

спуска, длины свечи, массовой концентрации минераловязущего при понижении температуры скважинной жидкости является резервом существенного увеличения глубины оборудования КГФ продуктивных горизонтов буровых скважин.

#### Литература

1. Кожевников А.А. Новое направление создания гравийных фильтров гидрогеологических скважин / А.А. Кожевников, А.К. Судаков // Природные ресурсы. – Минск: 2013. – №2. – С. 93 – 99.
2. Кожевников А.А. Результаты стендовых исследований влияния параметров технологии транспортирования криогенно-гравийного фильтра по стволу буровой скважины на глубину его спуска / А.А. Кожевников, Р.Е. Дычковский, А.К. Судаков // Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент – техника и технология его изготовления и применения: сб. науч. труд. – 2014. – Вып. 17.
3. Рубан С. А. Гідрогеологічні оцінки та прогнози режиму підземних вод України / С.А. Рубан, М.А. Шинкаревський. – К.: УкрДГРІ, 2005. – 572 с.
4. Гидрогеология СССР. Украинская ССР. / [Под ред. Ф.А. Руденко]. – М.: Недра, 1971. – Т. 5. – 614 с.

## МЕХАНИКА РАЗРУШЕНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД КОМБИНИРОВАННЫМИ ШАРОШЕЧНО-ЦЕПНЫМИ ДОЛОТАМИ

*А.Н. Давиденко, А.А. Игнатов, В.А. Ткаченко, Национальный горный университет, Украина*

Обобщены основные особенности конструктивных решений в комбинированном шарошечно-цепном долоте. Показаны преимущества, область применения и решения геолого-технологических задач бурения скважин при использовании проектируемого инструмента. Детально рассмотрены особенности механики разрушения горных пород рассматриваемыми долотами.

**Введение.** Успешное развитие экономики Украины невозможно без мощной минерально-сырьевой базы, для создания которой необходимо увеличение объемов и производительности основного вида геологоразведочных работ – бурения скважин.

Производственный цикл бурения скважин различного назначения состоит из большого количества трудоемких, энергоемких, сложных и дорогостоящих процессов: разрушения горной породы на забое; удаления разрушенной породы из-под торца породоразрушающего инструмента и транспортирования ее на поверхность; поддержания стенок скважины в устойчивом состоянии; спуска и подъема бурового инструмента. Последний названный вид операций производственного цикла сооружения скважин является самым продолжительным по времени, а кроме того и в достаточной степени трудоемким.

Анализ опыта бурения скважин различного назначения показал, что высокие технико-экономические показатели отдельных процессов и всего цикла в целом могут быть достигнуты, в частности, при использовании породоразрушающего инструмента высокой стойкости и обладающего значительным ресурсом работы на забое.

Целью настоящей работы является рассмотрение конструктивных параметров комбинированного шарошечно-цепного дискового долота и особенностей механики его работы на забое скважины.

**Основной материал.** Конструктивные и иные особенности породоразрушающего инструмента во многом определяются глубиной скважины и ее назначением. Из всей номенклатуры породоразрушающего инструмента для проходки скважин различного назначения

шарошечные долота можно считать, пожалуй, самым главным и наиболее распространенным. Шарошечные долота, как по конструкции, так и по технологии изготовления, являются самым сложным из всего инструмента для бурения скважин [1].

В машиностроении трудно найти аналогичный инструмент, условия, работы которого были бы такими же сложными и практически неконтролируемыми, как у буровых шарошечных долот. Значительная энергоемкость разрушения горных пород влечет за собой высокую степень энергетической нагруженности элементов конструкции долот, в особенности опор шарошек.

Поэтому, одной из основных причин выхода долот из строя является разрушение опорных подшипников. С целью устранения указанного недостатка был начат выпуск шарошечных дисковых долот [2].

В отличие от обычных шарошечных долот, дисковые позволяют при одном и том же диаметре долота разместить более мощные опоры. Кроме того, диски долот вращаются вокруг своей оси с числом оборотов значительно меньшим числа оборотов шарошек обычных долот, что положительно сказывается на стойкости их опор и позволяет увеличить их работоспособность.

