЫВОДЫ ПО РАЗДЕЛУ 2

1. Приведена упрощенная принципиальная схема шароструйного снаряда с характеристикой и назначением его основных узлов.

2. Освещены основы теории работы струйных аппаратов с указанием методики инженерного расчета параметров камеры смешения.

3. Изучены основополагающие принципы механизма разрушения горных пород ударами шаров с выводом важнейших аналитических зависимостей характеризующих забойные процессы формирования ствола скважины.

4. Приведены исчерпывающие сведения по конструктивным схемам исполнения и технологии применения наиболее эффективных моделей снарядов шароструйного бурения.

5. Обозначены предпосылки создания усовершенствованных конструкций снарядов гидромеханического бурения.

РАЗДЕЛ 3 СНАРЯДЫ ГИДРОМЕХАНИЧЕСКОГО БУРЕНИЯ ВРАЩАТЕЛЬНОГО ТИПА

3.1 Шароструйный снаряд с эффектом механического разрушения

Сформулированные выше концептуальные положения о конструктивном исполнении и технологических основах работы модернизированного шароструйного снаряда позволили четко выделить условия, которые необходимо создать для повышения технико-экономических показателей процесса бурения. Такие условия бесспорно являются функциональными и зависящими как от модели устройства шароструйного снаряда, так и технологического режима использования.

В основу модернизации шароструйного снаряда [41] положена задача усовершенствования последнего, за счет иного конструктивного исполнения механического породоразрушающего органа и технологической схемы приспособления, что будет обеспечивать: значительное снижение затрат мощности для создания статической нагрузки на механический породоразрушающий инструмент устройства, реализацию наиболее эффективного механизма обработки периферийной зоны забоя, а именно вращательного способа с использованием шаров, создание условий для значительного повышения интенсивности ведения работ; за счет этого исключается остановка процесса углубки из-за наличия параболической формы забоя скважины, увеличивается рейсовая скорость бурения, уменьшается амортизация самого устройства и бурильных труб.

Поставленную задачу специалисты кафедры ТР МПИ (кафедра техники разведки месторождений полезных ископаемых) НГУ решили следующим образом [42 – 43]: в известную конструкцию шароструйного снаряда, которая содержит в себя полый корпус, породоразрушающие шарики и концентрически размещенный в корпусе струйный аппарат, согласно техническому решению, включено породоразрушающее кольцо, в котором с одной стороны выполнена резьба, для соединения с нижней частью корпуса снаряда, а с другой – ряд специальных посадочных гнезд, для размещения породоразрушающих шариков. Кроме того, породоразрушающее кольцо устанавливается с возможностью вращения вместе с корпусом снаряда, который в верхней части, для создания крутящего момента с помощью потока промывочной жидкости, жестко связан с турбинным аппаратом, статорный вал которого резьбовым соединением сообщен с колонной бурильных труб.

На рис. 3.1 приведена общая схема шароструйного устройства, где 1 – корпус, 2 – струйный аппарат, 3 – породоразрушающие шарики. Корпус 1 в нижней части оснащен специальным породоразрушающим кольцом 4, которое имеет некоторое количество специальных посадочных гнезд 5, которые предназначены для размещения породоразрушающих шариков 3. Верхняя часть корпуса 1 соединена с турбинным аппаратом 6, работа которого сводится к созданию крутящего момента, передающегося через корпус 1 на породоразрушающее кольцо 4. Привод турбинного аппарата 6 создается за счет промывочной жидкости, которая циркулирует по колонне бурильных труб 7.

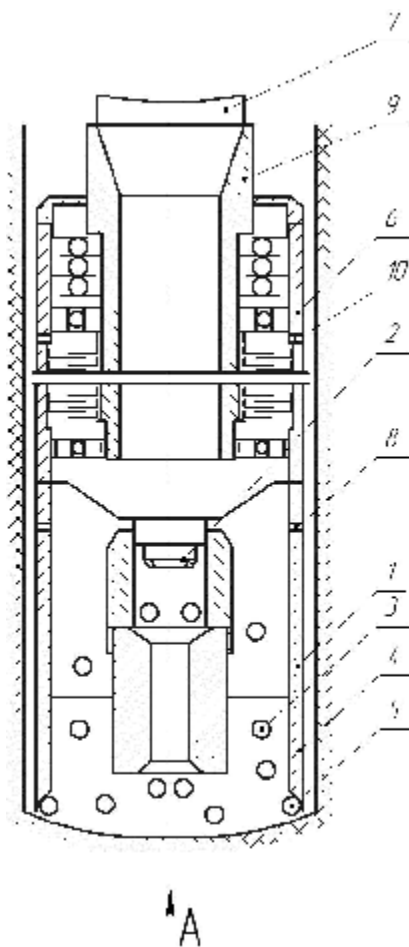


Рис. 3.1. Схема модернизированного шароструйного снаряда с эффектом механического разрушения

На рис. 3.2 приведен вид снизу породоразрушающего кольца 4 по направлению А, где показаны специальные посадочные гнезда 5 с шариками 3.

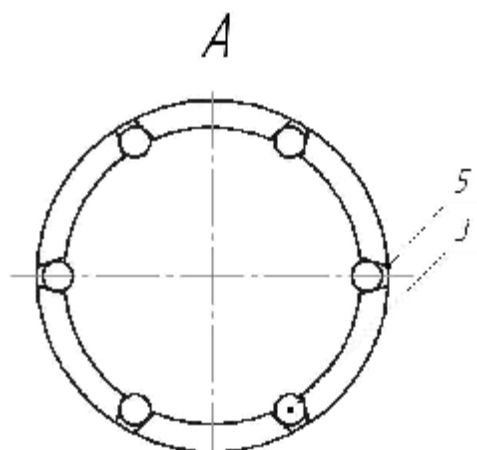


Рис. 3.2. Породоразрушающее кольцо

Устройство работает следующим образом: при создании циркуляции промывочной жидкости во внутренней части корпуса 1 устройства начинается активное движение породоразрушающих шариков 3, которые взаимодействуют

с породой забоя и разрушают ее. В призабойной зоне поток промывочной жидкости разделяется на две составляющие, одна из которых вместе с породоразрушающими шариками поднимается вверх, к струйному аппарату 2, а другая, обогащенная продуктами разрушения, выходит в затрубное пространство между торцом и корпусом породоразрушающего кольца 4 и забоем и стенками скважины соответственно. Частично разрушенная порода также удаляется через специальные промывочные окна 8. Наличие породоразрушающего кольца 4 в нижней части устройства продиктовано необходимостью формирования прямоугольного профиля забоя скважины за счет реализации наиболее эффективного механизма разрушения его криволинейных стенок, возникновение которых обусловлено технологической схемой бурения и приводит к уменьшению механической скорости бурения или к полной остановке процесса углубки. Этот механизм разрушения характеризуется следующей схемой. Породоразрушающие шарики 3, циркулирующие вместе с промывочной жидкостью в интервале от плоскости забоя до струйного аппарата 2, в ходе взаимодействия с горной породой постоянно уменьшаются по внешнему диаметру и массе. При достижении этими параметрами некоторых значений шарики потоком промывочной жидкости размещаются и удерживаются в посадочных гнездах 5, которые содержит в нижней части породоразрушающее кольцо 4. За счет постоянного вращения и создания осевой нагрузки на шарики, находящиеся в гнездах, последние разрушают породу на забое и формируют его периферийную зону. При этом происходит дальнейшее истирание породоразрушающих шариков, что приводит к их удалению из посадочных гнезд. Вместо изношенных шариков на их место поступают более крупные и работоспособные. Постоянное вращение породоразрушающего кольца 4 обусловлено наличием в верхней части корпуса устройства турбинного аппарата, привод которого создается промывочной жидкостью, поток которой при выходе из вала 9 разделяется на два: один направляется к струйному аппарату, а другой, поворачивая на 180° идет к турбине, затем через отверстия 10 в пространство между стенками скважины и корпусом устройства.

Для доказательства обоснованности некоторых конструктивных решений в модели снаряда необходимо на них остановиться более подробно.

Вращение породоразрушающего кольца обуславливается наличием забойного двигателя, в данном случае турбобура; включение его в снаряд связано с несколькими взаимосвязанными обстоятельствами: снижение затрат мощности на вращение за счет непосредственного подвода крутящего момента к исполнительному органу – кольцу, достижение рациональных частот вращения в отношении пары «шарик – горная порода», упрощение поверхностной схемы оборудования. Турбобур позволяет более эффективно использовать энергию потока промывочной жидкости, которая в этом случае делает возможной циркуляцию породоразрушающих шаров но и приводит в движение вал турбобура, причем, что очень важно, допустимо использование того же насосного агрегата, применяемого и в случае обычного шароструйного бурения. Это обстоятельство обеспечивается как технологическим режимом бурения, так и конструкцией турбобура.

Значительные частоты вращения, создаваемые турбинным двигателем, позволяют достигнуть высоких механических скоростей разрушения. Последнее было доказано исследованиями [44], направленными на выяснения влияния частотности вращения на скорость разрушения породы под сферическим индентором. В результате чего был показан непрерывный прирост скорости разрушения до частоты вращения 3000 – 3500 мин⁻¹.

Хотя в общем можно провести некоторую аналогию между породоразрушающим кольцом и дробовой коронкой, и, даже собственно между предложенным способом бурения и классическим дробовым, однако в них есть коренные отличия [45]. Породоразрушающее кольцо и само исполнение посадочных гнезд последнего, а также особенность внутриснарядных циркуляционных процессов позволяют прочно удерживать породоразрушающие шары. В дробовом же способе бурения, как известно, наблюдается вредное накопление дроби и внутри коронки и в закороночном пространстве, что ведет к износу породоразрушающего инструмента, разработке ствола скважины и его искривлению. Накопление изношенных шаров в модернизированном снаряде невозможно по причине их практически мгновенного удаления из призабойной зоны и транспортировки на поверхность потоком жидкости.

Значительно отличаются и условия разрушения породы, что связано, как уже подчеркивалось, с более высокими частотами вращения.

3.2 Снаряд шароструйно-абразивного бурения

Продолжая развивать высказанную ранее мысль о необходимости сокращения времени на вспомогательные операции и прежде всего спускоподъемные необходимо отметить, что в этой плоскости лежат, по крайней мере, две задачи, решение которых позволит достигнуть обозначенной цели [46]. Первая – это возможно больший период работы снаряда (породоразрушающего инструмента) на забое скважины без необходимости его извлечения на поверхность. Вторая – обеспечение одинаковой эффективности бурения, как в вертикальных, так и наклонных участках скважины, исключающая замену снаряда. Последнее обстоятельство обусловило направленность в разработке следующей модели гидромеханического снаряда. Описанную в подразделе 3.1 конструкцию можно признать вполне пригодной для проходки вертикальных скважин и таковых имеющих небольшие зенитные углы. Применение же такого снаряда для проходки скважин со значительными зенитными углами и интенсивной кривизной исключается целым рядом факторов [47], среди которых: сложность удержания породоразрушающих шаров в посадочных гнездах; необходимость создания значительных осевых нагрузок на шары, что практически невозможно в отмеченных скважинах; существенные продольные и поперечные габаритные размеры турбинного двигателя, препятствующие его свободному перемещению в стволе скважины.

Выдвинутые ограничительные условия трансформировались в постановку задачи усовершенствования шароструйного устройства, в котором принципиально иное конструктивное исполнение механического породоразрушающе-

го органа и схемы бурения обеспечивает: значительное снижение затрат мощности для создания нагрузки на механический породоразрушающий орган аппарата, и в первую очередь в скважинах с интенсивной кривизной. Также достигается реализация вращательного метода формирования периферийной зоны забоя с использованием обломков шариков и продуктов разрушения горных пород. Создаются условия для значительного увеличения интенсивности ведения работ. Все выше перечисленное практически полностью исключает остановку процесса углубки скважины вследствие наличия параболической формы забоя и значительных зенитных углов, что положительно сказывается и на увеличении рейсовой скорости бурения.

Специалисты кафедры ТР МПИ НГУ предлагают следующий вариант решения сформулированной задачи [48 – 49]: в известный гидромеханический снаряд, включающий корпус со струйным аппаратом, породоразрушающий башмак и шарики, согласно разработке, дополнительно введен винтовой двигатель, соединенный с колонной бурильных труб и корпусом струйного аппарата, механический породоразрушающий орган которого выполнен в виде матрицы, причем, верхняя часть её жестко соединена с корпусом струйного аппарата, а нижняя является пористой.

На рис. 3.3, *а* приведена общая схема шароструйного устройства, где 1 – корпус, 2 – струйный аппарат, 3 – породоразрушающие шарики. Корпус 1 в нижней части оснащен породоразрушающей матрицей 4 с пористой структурой 5, предназначенной для размещения обломков шариков 6 и горной породы 7. Верхняя часть корпуса 1 соединена с винтовым двигателем 8, для создания вращения, которое через корпус 1 передается на матрицу 4. Привод винтового двигателя 8 осуществляется с помощью промывочной жидкости, циркулирующей по колонне бурильных труб 9.

На рис. 3.3, *б* приведен вид снизу породоразрушающей матрицы 4 по направлению *А*, где показано специальную пористую структуру 5 с размещенными в ней обломками шариков 6 и горной породы 7.

Устройство работает следующим образом: при возникновении циркуляции промывочной жидкости во внутренней части корпуса 1 устройства, начинается активное движение породоразрушающих шариков 3, которые взаимодействуют с породой забоя, разрушают ее и разрушаются сами. В призабойной зоне поток промывочной жидкости разделяется на две составляющие, одна из которых с породоразрушающими шариками поднимается вверх к струйному аппарату 2, а другая, обогащенная продуктами разрушения, выходит в затрубное пространство между торцом и корпусом матрицы 4 и забоем и стенками скважины соответственно. Наличие породоразрушающей матрицы 4 в нижней части устройства необходимо для формирования прямоугольного профиля забоя скважины за счет реализации вращательного метода разрушения его криволинейных стенок, возникновение которых обусловлено технологической схемой бурения и приводит к уменьшению механической скорости бурения или к полной остановке процесса углубки. Этот механизм разрушения характеризуется следующей схемой. Породоразрушающие шарики 3, которые циркулируют вместе с промывочной жидкостью в интервале от плоскости забоя до струйного

аппарата 2, вследствие взаимодействия с горной породой непрерывно разрушаются. При этом обломки шариков и самой горной породы потоком промывочной жидкости размещаются и удерживаются в пористой структуре 5 нижней части матрицы. За счет постоянного вращения и создания осевой нагрузки на обломки, они путем абразивного износа разрушают породу на забое и формируют его периферийную зону. При этом происходит дальнейшее истирание продуктов разрушения шариков и горной породы, что приводит к их удалению из пористой структуры. Вместо изношенных обломков на их место поступают более работоспособные.

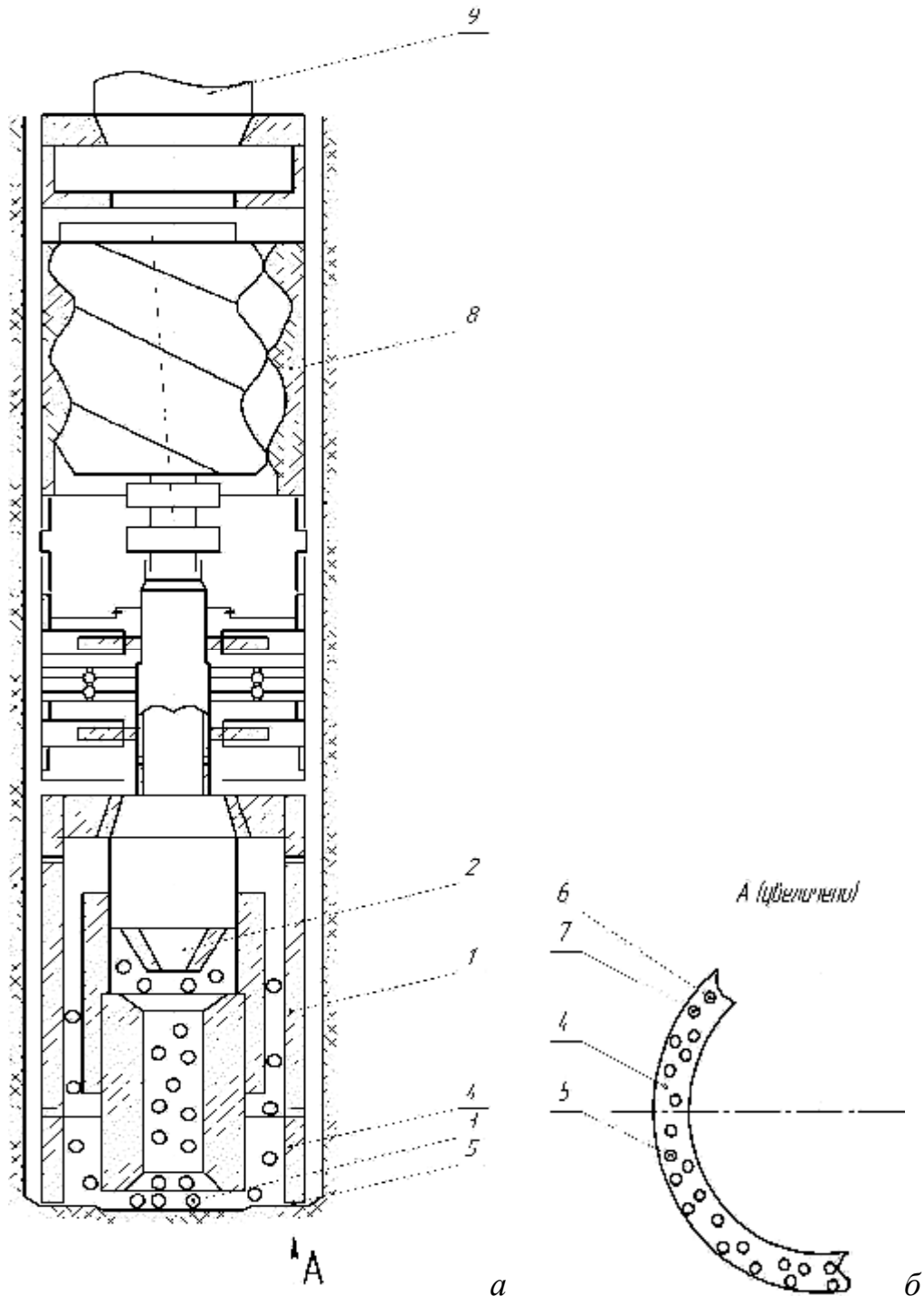


Рис. 3.3. Общая схема снаряда шароструйно-абразивного бурения

Постоянное вращение матрицы 4 обусловлено наличием в верхней части корпуса винтового двигателя 8, основным преимуществом которого является относительно небольшие габаритные размеры, которые позволяют ему беспрепятственно перемещаться в скважине с интенсивной степенью кривизны и большими зенитными углами. Привод винтового двигателя осуществляется промывочной жидкостью.

Некоторых пояснений требует термин «пористая структура породоразрушающей матрицы».

Пористые сплавы представляет собой особый класс функциональных материалов современного машиностроения; только они имеют в своем составе газовую фазу как полноправный компонент, который определяет большинство свойств материала [50]. По способу получения пористые сплавы можно разделить на два больших класса: пористые сплавы, структура которых сформирована в твердом состоянии; пористые сплавы, образующиеся в результате осуществления литейных технологий. Если сплавы первой группы оказались непригодными для выполнения функций размещения и удержания продуктов разрушения шаров и горных пород, то сплавы второй группы отвечают практически всем требованиям, предъявляемым к породоразрушающей матрице, в особенности это касается сплавов-газаров. Поэтому, на их структурных свойствах остановимся более детально.

Газары – это литые пористые сплавы, полученные путем газозвтектического превращения в системах «сплав – водород», отличающиеся особой пористой структурой. Газары могут быть получены с различным типом структуры, в зависимости от параметров процесса эвтектики, но их всегда отличает довольно равномерное распределение пор, размеры которых могут изменяться в пределах от 10 м (продольные) до 10 мкм и менее (поперечные), а сама пористость достигает 75%. Стенки пор в газарах чистые, а межпоровые перегородки представляют собой сплав, не загрязненный примесями или добавками.

Прочность практически всех пористых сплавов снижается с увеличением пористости, причем это снижение происходит не пропорционально – прочность падает значительно интенсивнее. Это объясняется тем, что в них имеются участки, являющиеся концентраторами напряжений. Кроме того, значительно снижают прочность вещества, покрывающие поверхность пор и добавки необходимые для увеличения вязкости расплава. Напротив, прочность газаров (при равной пористости) сравнительно выше. Причем, в большом параметрическом диапазоне падение прочности с повышением пористости идет пропорционально, а при небольшом размере пор (до 50 мкм) наблюдается даже некоторое упрочнение материала, по сравнению с монолитом, имеющим тот же химический состав. Кроме того, газары легко поддаются обработке давлением и резанием, что выгодно их отличает от прочих пористых сплавов и делает их исключительно технологичными.

Именно указанные выше преимущества позволяют рекомендовать газары, как материал для изготовления породоразрушающих матриц в проектируемом

снаряде.

Включение в состав конструкции (в верхнюю её часть) именно винтового двигателя обусловлено, прежде всего, габаритными параметрами самого двигателя, которые позволяют ему беспрепятственно преодолевать дуги значительной кривизны. Согласно предварительным расчетам, данную модель снаряда можно рекомендовать для бурения горизонтальных участков скважин. Кроме того, выходные характеристики винтового двигателя являются приемлемыми для реализации, заложенного в конструктивное решение матрицы снаряда, механизма разрушения горных пород на забое.

Как и в снаряде с породоразрушающим органом в виде кольца, так и в таковом с матрицей, основным, формирующим центральную часть забоя, является гидромеханический способ разрушения. Принципиально отличным можно считать механизм обработки периферийной зоны забоя.

Вовлекаемые во вращение и абразивно-силовое взаимодействие обломки горных пород и шаров совершают некоторую работу разрушения, аналитически обосновать которую можно следующим образом. Само исполнение пористой структуры матрицы и довольно неправильная форма, как обломков шаров, так и горной породы практически исключает их перекачивание по забою. В этом случае единственно осуществимым механизмом будет волочение частиц, а процесс разрушения сведется в конечном итоге к истиранию породы.

