

УДК 622.243.2

Проф. Литвинский Г. Г.  
(ДонГТУ, г. Алчевск, ЛНР, ligag@ya.ru)

## ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ БУРОВОГО ИНСТРУМЕНТА. СПИРАЛЬ АРХИМЕДА

Выполнен краткий ретроспективный экскурс в историю развития буровой техники от ударно-поворотного до шарошечного способа бурения с позиций геомеханического взаимодействия бурового породоразрушающего инструмента (БПРИ) с горной породой. Дан анализ особенностей работы БПРИ при разных способах бурения исходя из возникающих усилий на кромке реза. Вскрыты основные технические противоречия БПРИ, сформулированы требования к нему и критерии оптимизации. Рассмотрены недостатки разрушения породы под прямолинейным лезвием буровой коронки. Предложена оптимальная форма лезвия БПРИ в виде острого клина с тонкой по центру твердосплавной вставкой. Сформулирован критерий эффективности работы БПРИ, разработана математическая модель и путём решения дифференциального уравнения доказана оптимальная форма БПРИ в виде спирали Архимеда. Дана оценка эффективности применения оптимизированного БПРИ.

**Ключевые слова:** теория бурения, способы бурения, буровая коронка, требования к коронке, критерии оптимизации бурения, математическая модель бурения, форма лезвия коронки, спираль Архимеда, эффективность бурения.

### 1 Актуальность, цель и задачи исследований

Одним из наиболее важных процессов в горных технологиях при подземном строительстве и добыче всех видов полезных ископаемых является бурение горных пород. Ежегодно в мире бурят десятки тысяч километров скважин разного назначения, диаметра, глубины и пространственной ориентации, на что затрачивается много материальных и трудовых ресурсов, энергии и дорогостоящих дефицитных материалов. Стоимость сооружения 1 км скважины для добычи нефти или газа в Западной Сибири составляет 0,5...1,0 млн американских долларов. Поэтому так остро стоит проблема увеличения производительности и снижения стоимости бурения, которая приобретает межотраслевое значение. Для её решения необходимо совершенствовать существующие и изыскивать новые способы и средства бурения, в первую очередь — буровой породоразрушающий инструмент (БПРИ).

В основном для бурения применяют режуще-скалывающий БПРИ, разнообразие типов которого чрезвычайно велико (рис. 1).



Рисунок 1 Различные типы режуще-скалывающего БПРИ

Это обусловлено высокой изменчивостью горно-геологических и горнотехнических условий бурения, с одной стороны, и отсутствием чётко осознанной критериальной модели оптимизации типов БПРИ — с другой [1–6 и др.]. Следует признать, что именно БПРИ является са-

мым важным определяющим звеном в конструкции буровых машин и технологии сооружения скважин. Поэтому столь актуальна проблема его исследования, создания и совершенствования для дальнейшего прогресса буровой техники и технологии.

При выполнении исследований по оптимизации параметров БПРИ в их основу положены результаты, полученные в работах [7, 8].

**Целью** исследований является обоснование критериальных требований к работе режуще-скалывающего инструмента и оптимизация его параметров на основе выдвинутых критериев.

**Идея** исследований состоит в изучении геомеханического взаимодействия бурового инструмента с породами забоя скважины и создании математической модели этого взаимодействия.

В данной работе **объект** исследований — механизм силового взаимодействия режуще-скалывающего инструмента с горной породой при её разрушении, **предмет** исследований — конструкционные параметры бурового инструмента для оптимизации процесса бурения.

К основным задачам исследования следует отнести:

- 1) краткий ретроспективный экскурс в историю развития буровой техники;
- 2) формулирование требований к буровому инструменту и критериев его оптимизации;
- 3) обоснование оптимального способа бурения и конструкции бурового инструмента;
- 4) разработку математической модели и получение дифференциальных соотношений для установления конфигурации лезвия БПРИ на буровой коронке;
- 5) анализ полученных закономерностей и результатов, постановку задач дальнейших исследований.

Помимо указанных задач исследования попутно решались некоторые вспомогательные вопросы техники бурения.