Усиление опорного узла открыло путь к дальнейшему совершенствованию дисковых шарошечных долот в направлении увеличения их рабочей площади. Это было реализовано в конструкции дискового цепного долота [3], которая характеризуется следующим. В лапах такого долота закреплены две оси – верхняя и нижняя, на которых размещены звездочки и зубчатые диски соответственно. Зубчатая цепь, соединяющая в единую кинематическую систему звездочки и диски, является основным породоразрушающим элементом, роль вспомогательного играют зубья дисков.

Технически и конструктивно оправданная длина цепи позволяет существенно увеличить ресурс работы долота на забое.

Вместе с тем, область применения дисковых цепных долот ограничена мягкими и средними породами, где их основное преимущество – значительный ресурс работы, проявляется наиболее ярко. При переходе в более твердые породы, предложенное техническое решение конструкции цепного долота во многом неприемлемо. Анализ механизма разрушения различных по твердости пород и кинематики работы долот позволил прийти к выводу, что целесообразным является разработка двух типов цепных долот – для проходки исключительно твердых пород и разбуривания разрезов мягких пород с твердыми пропластками.

Обобщение отечественного и зарубежного опыта проходки скважин в перемежающихся по твердости породах позволило выделить два основных приема [4]. Первый заключается в применении различных типов долот, соответствующих проходным породам. Второй – в использовании долот с комбинированным вооружением. Первый вариант характеризуется значительным увеличением времени на спускоподъемные операции, что в конечном итоге негативно сказывается на технико-экономических показателях строительства скважины. Применение долот с шарошками, оснащенными комбинированным вооружением приводит к снижению механической бурения, в сравнении с ее показателями, достигнутыми использованием однотипных долот в соответствующих породах.

Из сказанного можно сделать вывод – конструкция долота должна предусматривать очередное включение в работу тех или иных породоразрушающих элементов, в соответствии с механическими характеристиками разрушаемых пород, что позволит свести к минимуму недостатки существующих методов проходки.

Согласно поставленным условиям, на кафедре техники разведки МПИ (НГУ) разработана конструкция комбинированного цепного дискового долота. При этом учитывалась необходимость выполнения следующих требований: возможность саморегулирования рабочего органа, эффективный механизм разрушения различных по твердости горных пород, продолжительный срок работы долота на забое.

На рис. 1 представлена общая конструктивная схема долота, где 1 – лапы, 2 – диски, 3 – шарошки, 4 – звездочки, 5 – вспомогательная ось, 6 – эксцентричная ось, 7 – подшипники качения, 8 – подшипники скольжения, 9 – специальные вкладыши, 10 – замковые втулки, 11 – цепи, 12 – зубки, 13 – изолированные полости вкладышей.

Долото работает следующим образом: при его вторжении в мягкие горные породы, цепи, на наружной поверхности которых размещены зубки, осуществляют разрушение забоя скважины. Цепи кинематически связаны с породоразрушающими дисками и звездочками, которые размещены на верхней вспомогательной оси с помощью подшипников качения. Наружная поверхность дисков выполнена зубчатой. С одной стороны зубки дисков являются связующим звеном между ними самими и цепью, что исключает проскальзывание в системе «диск – цепь», а с другой стороны зубки дисков – это дополнительные породоразрушающие элементы долота. Сами цепи представляют собой зубчатые пластинки, шарнирно соединенные между собой. Породоразрушающие диски, шарошки и звездочки свободно вращаются на осях.

Принцип саморегулирования долота был реализован в узле компоновки породоразрушающих дисков с эксцентричной осью.

Диски посажены на нижнюю ось при помощи специальной конструкции подшипника скольжения, которая представляет собой два обода – наружный и внутренний, между которыми вставлен вкладыш.