3.3 Расчет основных рабочих параметров привода снарядов вращательного типа

Исходя из конструктивных особенностей шароструйных снарядов вращательного типа и схем их компоновки становится очевидным, что все рабочие гидравлические процессы, как в самом струйном аппарате, так и приводном механизме (турбобуре или винтовом двигателе) необходимо строго увязать. Причем, очень важным является следующее: соотношение выходных характеристик машин должно обеспечивать с одной стороны максимум механической скорости проходки, а с другой минимум затрат на привод снарядов. Ниже приводятся основные параметры инженерного расчета машин вращательного действия применительно к технологической схеме их сочетания в гидромеханических снарядах.

Как известно из теории турбинных аппаратов, эффективные рабочие характеристики последних лежат в области оптимального коэффициента полезного действия (КПД) [51].

КПД турбины турбобура – это отношение мощности, передаваемой ротором на выходной вал турбины N' , к гидравлической мощности, которую отдает поток жидкости N_T :

$$h = N' / N_T = N' / Qp, \quad (3.1)$$

где Q – расход жидкости; p – перепад давления.

Разница $N_T - N' = N_{II}$ соответствует потерям мощности в турбине, которые подразделяют на гидравлические, объемные и механические.

Объемные потери, которые определяются истечением жидкости преимущественно в радиальный кольцевой зазор ротора, являются достаточно сложным гидродинамическим процессом.

Расход жидкости Q_1 , протекающей по межлопаточным каналам ротора и обеспечивающей создание определенных величин частот вращения, крутящих моментов и мощностей на валу турбины, можно найти из соотношения

$$Q_1 = Qh_0, \quad (3.2)$$

где Q – полный расход жидкости через турбину; h_0 – коэффициент истечения (объемный КПД).

С достаточным для практики приближением

$$h_0 = 1 - \Delta Q_p / Q, \quad (3.3)$$

где ΔQ_p – истечение в кольцевой зазор ротора,

$$\Delta Q_p = m_1 f \sqrt{2\Delta p_1 / \rho}, \quad (3.4)$$

где m_1 – коэффициент расхода, который определяется свойствами жидкости и формой зазора; f – площадь сечения кольцевой щели; Δp_1 – перепад давления между входом и выходом из зазора; ρ – плотность жидкости.

Передача мощности от турбобура на долото, в отличие от большинства машин, которые используются в других отраслях промышленности, возможна лишь при создании осевой нагрузки. Поэтому осевое усилие, которое воспринимается пятой турбобура, – не постоянная величина, а в общем случае определяется режимом работы турбобура и нагрузкой на долото. В нашем случае долото заменено на специальной конструкции породоразрушающее кольцо, что вносит значимые коррективы в режим работы турбинной установки. Это выражается в следующем: величина осевого усилия, воспринимаемого пятой, будет зависеть от характеристики процессов разрушения пород на периферийной части забоя скважины.

Потери мощности на трение в пяте обуславливают разницу между характеристиками турбины и внешней характеристикой турбобура, энергетические показатели которой могут быть реализованы на забойном инструменте для разрушения горной породы.

Осевую нагрузку, действующую на пяту, определяют по формуле

$$G_{II} = G + B - G, \quad (3.5)$$

где G – гидравлическая нагрузка на пяту; B – вес в жидкости вращающихся деталей, связанных с валом турбинного двигателя; G – реакция забоя, которая равна по модулю нагрузке на забойный породоразрушающий инструмент.

Крутящий момент на инструменте

$$M_{II} = M_I + M_{II.M}G, \quad (3.6)$$

где M_I – момент на инструменте, не зависящий от нагрузки на него; $M_{II.M}$ – удельный момент инструмента. Как правило, $M_I \ll M_{II.M}G$.

Удельный момент инструмента в общем случае зависит от его конструктивных особенностей, диаметра, степени износа вооружения, прочностных характеристик разрушаемой горной породы и параметров режима бурения.

Частота вращения инструмента

$$n = n_x \left(1 - \frac{mR[G_{II}] + M_1 + M_{II.M}G}{kM_T} \right), \quad (3.7)$$

где n_x – частота вращения турбины на холостом ходу; μ – коэффициент трения в пяте; R – приведенный радиус трения; k – число ступеней турбины; M_T – тормозной момент, развиваемый турбиной при ее полной остановке. Это выражение очень важное в практическом отношении. С его помощью, например, вычисляют частоту вращения инструмента в зависимости от нагрузки.

При $G = 0$ и $n = 0$ находят условия запуска турбобура в подвешенном состоянии:

$$kM_T \geq m_{CT}R(\Gamma + B) + M_1, \quad (3.8)$$

где m_{CT} – статический коэффициент трения пяты.

Из этой формулы находят предельно допустимое верхнее значение m_{CT} , при котором турбобур запускается без операции расхаживания, а также минимально необходимую потерю жидкости и перепад давления при запуске турбобура.

Гидравлическую мощность, которая может быть реализована в турбобуре или в другом забойном двигателе или устройстве получают по формуле

$$N_G = N_H - N_{II} \quad (3.9)$$

где N_H – гидравлическая мощность на выходе насосов; N_{II} – потери мощности на гидравлические сопротивления в циркуляционном контуре.

Известно, что значения N_{II} определяются потерями мощности в инструменте и обвязке насоса, а также в трубах, замках и затрубном пространстве, причем три последние составляющие пропорциональны глубине скважины. Поэтому для турбулентного режима течения жидкости

$$N_{II} = a_1Q^3 + a_2LQ^3 = (a_1 + a_2L)Q^3 \quad (3.10)$$

где L – глубина скважины; a_1, a_2 – коэффициенты потерь, которые вычисляются по известным формулам гидравлики.

В свою очередь,

$$N_H = p_H Q, \quad (3.11)$$

где p_H – давление на выбросе насоса.

Подставив выражения (3.10) и (3.11) в (3.9) получим

$$N_G = p_H Q - (a_1 + a_2L)Q^3 \quad (3.12)$$

В общем случае p_H является также функцией расхода во второй степени.

Приведенные математические зависимости являются основными для проектирования режимно-технологических параметров при использовании шабруструйного снаряда с эффектом механического разрушения.

Энергетические параметры винтовых двигателей определяются их передаточным числом, перепадом давления и расходом рабочей жидкости [52].

Из схемы конструктивного сочленения пары ротор – статор известно, что количество контактных поверхностей скольжения для многозаходных двигателей на единицу меньше количества заходов ротора. Можно считать, что момент

трения при прочих равных условиях пропорционален количеству таких контактных поверхностей. Тогда, с увеличением количества заходов КПД машины уменьшается, а редуцирование частоты вращения увеличивается.

Для винтового двигателя справедливы соотношения

$$Z_1 = Z_2 + 1; \quad (3.13)$$

$$t_1 = t_2 Z_1 / Z_2, \quad (3.14)$$

где Z_1, Z_2 – количество зубьев (заходность) статора и ротора соответственно; t_1, t_2 – шаги зубьев статора и ротора соответственно.

Чтобы уменьшить утечку и снизить междувитковый перепад давления, а, следовательно, и контактное механическое давление пары ротор – статор, осевую длину рабочего органа двигателя следует брать больше, что находится в пределах

$$t = (2...3)t_1. \quad (3.15)$$

Правого вращения выходного вала двигателя достигают при левом навивании зубьев статора и ротора.

Во время работы ротор осуществляет планетарное движение, обкатываясь по зубьям статора:

ось ротора (если смотреть со стороны подвода жидкости) вращается вокруг оси статора против часовой стрелки;

ротор вращается по часовой стрелке вокруг своей оси (относительное движение).

Частота вращения выходного вала двигателя

$$n = n_{II} / Z_2 = i n_{II}, \quad (3.16)$$

где n_{II} – частота вращения в переносном движении, i – передаточное число.

Итак, винтовой двигатель – это аналог редуктора с передаточным числом i .

Теоретический объем жидкости (без учета утечки), который необходимо пропустить через двигатель на один оборот вала

$$q_T = S t Z_2, \quad (3.17)$$

где S – площадь проходного сечения между статором и ротором в плоскости, перпендикулярной к оси двигателя.

Для механизмов, сконструированных на базе гипоциклоидального центроидного зацепления, можно использовать выражение

$$S = 2pe^2(Z_2 - 1) + 8er, \quad (3.18)$$

где e – эксцентриситет механизма; r – радиус зуба.

Частота вращения двигателя

$$n = Q h_0 / q_T \quad (3.19)$$

где h_0 – объемный КПД, который зависит от внешней нагрузки двигателя.

Эффективная гидравлическая мощность двигателя

$$N = Q p h, \quad (3.20)$$

где p – фактический перепад давления; h – полный КПД двигателя.

В свою очередь,

$$h = (q_T / q)(p_e / p) = h_0 h_M \quad (3.21)$$

где q – фактический объем жидкости на один оборот двигателя; p_e – эффективный перепад давления в двигателе; h_M – механический КПД.

Крутящий момент можно найти по формуле

$$M_{KP} = N / 2\pi n \quad (3.22)$$

Заменяя в выражении (3.22) соответствующие величины по формулам (3.19) и (3.20) и с учетом (3.21), получим

$$M_{KP} = p h_M St_1 Z_2 / 2\pi . \quad (3.23)$$

Объемный КПД двигателя определяется из выражения

$$h_0 = 1 - \Delta Q_p / Q, \quad (3.24)$$

где ΔQ_p – утечка в кольцевой зазор ротора; Q – полный расход жидкости через турбину.

Механический КПД зависит от контактного давления, которое диктуется конструктивными размерами собственно двигателя, предварительным натяжением в паре ротор – статор и свойствами контактирующих материалов. Наибольшее влияние имеют перепад давления жидкости и предварительное натяжение.

Изложенная выше методика расчета машин вращательного действия является отправным пунктом при проектировании модернизированных гидромеханических снарядов (в отношении к струйным аппаратам) и должна быть в обязательном порядке учтена в соответствующих конструктивно-технологических расчетах.

3.4 ОБЩИЕ ВЫВОДЫ ПО РАЗДЕЛУ 3

1. Детально рассмотрены технологические схемы модернизированных гидромеханических снарядов вращательного типа с указанием направленности разработки и формулированием ограничительных условий.

2. В конструктивных и технологических аспектах изложены принципы работы шароструйных снарядов с эффектом механического разрушения и шароструйно-абразивного бурения.

3. Подробно освещена работа и назначение отдельных деталей и узлов двух конструкций модернизированных снарядов.

4. Приведена инженерная методика расчета основных гидравлических параметров работы приводных двигателей проектируемых снарядов.

РАЗДЕЛ4 КОНСТРУКТИВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ГИДРОМЕХАНИЧЕСКИХ СНАРЯДОВ УДАРНОГО ТИПА

4.1 Шароструйный снаряд с гидроударным приводом

Несмотря на явные достоинства модернизированных снарядов вращательного действия им все же присущ недостаток – довольно низкая эффективность работы в крепких породах по обработке периферийной зоны забоя скважины и невозможность создания комбинированного механизма разрушения кольцом при существующей схеме бурения.

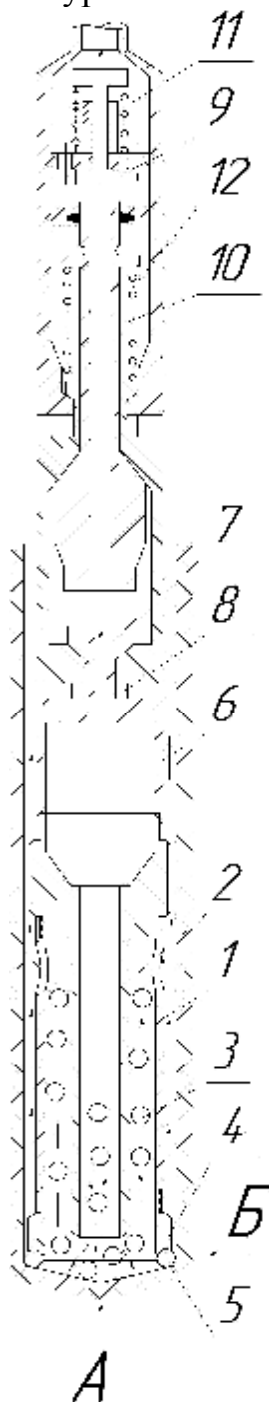


Рис. 4.1. Общая схема шароструйного снаряда с гидроударным приводом

В связи с этим, в основу следующей конструкции была поставлена задача усовершенствования устройства, в котором иное конструктивное исполнение схемы привода и механического породоразрушающего органа обеспечивает: расширение диапазона применения снаряда, даже в сверхкрепких породах, создание условий для осуществления производительного механизма формирования периферийной зоны забоя, а именно ударно-вращательного метода с применением породоразрушающих шаров [53].

Задача решена тем, что в известный шароструйный снаряд включена коронка специальной конструкции, которая жестко соединена с корпусом устройства, а в нижней части содержит специальные сквозные пазы для захвата и удержания породоразрушающих шаров, при этом верхняя часть корпуса струйного аппарата связана с гидроударником, с соответствующим соединением циркуляционных каналов, и возможностью вращения с помощью колонны бурильных труб.

На рис. 4.1. приведена общая схема устройства [54], где 1 – корпус, 2 – струйный аппарат, 3 – породоразрушающие шарики. Корпус 1 в нижней части соединен со специальной коронкой 4, которая имеет некоторое количество сквозных пазов 5, предназначенных для захвата и удержания породоразрушающих шариков 3. Верхняя часть корпуса 1 жестко соединена с гидроударником 6, который содержит наковальню 7, шлицевые разъемы 8, клапан 9, поршень 10, силовые пружины 11 и 12, и предназначен для создания ударных импульсов, передающихся через корпус 1 на коронку 4. Привод гидроударника 6 осуществляется с помощью промывочной жидкости, которая циркулирует по колонне бурильных труб.

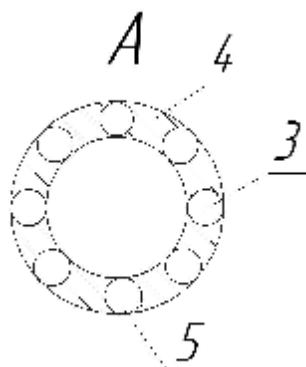


Рис. 4.2. Вид снизу коронки 4 по направлению А

На рис. 4.2 приведен вид снизу коронки 4 по направлению А, где показаны сквозные пазы 5 с шариками 3.

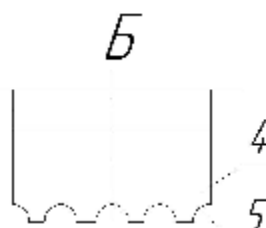


Рис. 4.3. Вид сбоку коронки 4 по направлению Б

На рис. 4.3 приведен вид сбоку коронки 4 по направлению Б, где показана профильная часть коронки со сквозными пазами 5.

Устройство работает следующим образом: при возникновении циркуляции промывочной жидкости во внутренней части корпуса 1 прибора начинается активное движение породоразрушающих шариков 3, которые взаимодействуют с породой забоя и разрушают ее. В этом отношении модернизированный снаряд полностью работает по принципу таковых вращательного действия, отличительным является механизм формирования периферийной зоны. При прямоугольной форме забоя скважины разрушение горного массива осуществляется исключительно шароструйным способом, а гидроударник 6 находится в нерабочем состоянии; промывочная жидкость, которая подается насосом, свободно проходит через него, попадая к струйному аппарату 2. Однако с увеличением кривизны забоя в контакт вступает специальная коронка 4, которая за счет такого взаимодействия вместе с корпусом 1 аппарата перемещается вверх. Это в свою очередь приводит к смыканию шлицевых разъемов 8 и перекрытию клапаном 9 отверстия в поршне 10. Таким образом, гидроударник 6 включается в работу. Под действием мгновенного роста давления клапан 9 вместе с поршнем-ударником 10 с большой скоростью двигается вниз, сжимая силовые пружины 11 и 12. Поршень-ударник 10 под действием приобретенной кинетической энергии двигается вниз и в конце хода осуществляет удар по наковальне 7 – дополнительного конструктивного элемента корпуса 1 струйного аппарата 2. Ударные импульсы передаются корпусом 1 и специальной коронкой на породоразрушающие шарики 3, которые удерживаются в сквозных пазах 5. Достаточно большое количество пазов необходимо для удержания породоразрушающих шариков 3 и надежной передачи на них ударных нагрузок. За счет проведения постоянных ударных импульсов на породоразрушающие шарики, вращения и осевой нагрузки на забое скважины реализуется наиболее эффективный механизм разрушения крепких пород, а именно ударно-вращательный; при этом шарики 3 разрушают породу на забое и формируют его периферийную зону.

4.2 Ударно-пневматический снаряд абразивного бурения

Из описания работы предлагаемых снарядов следует, что надежность их работы в полной мере зависит от наличия замкнутой схемы циркуляции промывочной жидкости, или, по крайней мере, призабойной при условии наличия определенного статического уровня жидкости в скважине и включении в состав конструкции снаряда шламовых труб. Исходя из сказанного, применение всех рассмотренных конструкций невозможно в скважинах с интенсивным или катастрофическим поглощением промывочной жидкости в связи с потерей циркуляции, а также в местностях с отсутствием непрерывного водоснабжения и в многолетнемерзлых породах. Такие ограничительные условия и стали задачей усовершенствования гидромеханического снаряда [5].

Предлагаемая конструкция обеспечивает создание надлежащих условий сооружения скважин, в породах осложненных наличием коллекторских свойств, которые приводят к возникновению поглощений промывной жидкости разной интенсивности и возможность ведения буровых работ в районах с ограниченным водоснабжением или его отсутствием, а также в мерзлых породах [55].

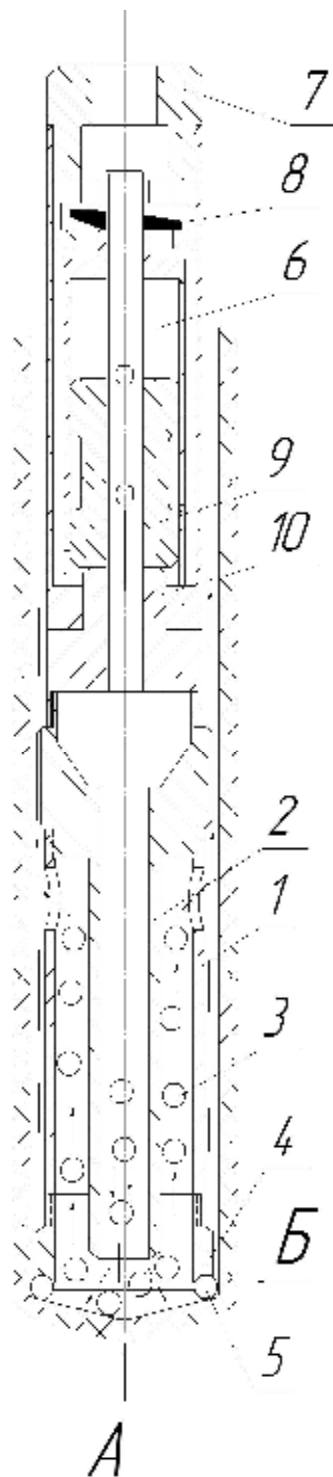


Рис. 4.4. Общая схема ударно-пневматического снаряда абразивного бурения

Согласно разработке, в состав конструкции снаряда включен пневмоударник, соединенный с колонной бурильных труб и корпусом струйного аппарата; механический породоразрушающий орган последнего выполнен в виде специальной коронки, верхняя часть ее жестко соединена с корпусом струйного аппарата, а нижняя оснащена наклонными зубками, с определенными пазами, направленными в сторону вращения устройства.

На рис. 4.4. приведена общая схема шароструйного снаряда, где 1 – корпус, 2 – струйный аппарат, 3 – породоразрушающие шарики. Корпус 1 оснащен зубчатой коронкой 4, которая имеет в нижней своей части специальные наклонные зубья с пазами 5, которые предназначены для более надежного расположения и удержания шариков 3. Верхняя часть корпуса 1 соединена с пневмоударником 6, работа его заключается в создании ударных импульсов, которые через корпус 1 передаются на зубчатую коронку. Вращающий момент корпусу устройства передается посредством переводника 7, соединенного с колонной бурильных труб. Привод пневмоударника 6 осуществляется с помощью сжатого воздуха, движущегося по колонне бурильных труб.

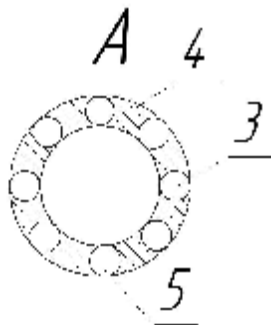


Рис. 4.5. Вид снизу зубчатой коронки 4 по направлению А

На рис. 4.5 приведен вид снизу зубчатой коронки 4 по направлению А, где показаны породоразрушающие шарики 3 и специальные наклонные зубки 5 с расположенными в них шариками.

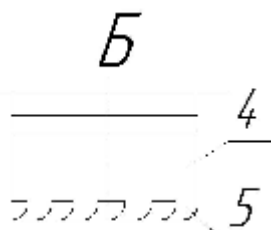


Рис. 4.6. Вид сбоку зубчатой коронки 4 по направлению Б

На рис. 4.6 приведен вид сбоку зубчатой коронки 4 по направлению Б, где показана профильная часть коронки с пазами 5.

Циркуляционные процессы формирования центральной части забоя скважины идентичны таковым при работе рассмотренных выше устройств (с учетом наличия в качестве очистного агента сжатого воздуха). Работу по обработке периферийной части забоя выполняет зубчатая коронка 4, которая имеет наклонные зубки с соответствующими пазами, предназначенными для надеж-

ного захвата и удержания породоразрушающих шариков 3. Такое условие обеспечивается возможностью размещения нескольких шариков 3 в зубчатых пазах 5 и их наклоном в сторону вращения шароструйного снаряда. За счет циркуляции сжатого воздуха, который попадает через колонну бурильных труб к переводнику 7 и соответствующей работы клапана 8 происходит нанесение ударов поршнем 9 по наковальне 10, соединенной с корпусом 1 струйного аппарата 2. Сформированный ударный импульс передается через корпус 1 на зубчатую коронку 4 и породоразрушающие шарики 3. Крутящий момент на прибор и зубчатую коронку 4 передается бурильной колонной. Постоянное создание ударных импульсов и вращение зубчатой коронки 4 обеспечивает реализацию наиболее эффективного ударно-вращательного способа разрушения породы на забое и формирования его периферийной зоны.