## 2 Краткий обзор развития буровой техники

Вся история развития бурения отражает устранение постоянно возникающего противоречия между уровнем существующей технологии и потребностью промышленности. Анализ исторического аспекта развития БПРИ показывает, что вначале (от древности до XX века) преобладал простейший ударно-скалывающий способ бурения скважин. Он сводился к подъёму БПРИ, повороту вокруг оси и сбрасыванию его на забой для выкалывания породы. Производительность была низкой, а глубина проходки скважин — малой (рис. 2).

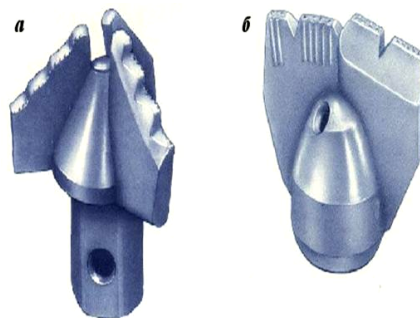


Рисунок 2 Буровые долота для ударного бурения пород:

а — трёхлопастное; б — двухлопастное

Революционные изменения в буровой технике произошли во время второй технической революции (последняя треть 19 – начало 20 вв.) и было «...непосредственно вызвано к жизни превышением потребности над возможностью удовлетворить её прежними средствами производства» (Маркс К., Энгельс Ф. Соч., т. 47, с. 461). Появление электромоторов и двигателей внутреннего сгорания позволило перейти к вращательному, а далее — к комбинированному способам бурения: ударно-вращательному и вращательно-ударному.

От способа взаимодействия БПРИ с породами забоя скважины во многом зависит производительность бурения и скорость проходки. В мягких и средней крепости породах производительным оказался вра-

щательный способ бурения, основанный на применении резцов, срезающих породную «стружку» с забоя (рис. 3). По сути, идея такого бурения аналогична работе обычного резца металлорежущего станка. Однако в породах, особенно в крепких, резцы быстро выходили из строя в результате износа и затупления.

Таким образом, для бурения в породах средней и высокой прочности пришлось перейти на ударно-вращательный способ, где при вращении БПРИ и постоянном прижатии его на забой дополнительно создавали ударные нагрузки на породу. Тем самым создавали комбинированное ударно-скалывающее и режущее воздействие на породы забоя скважины (рис. 4).



Рисунок 3 Буровой инструмент для вращательного бурения: резцы РП по породе и РУ по углю



Рисунок 4 Коронки для ударно-вращательного и вращательно-ударного бурения шпуров

Апофеозом развития вращательной техники бурения следует по праву считать изобретение шарошки в 1909 году американским инженером Говардом Хьюзом, которое кардинально изменило не только

особенности взаимодействия БПРИ с породой, но и скачком (в десятки раз) улучшило технико-экономические показатели проходки скважин. При таком бурении разрушение породы выполняют зубки шарошек, которые вращаются буровой колонной и прижимаются ею с большим напорным усилием к забоя (рис. 5).

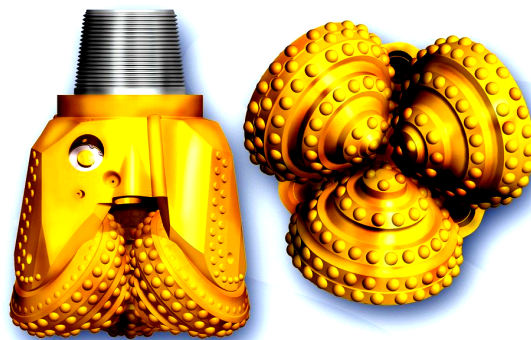


Рисунок 5 Шарошечное штыревое долото с твёрдосплавными зубками

Шарошка многократно ускорила бурение нефтяных и газовых скважин, позволила насытить промышленность XX века углеводородным сырьём, что скачком ускорило технический прогресс, дало мощный импульс развитию двигателей внутреннего сгорания и всех видов транспорта, легло в основу стратегии и тактики мировой геополитики в борьбе за энергетические ресурсы.

Однако достигнутый к настоящему времени уровень развития буровой техники уже перестал удовлетворять запросы промышленности. Необходимо новое кардинальное улучшение показателей бурения.

Для выбора предпочтительного направления совершенствования БПРИ выполним сопоставительное сравнение геомеханических параметров различных способов бурения.

### **3 Анализ особенностей работы БПРИ при разных способах бурения**

Горные инструменты, как правило, работают в тяжёлых условиях: высокие переменные по величине и направлению нагрузки; изменчивые свойства разрушаемых пород; абразивная среда, повышенные

температуры и др. Это предъявляет жёсткие требования к прочности и стойкости БПРИ, удовлетворить которые становится всё сложнее из-за накопления технических противоречий.