Для пояснения механизма саморегулирования, особенности конструктивного исполнения подшипника скольжения следует рассмотреть более детально. Вкладыш указанного подшипника выполнен полым из специальной механически прочной резины. В процессе сборки подшипника, его полые камеры, через специальные каналы высокого давления, сформированные во вкладыше, заполняются специальной средой. Положение вкладыша (в на рисунке) относительно самих дисков и оси долота должно быть строго выдержано при компоновке конструкции. Это является необходимым условием работы механизма саморегулирования.

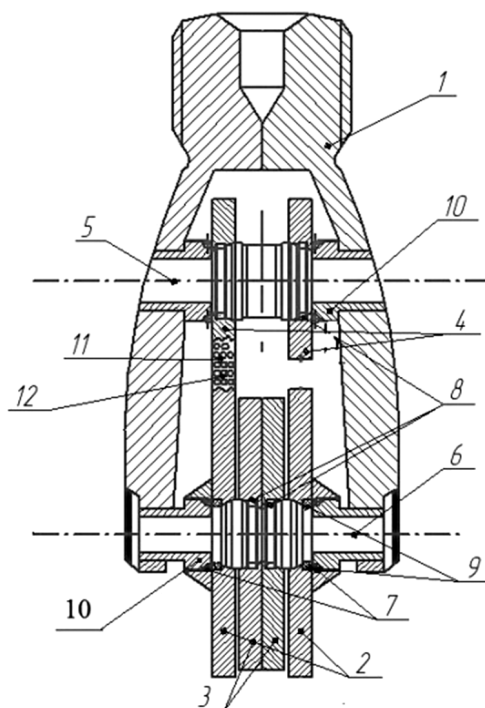


Рис. 1 Общая схема устройства шарошечно-цепного долота.

Сжимаемость среды, заполняющей полости вкладыша, может быть обеспечена за счет насыщения соответствующих технических масел инертными газами, наличие которых необходимо для предотвращения физико-механических преобразований в рабочей среде.

Из схемы долота видно, что диски с цепями имеют определенный вылет за контактную поверхность шарошек – это необходимо для обеспечения их работы исключительно в мягких породах. При переходе в более твердые породы осуществляется вертикальное перемещение дисков с цепями, т. е. их уход за рабочую поверхность шарошек. Этот процесс осуществляется за счет наличия в опорах дисков вкладышей, и проходит он по следующей схеме. Вертикальное перемещение дисков вверх вызывает определенное сокращение объемов нижней

полости и увеличение верхней. В соответствии с указанным, в нижней полости газы в среде растворяются, а в верхней – выделяются, что способствует беспрепятственному перемещению дисков с цепями вверх. Коэффициент сжатия среды, заполняющей полости вкладышей подшипников скольжения должен в обязательном порядке коррелироваться с механическими характеристиками – твердостью или категорией по буримости пород. Указанные характеристики могут быть определены по ГОСТ 12288-66 или методом ЦНИГРИ. Процессы, происходящие в полостях вкладышей, являются обратимыми.

Такой механизм саморегулирования позволяет разбуривать твердые пропластки шарошками, оснащенными необходимым вооружением.

При выборе рабочей среды необходимо учитывать: ее вязкость, диапазон рабочих температур и давлений, допустимую длительность эксплуатации, стоимость рабочей среды. Подбор инертных газов должен происходить в строгом соответствии их коэффициента растворимости в данной рабочей среде.

Реализованный в конструкции долота принцип саморегулирования позволяет без смены типа долот проходить как мягкие и средние породы, так и твердые пропластки. Достигается равномерное распределение работы разрушения мягких и твердых пород между дисками с цепями и шарошками соответственно. Кроме того, долото может быть использовано многократно, за счет оперативной замены его основных рабочих органов – цепей, даже в полевых условиях.