Использование в качестве рабочей среды сжатого воздуха создает условия для эксплуатации шароструйных снарядов в скважинах с поглощениями различной интенсивности и потерей циркуляции промывочной жидкости, в которых невозможно обеспечить нормальную работу обычных шароструйных снарядов. Кроме того, осуществление привода шароструйного устройства с помощью сжатого воздуха позволяет их применение в районах с отсутствием бесперебойного водоснабжения и наличием многолетнемерзлых пород, которые склонны к растеплению.

4.3 Методика расчета машин ударного действия

Надежность и устойчивость работы рассмотренных снарядов ударного действия полностью зависит от соблюдения всех технологических характеристик, как струйных аппаратов, так и приводных двигателей. Поэтому, гидравлично-пневматические процессы, протекающие в них, должны быть полностью согласованы. Работа струйных аппаратов по формированию центральной части забоя была рассмотрена выше, здесь необходимо остановится более подробно на работе машин ударного действия.

В.Г. Ясовым разработана методика расчета гидроударных машин. Распишем этот расчет [56].

I. Исходные данные для расчета: вес бойка – G_{σ} ; вес клапана – $G_{кл}$; расход жидкости – Q ; жесткость пружины бойка – Z_{σ} ; жесткость пружины клапана – $Z_{кл}$; предварительное поджатие пружины бойка – h_{σ} ; предварительное поджатие пружины клапана – $h_{кл}$; плотность промывочной жидкости – g ; скорость распространения ударной волны – c ; объемный КПД – h_0 ; диаметр клапана – $D_{кл}$; диаметр трубопровода – D_T .

II. Вспомогательные и предварительные расчеты.

1. Скорость движения жидкости в трубопроводе

$$v = Qh_0 / S_T. \quad (4.1)$$

2. Площадь поперечного сечения трубопровода

$$S_T = (pD_T^2) / 4 = 0,785D_T^2. \quad (4.2)$$

3. Площадь поперечного сечения клапана

$$S_{\text{кл}} = (pD_{\text{кл}}) / 4. \quad (4.3)$$

4. Коэффициенты:

$$K = \frac{2S_{\text{кл}}^2 g c}{mgS_T}; \quad (4.4)$$

$$A = (Z_{\delta} + Z_{\text{кл}}) / m; \quad (4.5)$$

$$B = \frac{2S_{\text{кл}} g c v}{mg} + g - \frac{Z_{\delta} h_{\delta} + Z_{\text{кл}} h_{\text{кл}}}{m}; \quad (4.6)$$

где

$$m = (G_{\delta} + G_{\text{кл}}) / g. \quad (4.7)$$

III. Расчет конструктивных данных. Рассмотрим три случая:

1-й случай:

а) если $k^2 > 4A$, то корни характеристического уравнения

$$r_{1,2} = -\frac{k}{2} \pm \sqrt{\frac{k^2}{4} - A}; \quad (4.8)$$

б) экспериментальное время хода бойка вниз соответствует максимуму его скорости

$$t_e = \frac{\ln r_2 / r_1}{r_1 - r_2}; \quad (4.9)$$

в) ход бойка вместе с клапаном

$$c_{\text{кл}} = \frac{B}{A} \left(1 + \frac{r_2}{r_1 - r_2} e^{r_1 t_1} - \frac{r_1}{r_1 - r_2} e^{r_2 t_1} \right); \quad (4.10)$$

г) скорость бойка в конце его общего хода с клапаном

$$c_{\delta} = \frac{B}{\sqrt{k^2 - 4A}} (e^{r_1 t_1} - e^{r_2 t_1}). \quad (4.11)$$

2-й случай:

а) если $k^2 < 4A$, то экстремальное время хода бойка вниз получим из формулы

$$t_e = \text{arctg} \frac{2b}{k} / b. \quad (4.12)$$

Здесь $b = \sqrt{A - (k^2 / 4)}$;

б) ход бойка вместе с клапаном

$$c_{\text{кл}} = \frac{B}{A} \left[1 - e^{-\frac{kt_1}{2}} \left(\frac{k}{2b} \sin bt_1 + \cos bt_1 \right) \right]; \quad (4.13)$$

в) скорость бойка в конце его общего хода с клапаном

$$c_{\delta} = \frac{B}{b} e^{-\frac{kt_1}{2}} \sin bt_1. \quad (4.14)$$

3-й случай

а) свободный ход бойка (т.е. после остановки клапана)

$$c_{\delta} = c_{\text{кл}} + 0,005; \quad (4.15)$$

б) запас кинетической энергии, накопленный бойком при его общем ходе с клапаном

$$E_1 = \frac{mc_{\delta}^2 10}{2} = 5mc_{\delta}^2; \quad (4.16)$$

в) расход кинетической энергии бойка на свободном ходу за счет сжатия пружины

$$E_2 = 5Z_{\delta}(c_{\delta} - c_{кл})(2h_{\delta} + c_{\delta} + c_{кл}); \quad (4.17)$$

г) запас энергии бойка в момент соударения с наковальной

$$E_{y\delta} = E_1 - E_2 \quad (4.18)$$

д) скорость бойка в момент соударения его с наковальной

$$v_{y\delta} = \sqrt{\frac{2E_{y\delta}}{m}}; \quad (4.19)$$

е) время перемещения бойка на свободном ходу (путь $c_{\delta} - c_{кл}$)

$$t_{B.X.} = \frac{2(c_{\delta} - c_{кл})}{v_{y\delta} + c_1} \quad (4.20)$$

ж) полное время хода бойка вниз

$$t_{\delta} = t_1 + t_{B.X.} \quad (4.21)$$

и) время хода бойка вверх

$$t_B = \sqrt{\frac{m}{Z_{\delta}}} \arccos \frac{a}{a + c_{\delta}} \quad (4.22)$$

где $a = h_{\delta} - (G_{\delta} / t_{\delta})$;

к) продолжительность цикла

$$T = t_{\delta} + t_B + t_y + t_{\Pi} \quad (4.23)$$

где t_y – продолжительность удара бойка по верхней наковальне; t_{Π} – время простоя бойка в верхнем положении;

л) частота ударов

$$f = 1/T; \quad (4.24)$$

м) мощность гидроударника (ударная)

$$N_{y\delta} = Ef; \quad (4.25)$$

н) повышение давления в гидроударнике

$$p_{cp} = \frac{cg(v_1 t_1 - c_{кл})}{Tg}; \quad (4.26)$$

п) гидравлическая (приводная) мощность гидроударника,

$$N_1 = Qp_{cp}; \quad (4.27)$$

р) КПД гидроударника

$$h = N_{y\delta} / N_1. \quad (4.28)$$

Изложенная методика расчета гидроударных машин вполне пригодна при проектировании рабочих параметров шароструйных снарядов с гидроударным приводом.

Расчет рабочего цикла пневмоударника по периодам выполнен А.П. Герман, В.М. Мостковой, а усовершенствовал его в своих работах Б.Л. Оситинский. Ниже приведен простой, но достаточно точный метод опре-

деления расчетным путем параметров пневмоударников разработанный Б.В. Суднишниковым [57].

На основе опытных данных установлено, что в период движение поршня от начала хода вперед к открытию выхлопных окон давления сжатого воздуха над поршнем изменяется практически по линейному закону. Поэтому зависимость движения P от времени t на отрезке t_k имеет вид

$$P = p_c - ct, \quad (4.29)$$

где

$$c = \operatorname{tg} a = (p_c - p_k) / t_k \quad (4.30)$$

Здесь p_c – избыточное давление сжатого воздуха в сети; p_k – давление над поршнем в момент, предшествующий открытию выхлопных отверстий.

Переменная сила, действующая на поршень в период времени t ,

$$PF_{\Pi} = (p_c - ct)F_{\Pi} \quad (4.31)$$

где F_{Π} – площадь поршня, которая воспринимает давление сжатого воздуха.

Тогда дифференциальное уравнение движения поршня будет иметь вид

$$M \frac{d^2 l}{dt^2} = (p_c - ct)F_{\Pi} \quad (4.32)$$

где M – масса поршня; l – ход на данном отрезке.

По заданным начальным условиям $l = 0$, $t = 0$ и $dl/dt = 0$, из уравнения (4.32) получим следующие зависимости:

скорости поршня

$$v = \frac{(2p_c t - ct^2)F_{\Pi}}{2M}; \quad (4.33)$$

ход поршня

$$l = \frac{(3p_c t - ct^3)F_{\Pi}}{6M}; \quad (4.34)$$

ход поршня за время t_k

$$l_k = \frac{(2p_c + p_k)F_{\Pi}}{6M} t_k^2; \quad (4.35)$$

$$t_k = \sqrt{\frac{6l_k M}{F_{\Pi}(2p_c + p_k)}}; \quad (4.36)$$

полное время рабочего хода поршня

$$t_{\Pi} = t_k + d \sqrt{\frac{M}{2A}}; \quad (4.37)$$

где d – перемещение поршня за время $t_{\Pi} - t_k$.

Можно предположить, что

$$d = (0,1 \dots 0,2)l_k \quad (4.38)$$

Кинетическая энергия поршня, накопленная им за время движения t_k (приближенно ее можно считать равной энергии удара),

$$A = Mv^2 / 2 = \frac{3(p_c + p_k)^2 F_{\Pi} l_k}{4(2p_c + p_k)} \quad (4.39)$$

Продолжительность цикла

$$T = t_{II} + t_{36}, \quad (4.40)$$

где t_{36} – продолжительность обратного хода.

На основе опытных данных можно предположить, что

$$t_{36} = (1,3...1,5)t_{II}. \quad (4.41)$$

Количество ударов поршня

$$n = 60/T \quad (4.42)$$

Экспериментально установлено, что давление над поршнем перед открытием выхлопных отверстий в пневмоударниках различных конструкций находят по формуле

$$p_k = (0,6...0,7)p_{36}. \quad (4.43)$$

Энергия удара

$$A = p_{cp} F_{II} t_k, \quad (4.44)$$

где p_{cp} – среднее индикаторное давление сжатого воздуха над поршнем пневмоударника,

$$p_{cp} = \frac{3(p_c + p_k)^2}{4(2p_c + p_k)} \quad (4.45)$$

Мощность пневмоударника

$$N = An/60 \cdot 10^2 \quad (4.46)$$

В условиях всасывания (без учета воздуха, который необходим на продувку скважины) расход воздуха

$$Q = 2F_{36} n \frac{p_c}{p_{II}} 10^{-6} (l_k + d) \quad (4.47)$$

где p_{II} – абсолютное давление воздуха в нижней камере в начале прямого хода, МПа.

Приведенные выше методики расчета являются основным отправным пунктом в разработке технологических режимов бурения снарядами ударного действия.

4.4 ОБЩИЕ ВЫВОДЫ ПО РАЗДЕЛУ 4

1. Сформулированы и обоснованы основные технологические преимущества шароструйных снарядов ударного типа.

2. Показан механизм взаимодействия основных деталей и узлов модернизированных снарядов, обеспечивающий достижение оптимальных показателей процесса сооружения скважин в соответствующих горно-геологических условиях.

3. Изложены принципы расчета с указанием конкретных энергетических характеристик машин ударного действия на примере гидро(пневмо)ударников

РАЗДЕЛ 5 ИЗУЧЕНИЕ МЕХАНИЗМА РАЗРУШЕНИЯ ПОРОД ПРИ АБРАЗИВНО-МЕХАНИЧЕСКОМ УДАРНОМ БУРЕНИИ**5.1 Общие вопросы физики разрушения пород**

Все современные теории процессов бурения скважин основываются на рассмотрении разрушения горных пород на забое при вращении и вдавливании инструмента, причем последнее трактуется как движение инородного тела внутри другого твердого тела, осуществляемое полностью за счет работы внешних сил. При этом сила инерции мала по сравнению с силой сопротивления движению, поэтому внешние силы и крутящий момент, приложенные к движущемуся телу, всегда равны соответствующей силе и моменту сопротивления со стороны горной породы [58 – 60].

Преобладающее большинство современных способов разрушения горных пород основано на механическом разделении некоторого объема твердой массы на элементы – частицы небольшого размера под действием локальных концентрированных напряжений, превышающих сопротивление сил внутренних связей. Разрушающие напряжения в этом случае могут создаваться под действием внешних сил, возникающих при внедрении в породу специальных инструментов, обладающих большей твердостью, чем сама порода. На забое скважины при воздействии породоразрушающего инструмента характер разрушения породы может быть объемный, поверхностный и усталостный [61 – 63].

За счет многократного силового воздействия инструмента в породе развивается система трещин, поэтому твердость ее снижается, и периодически на забое возникают условия для объемного разрушения. Большинство горных пород можно отнести к разряду микронеоднородных трещиноватых хрупких тел, разрушение которых начинается вблизи включений и трещин вследствие локальной концентрации напряжений. На практике значительные сдвиги и разрушения возникают вследствие развития поверхностей скольжения (т.е. трещин сдвига).

Если к свободной поверхности твердого тела, например горной породе, приложить через жесткий пуансон (породоразрушающий инструмент) внешнюю механическую нагрузку, то при достаточной величине последней в теле начнут проявляться упругие, а затем остаточные деформации. Вместе с пуансоном по направлению его движения будет смещаться материал, находящийся в зоне контакта пуансона с твердым телом, а также некоторая часть материала, находящаяся за пределами контактной зоны [64 – 65].

Таким образом, разрушение материала происходит путем чередования определенных явлений, которые могут быть объединены в периоды и циклы. Каждый такой цикл будет заканчиваться отделением от основного массива некоторого объема разрушенного материала и скачкообразным продвижением инструмента. Промывочные жидкости могут оказывать существенное влияние на эффективность этих процессов.

Все твердые тела, в том числе и металлы, из которых сделан буровой породоразрушающий инструмент, неоднородны по прочностным свойствам. По-

верхность металла имеет сложный геометрический микрорельеф. В результате трения и износа породоразрушающий инструмент теряет часть какого-либо слабейшего элемента, превращаемого в порошок, и выходит из строя. Постепенное разрушение поверхностного слоя происходит вследствие медленного докритического роста трещин вдоль граней кубиков, из которого состоит поверхностный слой, до тех пор, пока трещины не достигнут критического размера, после чего происходит отделение целых кубиков и всего слоя. Далее процесс повторяется [66 – 68]. Основные причины докритического роста трещин в металлах при сравнительно низких нагрузках следующие:

нестационарность внешних нагрузок (особенно периодичность или цикличность нагружения);

наличие водорода во внешней среде (особенно электростатического водорода в водных растворах солей, кислот и щелочей);

наличие влаги (воды или водяного пара) во внешней среде с коррозионно-активными веществами.

Первая причина приводит к росту трещин в результате локальных пластических деформаций в вершине трещины (усталостные трещины), вторая – к водородному износу, третья – к росту трещины вследствие различных электрохимических процессов локального анодного растворения в ее вершине (коррозионное растрескивание металлов). Все эти причины присутствуют при работе породоразрушающего инструмента на забое скважины. При этом в процессе разрушения трещины вследствие изменения коэффициента интенсивности напряжений, возможен переход от одного механизма к другому. Если имеет место последовательное влияние отдельных механизмов, результирующая скорость роста трещины может быть определена как сумма от сложения приращений трещин.

Из многообразия трудов, посвященных изучению взаимодействия пары «буровой инструмент – горная порода», особое внимание привлекают к себе те, в которых данное явление рассматривается с позиций быстро прогрессирующей и находящей широкое применение в практике триботехнике – науке о трении в машинах и механизмах и заключающейся в исследовании контактного взаимодействия перемещающихся твердых тел, в результате которого возникают силы трения. Они не только поглощают энергию, но и производят изменение размеров контактирующих тел. В основе молекулярно-механической теории сухого и граничного трения и износа, лежит учет двойственной природы процесса трения, которая обусловлена как преодолением сил молекулярного взаимодействия между поверхностями, так и преодолением механического сопротивления, связанного с формоизменением поверхностного слоя. Первый протекает в зоне контакта двух тел и обусловлен изменением формы только поверхностного слоя и преодолением молекулярных, атомарных связей, возникающих в точках реального контакта. Второй захватывает весь объем и обусловлен формоизменением всего объема. Другим важным положением этой теории является учет дискретности контакта двух твердых тел, обусловленный шероховатостью, линейной разновысотностью и волнистостью поверхности контакта, которые имеют место на любых твердых поверхностях [69]. В зависимости от условий

контактирования возможен один из следующих видов взаимодействия: упругое; упруго-пластичное; хрупкое и вязкое разрушения. Неотъемлемой частью этой теории является установление критических точек, характеризующих изменение свойств фрикционного контакта и определяющих износостойкость двух взаимоконтактирующих тел.

В процессе трения можно выделить две главные функции смазки: способность создавать прочные пленки на поверхности трущихся материалов, хорошо удерживаясь на краях трещин в результате адсорбции молекул, и взаимодействовать с поверхностными слоями трущихся пар, изменяя их структуру и свойства. Эти функции смазки оказывают существенное влияние на коэффициент трения, износ и предельное значение давления и скорости скольжения, при которых происходит переход к недопустимым процессам повышения вибрации и разрушения бурового инструмента. Смазывающее действие объясняют образованием полярными группами на поверхности твердого тела ориентированных слоев.

Приблизить процесс трения к идеальному можно с помощью смазки. В связи с этим к смазочным материалам предъявляют следующие требования. Во-первых, они должны обеспечить легкое скольжение одного слоя относительно другого, а во-вторых, смазка не должна вытекать из зазора. В первом случае необходима низкая вязкость смазки, т.е. когезия должна быть минимальна, а адгезия – максимальна. В этом отношении ПАВ должны удовлетворять обоим требованиям, так как полярная группа активно адсорбируется на поверхности, а когезия алифатических радикалов слабая. Условием оптимальной работы ПАВ, как компонента смазки, будет превышение работы адгезии над силой сдвига на единицу поверхности, обуславливающим десорбцию защитного слоя. Применение ПАВ в качестве смазок не является специфическим свойством именно этих веществ. Для жирных масел, которые относят к поверхностно-активным веществам, это скорее совпадение свойств, и поверхностная активность жиров не является мерой их смазочного действия в отношении величины силы трения. Положительное влияние высокой поверхностной активности жиров сказывается на их способности образовывать прочные пленки, снижающие величину поверхностной энергии на границе системы «масло – твердое тело».

Анализ результатов теоретических и экспериментальных исследований поведения горных пород и бурового инструмента при механическом нагружении показал, что промывочная жидкость во многих случаях контролирует их прочность и срок службы. Для объяснения влияния различных сред на уменьшение прочности твердых тел в большинстве случаев использовали критерий разрушения Гриффитса [70]

$$s = \sqrt{\frac{2aE}{pl(1-m^2)}}, \quad (5.1)$$

где a – удельная свободная поверхностная энергия; E – модуль Юнга; m – коэффициент Пуассона; l – длина микротрещины.

В последнее время для объяснения поведения твердых тел при механическом нагружении используют наиболее физически обоснованную кинетиче-

скую концепцию прочности, сущность которой впервые сформулировал С.Н. Журков [71 – 73]. В ее основе лежит положение о разрушении как процессе, в котором ведущая роль принадлежит тепловому движению, тепловым колебаниям и особенно тепловым флуктуациям. В физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе Академии наук бывшего СССР под руководством С.Н. Журкова были проведены исследования зависимости прочности на разрыв более 50 разнообразных твердых тел с различной структурой и природой межатомных связей от времени и температуры, которая в результате испытаний металла, полимера и монокристалла каменной соли была представлена в форме термофлуктуационного уравнения

$$t = t_0 \exp \frac{(U_0 - g \cdot s)}{k \cdot T}, \quad (5.2)$$

где t – долговечность разрываемого тела; t_0 – предэкспоненциальный множитель, имеющий размерность времени; U_0 – величина энергии активации или величина энергетического барьера, который управляет скоростью процесса разрушения тела; γ – структурно-чувствительный коэффициент, величина которого равна произведению активационного объема на коэффициент локального перенапряжения; s – растягивающее напряжение; T – температура.

На основании представлений Я.И. Френкеля о тепловом движении в твердых телах, был сделан вывод о том, что механизм разрушения твердых тел представляет собой кинетический процесс постепенного разрыва межатомных связей под действием тепловых флуктуаций и механического напряжения, который можно разделить на три стадии:

- возбуждение разрываемых связей механической нагрузкой;
- разрыв связей под действием тепловых флуктуаций;
- накопление разорванных связей с образованием микротрещин, в результате чего тело теряет устойчивость и разрывается на части.

Опубликованные экспериментальные данные дают основание считать, что для большинства твердых тел механическое разрушение под нагрузкой на различных стадиях процесса следует рассматривать как механохимическую реакцию распада межатомных связей.

Силовое возмущение межатомных связей горных пород при нагружении, связанное с деформированием электронных оболочек и возбуждением межатомных связей, в присутствии промывочной жидкости, способствует разрыву связей за счет резкого снижения энергии активации.

Проведенный анализ теоретических и экспериментальных исследований поведения твердых тел в механическом поле дает основание считать, что важным аспектом является также изучение роли дисперсных систем, как участников процесса разрушения и во многих случаях контролирующих прочность и срок службы материалов. В связи с этим, особый интерес представляют существующие гипотетические объяснения и модели влияния рабочих сред на водной основе на процесс разрушения и прочность твердых тел.

Исследования влияния жидкостей и добавок к ним на процессы разрушения твердых тел, начатые П.А. Ребиндером еще в 30-х гг. минувшего столетия,

показали, что вода, а также вещества, вводимые в ее состав, адсорбируясь на поверхности твердого тела, могут принимать активное участие в процессах разрушения. Эти вещества были названы понизителями твердости, а сам метод – способом адсорбционного понижения твердости («эффект Ребиндера») [74 – 75]. Давно известно, что при пропитке пористых тел (известняков, песчаников) водой их прочность понижается на 25-40 % причем это процесс обратимый, т.е. первоначальная прочность восстанавливается при просушивании.