### *3.1 Усилие на кромке резца и требования к нему при бурении*

Основным геомеханическим процессом при бурении является механическое деформирование и разрушение пород в забое скважины под режущей кромкой инструмента. Процессы деформирования и разрушения породы весьма сложны и разнообразны: скол, резание, смятие, выдавливание, истирание и усталостный износ, которые комбинируются в различных сочетаниях в зависимости от типов БПРИ.

Эти сложные деформационные процессы возникают за счёт статического или динамического прижатия БПРИ к породному забою. При этом, как правило, при вращательном движении неминуемо возникают касательные усилия на режущих кромках БПРИ в процессе их движения по породе.

Знакопеременное деформирование и разрушение породы вызывает в инструменте сложные сочетания сжимающих, изгибающих и сдвигающих усилий, создающие динамические **пространственные** поля нормальных и касательных напряжений. Наиболее нагруженным оказывается лезвие инструмента, разрушающее породу, — самая ответственная часть бурового оборудования, во многом определяющая его эффективность работы.

Анализ особенностей работы БПРИ позволяет сформулировать основные общие требования, которым должны удовлетворять его резцы или коронки:

1) стойкость и прочность при действии статических и динамических усилий сжатия и сдвига;

2) максимальная глубина внедрения в породу при минимальной нагрузке на лезвие;

3) наиболее полная очистка забоя скважины от продуктов разрушения (бурового шлама);

4) высокая производительность бурения при минимальных затратах энергии и расходе инструмента.

Оказывается, что разные способы бурения (ударное, вращательное и их различные комбинации) существенно различаются одним из важнейших показателей работы БПРИ: наличием или отсутствием сдвигающих усилий, приложенных к лезвию БПРИ при его воздействии на породный забой. До сих пор этому обстоятельству уделялось недостаточное внимание.

Сдвигающие усилия на лезвии возникают при перемещении коронки по касательной к поверхности породного забоя скважины. Чаще всего это происходит в результате вращения БПРИ в забое, т. е. в подавляющем большинстве существующих способов бурения.

Выполним краткий сопоставительный анализ двух принципиально различных способов разрушения породы:

1) ударный или статический выкол породы путём внедрения клина на глубину  $h$  перпендикулярно поверхности породы;

2) резание и сдвиг породы путём перемещения заглублённого резца параллельно поверхности забоя.

### *3.2 Особенности работы БПРИ при ударном способе бурения*

При ударном способе бурения (рис. 6) для динамического дробления породы на ударную кромку инструмента и долото действует только нормальная сила  $N$ , которая создаёт под лезвием трещину раскола в соответствии с законами пинч-эффекта [8].

Таким образом, достигается наиболее эффективный для каменных материалов вид разрушения — тангенциальное растяжение, вызывающее последующий раскол.

Как доказано в [8], глубина  $h_c$  трещины раскола зависит от угла заострения клина  $\alpha$  (он из теоретических соображений принят равным  $\alpha = 0,5\beta$ , где  $\beta$  — обычно принятый угол заострения) приложенной к нему нормальной погонной нагрузки  $q$  и

прочности породы на одноосное растяжение  $[\sigma_p]$ :

$$h_c = \frac{2 v_p E_p q}{\pi v_c E_c [\sigma_p]} [\alpha + 0,5 \cdot \sin(2\alpha)]^{-1}, \quad (1)$$

где  $v_p$ ,  $v_c$ ,  $E_p$ ,  $E_c$  — коэффициенты Пуассона и модули Юнга соответственно при растяжении и сжатии породы (индексы « $p$ » и « $c$ »).