Теперь перейдем к вопросам механики разрушения горных пород проектируемым долотом. В самом общем случае разрушение забоя скважины происходит за счет многократного силового воздействия инструмента, в результате чего в породе развивается система трещин, поэтому твердость ее снижается, и периодически 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). В механике образования и развития трещин, рассматривают три их типа: отрыва, сдвига и среза [5]. При разрушении горных пород в процессе бурения скважин имеют место все типы трещинообразования, однако, преобладают трещины отрыва и сдвига. Были проведены эксперименты по исследованию влияния среды на процесс зарождения и развития трещин отрыва и сдвига.

В качестве критерия для оценки влияния среды на процесс трещинообразования использовали критическое значение коэффициента интенсивности напряжений при вершине трещины ( $K_{Ic}$ ), зависящего от прочностных и упругих характеристик материала, начальных размеров трещин и на величину которого оказывает влияние среда. Вязкость разрушения для трещин отрыва в бесконечных пластинах определяется выражением

$$K_{Ic} = \sigma_c \sqrt{\pi a}, \quad (1)$$

где  $\sigma_c$  – разрушающее нормальное напряжение;  $a$  – линейный размер трещины.

Для пластин конечных размеров

$$K_{Ic} = \sigma_c \sqrt{\pi a} \cdot f\left(\frac{a}{W}\right), \quad (2)$$

где  $W$  – ширина пластины.

В основу эксперимента положен известный способ определения вязкости разрушения при трехточечном изгибе [6].

Для такой схемы нагружения коэффициент  $K_{Ic}$  определяется выражением

$$K_{Ic} = \frac{P_c S}{BW^{3/2}} \left[ 2,9 \left(\frac{a}{W}\right)^{1/2} - 4,6 \left(\frac{a}{W}\right)^{3/2} + 21,8 \left(\frac{a}{W}\right)^{5/2} - 37,6 \left(\frac{a}{W}\right)^{7/2} \right], \quad (3)$$

где  $P_c$  – разрушающее усилие;  $B$  – высота образца;  $S$  – длина участка нагружения.

При  $a \ll W$  членами полинома (3) высших степеней можно пренебречь

$$K_{Ic} = 2,9 \frac{P_c S}{BW} \sqrt{a}, \quad (4)$$

Если величина  $K_{Ic}$  является мерой трещиностойкости материала, то величина  $\psi(a) = \frac{K_{Ic}}{\sqrt{a}}$  может служить характеристикой трещиностойкости конкретного образца из данного материала

$$\psi(a) = \frac{K_{Ic}}{\sqrt{a}} = 2,9 \frac{P_c S}{BW} = \alpha P_c, \quad (5)$$

где  $\alpha = 2,9 \frac{S}{BW^2}$  – коэффициент, характеризующий геометрические размеры образца.

Как видно из (5)  $\psi(a)$  является линейной функцией разрушающей нагрузки  $P_c$ . При этом для образцов из одного материала с одинаковыми начальными размерами концентраторов напряжений (трещин) справедлива следующая зависимость

$$\psi(a_1) = \psi(a_2) = \psi(a_3) = \dots, \quad (6)$$

Линейный характер выражения (5) позволяет использовать для характеристики прочностных свойств образцов значения разрушающей нагрузки, а зависимость (6) сравнивать между собой образцы с разными геометрическими размерами.

Действительно, на основании (6) мы можем записать

$$\alpha^* P_c^* = \alpha_1 P_{c1} = \alpha_2 P_{c2} = \dots, \quad (7)$$

где  $\alpha^*$  – некоторое приведенное значение коэффициента, характеризующего геометрические размеры образца;  $P_c^*$  – соответствующая этим размерам приведенная нагрузка.

Из (7) имеем

$$P_c^* = P_{c1} \frac{\alpha_1}{\alpha^*} = P_{c2} \frac{\alpha_2}{\alpha^*} = \dots, \quad (8)$$

или

$$P_c^* = P_{ic} K_i, \quad (9)$$

где  $K_i = \frac{\alpha_i}{\alpha^*} = \frac{B^* W^{*2}}{B_i W_i^2}$  – коэффициент приведения;  $i = 1, 2, 3 \dots n$  – номер опыта;  $n$  – количество опытов в эксперименте.