Механизм влияния жидкости на свойства пористых тел можно понять, учитывая значения поверхностной энергии. опыты показывают, что при смачивании водой известняков и песчаников их прочность понижается, следовательно, поверхностная энергия твердого тела на границе с водой меньше, чем на границе с воздухом. Это естественно, так как вода хорошо смачивает известняки и песчаники. Возможно, что прочность тех же песчаников и известняков возрастет при погружении в жидкости, их не смачивающие. Дело значительно усложняется при переходе к телам не пористым, например, к хорошо образованным кристаллам различных минералов. Они не могут быть пропитаны жидкостями, следовательно, влияние на прочность такого кристалла жидкость оказать не может. Следует отметить, что облегчение и ускорение процессов механического разрушения хрупкого тела производят только те жидкости, которые хорошо смачивают тело или содержат вещества, обладающие способностью адсорбироваться на поверхности тел. Жидкости, не смачивающие тела, напротив, затрудняют процесс разрушения.

Механизм влияния жидкостей можно представить в следующем виде. При разрушении хрупкого тела на поверхности и во внутренних частях появляются постепенно возрастающие микротрещины. Если разрушение происходит в вакууме, то края микротрещин могут вновь смыкаться при удалении разрушающей силы, и тело восстанавливается, при условии, конечно, что не произошло полного разделения на части. Теперь предположим, что разрушение хрупкого тела происходит в какой-либо жидкости, которая совершенно не смачивает его поверхность и в составе которой нет ПАВ. При образовании трещин жидкость по капиллярам не может войти в трещины, и разрушение тела происходит, так как будто оно находится в вакууме. Поверхностная энергия тела остается такой же, как в вакууме. Трещина заполняется парами жидкости, осаждающимися на ее стенках в виде микроскопических капелек, которые при удалении разрушающей силы вытесняются, и целостность тела может восстановиться.

Теперь рассмотрим другой предельный случай, когда жидкость абсолютно смачивает тело. При образовании трещины жидкость тотчас же по капиллярам заполняет ее, проникая в самую узкую часть, где расстояние между поверхностями немногим более межатомного или межионного порядка. Следовательно, в этом случае мы имеем дело с поверхностной энергией тела не относительно вакуума, а относительно смачивающей жидкости [76]. Если процесс образования трещин в вакууме может быть обратимым, то в смачивающей жидкости он является, необратимым.

Рассмотрим частный случай разрушения – процесс абразивного шлифования в присутствии смачивающей жидкости. Зерна абразива вызывают в поверхностном слое напряжения, которые сопровождаются образованием трещин (микротрещин) и откалыванием частиц. Трещины и микротрещины в момент образования заполняются жидкостью и образуют некоторую зону, названную зоной предразрушения, в которой прочность всегда понижена по сравнению с прочностью цельного тела. Если разрушение ведется в неактивной среде, то после удаления разрушающей силы самые тонкие трещины в зоне предразрушения исчезают и целостность зоны отчасти восстанавливается. Если же разрушение происходит в присутствии ПАВ, которые проникают в самые тонкие трещины, образуя адсорбционные слои на их поверхности, то они препятствуют смыканию разрывов после удаления приложенной силы. В этой связи в зоне предразрушения возрастает трещиноватость и прочность зоны уменьшается.

Если зона предразрушения отсутствует, то жидкости не могут оказывать какого-либо действия на процесс разрушения.

Исследования показали, что зона предразрушения образуется не только при механическом разрушении твердого тела, т.е. при образовании в нем новых поверхностей, но и при любом его деформировании как в области упругих, так и в области пластических деформаций. Чем выше напряжения, чем ближе они к пределу прочности, тем больше развита зона предразрушения. Характерно, что в области упругих деформаций зона предразрушения постепенно исчезает, как бы «залечивается» под влиянием молекулярных сил после удаления внешних усилий. В области пластических деформаций эта зона также может постепенно «заживляться», но при разрушении твердого тела зона предразрушения развивается необратимо, что имеет место при применении ПАВ. Следует обратить внимание на весьма важное обстоятельство: одной зоны предразрушения недостаточно, чтобы проявилось действие жидкостей или адсорбционных слоев. Зона предразрушения возникает при всяком разрушении, например, при измерении твердости по методу вдавливания, но если действие разрушающей силы не повторяется, то жидкости или совсем не дают эффекта, или он сводится к смазывающему действию. Для проявления влияния жидкости или адсорбционных слоев необходимо, чтобы процесс разрушения повторялся периодически и зона предразрушения могла превращаться в зону разрушения.

Механика коррозионного разрушения использует известные положения физической химии и представления А.А. Гриффитса, который впервые ввел понятие о трещине, как об основном факторе разрушения хрупких твердых тел. Следует выделить два наиболее распространенных вида коррозионного разрушения твердых тел – усталость и растрескивание, которые происходят в результате зарождения и развития, специфических коррозионно-механических трещин. Металлы и сплавы, применяемые в горном деле, имеют в себе дефекты различного происхождения (трещины, остроконечные полости и неметаллические включения), которые понижают их прочность, являясь источником зарождения трещин. При механическом нагружении поликристаллических материалов, учитываются размеры уже имеющихся в теле начальных дефектов, которые перерастают в трещины. Разупрочняющее действие среды в процессе за-

рождения и развития трещины коррозии под механическим напряжением сводится к трем основным факторам [77]:

локальной коррозии напряженного металла в вершине трещины;

водородному разупрочнению металла вследствие наличия в нем растворенного водорода, поступающего в металл из среды;

адсорбционному понижению прочности металла вследствие адсорбции на его поверхности компонентов среды.

Необходимо отметить, что перечисленные факторы зачастую проявляются одновременно, комбинируясь друг с другом и воздействуя друг на друга. Коррозионно-механическое разрушение происходит в три этапа:

на поверхности напряженного металла возникает множество коррозионно-механических питтингов, на дне которых и зарождаются трещины (этап зарождения трещины);

зародившиеся трещины, разветвляясь, углубляются в тело материала. При этом одна из них, обгоняя остальные в своем развитии, со временем становится концентратором напряжений, развивающихся с все нарастающей скоростью (этап развития трещины);

лавинообразное разрушение материала по месту магистральной трещины (этап долома материала по месту магистральной трещины).

Таким образом, приведенные сведения по механике разрушения горных пород являются базисными для построения теории абразивно-механического ударного способа бурения.

5.2 Силовые отношения в паре «породоразрушающий орган – забой скважины»

В конструкции снаряда с эффектом механического разрушения осуществлена комбинация двух способов бурения [78]. Один из них – это так называемый ударно-дробовой или шароструйный, а другой классический дробовой способ бурения (с некоторыми, во многом принципиальными, изменениями в конструкции самого породоразрушающего инструмента и забойных процессов), который ранее широко применялся в практике геологоразведочных работ, но впоследствии был вытеснен более эффективным алмазным бурением. Однако за дробовым способом осталось одно из его главных преимуществ – это низкая стоимость породоразрушающего инструмента (в сравнении с твердосплавным и алмазным), самой дроби и простота их изготовления.

Важно и то, что замену породоразрушающих «элементов» (дроби) можно производить без подъема всего бурового снаряда, простым их вбрасыванием через устье скважины, чем достигается сокращение времени на спускоподъемные операции.

Для дальнейшего обоснования технологических параметров процесса бурения проектируемыми снарядами, необходимо получить адекватную модель взаимодействия породоразрушающего кольца, содержащего дробинки с горной породой [41]. Это можно осуществить, рассмотрев качественную сторону забойных процессов, происходящих при работе породоразрушающего кольца.

Хотя в работе кольца и использованы некоторые принципы дробового бурения, однако простой перенос закономерностей последнего на механизм взаимодействия в паре «кольцо – горная порода» невозможен. Это связано как с особенностями конструкции самого породоразрушающего кольца, так и забойными процессами разрушения собственно гидромеханическим способом.

Правильное и четкое представление о механизме разрушения горных пород с помощью кольца является необходимым условием дальнейших технико-технологических разработок гидромеханического бурения.

В целом механизм разрушения горных пород при статической и динамической нагрузках отдельными шариками, находящимися в посадочных гнездах кольца можно разделить на несколько условных стадий [79]. Прежде всего, следует отметить, что согласно общепринятым представлениям Геруа распределение напряжений в случае контакта плоской поверхности со сферой, будет иметь вид отраженной кривой показанной на рис. 5.1. Наибольшими они будут около центра поверхности контакта, а к периферии они будут снижаться до нуля.

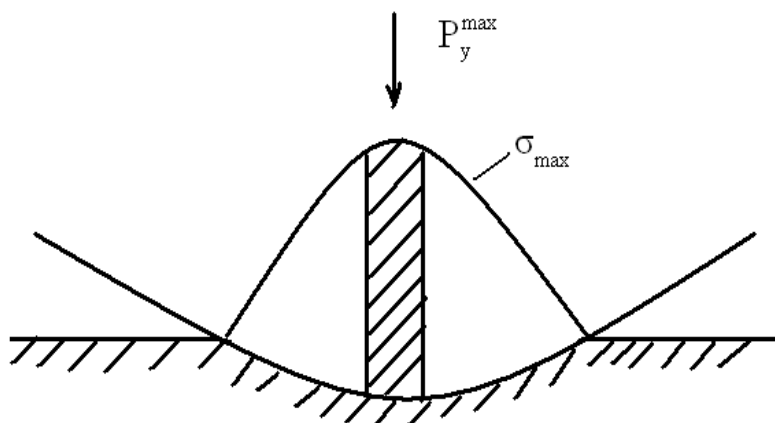


Рис. 5.1. Распределение напряжений на поверхности контакта под давлением максимального осевого усилия P_y^{max}

Неравномерность разрушающих напряжений вызовет в теле возникновение так называемых касательных напряжений, которые приведут к мелким сколам и сдвигам (рис. 5.2, а). При увеличении внешней силы P_y поверхность контакта также будет расти и возникнет новая система трещин, параллельно первым, а ранее образовавшиеся попадут в зоны с меньшими возможностями для развития и затухнут (рис. 5.2, б); кроме того в зоне контакта происходит смятие материала под площадкой соприкосновения в объеме, близком к таковому опрокинутого корпуса, основанием которого и служит площадка контакта. Дальнейшее увеличение давления на шарик приведет к скалыванию краев конуса и смятию в объеме, тяготеющему также к форме опрокинутого конуса (рис. 5.2, в).

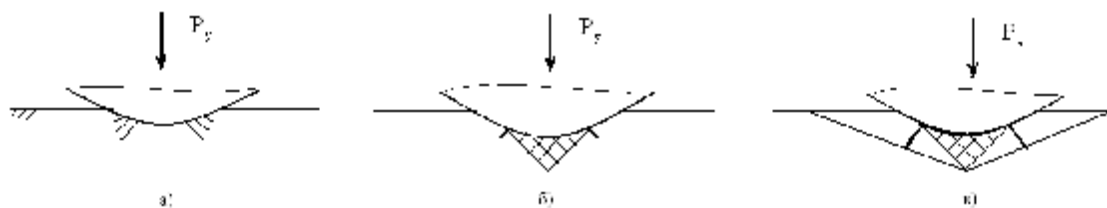


Рис. 5.2. Схема развития процесса разрушения поверхности шариком

Совершенно очевидно, что забой скважины при шароструйном бурении не является монолитным. Под напором бомбардирующих его шариков он уже имеет ту или иную степень развитости трещин, что, безусловно, приведет к некоторому снижению величины необходимого осевого усилия P_y^m , требуемого для эффективного разрушения по заданному механическому типу

$$P_y^m < P_y^{max}, \quad (5.3)$$

Величина нагрузки, обуславливающая ту или иную стадию разрушения, зависит в основном от физико-механических свойств горной породы и шариков, а также размеров последних; однако их размер определяет только величину разрушающей нагрузки и объем разрушенной породы. Характер разрушения при различных размерах шарика остается неизменным.

Динамика накладывает свой отпечаток на механизм разрушения горных пород под торцом кольца. При перекатывании шарика по поверхности забоя, разрушение породы начинается при нагрузке, приблизительно в два раза меньшей, чем под неподвижным шариком. Это закономерное уменьшение разрушающей нагрузки можно объяснить изменением условий развития напряженного состояния горной породы под движущимся шариком.

Физическая сущность каждой стадии механизма разрушения горных пород такова. Первая стадия может иметь место только в пределах упругих свойств горных пород, когда концентрация напряжений на контуре давлений приводит к образованию местных трещин или некоторому развитию уже существующих. Появление трещины по контуру давления при нагрузках, не превышающих предел упругости горной породы, обусловлено местным максимальным касательным напряжением на контуре давления. Причем поверхность горной породы после снятия нагрузки не имеет остаточных деформаций, она полностью восстанавливает первоначальную форму. Но на восстановленной поверхности остается макротрещина, являющаяся следствием местной концентрации напряжений, а также предыдущих ударов шаров, разогнанных с помощью струйного аппарата. Вторая стадия находится за пределом упругости горной породы при нагрузке, превышающей сопротивление породы раздавливанию. Она характеризуется смятием горной породы, которое выражается в разрушении кристаллической решетки в объеме конуса смятия; последнее обусловлено неравномерным распределением нормальных напряжений под площадкой соприкосновения. Дальнейшее увеличение нагрузки на шарик приводит к увеличению давления на смятую горную породу, представляющую собой мелкий порошок. Следовательно, распространение давления в объеме смятой

породы будет аналогично распространению давления в сыпучих телах, иными словами подчиняться законам взаимодействия в жидкости. Вследствие того, что величина усилия в объеме смятой породы распространяется равномерно, происходит пропорциональный рост давления на поверхность конуса смятия, а последнее обстоятельство способствует локальному увеличению нормальных и касательных напряжений в зоне горной породы, прилегающей к конусу смятия. Когда касательные напряжения превысят сопротивление горной породы скалыванию, произойдет скол части породного массива. Третья стадия, само разрушение, выражающаяся отделением объема скалывания по образующей конуса, является следствием превышения касательными напряжениями сопротивления горной породы скалыванию [80].

Приведенный детальный анализ условий разрушения горных пород под торцом кольца шароструйного снаряда позволяет сделать важный вывод. Условия, создаваемые в паре «породоразрушающее кольцо – забой скважины» являются довольно эффективными с позиций рационализации механизма разрушения и существенного снижения его энергоемкости [81 – 82].

5.3 Теоретические основы процесса абразивно-механического разрушения породы под торцом снаряда

Основные закономерности разрушения горной породы, а впоследствии и их технологические аспекты, характеризующие забойные процессы при работе кольца шароструйного снаряда с эффектом механического разрушения, возможно установить, изучая элементарный акт механизма разрушения одним шариком, в последовательности, рассмотренной в подразделе 5.2.

Первая стадия разрушения горной породы, происходящая в пределах упругих свойств, с достаточной степенью точности описывается теорией о распределении усилий и напряжений при сжатии соприкасающихся тел (задачи Буссинеска и Герца о действии сосредоточенной силы на упругую плоскость и о сжатии двух соприкасающихся тел по криволинейной поверхности соответственно) [30].

Теоретические закономерности, полученные Буссинеском и Герцем вполне приложимы к взаимодействию в паре «шарик – горная порода». Краткий анализ уравнений названных авторов изложен в подразделе 2.2, поэтому останавливаться на нем нет необходимости.

Вторая стадия разрушения горной породы наступает при нагрузке, достигающей временного сопротивления горной породы дезинтеграции в зоне объемных напряжений. Незначительное отличие предела упругости от временного сопротивления породы разрушению (для твердых горных пород), позволяет считать, что сжатие в зоне контакта наступает при нагрузках близких к пределу упругости каждой конкретной породы [33].

Величина нагрузки сминающей или разрушающей горную породу определится из условия

$$p = s_g F, \quad (5.4)$$

где $s_с$ – расчетное разрушающее напряжение горной породы; F – площадь зоны соприкосновения шарика с горной породой в момент разрушения последней.

В качестве значений параметра $s_с$ могут быть без больших погрешностей взяты величины статической твердости горной породы $s_{с0}$, определенные методом Л. А. Шрейнера [30] с учетом коэффициента динамичности, то есть

$$s_с = \frac{s_{с0}}{b}, \quad (5.5)$$

где b – коэффициент динамичности нагрузки, зависящий от характера ее приложения. Для условий работы породоразрушающего кольца с шариками величина b колеблется в пределах 2.

В данном случае важным обстоятельством является то, что значения $s_{с0}$ были получены при вдавливании цилиндрического пуансона в образец породы, а, как известно характер и последовательность механизма деформации под пуансоном и сферой различны. Это в свою очередь накладывает определенный отпечаток на величины $s_{с0}$, заключающиеся в так называемом масштабном факторе; иными словами значения статической твердости, полученные для каждой конкретной величины площадки соприкосновения под цилиндрическим штампом будут несколько завышены для тех же величин площадок под сферическим штампом. Особое значение данное высказывание приобретает в случае работы модернизированного шароструйного снаряда вследствие наличия как статических, так и динамических нагрузок.

Площадь соприкосновения шарика с горной породой, в случае его правильной округлой формы, естественно будет близка к площади круга, диаметр которого, в наиболее общем случае, определяется формулами Герца. При достаточно большом различии в свойствах материала дроби и самой горной породы, что имеет место в случае шароструйного способа бурения, наиболее адекватна следующая формула Герца

$$d = 1,1443 \sqrt{4 Pr \left(\frac{1 - m_1^2}{E_1} + \frac{1 - m_2^2}{E_2} \right)}, \quad (5.6)$$

где P – нагрузка на один породоразрушающий шарик; r – радиус шарика; m_1 и m_2 – коэффициент Пуассона для материала шарика и горной породы соответственно; E_1 и E_2 – модули упругости материала породоразрушающего шарика и породы в массиве.

Приведенная формула справедлива для определения площади соприкосновения шарика с плоскостью, в то время как практически забой скважины имеет в той или иной мере «волнистую» форму. Однако это обстоятельство не является препятствием для подобной трактовки взаимоотношений в паре «шарик – горная порода», что доказано некоторыми теоретическими и экспериментальными исследованиями, которыми наглядно проиллюстрировано следующее обстоятельство – криволинейная поверхность тела может быть приравнена к плоскости при определении размеров площади соприкосновения, если радиус кривизны поверхности тела в семь раз и более превышает радиус шарика. Мно-

гочисленные замеры «кривизны» забойной зоны скважины шароструйного способа бурения вполне ложатся в обозначение предельные размеры.

Третья стадия разрушения горной породы шариком, характеризующиеся отделением конуса скалывания наступает только после образования конуса смятия, при этом снова подчеркнем, что скалывание горной породы происходит под действием касательных усилий, возникающих вследствие развивающегося на поверхности конуса смятия давления.

Расчетная схема для определения нагрузки на шарик, обеспечивающей скалывание горной породы, может быть получена при рассмотрении выделенного на поверхности конуса смятия элементарного кубика (рис. 5.3).

Две грани этого кубика параллельные поверхности конуса смятия. Перпендикулярно этим граням по оси $n_1 - n_1$ действуют нормальные сжимающие напряжения s_1 . По оси кубика $n_2 - n_2$, перпендикулярной плоскости сечения, действуют сжимающие напряжения s_2 . По оси кубика $n_3 - n_3$, параллельной поверхности конуса смятия, напряжения равны нулю, так как поверхность горной породы вокруг площадки соприкосновения не нагружена, и перемещение в этом направлении линии не стеснено.

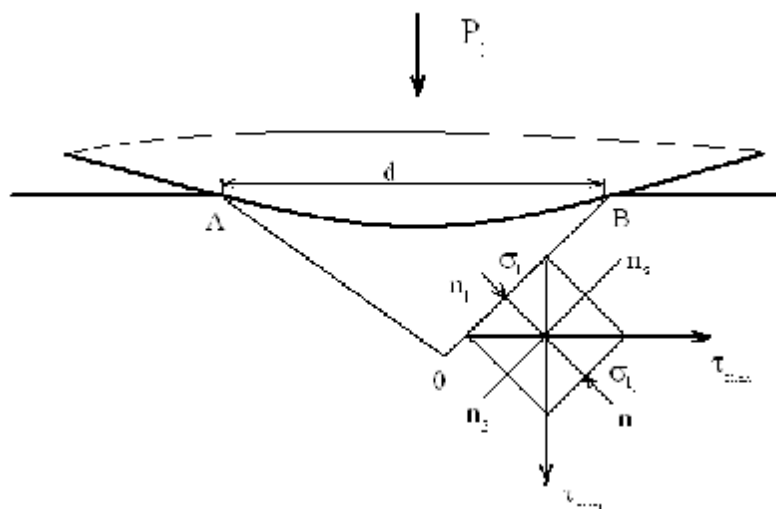


Рис. 5.3. Расчетная схема для определения нагрузки на шарик, обеспечивающей скалывание горной породы

Следовательно, зону вокруг конуса смятия вполне оправдано можно считать подверженной плоскому напряженному состоянию на глубину, соответствующую высоте конуса смятия. Касательные напряжения на гранях выделенного элементарного кубика отсутствуют, так как скольжение сжатой горной породы по поверхности конуса деформированной породы практически нет. Поэтому грани выделенного кубика можно считать главными [79 – 80].

Рассматривая плоское сечение зоны, прилегающей к плоскости соприкосновения шариков с горной породой несложно увидеть, что по оси $n_1 - n_1$ действуют нормальные сжимающие напряжения s_1 , и, как результат последних – касательные напряжения t , величину которых в любой площадке, направленной под углом q к главным площадкам можно отыскать как

$$t = \frac{S_1}{2} \sin 2q \quad (5.7)$$

Данные рис. 5.3 и основные закономерности теоретической механики и сопротивлении материалов позволяют утверждать следующее: наибольшими будут касательные напряжения под углом 45^0 к поверхности конуса смятия во взаимно перпендикулярных направлениях; причем наибольшее касательное напряжение t_{\max} направлено к поверхности забоя, а t_{\min} уходит вглубь, что обусловлено направлением s_1 . Следовательно, скалывание произойдет в направлении наибольшего касательного напряжения t_{\max} , при его достижении разрушающего значения.

Совершенно очевидно, что за меру сопротивления горной породы касательным напряжениям следует принимать сопротивление скалыванию $t_{\text{скал}}$. Исходя из этого можно записать условие наступления третьей стадии разрушения

$$t_{\max} \geq t_{\text{скал}}, \quad (5.8)$$

иначе говоря, скалывание произойдет тогда, когда $t_{\text{скал}}$ превысит сопротивление горной породы в том месте, где оно минимально.