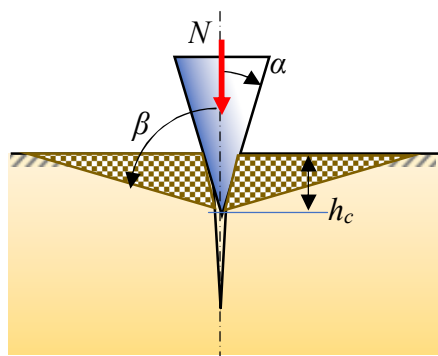


Рисунок 6 Действующие усилия при разрушении породы ударным или статическим сколом

Для определения параметров призм выкола под клиновым инструментом породы следует воспользоваться исследованиями [8], где были разработаны основы теории разрушения пород клиновым инструментом. Эти исследования и численные расчёты показали, что по мере увеличения угла заострения клина  $\alpha$  (его «затупления») угол наклона площадки сдвига  $\beta$  незначительно увеличивается от  $75$  до  $80^\circ$ , а глубина  $h$  внедрения клина в породу существенно уменьшается. Так, для углов заострения  $\alpha=10, 20, 30, 40, 50^\circ$  соответствуют глубины внедрения  $h=9,8; 4,2; 1,8; 0,7, 0,2$  мм. Следовательно, при углах заострения  $\alpha$  более  $40^\circ$  (существующие коронки) клин почти не внедряется в породу и происходит лишь усталостное повреждение её поверхности.

Ударно-поворотный способ воздействия долота на забой скважины эффективен в основном для пород малой твёрдости. Он

зависит от остроты кромок ударного лезвия долота, что позволяет увеличить глубину его внедрения и площадь выкола породы после удара. Обратим внимание на то, что угол заточки кромок лезвий  $2\alpha$  существующих коронок нельзя было выполнить менее  $90^\circ$  из-за опасности выкалывания кромок при ударных колебаниях инструмента в процессе его внедрения в породу.

Единственным усилием, действующим на инструмент при ударном отколе, является нормальная сила  $N$ , а усилия сдвига  $T$  и изгибающий момент  $M$  почти отсутствуют (рис. 6), откуда следует основное определяющее неравенство при разрушении расколом:

$$N \gg T \approx M \approx 0. \quad (2)$$

Работа  $W_1$  при разрушении расколом определяется лишь трением на боковых гранях клина при его внедрении в породу на глубину  $h$  и ввиду её малости ( $3 \dots 10$  мм) оказывается незначительной:

$$W_1 = 0,5 \cdot N \cdot h. \quad (3)$$

Итак, у дробящего инструмента затраты энергии меньше, а процесс затупления идёт медленнее, чем у режущего. Тем не менее существующие в настоящее время БРПИ для ударно-поворотных способов бурения не удовлетворяют условиям оптимальной работы резца при его внедрении в породу. Это обусловлено тем, что:

- основная энергия удара расходуется на смятие и переизмельчение породы под резцом из-за его «затупленного» лезвия, когда  $\alpha > 40^\circ$ , что приводит к большим затратам энергии и малой скорости бурения;

- для внедрения ударного инструмента при существующих углах заострения  $\alpha$  более  $40^\circ$  необходима чрезмерно высокая погонная нагрузка на лезвие ( $q > 3 \dots 5$  кН/см и более), что ведёт к потере стойкости инструмента.

Эти антагонистические технические противоречия стали тормозом дальнейшего развития ударного способа бурения, несмотря на его простоту и теоретические преимущества.

Кроме того, процесс работы дробящего БПРИ прерывен, т. к. после каждого удара инструмент поднимают и перемещают путём поворота в новое положение, что обуславливает низкую частоту ударов, сложность выполнения и меньшую эффективность такого инструмента. Чаще всего на практике режущая кромка инструмента прижата напорным усилием к забою, и тогда неминуемо возникают касательные и скалывающие напряжения на кромке реза, а все преимущества ударно-поворотного бурения исчезают. По этой причине область его применения ограничена главным образом бурением шпуров и скважин.

### 3.3 Особенности бурения резцами

Исполнительные органы выемочных и проходческих машин обычно оснащают группой резцов, которые, воздействуя на горную породу, образуют на ней борозды — резы, проходы, лунки. При резании с поверхности обычно образуется «развал» породы. Способ резания породы резцом также происходит при вращательном, вращательно-ударном и ударно-вращательном способах бурения. Тогда порода разрушается в забое скважины путём среза и скола.

Для этого на резец следует воздействовать нормальной  $N$  и сдвигающей касательной  $T$  силами одновременно, но при этом неминуемо возникает и значительный изгибающий момент  $M$  (рис. 7).