Если среда влияет на процесс зарождения и развития трещины, то для образцов с одинаковыми размерами трещин, разрушаемых в различных средах, зависимость (6) выполняться не будет, т.е.

$$\psi'(a) \neq \psi''(a), \quad (10)$$

$$P_c^{*'} \neq P_c^{*''}. \quad (11)$$

Детальный анализ механизмов разрушения пород при сооружении скважин дает основание считать, что в их основе лежат волновые процессы.

Под действием рабочего органа в горной породе возникают сдвиговые напряжения, приводящие к генерированию упругих волн, в особенности это касается цепного инструмента. По мере распространения волны часть энергии расходуется на совершение работы разрушения, а другая ее часть, изменяя направление движения, рассеивается в массиве.

К параметрам волны, определяющим процесс разрушения, следует отнести напряжение, интенсивность, длительность и спектральный состав. Распространение упругой волны в горной породе характеризуется непрерывным поглощением энергии средой и явлением дисперсии.

Одним из авторов работы была впервые сделана попытка произвести расчет оптимального режима разрушения горных пород при наличии в них трещин и непроизводительных потерь энергии по мере распространения волны в массиве.

Процесс поглощения энергии волны сложен и включает в себя целый ряд явлений, приводящих к преобразованию энергии упругой волны в тепло. Убыль энергии волны за счет соверше-

ния работы зависит от прочности породы и может быть охарактеризована энергопоглощаемостью или коэффициентом поглощения, определяющим первоначальное состояние породы.

Механизм поглощения энергии породой в значительной степени определяет характер процесса разрушения. Если поглощение велико, то даже при кратковременных нагрузках процесс может считаться квазистатическим. Если же поглощение энергии мало, то и сравнительно длительные нагрузки приводят к динамическому режиму разрушения. Процесс разрушения горных пород весьма энергоемкий; чем больше поглощается энергии на совершение работы разрушения, тем интенсивнее он протекает.

Для каждой формы волны имеется оптимальная длительность, для которой может быть найдена ширина зоны разрушения, определяемая только энергией волны и соответствующая наибольшему объему разрушаемой породы и наибольшему коэффициенту полезного действия.

При воздействии инструмента на породу, последняя в свою очередь воздействует на инструмент, генерируя в нем волны сжатия-растяжения, которые приводят к накоплению усталостных напряжений в инструменте и выходу его из строя. Увеличение долговечности инструмента может быть достигнуто за счет повышения его удельной энергоемкости разрушения, уменьшения коэффициента поглощаемости, увеличения непроизводительных потерь, переводящих энергию волны в тепло увеличения отвода энергии из инструмента в породу.

Процесс поглощения энергии при разрушении горных пород может быть описан уравнением [7]

$$dI = -[\beta I + \chi(I - I_r)^n] dx, \quad (12)$$

где  $\beta$  – коэффициент рассеивания упругой волны.

Величина показателя степени  $n$  для неодинаковых пород может быть разной, так же, как и величина предела выносливости.

Интенсивность волны может убывать за счет диссипативных потерь, рассеяния энергии и работы разрушения, что дает основание принять допущение, что первый член уравнения (12) пропорционален непроизводительным потерям, а второй характеризует работу разрушения

$$dI_2 = \chi(I - I_2)^n. \quad (13)$$

Однако если диссипативные потери входят и во второй член, то и они могут быть учтены выражением

$$\chi_{полн} = \chi + \theta, \quad (14)$$

где  $\theta$  – работа разрушения.

Для определения работы разрушения ( $\theta$ ) необходимо решить дифференциальное уравнение

$$I' + \alpha I + \chi(I + I_2)^n = 0 \quad (15)$$

Сделаем замену переменных

$$I_1 = I - I_2, \quad (16)$$

где  $I_2$  – пороговое значение интенсивности.