Довольно многочисленные экспериментальные исследования характера скалывания горной породы вокруг площадки соприкосновения и величина углов наклона, образующих конусов смятия и скалывания к основанию вполне подтверждают сказанное [80]. Различные местные ослабления горной породы также приводят к частичным выколам. Некоторое сжатие горной породы непосредственно шариком, прилегающим к точкам A и B (рис. 5.3) ведет к увеличению сопротивления горной породы скалыванию в данной области, а кроме того в вершине конуса смятия происходит концентрация напряжения. Это подтверждается тем, что вершина конуса скалывания приближается к вершине конуса смятия, причем площадь зоны скалывания естественно увеличивается. Величина нагрузки, обеспечивающей скалывание горной породы, может быть найдена из соотношения нормальных и касательных напряжений, имеющих место на поверхности конуса смятия, при этом необходимо условно принять, что напряжения s_1 равны по абсолютной величине удельному давлению в основании конуса смятия, т. е.

$$s_1 = s_k = \frac{P_2}{F}, \quad (5.9)$$

где s_1 и s_k – нормальные напряжения на поверхности конуса смятия и его основании в момент скалывания соответственно; P_2 – нагрузки на шарики в момент скалывания; F – площадь основания конуса, соответствующая площади соприкосновения шарика с горной породой в момент смятия.

Переписав последнее уравнение в другом виде, мы можем получить выражение для определения скалывающей нагрузки.

$$P_2 = s_1 F = 2t_{\text{скал}} F \quad (5.10)$$

Подводя итог изложенному выше можно с уверенностью сказать, что, во-первых выбор в качестве органа формирования периферийной зоны забоя породоразрушающего кольца является оправданным как с точки зрения механиз-

ма разрушения, так и эффективности работы, и во-вторых сама технологическая схема работы породоразрушающего кольца позволяет в широком диапазоне регулировать выходные характеристики взаимодействия в паре «шарик – горная порода».

Осуществляемый в гидромеханическом снаряде шароструйно-абразивного бурения механизм обработки периферийной зоны скважины основывается на известном с давних времен эффекте изнашивания (например, разрушение и истирание берегов рек осколками пород, увлекаемых течением, а также волнами морей и океанов).

Адекватность предлагаемого процесса условиям, имеющим место при шароструйном бурении подтверждается наличием большого числа разнородных обломков на забое скважины, являющихся результатом раскалывания дробы и отделения от массива продуктов разрушения [83]. Конструкция породоразрушающей матрицы позволяет перенести абразивное воздействие обломков с собственно самого снаряда на забой скважины (его пристенную зону, чем достигается придание ей прямоугольной формы).

Механизм разрушения осколкосодеждающей матрицей, безусловно, будет комплексный, включающий в себе несколько элементарных видов изнашивания, а именно: абразивное изнашивание, изнашивание вследствие пластического деформирования, изнашивание при хрупком разрушении, и наконец, усталостное изнашивание [84].

Абразивное изнашивание пород забоя скважин осуществляется в результате режущего или царапающего действия осколков шаров или горных пород; при этом продукты разрушения изнашиваемой поверхности удаляются либо в виде очень мелких частиц, либо фрагментов предразрушенного материала, выдавленного предварительно по сторонам пластически деформированной царапины, либо в виде более или менее дисперсных агрегатов, хрупко отделившихся при одно- или многократном воздействии.

В соответствии с забойными процессами шароструйного бурения породоразрушающая матрица будет содержать в себе осколки различной формы, произвольным образом ориентированные, осуществляющие изнашивание гранями или ребрами. Совершенно очевидно, что эффективную работу разрушения будут производить относительно твердые частицы, роль остальных будет сведена к предварительным деформациям.

В соответствии с физическими свойствами пород возможно изнашивание вследствие пластического деформирования, заключающееся в постепенном (той или иной меры интенсивности) перемещении поверхностных слоев массива пород в пристенную зону. Такой вид изнашивания будет характерен для пород проявляющих упруго-пластичные свойства (например, известняки и песчаники). Также описанный процесс может происходить в результате микродеформирования, являющегося следствием передачи статических и в некоторой мере динамических нагрузок породам забоя.

Изнашивание при хрупком разрушении практически осуществимо в породах упруго-хрупкой группы (кварциты, джеспилиты, роговики и пр.), которые характеризуются исключительно упругими деформациями, завершающи-

мися в конце цикла приложения разрушением. Качественно такой вид обработки периферийной зоны скважины можно охарактеризовать трением абразивных частиц о породу, результатом которого является выкалывание и некоторое спрессовывание частиц продуктов разрушения, ведущее к высокому охрупчению породы, которое проникает на довольно значительные расстояния вглубь массива.

Все описанные выше виды абразивного изнашивания сопровождаются в той или иной степени усталостным разрушением. При повторных, достаточно высоких напряжениях, испытываемых одним и тем же объемом пород, прилегающих к контактной поверхности (особенно при чередовании знака напряжений), в нем возникают микротрещины, и может произойти местное поверхностное разрушение в виде борозд выкрашивания. Закономерности протекания (в зависимости от изменения величины напряжения и числа циклов) в общем виде подобны аналогичным процессам в прочих отраслях техники.

Усталостное изнашивание возможно при волочении с проскальзыванием, когда контакт сосредоточенный. В этом случае возможно возникновение высоких контактных напряжений и при достаточно большом числе повторяющихся циклов напряжений одного и того же объема возможно появление поверхностных или подповерхностных усталостных трещин и местное разрушение в виде поверхностного откалывания или выкрашивания. Действие режущих кромок абразивных частиц на обрабатываемый забой в той или иной мере будет носить импульсный (ударный) характер. В этом заключается основная особенность процесса.

Активность жидкости при разрушении зависит от физико-химического (молекулярного) сродства последней и ее активных составляющих с обрабатываемой поверхностью. Разрушающее действие жидкости повышается при добавке поверхностно-активных веществ, что объясняется эффектом П.А. Ребиндера. Химически активные вещества, добавленные в очистной агент, облегчат забойные процессы разрушения [85]. В таком виде процесс разрушения вполне вписывается в рамки эрозионно-коррозионного механизма [86]. При этом процесс деформирования твердого тела начинается с упругой деформации, которая предшествует пластической деформации и разрушению твердого тела. В то же время вполне возможно, что большие скорости деформации (до 100 м/с) могут вызвать разрушение твердого тела без пластической деформации, т. е. хрупкое разрушение.

По мнению И.Р. Клейса [87], при взаимодействии абразивных частиц с материалами происходит изменение микро- и макрогеометрии поверхности. В результате упруго-пластической деформации на обрабатываемой поверхности уже в начале процесса остаются характерные лунки, от которых у пластичных материалов могут образоваться характерные волны, фронт которых ориентирован перпендикулярно к проекции вектора скорости внедрения.

Под торцом матрицы снаряда будет находиться большое количество абразивных частиц [46], многие из которых одновременно контактируют с обрабатываемой поверхностью, поэтому их влияние, с точки зрения выполнения работы разрушения, должно суммироваться. Общую работу абразивно-

механического разрушения выполняет пакет абразивных частиц, плотность которого регулируется содержанием пор в структуре матрицы и их размером. При этом поверхностный забойный слой горной породы претерпевает следующие изменения: упругие деформации; пластические деформации; деформации сдвига и скалывания. В целом описанный процесс можно вполне уверенно охарактеризовать как микрорезание.

В описанных условиях весьма вероятно будет присутствовать гидромолекулярное разрушение, как форма проявления эффекта Ребиндера при проникновении жидкой фазы очистного агента в высокоразвитые субмикротрещины на обрабатываемой поверхности.

В технологических расчетах необходимо знать величину линейного съема материала за некоторый промежуток времени, иными словами углубку снаряда, которую можно описать дифференциальным уравнением [88]

$$\frac{dx}{dt} = K_I(Q - x), \quad (5.11)$$

где Q – толщина общего линейного слоя; x – текущий съем слоя за время воздействия на всю обрабатываемую поверхность; K_I – коэффициент разрушения;

$$K_I = S_{кр} / m_F, \quad (5.12)$$

где $S_{кр}$ – критическое напряжение, при котором происходит разрушение; m_F – коэффициент площади или удельный импульс:

$$m_F = \frac{mv}{F}, \quad (5.13)$$

где mv – количество движения инструментальных частиц, вызвавших разрушение, с учетом того, что m – масса абразивных частиц, а v – скорость их движения; F – площадь следа движущихся частиц, определяющая массу разрушенного материала.

Величина съема материала может быть определена как

$$G = \int_S q dS, \quad (5.14)$$

где S – площадь обрабатываемой поверхности; q – величина съема с элементарной площадки.

Здесь

$$q = \sum_{i=1}^N q_i, \quad (5.15)$$

где N – количество единичных актов контактного взаимодействия на элементарной площадке; q_i – величина съема после единичного акта контактного взаимодействия.

При этом величина q_i обусловлена технологическими параметрами процесса, неровностью поверхности и ее свойствами. Вместе с тем, изменение неровности поверхности в процессе углубки взаимосвязано с изменением величины съема материала, что должно быть учтено при разработке математической модели.

Таким образом, в основу математической модели процесса обработки потоком абразивных частиц должна быть положена модель единичного акта кон-

тактного взаимодействия, позволяющая определять величину q_i .

Известно [88], что хотя реальные частицы абразивного материала имеют неправильную и весьма сложную форму, их представляют в виде тел правильной формы, чаще всего эллипсоидов или сфер. Поэтому абразивные частицы потока моделируются сферами, размеры которых, являясь случайными величинами, воспроизводятся в соответствии с законом распределения вероятностей, согласующимся с процентным содержанием крупной, основной и мелкой фракций абразивного материала.

Довольно большим числом исследований в смежных областях науки и техники было показано, что изнашивание при взаимодействии зерен абразива нельзя рассматривать как один вид изнашивания. Для создания адекватной модели контактных взаимодействий виды абразивного изнашивания были классифицированы на основе учета условий их проявления, силовой картины нагружения и критериев износостойкости. Такая классификация чрезвычайно полезна для проведения исследований в лабораторных условиях с целью раскрытия механизма изнашивания и определения критериев эффективности технологического процесса.

Наиболее существенным классификационным признаком любого вида изнашивания является качественная картина рельефа поверхности. В каждом виде изнашивания макро- и микрорельеф на поверхности формируется под действием многих факторов, основные из которых – уровень внешнего силового воздействия на контактирующие пары, присутствие абразива и его характеристика, возможность охлаждения, физико-механические свойства взаимодействующих материалов и др.

Каждому характерному рельефу на поверхности изнашивания соответствует вполне определенный механизм формирования и отделения частицы износа. В свою очередь, механизм отделения частицы износа обуславливает закономерности между физико-механическими свойствами обрабатываемой поверхности и интенсивностью изнашивания, а также выбор критерия износостойкости материала при данном виде изнашивания.

Каждый вид изнашивания можно выделить как самостоятельный, если при сопоставлении с уже известными видами изнашивания он отличается не только качественной картиной рельефа и условиями его развития, но и критерием износостойкости.

С учетом этих предпосылок были систематизированы особенности различных условий изнашивания, основных закономерностей, рельефа, критериев износостойкости и выделены виды изнашивания, отличающиеся указанными классификационными признаками.

По классификации, представленной в работе [89], существуют следующие виды изнашивания: абразивное, гидроабразивное, усталостное и тепловое.

Каждый вид изнашивания отличается макро- и микрорельефом на поверхности изнашивания, основными закономерностями влияния внешнего силового воздействия и механических свойств контактирующих поверхностей и критериями износостойкости.

Кроме того, виды изнашивания отличаются условиями, при которых оно

происходит: при трении скольжения или качения, при кавитации, при наличии активных сред и т.д.

В соответствии с предложенной авторами, в данном контексте, классификацией механизмов разрушения, реализуемых проектируемыми техническими средствами, последние подразделяются на снаряды гидромеханического бурения вращательного типа и таковые ударного. Отсюда логически следует, что контактные взаимодействия будут носить так называемый абразивно-ударный характер.

Абразивное изнашивание будет иметь место в случае наличия твердых частиц, способных поражать поверхность контактирования путем образования на ней лунок – следов прямого статического или динамического внедрения этих частиц. Качественным признаком указанного изнашивания является специфическая поверхность, представляющая собой сочетание лунок, разделенных перемычками. На поверхности, подверженной абразивному изнашиванию, нет направленной шероховатости в виде рисок, а, следовательно, нет относительно-го перемещения твердых частиц вдоль этой поверхности.

Условия появления абразивного изнашивания весьма разнообразны, в данном случае это будет результат прямого динамического внедрения частиц той или иной степени твердости, причем последние могут быть различного происхождения [47]. Абразивное изнашивание могут вызывать как частицы сферической формы – собственно говоря, породоразрушающие шары, так и частицы, попадающие в зону контакта и образующиеся в результате разрушения основного истирающего материала и самого породного массива.

Можно предположить, что в механизме абразивного изнашивания проявляется «циклическая усталость» микрообъемов горной породы, вызванная повторным приложением динамической нагрузки при упругом и упругопластическом контактах, что совершенно очевидно, учитывая механизм шароструйного бурения. В основе механизма абразивного изнашивания лежат прямое динамическое внедрение в породу твердой частицы и связанная с ним деформация, завершающаяся разрушением микрообъемов массива и образованием частиц износа. Твердая частица, внедряясь в поверхность изнашивания, стремится сдвинуть породные перемычки путем повторного деформирования или хрупкого выкрашивания в зависимости от их твердости. В таких условиях взаимодействия твердой частицы с поверхностью изнашивания срез становится ведущим процессом образования частиц износа, а сопротивление срезу или отрыву – основным критерием износостойкости.

Правомерность такого описания механизма абразивного изнашивания подтверждается линейной зависимостью износостойкости материала от сопротивления срезу (отрыву) при различных характерах его разрушения.

При определенном внешнем силовом воздействии на поверхность контакта внедрение твердой частицы аналогично действию индентора при соответствующих методах определения твердости. В этом случае абразивное действие твердой частицы ограничено поверхностью образуемой ею лунки, а сдвиговые процессы материала перемычек сведены к минимуму.

При абразивно-ударном изнашивании износостойкость контактирующих

поверхностей связана с уровнем внешнего силового воздействия. Энергия удара влияет на скорость и механизм изнашивания, а также на критерий износостойкости. Абразивно-ударное изнашивание в определенных условиях может быть осложнено дополнительным перемещением взаимодействующих поверхностей или частиц абразива. Имеются в виду случаи, когда удар сопровождается кратковременным проскальзыванием.

Гидроабразивно-ударное изнашивание происходит при взаимодействии поверхностей, в случае наличия в зоне контакта одновременно жидкости и твердых частиц, способных поражать поверхность изнашивания. При этом виде изнашивания взаимодействие твердых частиц с поверхностью изнашивания происходит прямым внедрением или относительным перемещением. Прямое внедрение частиц связано с ударом, относительное перемещение – с вытеснением жидкости из зоны контакта. При движении с жидкостью частицы изнашивают обрабатываемую поверхность путем микрорезания. В результате этих двух видов взаимодействия на поверхности изнашивания формируется сложный микрорельеф, включающий участки абразивно-ударного и гидроабразивного изнашивания. Таким образом, механизм гидроабразивно-ударного изнашивания носит комплексный характер, включающий элементы абразивно-ударного и гидроабразивного изнашивания.

Различие механизмов изнашивания, естественно, обуславливает неравномерный износ поверхности контакта. Гидроабразивно-ударное изнашивание проявляется при определенном внешнем силовом воздействии на поверхность контакта. Энергия удара существенно влияет на динамику гидроабразивно-ударного изнашивания и его развитие во времени.

Ударно-усталостное изнашивание происходит при многократном соударении поверхностей, не имеющих в зоне контакта твердых частиц, способных поражать их. Износ при этом увеличивается постепенно. Для развития ударно-усталостного изнашивания необходимо большое число циклов динамического воздействия в микрообъемах контактируемых поверхностей.

Ударно-тепловое изнашивание происходит при соударении контактирующих поверхностей, подверженных по условиям взаимодействия значительному объемному нагреву. Элементарным процессом ударно-теплого изнашивания является отрыв частиц породы от поверхности изнашивания в результате многократного пластического деформирования или непосредственно среза, связанного с внедрением твердых частиц при ударе. При ударно-тепловом изнашивании определяющую роль играет возможность охлаждения контактируемых поверхностей. Интенсивность ударно-теплого изнашивания определяется уровнем внешнего силового воздействия, механическими свойствами и температурой контактирующих пар. Исходя из общих представлений о процессах, сопровождающих абразивно-механический ударный способ бурения, возможность проявления, а тем более, сколько ни-будь весомая роль в механизме разрушения пород именно теплового изнашивания – маловероятны.

Приведенный теоретический и фактический материал дает довольно ясное представление о картине забойных процессов разрушения осколкосодеждающей матрицей и позволяет определить предложенный вид формирования пе-

риферийной зоны скважины как достаточно эффективный, а также сформулировать его основные аналитические закономерности.

Изложенные выше возможные варианты силовых соотношений в паре «матрица снаряда – массив породы» показали значительную многофакторность процесса и его сложность с точки зрения математического описания даже элементарного акта разрушения. Все это определяется, прежде всего, большим количеством разрушающих элементов, участвующих в образовании забоя, их довольно произвольной формой и невозможностью определить действительное значение осевых усилий в площадках контакта. В то же время, в некоторой степени предопределить возможные варианты взаимодействия в паре «матрица снаряда – массив породы» можно задавая на этапе формирования породоразрушающего органа снаряда определенные геометрические соотношения по матрицы. Такой подход вполне возможен исходя из технологии получения пористых сплавов. Причем, как показывает анализ технологического процесса производства газаров так называемые поры можно получить в строгом соответствии с предъявляемыми к ним требованиями в отношении не только размеров и положения, но также и определенных прочностных характеристик. Следовательно, при соблюдении указанных условий возможно получение в той или иной мере хотя бы приближенной модели взаимодействия в забойной зоне. Причем «приблизённость» сглаживается наличием нескольких видов абразивного изнашивания, что в конечном итоге повышает эффективность комплексного воздействия.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ ПО РАЗДЕЛУ 5

1. Сформулированы теоретические основы работы породоразрушающего кольца шароструйного снаряда с детальным обоснованием механизма разрушения.
2. Приведены аналитические зависимости, определяющие последовательность и этапы цикла формирования периферийной части забоя скважины.
3. Изучено влияние нагрузки на элементарный породоразрушающий орган – шарик, определяющей размеры контактной площадки, а также влияние физических свойств горных пород (модуль упругости) на величину последней.
4. Детально рассмотрены процессы формирования забойной зоны скважины при абразивном изнашивании контактной поверхности с обоснованием ведущих критериев такого взаимодействия.

РАЗДЕЛ 6 НЕКОТОРЫЕ НОВЫЕ КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ ДРОБОВОГО СПОСОБА БУРЕНИЯ СКВАЖИН

6.1 Общие сведения о дробовом способе бурения скважин

Исходя из характеристических основ принятой классификации способов бурения, дробовой, во всех его технологических аспектах, с уверенностью можно отнести к группе абразивно-механического ударного способа бурения.

Дробовое бурение – это вид вращательного бурения с применением дроби в качестве истирающего материала. По режущим способностям дробь занимает после алмазов первое место. Впервые было предложено в США в 1899 для проходки скважин в твёрдых породах. Технологические основы применения указанного способа были заложены В. М. Крейтером, а в дальнейшем усовершенствованы работами Б. И. Воздвиженского, Ф. А. Шамшева, С. А. Волкова и И. А. Остроушко. При дробовом бурении в скважину засыпают дробь (чугунную или стальную), которая под воздействием струи промывочной жидкости поступает под торец коронки через прорез в ней. Вследствие вращения бурового инструмента и осевого давления дробь разрушает горную породу на забое скважины. Вынос разрушенной породы, отработанной дроби и частиц металла дробовой коронки осуществляется промывочной жидкостью или сжатым воздухом. На современном этапе развития техники сооружения скважин дробовое бурение почти полностью вытеснено алмазным и гидроударным и применяется только в весьма твёрдых абразивных породах. В некоторых случаях дробовое бурение применяется также при проходке стволов шахт и прочих работах [34, 83].

Однако, несмотря на все это только дробь можно считать наиболее универсальным, и, что самое важное дешёвым буровым материалом.

На качественном уровне процесс бурения дробью, по мнению ряда исследователей, можно охарактеризовать следующим. В связи с тем, что чугунная дробь весьма хрупка и быстро раскалывается под торцом коронки на остроугольные кусочки, последние волочатся коронкой по забою и своими острыми краями производят выбуривание породы; дробясь под коронкой, она в момент своего разрушения и производит основную работу истирания, пока образующиеся куски раздавленного материала еще свежи в своем разломе, а, следовательно, особенно остры в своих режущих кромках. Что касается стальной дроби, то она должна быть достаточно хрупкой, в противном случае по мере изнашивания режущих краев производительность бурения будет падать. И вообще бурение, в рамках указанной технологии, может производиться даже угловатыми отсортированными по размерам кусочками дроби.

С. А. Волковым, при изучении вопросов влияния осевой нагрузки на скорость бурения, установлено следующее:

- 1) при увеличении осевого усилия на коронку углубка скважины увеличивается почти прямо пропорционально давлению, до определенного критического его значения;

2) для каждого сорта дробы устанавливается только одно оптимальное значение осевой нагрузки, при котором происходит наиболее эффективная углубка скважины;

3) оптимальное осевое усилие не зависит от крепости породы;

4) превышение оптимального (критического) усилия на дробь снижает скорость углубки в соотношении, почти обратном величине нагрузки.

Эти выводы были сделаны на основании опытов, проведенных и производственных условиях при применении двух сортов дробы, мало отличимых по физико-механическим свойствам.

Из практики дробового бурения известно, что весомым фактором работы дробы является давление на инструмент. К примеру, в мягких породах дробь может вдавливаясь в породу так глубоко, что коронка начнет скользить по ней и эффективность бурения будет ниже, чем при меньших давлениях, хотя принятое давление и может быть оптимальным для данной дробы при бурении крепких пород. В противовес этому при бурении пород крепких слабой и хрупкой дробью возможность увеличения давления на коронку действительно ограничивается свойствами дробы и ее размерами, поскольку с увеличением диаметра последней, ее сопротивление раздавливанию возрастает.

Н.И. Куличихиным и Б.И. Воздвиженским неоднократно отмечались следующие положения.

1. Основную работу при бурении выполняет колотая дробь. Шарообразная неколотая дробь выполняет ничтожную работу по разрушению, но вместе с тем улучшает распределение колотой дробы и тем полезна.