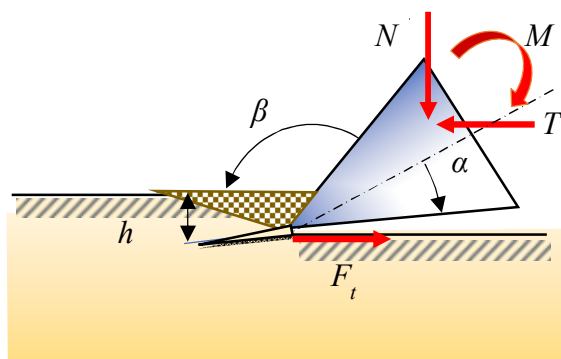


Рисунок 7 Действующие усилия при разрушении породы резанием

Главную роль при резании породы играет сдвигающее усилие  $T$ , и всегда выполняются основные определяющие неравенства

$$T \gg N, M > 0. \quad (4)$$

При срезе работа  $W_2$  разрушения оказывается на порядок больше, чем при расколе, поскольку совершается усилием сдвига  $T$  на всём протяжении пути  $s$  движения инструмента:

$$W_2 = T \cdot s \gg W_1. \quad (5)$$

При резании сдвиговым усилием  $T$  происходит дополнительное воздействие на породу в виде различных типов среза и сдвига поверхностного слоя, касательного скалывания и отделения породы от массива. Однако основная работа по разрушению затрачивается на преодоление сил трения между режущим инструментом и породой. Такая особенность взаимодействия БПРИ с породой приводит к нарастающим негативным последствиям:

- работа силы трения полностью переходит в тепловыделение на самом ответственном участке инструмента — на его лезвии;
- ввиду плохого теплорассеяния на лезвии БПРИ, всегда окружённого породой с низким коэффициентом теплопередачи, температура лезвия резко повышается до значений 1000...2000 °C и более;
- высокая температура на лезвии приводит к снижению в разы его деформационно-прочностных свойств;
- необходимость постоянного преодоления скользящим лезвием трения жёсткой абразивной среды приводит к интенсивному его износу и затуплению;
- у затупленного лезвия резко возрастают сопротивление породы и температура, что ведёт к прогрессивному усилению тепловыделения от сил трения и к износу и затуплению кромок.

Работа БПРИ, таким образом, является геомеханическим процессом, при котором происходит взаимовлияние входящих (приложенные усилия, заточка, температура ин-

струмента и др.) и результирующих (скорость резания, работа разрушения и др.) параметров. При этом реализуется положительная обратная связь, ухудшающая технические параметры бурения, что делает этот процесс неустойчивым.

Очевидно, сам процесс бурения способом резания самопроизвольно формирует механизм **нелинейной положительной обратной связи**.

Вышеприведённый анализ показывает, что при резании породы реализуется так называемый **режим с обострением** в виде динамического закона, при котором одна или несколько моделируемых величин (в нашем случае — температура лезвия и сопротивление породы) стремятся к бесконечности за конечный промежуток времени. В реальных условиях происходит остановка процесса бурения из-за затупления и износа инструмента, что требует его замены и ремонта.

#### 3.4 Особенности работы раздавливающего БПРИ

По принципу воздействия на горную породу он отличается от дробящего инструмента ударно-поворотного действия не динамическим, а статическим приложением нагрузки к породе и нашёл своё конструктивное исполнение в виде дисковых шарошек (рис. 8). Из рисунка видно, что разрушение породы под шарошкой происходит путём раздавливания и выкола.

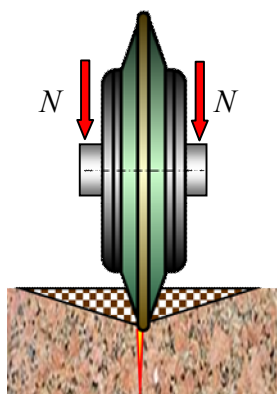


Рисунок 8 Дисковая шарошка с боковыми призмами выкола и разрушающим твёрдосплавным ободом

Как правило, дисковые шарошки устанавливают на проходческие комбайны, и они, как инструменты дробяще-скалывающего действия, доказали свою эффективность по породам с коэффициентом крепости 4...8 при высокой износостойкости и относительно низкой энергоёмкости разрушения. Это их роднит с ударно-поворотным способом бурения.

При внедрении в породу диск своим ободом уплотняет её поверхностный слой и перемещает его на некоторую глубину без хрупкого разрушения. По мере увеличения глубины вдавливания образуется уплотнённое пылевидное ядро, которое из глубины давит во все стороны, что приводит к сколу частиц породы по сторонам диска. Образуется «развал», на дне которого остаётся нарост — остаток пылевидного ядра.