Тогда

$$I_1' + \alpha I_1 + \chi I_1^n = 0, \quad (17)$$

При  $n = 1$ ,  $n = 2$  задача решена в работе [7]. В предлагаемой работе дан общий подход к решению волнового уравнения (15), который пригоден для любых  $n$ .

Заметим что  $\alpha$ ,  $\chi$  и  $I_2$  не зависят от  $x$ . При  $n = 1$  уравнение (17), как справедливо замечается в [7], является уравнением с разделяющимися переменными

$$\frac{dI_1}{(\alpha + \chi)I_1 + \alpha I_2} = -dx, \quad (18)$$

При  $n = 2$  уравнение (17) является не только уравнением Риккати, но и уравнением с разделяющимися переменными

$$\frac{dI_1}{I_1 + \chi I_1^2 + \alpha I_r} = -dx, \quad (19)$$

при  $n = 3$

$$\frac{dI_1}{I_1 + \chi I_1^3 + \alpha I_r} = -dx, \quad (20)$$

при  $n = 4$

$$\frac{dI_1}{I_1 + \chi I_1^4 + \alpha I_r} = -dx. \quad (21)$$

В общем случае

$$\frac{dI_1}{I_1 + \chi I_1^n + \alpha I_r} = -dx. \quad (22)$$

В случаях  $n = 3, n = 4$  возможно исчерпывающее аналитическое исследование.

В целом горный массив можно представить изотропным телом, упругие модули которого  $\lambda$  и  $\mu$  зависят от одной координаты  $x$ , то в этом случае уравнение движения сводится к виду [8]

$$\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial \mu}{\partial x} \frac{\partial}{\partial x} \ln(\lambda + 2\mu) = \frac{\rho(x)}{\lambda(x) + 2\mu(x)} \frac{\partial^2 U}{\partial t^2}, \quad (23)$$

где  $U$  – перемещение, при условии, что массовые силы отсутствуют.

Если плоская волна возникает от мгновенного нормального напряжения интенсивности  $f(t)$  к поверхности  $x = 0$  упругой полуплоскости, то задача о распространении плоской волны в неоднородной среде сводится к решению дифференциального уравнения (23). Укажем на то, что дифференциальное уравнение (23) допускает бесчисленное множество точных решений.

**Выводы.** Проанализирован современный этап развития конструирования шарошечных долот. Указаны перспективные пути дальнейшего совершенствования породоразрушающего инструмента шарошечного типа. Предложена конструктивная схема исполнения комбинированного шарошечно-цепного долота. Рассмотрены принципиальные вопросы забойных процессов разрушения горных пород при работе проектируемого инструмента.

#### Список литературы

1. Масленников И. К., Матвеев Г. И. Инструмент для бурения скважин. – М.: Недра, 1981. – 336 с.
2. Борисович В. Т., Михин В. Н. Долота различных типов // Итоги науки и техники. Техника геологоразведочных работ. ВИНТИ. – 1981. – Т. 11. – С. 66 – 85.
3. Пат. 46041 № u200905218 Украина, МПК Е 21 В 10/46. Буровое долото /А. О. Игнатов, С. Ю. Андрусенко. Заявл. 25.05.09; Опубл. 10.12.09; Бюл. № 23.
4. Пути повышения эффективности геологоразведочного бурения / П. И. Букреев, С. И Голиков, В. А. Кудря и др. – М.: Недра, 1989. – 158 с.
5. Шрейнер Л.А. Физические основы механики горных пород. – М. – Л. Гостоптехиздат, 1950. – 212 с.
6. Свешников И.А., Винник Э.М. Исследование процесса разрушения горных пород методом люминесцентной дефектоскопии. – К.: ИСМ АН УССР, 1980. – 56 с.
7. Давиденко А.Н., Эйшинский А.М. Волновые процессы в разрушении горных пород. – НТЖ «Вибрации в технике и технологиях» № 4, 2000. – С. 56-59.
8. Блохин С.Е., Эйшинский А.М., Давиденко А.Н. Некоторые вопросы разрушения горных пород. Д., 1995. – 444 с.