2. Питание дробью должно производиться порциями весом от 0,6 до 2,5 кг, в зависимости от диаметра скважины, толщины стенок коронки, диаметра дробы и крепости породы.

3. При бурении с большими порциями дробы успех работы в значительной степени определяется частым расхаживанием бурового снаряда.

Из изложенного выше вытекает, что основные вопросы дробового бурения и в первую очередь механизма воздействия дробы на породу и по настоящее время не имеют надлежащей ясности, то же касается и теории, освещающей кинематику и динамику поведения дробы на забое скважины.

Все укоренившиеся способы бурения в большинстве своем основаны на приложении к породам сосредоточенных нагрузок, вызывающих местные разрушения. Поскольку местные разрушения на поверхности пород развиваются, подчиняясь какой-то одной закономерности, совершенно необходимо, чтобы в теориях бурения пород различными способами прослеживалась базовая общность. Таковая обнаруживается при сравнении различных теорий бурения, однако она проявляется слабо в силу многообразия представлений о физической сущности явлений, происходящих в породах при их местном разрушении, что в конечном итоге почти полностью исключает ее роль в качестве нужного координирующего влияния на основы теорий. В этом и заключается главный недостаток существующих объяснений механизма разрушения.

Б. Д. Кузнецовым было отмечено [90], что оценка современных теорий резания металлов, представленных в значительном количестве, позволяет четко

сказать, что единства взглядов нет и соответственно этому ни одна из теорий не может быть названа таковой в полном смысле этого понятия. Еще в большей степени эти замечания справедливы для теорий разрушения горных пород, ибо они, как это следует из изложенного, еще в меньшей степени научно обоснованы и разработаны, чем теории резания металлов.

До настоящего времени еще нет единого взгляда на механизм разрушения породы, как при дробовом, так и при алмазном способах бурения. Некоторые исследователи полагают, что алмазы разрушают породу резанием. При дробовом бурении основную роль в разрушении породы отводят колотой дробью, полагая, что она острыми гранями разрушает породу царапанием, понимая под последним процесс резания в малых масштабах. Существуют, как уже отмечалось, и другие взгляды, согласно которым основную роль в разрушении при дробовом бурении отводят целой дробью.

Ввиду таких неясностей, прежде всего, необходимо уточнить вопросы, связанные с механизмом разрушения породы при указанных способах бурения [84].

Алмазы шарообразной формы считаются лучшими как по сопротивлению износу, так и по своей режущей способности. Резцы из твердых сплавов шарообразной формы не применяются для разрушения горных пород. В то же время стеклорезы из твердых сплавов, в виде свободно вращающегося колеса с острым ободом, находят широкое применение. При достаточном осевом давлении они режут стекло и породу не хуже алмазов. Колесо такого резца, перекатываясь по поверхности, производит разрушение. Если придавливающая сила колеса мала, то при качении по стеклу или породе колесо не оставляет никакого следа. С увеличением придавливающей силы наступает момент, когда за колесом остается след в виде разрушенного материала. След имеет форму треугольника, уходящего вглубь. В дальнейшем, по мере роста силы, проявляется скалывание с образованием клиновидного желобка.

Заменяя стеклорез шариком буровой дроби и наблюдая за состоянием поверхности стекла или породы, по которой катается шарик, придавливаемый с различной силой, можно видеть те же явления, что и при качении стеклореза. Однако объемы разрушения и величина действующих сил в этих случаях будут различны. Разрушение, произведенное шариком, по объему будет больше разрушения, произведенного стеклорезом, но и усилия, необходимые для придавливания и перекатывания шарика, будут больше.

Если придавливать к поверхности материала шаровидный алмаз, закрепленный в оправке, то и в этом случае эффект действия будет тот же, но тяговая сила и сила придавливания, по сравнению с работой колеса или шарика, существенно изменяются. Для работы колеса и шарика требуется большая сила придавливания и меньшая тяговая сила, для работы алмаза – наоборот. Это поясняется изменением сил трения при перемещении вдоль поверхности и величинами площадей соприкосновения. В первых двух случаях имеет место трение-качения, а в последнем – трение-скольжения.

Размеры площади активного соприкосновения тел в таких случаях определяются свойствами соприкасающихся тел, их размерами и формой.

Если при дробовом бурении разрушение породы происходит только путем царапания острыми углами колотой дроби, то с увеличением хрупкости последней производительность бурения должна возрасти. Опыты же показывают иное: менее хрупкая термически обработанная дробь (отпущенная при 200°С) дает более высокую производительность, чем более хрупкая, не отпущенная (отпуск, как известно, увеличивает вязкость металла и уменьшает его хрупкость).

Общим для бурения, как алмазами, так и буровой дробью является механизм разрушения породы путем раздавливания или смятия. Колотая дробь, перекатываясь по породе своими острыми гранями, раздавливает породу. Царапать или строгать ее она сможет только в том случае, если будет значительно тверже породы.

Таким образом, можно считать, что основными при дробовом бурении являются процессы раздавливания и смятия породы. Царапание же и истирание представляет собой второстепенные процессы, в общем балансе занимающие небольшое место при бурении крепких пород. Только при бурении по породам мягким, имеющим твердость меньшую, чем твердость дроби, царапание, как способ разрушения, может иметь практическое значение.

Целая дробь при достаточном давлении со стороны коронки, катаясь по забою, в зависимости от величины придавливающей силы, разрушает породу, сминая ее или раздавливая.

Кусочки колотой дроби в зависимости от их формы и положения, которое они занимают, ведут себя различно. При перемещении осколки колотой дроби стремятся занять такое положение, при котором они будут устойчиво соприкасаться либо с породой, либо с коронкой. Независимо от того, будут ли эти кусочки иметь форму полушара, пирамиды, призмы или какую-либо другую, в любом устойчивом положении при скольжении они будут разрушать ту поверхность, по отношению которой занимают неустойчивое положение (рис. 6.1).



Рис. 6.1 Возможные варианты расположения истирающего материала под торцом дробовой коронки

При перекатывании условия для воздействия дробинок, как на коронку, так и на породу одинаковы. Вероятность благоприятного расположения их по отношению, как к забою породы, так и к торцу коронки, в данных условиях одинакова. Поэтому колотая дробь, перекатываясь, не только производит разрушение породы, но должна сильно изнашивать коронку и изнашиваться сама.

Изложенное выше представление о роли различных видов дроби в разрушении породы находит отражение в эффективности бурения, что и подтверждается лабораторными и производственными данными.

В скважине разрушение породы должно происходить как против торца коронки, так и в кольцевых пространствах, которые образуются между корон-

кой, керном и стенками скважины. Нагрузки на дробь прикладываются через буровую коронку. Шарiki дроби, находящиеся непосредственно под коронкой, в полной мере воспринимают на себя ее давление, в то время как шарiki, которые находятся у ее краев, полную нагрузку будут воспринимать от коронки только в те моменты, когда нижерасположенные шарiki не будут оказывать сопротивления смещению коронки вниз.

6.2 Пути совершенствования технологии дробового бурения

Производительность дробового бурения, несомненно, будет полностью определяться характером заданной деформации разрушения. Если заданной деформацией является смятие, т. е. разрушение породы в пределах главных объемов давления, то, естественно, бурение будет сопровождаться большим расходом работы на повторное дробление уже отделенной породы при ее выталкивании и повторных зажимах. При разрушении путем отделения объемов скалывания повторное дробление будет иметь меньшее значение. Шлам будет более крупный, а работа более производительна. Следует также отметить, что действие шариков на неровную и нарушенную поверхность породы может вызывать, в зависимости от условий, различные виды деформаций, но преобладающей будет та из них, которая задана режимом работы. Практическая же производительность будет ниже, поскольку на значительной части пути, в силу неровности поверхности забоя после отделения породы, шарiki будут работать с неполной нагрузкой, а также выполнять работу по удалению разрушенной породы [34].

Вращению буровой коронки на забое будет препятствовать еще ряд сопротивлений, среди которых, очевидно, большое значение будет иметь сопротивление дроби, скопившейся в кольцевых пространствах вокруг коронки. Буровая коронка вследствие действия сил трения при вращении увлекает за собой окружающую ее дробь. Развивающаяся при этом центробежная сила оказывает влияние на распределение дроби. Под действием этих сил дробь, находящаяся во внешнем кольцевом пространстве, прижимается к стенкам скважины, а находящаяся во внутреннем кольцевом пространстве, – к внутренним стенкам буровой коронки. В том и другом месте это придавливание уменьшает давление дроби на забой скважины. Дробь, находящаяся под торцевой частью коронки, центробежными силами выталкивается во внешнее кольцевое пространство.

На дробь действуют четыре силы различно направленные: окружное усилие, перекатывающее дробь по забою, вертикальное давление, придавливающее ее к породе, радиальное давление, стремящееся вытолкнуть ее по направлению действия центробежной силы, и давление дроби со стороны кольцевого пространства, придавливающее ее к забою.

При непрерывном действии первых двух сил дробь под коронкой будет устойчиво удерживаться в том случае, если две последние силы будут уравновешиваться какой-либо другой силой противоположного направления. Дробь, находящаяся во внутреннем кольцевом пространстве против коллекторного прореза, под действием центробежных сил вдавливается в этот прорез. Оттуда

она может выйти во внешнее кольцевое пространство, минуя рабочую часть бурового снаряда. Дробь из коллектора направляется под рабочую часть коронки за счет давления направляющей стенки, но это происходит только в том случае, если какая-либо сила не дает ей выйти во внешнее кольцевое пространство. Такой силой может быть давление столба дроби, находящегося во внешнем кольцевом пространстве.

Эффективное бурение, при минимальном столбе дроби во внутреннем кольцевом пространстве, возможно только в течение короткого промежутка времени, так как по мере износа дроби, находящейся под коронкой, эффективность бурения будет снижаться. Для сохранения эффективности необходимо, чтобы под коронку поступала свежая дробь. Для этой цели в коронке делается специальный коллекторный прорез. Дробь попадает в коллекторный прорез из внутреннего кольцевого пространства под действием центробежных сил и веса, находящихся выше слоев дроби. Во внешнем кольцевом пространстве дробь центробежными силами отталкивается от коронки и прижимается к стенкам скважины, сверху на нее действует вес верхних слоев дроби. Для того чтобы дробь могла непрерывно поступать в коллектор, необходимо, чтобы прорез в нем был достаточно широк. Только в этом случае дробь успеет потерять инерцию центробежных сил и под действием собственного веса и веса выше расположенной дроби войти в него.

Известно, что для равномерного питания забоя скважины дробью есть один путь – это движение дроби из внутреннего кольцевого пространства. Для этого в нем должен быть соответствующий запас дроби. Очевидно, минимальным запасом будет столб дроби, по высоте равный высоте коллектора. В общем случае, чем с большей силой дробь будет придавливаться к забою, тем лучше она будет входить под коронку и тем успешнее будет идти работа. Однако в этом направлении имеется определенный предел. Если не считаться с вопросами износа дроби и бурового снаряда, а также с работой, затраченной на преодоление вредных сопротивлений, то верхним пределом следует считать такую высоту столба дроби в кольцевом пространстве, при которой самые нижние слои дроби будут испытывать на себе давление, равное усилию первой деформации разрушения породы. В этом случае будет происходить интенсивное разбуривание стенок скважины против заданных размеров.

Питание скважины дробью может осуществляться либо путем единовременной засыпки в скважину дроби в количестве, достаточном для работы в течение всего рейса (рейсовая засыпка), или же путем посылки мелких порций дроби в течение всего периода бурения (непрерывное питание). Если бурение в предыдущем рейсе было прекращено при нормальном количестве дроби на забое, то при рейсовой засыпке в кольцевых пространствах скопится большое количество избыточной дроби, которая своим присутствием затрудняет промывку скважины и способствует бесполезному износу снаряда и дроби. В таком случае выгоднее и удобнее непрерывное питание [84].

Иное положение будет в том случае, если предыдущий рейс был закончен после прекращения эффективного бурения и на забое к началу рейса осталось минимальное количество дроби. Рейсовая засыпка восполнит недостаток дроби

и восстановит эффективное бурение. При этом непрерывное питание не сможет обеспечить увеличение скорости бурения, так как бурение с высокой эффективностью, при минимальном расходовании материалов, инструмента и энергии может происходить только при нормальном количестве дроби на забое.

Поскольку как избыток, так и недостаток дроби на забое вреден, непрерывное питание скважины дробью более совершенно, чем рейсовое, но при условии, что в скважине имеется нормальный переходящий запас дроби. Величина этого запаса зависит от многих факторов, прежде всего от числа оборотов бурового снаряда, диаметра кольцевого пространства скважины и угла ее наклона.

Дробь, скопляющаяся в кольцевом пространстве, создает давление, как на стенки скважины, так и на стенки коронки. Коэффициент горизонтального распора (бокового давления) твердых шариков, находящихся в движении, примерно равен единице.

Сцепление между шариком и коронкой может обеспечиваться, с одной стороны, действием сил трения, а с другой, соответствующим погружением шарика в материал коронки. Коэффициент трения качения между металлическими телами всегда меньше коэффициента трения между металлом и горной породой. Поэтому решающим в обеспечении сцеплений шарика с коронкой должно быть его погружение в материал коронки. Так как желательнее, чтобы износ коронки был, возможно, меньше, то лучшим случаем будет тот, при котором погружение обеспечивается упругим смятием.

Величина упругого смятия зависит от упругих свойств соприкасающихся тел и величины придавливающей силы. С точки зрения обеспечения эффективного бурения требуется, чтобы шарики буровой дроби имели небольшие упругие деформации. Отсюда очевидно, что достаточное сцепление между коронкой и шариками может быть получено за счет больших упругих деформаций тела коронки.

Довольно интересные данные были получены при исследовании влияния числа оборотов дробовой коронки на механическую скорость бурения. Лабораторными опытами было убедительно показано наличие тесной связи между скоростью вращения коронки и ее углубкой, что выражается в непрерывном росте механической скорости бурения с увеличением числа оборотов. Причем, в сравнении с алмазным способом бурения, интенсивность роста механической скорости дробового бурения, при описанных условиях, даже несколько выше. Это обстоятельство открывает новые перспективы для дробового бурения, и показывает определенную необоснованность его почти полного вытеснения из практики применения.

Одним из препятствий применения высоких частот вращения бурового снаряда при дробовом бурении является скопление дроби во внешнем кольцевом пространстве, что ведет к необоснованной разработке ствола скважины и в конечном итоге может вызвать возникновение осложнений и даже аварий. Такое положение вещей обусловлено, в основном, конструктивным исполнением дробовой коронки. В связи с обозначенными условиями на кафедре техники разведки МПИ НГУ была поставлена задача усовершенствования снаряда дро-

бОВОГО бурения, результатом решения которой явилась следующая конструкция, содержащая, как и базовая [] коронку (несколько видоизмененную), керна-приемник и переходник, вместе с этим, согласно изобретению, коронка изготовлена в виде породоразрушающего кольца, жестко закрепленного в нижней части кернаприемника, имеющего, как и кольцо, внутренние вертикальные коллекторные пазы (рис. 6.2).

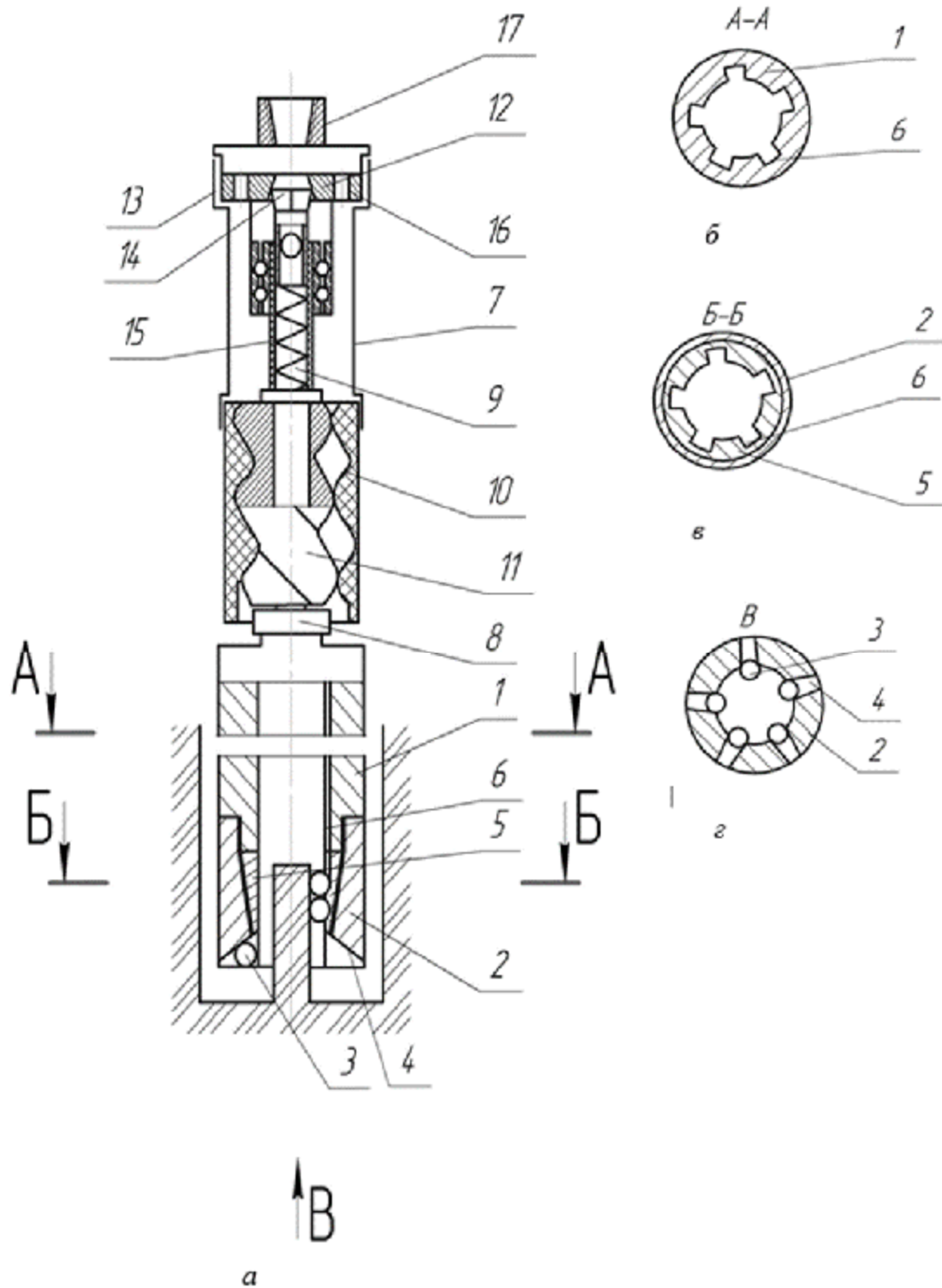


Рис. 6.2 Модернизированный снаряд для дробового бурения

В породоразрушающем кольце выполнены сквозные гнезда переменной высоты для размещения дроби; кроме этого, кольцо и керноприемник установлены в корпусе соосно, с обязательным совмещением соответствующих коллекторных пазов. Во внутренней полости породоразрушающего кольца имеется рвательное устройство, необходимое для срыва керна и дальнейшего его удержания. Верхняя часть керноприемника, через переходник, соединена с полым ротором забойного винтового двигателя, служащего приводом всего снаряда.

На рис. 6.2, *а* приведена общая схема устройства для дробового бурения, где 1 – керноприемник, 2 – породоразрушающее кольцо, 3 – дробь. Керноприемник 1 с вертикальными коллекторными пазами б, в нижней части оснащен породоразрушающим кольцом 2, со специальными посадочными сквозными гнездами переменной высоты 4. Кольцо 2 концентрично и скользяще соединено с кернорвателем 5, в котором также выполнены внутренние коллекторные пазы б для размещения дроби 3, при этом сквозные гнезда 4 и коллекторные пазы б кернорвателя 5 и керноприемника 1 соответственно соединены. Верхняя часть керноприемника 1 сообщена с винтовым двигателем 7, служащим источником создания крутящего момента, который через переводник 8 передается на керноприемник 1 и породоразрушающее кольцо 2. Привод винтового двигателя, который состоит из следующих основных конструктивных узлов: гибкого полого вала 9, металлорезинового статора и полого ротора 10 и 11 соответственно, фланца 12, шлицевых разъемов 13, цангового клапана 14, пружины 15, циркуляционных каналов 16, ниппеля 17, осуществляется с помощью промывочной жидкости, циркулирующей по бурильной колонне.

На рис. 6.2, *б* приведен разрез керноприемника по *А – А*, где 1 – корпус керноприемника, б – коллекторные пазы.

На рис. 6.2, *в* приведен разрез керноприемника в соединении с породоразрушающим кольцом по *Б – Б*, где 2 – породоразрушающее кольцо, 5 – кернорватель, б – коллекторные пазы.

На рис. 6.2, *г* приведен вид сбоку породоразрушающего кольца 4 по направлению *В*, где 2 – породоразрушающее кольцо, 3 – дробь, 4 – специальные посадочные сквозные гнезда переменной высоты.