Шарошкам присущи и существенные недостатки. Статическое разрушение раздавливанием под кольцевой твёрдосплавной вставкой требует чрезвычайно высоких напорных усилий на породный забой. Кроме того, у дисковой шарошки диаметром более 0,1 диаметра её кольцевой траектории по забою возникают высокие выламывающие усилия на лезвии при её внедрении в породу. Это вызывает разрушение лезвия на твёрдосплавном ободе, особенно возле центра кругового породного забоя. Тяжёлые и сложные по конструкции дисковые шарошки для роторных проходческих комбайнов требуют массивных валов и подшипников для выдерживания высоких напорных усилий, что значительно ограничивает их область применения. Ввиду этого следует признать, что дисковые шарошки вряд ли могут рассчитывать на широкое распространение в будущем.

Наиболее совершенным и распространённым для бурения скважин БПРИ следует считать шарошечное ребристое или штыревое долото (рис. 5), которое осуществляет дробяще-скалывающее разрушение породы.

Шарошечное буровое долото состоит из сферических или цилиндрических шарошек в количестве от одной до шести, смонтирован-

ных на подшипниках качения или скольжения на цапфах секций бурового долота. Шарошки представляют собой конусное стальное колесо, на котором расположены зубья разной длины или штыри из карбида вольфрама. Основная разновидность шарошечных долот для сплошного бурения — трёхшарошечное долото (рис. 5), а для бурения глубоких скважин получило распространение также одношарошечное буровое долото.

Зубья шарошки при работе выполняют сложное составное движение: обкатываются по породному забою скважины, вращаясь вокруг оси конусного корпуса за счёт вращения буровой колонны. Все шарошки имеют усложнённые системы смазки и промывки.

Преимуществами шарошки являются: малая площадь контакта штырей (зубьев) с забоем и их большое число; некритичный уровень износа зубьев; малый крутящий момент для вращения колонны труб.

Однако анализ механизма взаимодействия шарошки с породой показывает наличие ряда недостатков:

– на штыри (зубья) шарошки помимо усилий сжатия действуют изгибающие моменты из-за их внедрения в лунку с поворотом и скольжением;

– для исключения откола режущих кромок их выполняют затупленными, что ведёт к неэффективному разрушению породы смятием и выдавливанием и высокому абразивному износу;

– глубина внедрения штырей весьма мала (до 1 мм в крепких породах), что заметно снижает эффективность бурения;

– затруднённое удаление породного шлама из забоя снижает скорость бурения и ограничивает применение шарошки только породами, склонными к хрупкому разрушению.

Заканчивая критический анализ особенностей работы различного типа вооружений БПРИ, можно заключить, что по мере своего исторического развития появилось много разновидностей бурения от ударно-поворотного способа вначале до современного способа шарошечного бурения.

Однако все существующие способы бурения обладают существенными, до сих пор не преодоленными недостатками.

#### **4 Оптимальные параметры БПРИ**

Для создания БПРИ с оптимальными параметрами следует сформулировать исходные требования, которым должны отвечать конструктивные особенности инструмента, способ и режим его взаимодействия с разрушаемой породой. Эти требования вытекают из анализа особенностей работы всех существующих конструкций БПРИ и сводятся к следующему:

1) следует исключить появление касательных усилий на контакте лезвия с разрушаемой породой, а это значит, что инструмент должен всегда внедряться по нормали к породной поверхности забоя скважины;

2) на инструмент должны действовать только нормальные сжимающие усилия вдоль его оси без создания в нём поперечных сил и изгибающих моментов;

3) воздействие лезвия на породу должно быть не статическим, а динамическим (ударное вдавливание);

4) недопустимо касательное к породе (скользящее) перемещение БПРИ в момент внедрения лезвия в породу, для чего следует исключить любой его поворот вокруг своей оси при контакте с породой;

5) угол заточки лезвия должен быть минимальным для обеспечения наибольшей глубины его проникновения в породу, одновременно исключая поломку его при ударе;

6) для улучшения выноса породы и очистки забоя лезвие должно подниматься над забоем не менее двух-трёх глубин его ожидаемого внедрения в породу;

7) ударное лезвие должно взаимодействовать с породой не в отдельных изолированных точках забоя, а по линии длиной не менее 3...5 глубин внедрения, что повышает его устойчивость и заметно увеличивает производительность бурения, поскольку достигается не объёмное, а близкое к плоскому напряжённо-деформированное состояние в породе под лезвием;



8) поскольку глубина внедрения такого инструмента после единичного удара по породе в лучшем случае не превышает  $h < 5 \dots 10$  мм, его высота должна быть не более  $3 \dots 4 h$ , что значительно снижает массу и расход дорогостоящих материалов.