Устройство работает следующим образом: при возникновении циркуляции промывочной жидкости в бурильных трубах, начинается вращательное движение винтового двигателя 7, крутящий момент которого, через переходник 8 и соответственно корпус керноприемника 1 и породоразрушающее кольцо 2, передается дробинкам 3, которые взаимодействуют с породой забоя и разрушают ее. В призабойной зоне поток промывочной жидкости, обогащенный продуктами разрушения, выходит в затрубное пространство между торцом и корпусом кольца 2 и забоем и стенками скважины соответственно. Наличие в кольце 2 специальных сквозных гнезд переменной высоты 4 необходимо для размещения и устойчивого удержания дробинки 3 и надежной передачи на них крутящего момента. За счет постоянного вращения и создания осевой нагрузки на дробинки 3, осуществляется разрушение породы на забое. При этом происходит износ дробинки, что приводит к их постепенному удалению из гнезд 4. Вместо изношенных дробинки на их место из вертикальных коллекторных па-

зов 6 поступают более крупные и работоспособные. Этот механизм подачи на забой новых дробинок и удаления изношенных полностью исключает возможность скопления дроби во внешнем пространстве скважины и его неоправданную разработку. Для надежного размещения дробинок 3 в коллекторных пазах 6, на забой их необходимо подавать после спуска устройства. Это происходит следующим образом: когда устройство находится над забоем, промывочная жидкость может свободно циркулировать через ниппель 17, гибкий вал 9, полый ротор 11 и керноприемник 1, а также частично – циркуляционные каналы 16, при этом винтовой двигатель имеет холостое низкомомментное вращение. Дробинки 3, вводящиеся на поверхности в поток промывочной жидкости свободно проходят бурильную колонну и через ниппель 17, фланец 12, гибкий вал 9 с цанговым клапаном 14, полый ротор 11 поступают во внутреннюю полость керноприемника 1, где последовательно размещаются в коллекторных пазах 6. При постановке устройства на забой, шлицевые разъемы 13 смыкаются, фланец 12 двигается вниз и перекрывает цанговый клапан 14, это вызывает изменение пути движения промывной жидкости, которая теперь может проходить только исключительно через циркуляционные каналы 16, что в свою очередь приводит к включению в рабочий режим винтового двигателя 7. Пружина 15, которая размещена во внутренней полости гибкого вала 9, необходима для надежной фиксации цангового клапана 14 при его перекрытии. Высокие частоты вращения породоразрушающего кольца 2 с дробишками 3 и его многоконтактность с забоем, что возможно благодаря наличию винтового двигателя 7 и особенностям конструкции кольца, способствуют установлению эффективных условий разрушения породы, необходимых именно для дробного бурения. За счет этого значительно изменяется ход и направленность элементарного акта разрушения породы, а соответственно этому растет механическая скорость бурения. Срыв и удержание керна в корпусе керноприемника осуществляется за счет прекращения вращения винтового двигателя 7 и левого вращения самой бурильной колонны вместе с устройством. При этом кернорватель 5 выкручивается на резьбе вниз, что ведет к его смыканию и плотному обжиму керна посредством дробинок 3. Для надежного срыва породы достаточно нескольких оборотов бурильной колонны – это вызывает возникновение высоких напряжений в столбике керна и его скол. Такая конструкция устройства позволит значительно повысить механическую скорость бурения, исключить расходы мощности, связанные с неоправданной разработкой ствола скважины и уменьшить интенсивность его искривления, кроме этого создаются все условия надежности работы узла срыва и удержания керна.

6.4 ОБЩИЕ ВЫВОДЫ ПО РАЗДЕЛУ 6

1. Приведены общие сведения о дробовом способе бурения.
2. Показаны перспективные пути возможного совершенствования дробового способа, как такового, входящего в группу абразивно-механических ударных.
3. Рассмотрена принципиальная конструктивно-технологическая схема

модернизированного снаряда дробового бурения, с детальным обоснованием работы каждого узла.

4. Показан механизм взаимодействия основных деталей и узлов модернизированных снарядов, обеспечивающий достижение оптимальных показателей процесса сооружения скважин в соответствующих горно-геологических условиях.

5. Намечены основные органические направления дальнейшего совершенствования дробового способа бурения.

РАЗДЕЛ 7 ЦИРКУЛЯЦИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ ПРИ АБРАЗИВНО-МЕХАНИЧЕСКОМ УДАРНОМ БУРЕНИИ СКВАЖИН

7.1 Особенности режима очистки при абразивно-механическом ударном бурении скважин

Циркуляция очистного агента в скважине создается буровым насосом, компрессором либо их комбинацией. Они обеспечивают необходимую интенсивность подачи (расход) и создают напор, который должен превышать сумму всех гидравлических сопротивлений движению очистного агента на всем пути от насоса (компрессора) до забоя скважины и затем до устья скважины на поверхности.

Гидравлический расчет циркуляции выполняют с целью определения необходимых характеристик бурового насоса (компрессора), обоснования выбора его типа, соответствующего расчетным величинам, и необходимого количества насосов.

При проведении гидравлического расчета определяют следующие параметры: необходимую интенсивность подачи очистного агента; режим движения в зависимости от скорости перемещения; гидравлические (аэродинамические) сопротивления движению жидкости (газа) по характерным участкам, суммарные гидравлические (аэродинамические) сопротивления [91].

Технологический процесс очистки должен быть спроектирован и реализован так, чтобы достичь наилучших технико-экономических показателей бурения. При этом главное внимание должно быть уделено выполнению основных технологических функций и ограничений.

В отличие от классического процесса очистки скважины при бурении таковой абразивно-механическим ударным методом, режим транспортировки продуктов разрушения будет иметь ряд отличительных особенностей, в основном диктуемых требованиями технологии.

Расход очистного агента – такой же важный параметр режима бурения, как осевая нагрузка и частота вращения бурового снаряда.

Количество очистного агента, подаваемого в скважину, играет доминирующую роль в формировании керна при бурении в рыхлых слабосвязанных и в подверженных химическому воздействию агента породах.

Энергия потока очистного агента обеспечивает удаление с забоя разрушенной породы, вынос шлама из скважины, охлаждение рабочего инструмента, способствует разрушению породы на забое, используется для привода забойных двигателей и механизмов, а также создания циркуляционных потоков гидро(пнеumo)абразивной смеси. Для решения каждой конкретной из этих задач необходима определенная энергия потока [92].

Чрезмерный расход очистного агента может оказывать отрицательное влияние на процесс бурения, вызывая разрушение керна, способствуя его самозаклиниванию, создавая силы гидравлического подпора и другие вредные воздействия, а также вызывает неоправданные затраты энергии и повышенный износ оборудования. Выбор рационального расхода должен производиться с уче-

том всех этих обстоятельств; он является важной задачей, определяющей эффективность процесса бурения. Минимальный расход очистного агента в общем случае должен обеспечивать решение трех основных задач: очистку забоя скважины от разрушенной породы, очистку ствола скважины, охлаждение породоразрушающего инструмента.

Вместе с тем, при абразивно-механическом ударном бурении, кроме прочих ограничительных условий в отношении предельно допустимого расхода, существуют таковые, определяемые конструктивными и технологическими параметрами снарядов, реализующих указанный способ.

При детальном рассмотрении конструкции снарядов абразивно-механического ударного бурения подчеркивалась ведущая роль очистного агента в аспектах создания высоконапорных струй, обогащенных металлическими шариками, бомбардирующих поверхность забоя, а также размещения и удержания истирающих материалов в соответствующих породоразрушающих органах. Кроме этого, очистной агент выполняет функции по удалению изношенного истирающего материала из контактной зоны и транспортировки его на поверхность.

Таким образом, рациональный расход очистного агента определяется не только теми или иными функциональными характеристиками комплекса «буровая скважина – шлам», но и необходимостью обеспечения требуемой мощности несущих струй и удовлетворительной транспортировки истирающих материалов на различных этапах технологического цикла. Неоправданно малый расход очистного агента будет приводить к снижению «качества» размещения и удержания породоразрушающих шариков и прочих истирающих в предназначенных для них местах, ухудшит условия и исключит своевременность удаления отработанного материала из призабойной зоны, а также вызовет вредное накопление изношенного истирающего материала, что в свою очередь, как известно, является главной причиной разработки ствола скважины и последующего ее искривления. Повышенный расход очистного агента будет способствовать возникновению гидравлического подпора, который нарушит нормальное течение процесса контактного взаимодействия в призабойной зоне. Следовательно, определение рационального количества очистного агента при абразивно-механическом ударном способе бурения является сложной многофакторной задачей, требующей комплексного подхода.

7.2 Определение скорости относительного движения шлама и истирающих материалов

При абразивно-механическом ударном способе бурения в циркулирующем потоке очистного агента находятся породоразрушающие шарики, формирующие центральную часть забоя скважины в своем свободном движении, таковые, размещающиеся в соответствующих гнездах породоразрушающих органов, осколки шариков и горной породы, обрабатывающие периферийную зону забоя скважины и наконец, частицы шлама, подлежащие транспортировке на дневную поверхность. Такая сложная система обладает большим спектром не-

обходимых и ограничительных условий, выполнение которых почти полностью определяет эффективность проектируемого способа. Для создания адекватной модели процесса очистки скважины, а, следовательно, и проектирования рационального технологического цикла строительства скважины, необходимо рассмотреть механо-гидравлические взаимодействия циркулирующих материалов с потоком очистного агента, что в свою очередь позволит определить критерии объемно-скоростных характеристик гидравлической программы.

Распределение скоростей по сечению потока зависит от ряда факторов: формы сечения, рода жидкости, режима течения и т.д. неравномерность скорости потока характеризуется отношением максимальной скорости ω_{max} в некотором сечении к средней объемной скорости ω_{cp} в том же сечении, т.е. выражается отношением [93]

$$\alpha = \omega_{max} / \omega_{cp}. \quad (7.1)$$

Известно, что для потока вязкой жидкости в круглой трубе при ламинарном режиме $\alpha=2$; при турбулентном режиме α достигает значений близких к единице. При структурном режиме течения вязко-пластичных жидкостей в зависимости от средней скорости и реологических параметров это отношение изменяется почти от 1 до 1,6.

Таким образом, в зависимости от положения выносимой частицы в потоке скорость ее выноса может изменяться в достаточно широких пределах, и это может явиться причиной того, что определенный процент частиц попавших в зону меньших скоростей, не будет выноситься, хотя значение $u \leq \omega_{cp}$.

В общем случае зависимость механической скорости проходки V_M от расхода промывочной жидкости Q описывается уравнением [92]

$$V_M = Q / (a + bQ) \quad (7.2)$$

где a и b – величины, зависящие от свойств проходимых пород, качества промывочной жидкости, конструкции породоразрушающего инструмента, размера кольцевого пространства и скорости вращения инструмента.

В основе многочисленных существующих методик расчета выноса шлама при бурении лежат известные закономерности движения шара в жидкой или газообразной среде.

Транспортирование частиц разрушенной породы по стволу скважины характеризуется абсолютной скоростью частицы $V_{ч}$, которая связана со средней скоростью потока жидкости в кольцевом пространстве $V_{ж}$ соотношением [91]

$$V_{жс} = u + V_{ч}, \quad (7.3)$$

где u – скорость оседания частицы шлама в неподвижной жидкости, м/с.

Поскольку одна из величин $V_{ж}$ или $V_{ч}$ известна, то для определения другой необходимо найти величину u . При этом возможны такие соотношения скоростей рис. 7.1.

Уравнение движения твердой частицы составляют исходя из законов механики и сумму всех сил, действующих на частицу, приравнивают к силе инерции. В условиях гидродохода это сделать легко, потому, что траектория частицы известна и направления действия всех сил совпадают с направлением движения частицы [93].

На тело, которое погружается в неограниченном объеме, кроме силы инерции действует сила тяжести

$$G_T = r g V, \tag{7.4}$$

и Архимедова сила

$$P_A = r_{ж} g V, \tag{7.5}$$

где $\rho_{ж}$ и ρ – соответственно плотность жидкости и тела, которое погружается; g – ускорение силы тяжести; V – объем тела, погруженного в жидкость.



Рис. 7.1 Схемы возможных соотношений скорости движения жидкости и оседания частиц

При появлении относительной скорости между телом и жидкостью возникает сила сопротивления

$$R = C_f \frac{r_{ж} u^2}{2}, \tag{7.6}$$

где f – площадь проекции поверхности тела на нормаль к вектору скорости (миделево сечение); C – коэффициент сопротивления, который зависит от формы тела и режима обтекания; u – скорость тела относительно жидкости; m_T – масса тела.

Уравнение движения тела под действием этих сил можно записать в виде

$$G_T - P_A - R = m_T \frac{du}{dt}. \tag{7.7}$$

Подставляя значения для G_T , P_A и R в уравнение (7.7) получим

$$m_T \frac{du}{dt} = r_{ж} g V \left(\frac{r}{r_{ж}} - 1 \right) - C_f \frac{r_{ж} u^2}{2}. \tag{7.8}$$

При неустановившемся движении появляется действие силы инерции, расчеты показывают, что длительность начального периода движения тела из состояния покоя обычно мала, и его можно не принимать во внимание. В об-

щем случае рассматривают движение установившееся и поэтому силу инерции в уравнении (7.8) приравнивают нулю, тогда

$$r_{жс} g V \left(\frac{r}{r_{жс}} - 1 \right) = C f \frac{r_{жс} u^2}{2}. \quad (7.9)$$

После преобразований из уравнения (7.9) получаем

$$u = \sqrt{\frac{V}{f} \left(\frac{r}{r_{жс}} - 1 \right) \frac{2g}{C}}. \quad (7.10)$$

Для частицы шарообразной формы объем определяется по формуле

$$V = \frac{\pi d^3}{6}, \quad (7.11)$$

где d – диаметр шара.

Проекцией поверхности тела в форме шара на нормаль к вектору скорости будет круг, площадь которого определяется формулой

$$f = \frac{\pi d^2}{4}. \quad (7.12)$$

Подставив (7.11) и (7.12) в (7.10), после преобразований получим

$$u = \sqrt{\frac{4g}{3C} d \left(\frac{r}{r_{жс}} - 1 \right)}. \quad (7.13)$$

Обозначив в (7.13) отношение $\sqrt{\frac{4g}{3C}}$ через K , получим формулу, которая широко известна под названием формулы Риттингера и довольно распространена в практике инженерных расчетов режима промывки скважин

$$u = k \sqrt{d \left(\frac{r}{r_{жс}} - 1 \right)}. \quad (7.14)$$

При определении скорости оседания частиц шлама в потоке промывочной жидкости также рекомендуют применять формулу Стокса [94], которая имеет следующий вид

$$u = \frac{d^2 (r - r_p) g}{18 \mu}, \quad (7.15)$$

где μ – динамическая вязкость жидкости.

Эта формула дает удовлетворительные результаты, если число Рейнольдса при обтекании частицы не превышает единицы.

Поскольку u является функцией d , то можно установить предельный диаметр частицы $d_{\text{пр}}$, при котором число Рейнольдса не будет превышать единицы, для этого на рис. 7.2 построена зависимость $Re = f(d)$.

Из данных рис. 7.2 имеем, что число Рейнольдса не превышает единицы при диаметре частицы $1,06 \cdot 10^{-4}$ м.

Также при расчетах используют формулу при участии параметра Архимеда Ar

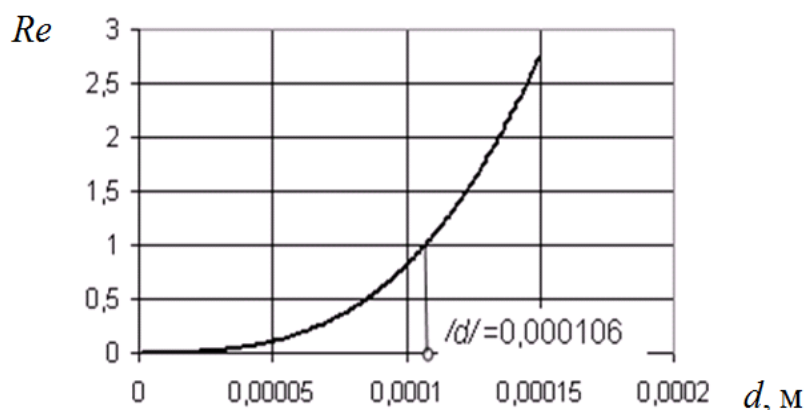


Рис. 7.2 График функции $Re = f(d)$.

$$u = \frac{n}{d} \exp 10 \left(\frac{\sqrt{\ln Ar + 2,3}}{2,3} - 1 \right), \quad (7.16)$$

где Ar – безразмерный параметр Архимеда

$$Ar = \frac{d^3 (r - r_{ж})}{n^2 r} g. \quad (7.17)$$

Эта формула получена на основании логарифмического закона критериальной зависимости, которая описывает «стандартную кривую» $C = f(Re)$ в диапазоне $Re = 0,5 - 10^5$.

Формулы, которые применяют при расчетах относительной скорости, не учитывают влияние стенок скважины и бурильных труб, которые ограничивают кольцевое пространство.

Для восходящего потока жидкости экспериментальными исследованиями, которые были проведены во ВНИИБТ (Всероссийский научно-исследовательский институт буровой техники), было установлено, что такое влияние имеет место, и с учетом этого фактора была определена следующая формула для определения относительной скорости

$$u = \sqrt{\frac{2gl}{C_L} \left(\frac{r}{r_{ж}} - 1 \right)}, \quad (7.18)$$

где l – характерный размер частички шлама; C_L – коэффициент лобового сопротивления, который определяется по формуле

$$C_L = \left(\frac{D_C - d_{БТ}}{l} \right)^{-0.18}, \quad (7.19)$$

где D_C и $d_{БТ}$ – диаметры скважины и бурильных труб соответственно.

В зарубежной практике проектирования режима промывки скважин пространство получила формула Уокера – Мейеза [10]

$$u = \sqrt{\frac{2gd(r - r_{ж})}{1,12r_{ж}}}. \quad (7.20)$$

Следует указать, что авторы, которые приводят указанные зависимости не оговаривают область их применения, а именно: тип и параметры промывоч-

ной жидкости, форму и размер частиц, потому возникает вопрос о том, каким условиям бурения соответствуют эти зависимости.

Приведенные аналитические зависимости являются отправным пунктом в расчетах, связанных с определением необходимого количества очистного агента для создания циркуляции породоразрушающих шаров и прочих истирающих материалов в пределах центральной части забойной зоны скважины (в полном соответствии с конструкцией гидромеханического снаряда), а также они необходимы в решении вопросов «вооружения» механических породоразрушающих органов устройств абразивно-механического ударного способа бурения.

Для прикладных расчетов в классическом колонковом бурении рекомендуется [94] принимать величину $V_{\text{ч}}$ в доле от u

$$V_{\text{ч}} = (0,2 - 0,3)u. \quad (7.21)$$

Расход промывочной жидкости Q вычисляют по формуле:

$$Q = \frac{P}{4} (D_c^2 - d_{\text{БГ}}^2) V_{\text{жс}}. \quad (7.22)$$

На практике используют следующие рекомендации (табл. 7.1) относительно скоростей восходящего потока [95].

Таблица 7.1

Рекомендованные скорости восходящего потока

Породоразрушающий инструмент	Скорость восходящего потока при промывании, м/с	
	водой	глинистым раствором
Долота режущего типа	0,6 – 1,0	0,6 – 0,8
Шарошечные долота	0,6 – 0,8	0,4 – 0,6
Твердосплавные коронки	0,25 – 0,6	0,2 – 0,5
Алмазные коронки	0,5 – 0,8	0,4 – 0,6

Такая методика является удовлетворительной для условий колонкового и бескернового бурения, однако для абразивно-механического ударного способа бурения она непригодна, так как совершенно не учитывает механо-гидравлического взаимодействия истирающих материалов на различных этапах их работы.

Рациональный расход очистного агента, подаваемого на забой скважины, должен обеспечивать наилучшие результаты бурения в данных геолого-технических условиях. При выборе рационального расхода должна учитываться вся совокупность воздействия очистного агента на процессы на забое и в стволе скважины, его положительные и отрицательные влияния.

Минимальный расход в случае абразивно-механического ударного способа бурения должен выбираться из условий необходимости возникновения требуемой циркуляции породоразрушающих шаров, надлежащей очистки забоя и выноса шлама по стволу скважины и наконец, привода забойных двигателей.

Скорость выноса частиц $V_{\text{ч}}$ должна обеспечить достаточную чистоту кольцевого пространства ствола скважины, которая зависит от допускаемого

обогащения объема промывочной жидкости в кольцевом пространстве скважины частицами твердого тела, что в свою очередь зависит от механической скорости бурения. Поэтому определение этой величины также возможно из следующего соотношения [95]

$$V_{\text{ч}} = \frac{f_3 V_M (r - r_{\text{жс}})}{f_{\text{кп}} I_{\text{кп}} (r_{\text{кп}} - r)}, \quad (7.23)$$

где f_3 и $f_{\text{кп}}$ – площади сечения забоя и кольцевого пространства между стенками скважины и бурильными трубами соответственно; $I_{\text{кп}}$ – коэффициент, учитывающий винтообразное движение частиц в восходящем потоке в процессе бурения; $\rho_{\text{кп}}$ – плотность промывочной жидкости в кольцевом пространстве.

Согласно рекомендациям [11], разность плотностей нисходящего и восходящего потока очистного агента не должна превышать 10 кг/м^3 для воды, а для глинистого раствора она находится в пределах $20 - 30 \text{ кг/м}^3$. Превышение указанных концентраций влечет за собой возможность возникновения сальникообразований и прочих осложнений, существенное неоправданное повышение энергопотребления буровыми насосами и снижение эффективности работы системы по очистке и регенерации очистных агентов на буровой. Эти ограничительные условия полностью соответствуют и условиям абразивно-механического ударного способа бурения.

Из аналитических методов определения расхода очистного агента находит применение таковой, основанный на определении объема доли твердых частиц $C_{\text{ТВ}}$, исходя из соотношения между их объемом и объемом жидкости в кольцевом пространстве [11]:

$$C_{\text{ТВ}} = \frac{D_c^2}{D_c^2 - d_{\text{БТ}}^2} \frac{V_M}{V_{\text{ч}}}, \quad (7.24)$$

Из (7.24) мы можем получить выражение для определения абсолютной скорости движения частицы

$$V_{\text{ч}} = \frac{D_c^2}{D_c^2 - d_{\text{БТ}}^2} \frac{V_M}{C_{\text{ТВ}}}. \quad (7.25)$$

В отношении выбора максимально допустимой объемной доли шлама существует следующие рекомендации [11]. Если промывочной жидкостью служит вода или другие ньютоновские жидкости максимальная объемная доля шлама составляет 0,02, при промывке скважины глинистым раствором или другими неньютоновскими жидкостями $C_{\text{ТВ}} = 0,05$.

Поток газообразного агента оказывает воздействие на частицу шлама, аналогичное потоку жидкости, поэтому при расчетах может быть использована формула Риттингера. Однако при вычислении величины критической скорости газообразного потока необходимо учитывать, что скорость потока меняется по глубине скважины пропорционально изменению плотности.

В призабойной зоне, где газообразный агент находится под избыточным давлением, скорость потока меньше, чем у устья скважины [97].

Для учета этого обстоятельства в формулу Риттингера надо вводить еще один множитель, отражающий изменение давления газа по глубине скважины.

$$u = k \sqrt{\frac{P_z}{P_y}} \sqrt{d \left(\frac{r}{r_{жс}} - 1 \right)}, \quad (7.26)$$

где P_z и P_y – давление газа у забоя и у устья скважины соответственно.

Основное отличие транспортировки шлама газообразным агентом от жидких заключается в значительно меньшей плотности газов, и, следовательно, в больших значениях величины критической скорости. Действительно, если при использовании жидкостей максимальные значения критической скорости составляют 0,6 – 0,8 м/с, то при продувке скорости потока для тех же условий достигают 20 м/с и более.

Скорость транспортирования шлама в скважине как при бурении с промывкой, так и при бурении с продувкой определяется одинаково, по допустимой степени концентрации частиц в потоке, т.е. зависит от механической скорости бурения и соотношения площадей забоя и кольцевого пространства.

Количественным критерием достаточности очистки скважины при продувке также принято считать объемную концентрацию частиц шлама в потоке, которая не должна превышать 0,02 – 0,03. Скорость транспортирования при этом условии будет:

$$V_{ч} = \frac{f_z V_M}{f_{кп} c}, \quad (7.27)$$

где χ – объемная концентрация выбуренной породы в восходящем потоке газообразного очистного агента.

Практически необходимая скорость транспортирования частиц при использовании газообразных агентов составляет 0,1 – 0,4 м/с, что вполне обеспечивает работу забойных двигателей.

7.3 ОБЩИЕ ВЫВОДЫ ПО РАЗДЕЛУ 7

1. Детально освещены особенности режима очистки при абразивно-механическом ударном бурении скважин с указанием ограничительных и необходимых условий.

2. Дан исчерпывающий анализ основных аналитических зависимостей, определяющих гидравлическую и аэродинамическую программы очистки скважины.

3. Проанализированы факторы, определяющие модель процесса очистки скважины.

4. Рассмотрены критерии расчетов, связанных с определением необходимого количества очистного агента для создания циркуляции породоразрушающих шаров и прочих истирающих материалов в пределах, как центральной части забойной зоны скважины, так и ее периферии.

ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ

Предлагаемая читателю работа является лишь первой попыткой обоснования довольно перспективного способа бурения – абразивно-механического ударного, а, следовательно, не может претендовать на полную объективность содержащихся в ней сведений. Но несмотря на это, в ней впервые рассмотрены вопросы совершенствования гидромеханических снарядов с позиций минимизации энергоемкости процесса разрушения и сокращения затрат на вспомогательные операции, которые, как известно, занимают в общем балансе времени на сооружение скважин до 40%. Изучаемые в монографии конструкции моделей снарядов абразивно-механического ударного бурения являются полностью оригинальными работами авторов, что подтверждено серией патентов Украины. Вместе с тем, такой результат является следствием изучения большого числа научно-практических работ, в той или иной мере посвященных вопросам физических способов разрушения и прочих смежных направлений. Цитирование используемых источников авторами осуществлялось либо дословно, либо в рамках требований к излагаемому материалу. Список литературы включает практически все источники информации, использованные в процессе как работы над обозначенной тематикой, так и подготовке рукописи к печати. Авторы выражают свою заинтересованность в дальнейшей работе в направлении развития и совершенствования гидромеханического способа бурения, и надеются, что предлагаемая монография послужит толчком в развитии указанного способа.

В качестве положительных сторон работы необходимо отметить следующее.

1. Освещены основополагающие принципы теории работы струйных аппаратов с указанием методики инженерного расчета параметров камеры смешения в приложении к гидромеханическим снарядам.

2. Изучен элементарный акт механизма разрушения горных пород ударами шаров с выводом важнейших аналитических зависимостей характеризующих забойные процессы формирования ствола скважины.

3. Приведены исчерпывающие сведения по конструктивным схемам исполнения и технологии применения наиболее эффективных моделей снарядов шароструйного бурения.

4. Обозначены важнейшие предпосылки создания усовершенствованных конструкций снарядов гидромеханического бурения.

5. Детально рассмотрены технологические схемы модернизированных гидромеханических снарядов вращательного и ударного типов с указанием направленности разработок и констатацией ограничительных условий.

6. Подробно освещена работа и назначение отдельных деталей и узлов проектируемых конструкций снарядов абразивно-механического ударного бурения скважин.

7. Приведена инженерная методика расчета основных гидравлических и пневматических параметров работы приводных двигателей разрабатываемых снарядов.

8. Сформулированы основные теоретические положения работы породоразрушающих органов проектируемых снарядов с детальным обоснованием механизма разрушения.

9. Обозначены аналитические зависимости, определяющие последовательность и этапы цикла формирования периферийной части забоя скважины механическими породоразрушающими органами.

10. Детально рассмотрены процессы формирования забойной зоны скважины при абразивном изнашивании контактной поверхности с обоснованием ведущих критериев такого взаимодействия.

11. Дан исчерпывающий анализ основных аналитических зависимостей, определяющих гидравлическую и аэродинамическую программы очистки скважин в приложении к абразивно-механическому ударному способу.

12. Рассмотрены на качественном уровне критерии расчетов, связанных с определением необходимого количества очистного агента для создания циркуляции породоразрушающих шаров и прочих истирающих материалов в пределах, как центральной части забойной зоны скважины, так и ее периферии.

Таким образом, монография, кроме прочего, является полезным инструментом для дальнейших работ в области совершенствования абразивно-механического ударного способа строительства скважин.

Подводя итог сказанному, необходимо отметить, что процессы разрушения пород проектируемыми снарядами, равно как и вопросы циркуляции истирающих материалов в призабойной зоне должны быть подвергнуты дальнейшему теоретическому и практическому изучению.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Разведочное бурение / А.Г. Калинин, О.В. Ошкордин, В.М. Питерский и др. – М.: ООО «Недра-Бизнесцентр», 2000. – 748 с.
2. Chadwick John, US mining technology, MINING Magazine, February 2003, pp. 54 – 75.
3. <http://www.worldoil.com>
4. Сулакшин С.С. Практическое руководство по геологоразведочному бурению. – М.: Недра, 1978. – 333 с.
5. Давиденко А.Н., Игнатов А.А. Конструктивные и технологические особенности снарядов абразивно-механического ударного бурения // Матеріали міжнародної конференції «Форум гірників – 2013». – Дніпропетровськ: РВК НГУ, 2013. – С. 107–115.
6. Новые способы бурения скважин: Обзорн. информ. // Техн. и технол. геол.-развед. работ, орг. пр-ва / ВНИИ эконом. минер. сырья и геологоразвед. работ: ВИМЭС / В.И. Максимов, А.М. Цехмистренко, М.М. Розин и др. – М., 1971. – 55 с.
7. Назаров В.И., Сидорова Т.К. Использование воздействия высоконапорных струй при строительстве скважин: Обзорн. информ. // Бурение / ВНИИОЭНГ. – М., 1985. – 56 с.
8. Мучник В.С., Голланд Э.Б., Маркус М.Н. Подземная гидравлическая добыча угля. – М.: Недра. – 1986. – 222 с.
9. Нурок Т.А., Агаева Э.М. Вопросы теории гидромонеторной струи и гидравлического разрушения пород. – М.: Изд. МГИ. 1968. – 60 с.
10. Грей Дж. Р., Дарли Г.С.Г. Состав и свойства буровых агентов. Пер. с англ. – М.: Недра, 1985. – 509 с.
11. Маковой Н. Гидравлика бурения. Пер. с рум. – М.: Недра, 1986. – 536 с.
12. Braithwaite Richard, Exploration drilling 2000, MINING Magazine, July 2000, pp. 6 – 10.
13. Мирзаджанзаде А.Х., Ентов В.М. Гидродинамика в бурении. – М.: Недра, 1985. – 268 с.
14. Дерусов В.П. Обратная промывка при бурении геологоразведочных скважин. – М.: Недра, 1984. – 184 с.
15. Кардыш В.Г., Мурзаков Б.В., Окмянский А.С. Техника и технология бурения геологоразведочных скважин за рубежом – М.: Недра, 1989. – 256 с.
16. Оноприенко М.Г. Бурение и оборудование гидрогеологических скважин. – М.: Недра, 1978. – 168 с.
17. Шелковников И.Г., Лукошков А.В. Технические средства подводного разведочного бурения и опробования. – Л.: Изд-во ЛГУ, 1979. – 224 с.
18. Юшков И.А. Обоснование технологических параметров многорейсового поинтервального бурения подводных скважин погружными установками: Автореф. дис... к-та техн. наук 05.15.10 / Нац. горн. ун-т. – Днепропетровск, 2004. – 18 с.
19. Козодой А.К., Зубарев А.В., Федоров В.С. Промывка скважин при бурении. – М.: Гостоптехиздат, 1963. – 172 с.
20. Леонов Е.Г., Исаев В.И. Гидроаэромеханика в бурении. – М.: Недра, 1987. – 304 с.
21. Кожевников А.А., Давиденко А.Н. Гидромеханический и эрозионный способы разрушения горных пород при бурении скважин: Обзорн. информ. // Техн. и технол. геол.-развед. работ, орг. пр-ва / ВНИИ эконом. минер. сырья и геологоразвед. работ: ВИМЭС. – М., 1987. – 45 с.
22. Уваков А. Б. Шароструйное бурение. – М.: Недра, 1969. – 207 с.
23. Заурбеков С.А. Повышение эффективности призабойных гидродинамических процессов при шароструйном бурении скважин: Автореф. дис... к-та техн. наук 05.15.11 / КНТУ. – Алматы, 1995. – 19 с.
24. Давиденко А. Н., Игнатов А. А., Вяткин С. С. Некоторые вопросы гидромеханического способа бурения // Наук. праці ДонНТУ. Серія Гірничо-геологічна. – 2011. – № 14(181) – С. 75 – 78.

25. Справочник инженера по бурению геологоразведочных скважин: В 2 т. Т. 2 / Под ред. Е.А. Козловского. – М.: Недра, 1984. – 437 с.
26. Технология и техника разведочного бурения / Ф.А. Шамшев, С.Н. Тараканов, Б.Б. Кудряшови др. – М.: Недра, 1983. – 565 с.
27. Чугаев Р.Р. Гидравлика. – Л.: Энергоиздат, 1982. – 672 с.
28. Штеренлихт Д.В. Гидравлика. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 640 с.
29. Соколов Е.Я., Зингер Н.М. Струйные аппараты. – М.: Энергия, 1970. – 350 с.
30. Шрейнер Л.А. Физические основы механики горных пород. – М. – Л. Гостоптехиздат, 1950. – 212 с.
31. Динник А.Н. Избранные труды. – К.: Изд-во АН УССР, 1952. – 151 с.
32. Спивак А.И., Попов А.Н., Разрушение горных пород при бурении скважин. – М.: Недра, 1979. – 239 с.
33. Сулакшин С.С. Разрушение горных пород при бурении скважин. – Томск Изд. ТПИ, 1979. – 100с.
34. Разведочное колонковое бурение / Б. И. Воздвиженский, С. А. Волков, Б. С. Филатов. – М.: Изд-во Госгеолтехиздат, 1957. – 332 с.
35. United States Patent, Pellet impact core drill 2,724,575 / F.H. Deily, Patented Nov. 22, 1955.
36. А.с. 939710 СССР, МПК Е 21 В 7/18. Шароструйный снаряд для бурения скважин / Коротков В. П. № 3009898; Заявлено 02.12.80; Оpubл. 30.06.82; Бюл. № 24. – 2 с.
37. А.с. 417599 СССР, МПК Е 21 В 7/18. Шароструйный снаряд для бурения скважин / Уваков А. Б., Штрассер В. В. № 1451266; Заявлено 15.06.70; Оpubл. 28.11.74; Бюл. № 8. – 2 с.
38. А.с. 1120733 СССР, МПК Е 21 В 7/18. Устройство для шароструйного бурения скважин / Дугарцыренов А. В., Ларин О. Р., Потехин Е. А. и др. № 3597561; Заявлено 31.05.83; Оpubл. 15.08.86; Бюл. № 30. – 3 с.
39. Кардыш В.Г., Мурзаков Б.В., Усков Ю.Б. Оценка потенциальных возможностей прогрессивных методов бурения // Техника и технология геологоразведочных работ; организация производства. – М.: ВИЭМС, 1985. – 28 с.
40. Спивак А.И. Механика горных пород. – М.: Недра, 1967. – 192 с.
41. Игнатов А. А., Вяткин С. С. Особенности конструкции и механики работы нового гидродинамического снаряда // Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент-техника и технология его изготовления и применения: Сб. науч. тр. – К.: Изд-во ИСМ им. В.Н. Бакуля НАН Украины – Вып. 14. 2011. – С. 58 – 61.
42. Пат. 67845 № u201108906 Україна, МПК Е 21 В 7/18. Кулькоструминний прилад / А. О. Ігнатов, С.С. Вяткин. Заявл. 15.07.2011; Оpubл. 12.03.2012; Бюл. № 5.
43. Пат. 102707 № a201107407 Україна, МПК Е 21 В 7/18. Кулеструминний пристрій для буріння свердловин /А. О. Ігнатов, С. С. Вяткин. Заявл. 14.06.2011; Оpubл. 12.08.2013; Бюл. № 15.
44. Остроушко И. А. Бурение твердых горных пород. – М.: Недра, 1966. – 291 с.
45. Воздвиженский Б.И., Васильев М.Г. Буровая механика. – М.: Госгеолтехиздат, 1954. – 492 с.
46. Игнатов А. А., Вяткин С. С. Некоторые технико-технологические решения вопросов бурения направленных скважин // Наук. праці ДонНТУ. Серія Гірничо-геологічна. – 2012. – № 16(206) – С. 42 – 46.
47. Игнатов А. А., Вяткин С. С. Конструктивное исполнение снарядов гидромеханического бурения // Наук. праці ПолтНТУ. Серія Галузеве машинобудування Будівництво. – 2012. – № 2(32), т. 2 – С. 145 – 152.
48. Пат. 68322 № u201109643 Україна, МПК Е 21 В 7/18. Кулькоструминний прилад / А.О. Ігнатов, С.С. Вяткин. Заявл. 02.08.2011; Оpubл. 26.03.2012; Бюл. № 6.

49. Пат. 102708 № a201107452 Україна, МПК Е 21 В 7/18. Кулеструмiнний пристрiй для бурiння свердловин /А. О. Iгнатов, С. С. Вяткин. Заявл. 14.06.2011; Опубл. 12.08.2013; Бюл. № 15.
50. <http://www.pminstitute.by>.
51. Султанов Б.З., Шамасов Н.Х. Забойные буровые машины и инструменты. – М.: Недра, 1976. – 293 с.
52. Ильский А.Л., Шмидт А.П. Буровые машины и механизмы. – М.: Недра, 1989. – 396 с.
53. Iгнатов А. А. Конструктивные и технологические особенности гидромеханического снаряда ударного типа // Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент-техника и технология его изготовления и применения: Сб. науч. тр. – К.: Изд-во ИСМ им. В.Н. Бакуля НАН Украины – Вып. 16. 2013. – С. 208 – 212.
54. Пат. 81068 № u201212576 Україна, МПК Е 21 В 7/00. Пристрiй для бурiння / А.О. Iгнатов. Заявл. 05.11.2012; Опубл. 25.06.2013; Бюл. № 12.
55. Пат. 81067 № u201212574 Україна, МПК Е 21 В 7/00. Пристрiй для бурiння / А.О. Iгнатов. Заявл. 05.11.2012; Опубл. 25.06.2013; Бюл. № 12.
56. Ясов В.Г. Теория и расчет рабочих процессов гидроударных буровых машин. – М.: Недра, 1977. – 153 с.
57. Суднишников Б.В., Есин Н.Н., Тупицын К.К. Исследование и конструирование пневматических машин ударного действия. – Новосибирск: Наука, 1985. – 130 с.
58. Черепанов Г.П. Механика разрушения горных пород в процессе бурения. – М.: Недра, 1987. – 308 с.
59. Cherepanov G.P. Mechanics of Brittle Fracture. – New York, Mc Graw Hill, 1979. – 171 p.
60. Черепанов Г.П. Механика хрупкого разрушения. – М.: Наука, 1974. – 640 с.
61. Павлова Н.Н., Шрейнер Л.А. Разрушение горных пород при динамическом нагружении. – М.: Недра. 1964. – 160 с.
62. Эйгелес Р.М. Разрушение горных пород при бурении. – М.: Недра, 1971. – 231 с.
63. Барон Л.И. и др. Экспериментальные исследования процесса разрушения горных пород ударом – М.: Изд. АН СССР, 1962. – 219 с.
64. Кучерявый Ф.И. О механизме разрушения горных пород резцом по данным скоростной киносъемки // Известия ДГИ, т. XXX, кн. 2. – Днепропетровск. – 1957. С 31 – 37.
65. Кожевников А.А. Исследования процессов разрушения горных пород при колонковом бурении твердосплавными коронками: Автореф. дис... к-та техн. наук 04.00.19 / Днепроп. горн. ин-т. – Днепропетровск, 1975. – 32 с.
66. Работнов Ю.Н. Введение в механику разрушения. – М.: Наука, 1987. – 80 с.
67. Никифоровский В.С., Шемякин Е.И. Динамическое разрушение твердых тел. – Новосибирск: Наука, 1970 – 271 с.
68. Фридман Я.Б. Единая теория прочности материалов – М.: Оборонгиз, 1943. – 96 с.
69. Крагельский Н.В. Трение и износ. – М.: Машгиз, 1962. – 480 с.
70. Griffit A.A. The phenomena of fracture and flow in solids / Phil. Trans. Roy. Soc. – 1920. – Ser. A.V. 221p. 163 – 198.
71. Журков С.Н. Кинетическая концепция прочности твердого тела // Вестник АН СССР, № 3, 1968. – С. 46 – 52.
72. Журков С.Н. Проблемы прочности твердого тела // Вестник АН СССР, № 11, 1957. – С. 32 – 35.
73. Френкель Я.И. Теория обратимых и необратимых трещин в твердых телах // ЖТФ, т. 22, 1952. – С. 19 – 21.
74. Ребиндер П.А. Избранные труды: Поверхностные явления в дисперсных системах. Физико-химическая механика. – М.: Наука, 1979. – 382 с.
75. Ребиндер П.А. Физико-химическая механика. – М.: Знание, 1958. – 114 с.

76. Ребиндер П.А., Калиновская Н.А., Липец М.Н. Исследования в области поверхностных явлений. – М.: ОНТИ, 1936. – 47 с.
77. Конесев Г.В., Мавлютов М.Р., Спивак А.И. Противоизносные и смазочные свойства буровых растворов. – М.: Недра, 1980. – 144 с.
78. Воздвиженский Б.И., Голубинцев О.Н., Новожилов А.А. Разведочное бурение. – М.: Недра, 1979. – 510 с.
79. Эпштейн Е.Ф. Теория резания горных пород твердыми сплавами. – М.: ГОНТИ, 1939. – 179 с.
80. Саламатов М.А. Механизм разрушения горных пород дробью и его теоретические основы // Тр. Свердловского горного ин-та. Матер. по геологии и разведке полезных ископаемых Урала. – 1960. – Вып. № XXXVII – С. 213 – 224.
81. Игнатов А. А. Некоторые вопросы разрушения горных пород при использовании гидромеханического снаряда // Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент-техника и технология его изготовления и применения: Сб. науч. тр. – К.: Изд-во ИСМ им. В.Н. Бакуля НАН Украины – Вып. 15. 2012. – С. 89 – 93.
82. Игнатов А. А. Забойные процессы при работе снаряда с эффектом механического разрушения // Наук. праці ДонНТУ. Серія Гірничо-геологічна. – 2012. – № 2(17) – С. 195 – 198.
83. Остроушко И. А. Разрушение горных пород при бурении. – М.: Госгеолиздат, 1952. – 254 с.
84. Остроушко И. А. Забойные процессы и инструменты при бурении горных пород. – М.: Госгортехиздат, 1962. – 272 с.
85. Ребиндер П.А., Шрейнер Л.А., Жигач К.Ф. Понизители твердости в бурении. – М. – Л.: АН СССР, 1944. – 200 с.
86. Билык Ш.М. Абразивно-жидкостная обработка металлов. – М.: Машиностроение, 1960. – 198 с.
87. Клейс И.Р. Об изнашивании металлов в абразивной струе // Труды Таллинского политехнического института. Вып. 168. – Таллин, 1959. – С. 3 – 27.
88. Проволоцкий А.Е. Струйно-абразивная обработка деталей машин. – К.: Тэхніка, 1989. – 177 с.
89. Виноградов В.Н., Сорокин Г.М., Албагачиев А.Ю. Изнашивание при ударе. – М.: Машиностроение, 1982. – 192 с.
90. Кузнецов В. Д. Поверхностная энергия твердых тел. – М. – Л.: Гостехиздат, 1954. – 220 с.
91. Ганджумян Р.А., Калинин А.Г., Никитин Б.А. Инженерные расчеты при бурении глубоких скважин. – М.: ООО «Недра-Бизнесцентр», 2000. – 490 с.
92. Федоров В.С. Проектирование режимов бурения М.: Гостоптехиздат, 1958. – 172 с.
93. Гейер В.Г., Дулин В.С., Заря А.Н. Гидравлика и гидропривод. – М.: Недра, 1991. – 331 с.
94. Давиденко А.Н., Игнатов А.А. Прямая и обратная схемы очистки при бурении скважин. – Д.: РВК НГУ, 2012. – 101 с.
95. Кудряшов Б.Б., Яковлев А.М. Бурение скважин в осложненных условиях. – М.: Недра, 1987. – 269 с.
96. Ивачев Л.М., Юшков А.С. Об определении расхода промывочной жидкости при разведочном бурении // Известия ВУЗов. Геология и разведка. – 1986. – № 9 – С. 86 – 91.
97. Ганджумян Р.А. Практические расчеты в разведочном бурении. – М.: Недра, 1986. – 253 с.

Наукове видання

Давиденко Олександр Миколайович
Ігнатов Андрій Олександрович

АБРАЗИВНО-МЕХАНІЧНЕ УДАРНЕ БУРІННЯ СВЕРДЛОВИН

Монографія

(Російською мовою)

Видано за редакцією авторів.

Підп. до друку 18.12.2013. Формат 30x42/4.
Папір офсетний. Ризографія. У м. друк. арк. 6,3.
Обл.-вид. арк. 8,0. Тираж 300 пр. Зам. №

Підготовлено до друку та видруковано
в Державному вищому навчальному закладі
«Національний гірничий університет»
Свідоцтво про внесення до Державного реєстру
ДК № 1842 від 11.06.2004.

45005, м. Дніпропетровськ, просп. К. Маркса, 19.