Отсюда следует, что наиболее простым и наименее энергоёмким является способ разрушения породы ударным инструментом дробящего действия, когда его вдавливают в породу ударной нагрузкой, после чего поднимают и перемещают в новое положение.

Перечисленным требованиям в полной мере удовлетворяет лишь ударно-поворотный способ бурения, с которого и началось развитие технологии бурения и от которого давно, тогда вполне обоснованно, отказались как от малопродуктивного. Тем не менее, с точки зрения геомеханического взаимодействия ударного лезвия с породой, этот способ является самым эффективным. Остаётся только преодолеть основной его недостаток, состоящий в том, что в ударно-поворотном способе бурения периодически происходит относительно медленный подъём и сброс инструмента на забой под собственным весом. Именно эта особенность технологии не позволяла решить конструкторские задачи по увеличению частоты и энергии ударов.

Таким образом, если обеспечить выполнение условия повышения частоты ударов до  $1 \dots 2$  Гц, то благодаря выполнению всех вышеперечисленных требований наиболее оптимальным БПРИ следует признать инструмент клиновидной формы с углом заострения в пределах  $\beta = 2\alpha = 25 \dots 30^\circ$ , форма которого показана на рисунке 9. Это БПРИ с симметричными клиновидными гранями и твёрдосплавной вставкой для ударно-скалывающего разрушения породы.

Новый БПРИ состоит из корпуса 1, симметричных клиновидных граней 2, наклонённых к оси симметрии под углом  $\alpha = 12 \dots 15^\circ$ . По центру расположена твёрдосплавная вставка 3, которую можно заполнить из сверхтвёрдых композиционных

материалов типа СВПК, обладающих свойствами синтетических поликристаллических алмазов и позволяющих изготавливать заготовки режущих элементов различных форм и размеров [9].

В частности, весьма перспективен кубический нитрид бора в виде химического соединения бора и азота. Параметры решётки и минимальное межатомное расстояние у него несколько больше, чем у алмаза. При твёрдости до 80000 МПа термостойкость его выше, чем у алмаза (он не теряет своих свойств даже при температуре  $1400^\circ\text{C}$ ); модуль упругости в  $3 \dots 3,5$  раза выше, чем у стали, предел прочности на сжатие — 500 МПа. В зависимости от технологии изготовления известны разные его модификации под названиями: эльбор, кубонит, боразон, гексанит.

Такие свойства новых сверхтвёрдых материалов позволяют уменьшить толщину твёрдосплавной вставки в клиновом БПРИ до 1 мм, что для самой крепкой породы с прочностью на одноосное сжатие  $\sigma_c = 200$  МПа (коэффициент крепости порядка  $f=20$ ) требует создания статической погонной нагрузки  $q_n$  порядка

$$q_n \approx \sigma_c / A = 200 \text{ МПа} / 0,1 \text{ см}^2 \approx 2 \text{ кН/см}, \quad (6)$$

где  $A$  — площадь давления под остриём твёрдосплавного лезвия толщиной 0,1 см и длиной 1 см,  $A = 0,1 \text{ см} \cdot 1 \text{ см} = 0,1 \text{ см}^2$ .

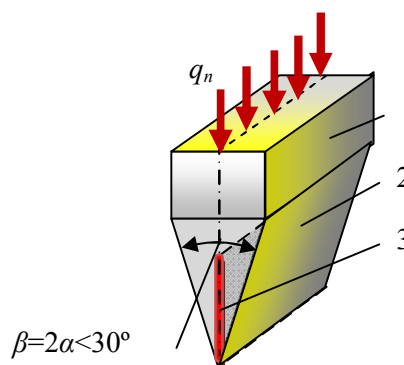


Рисунок 9 Новая конструкция БПРИ

Оценим возможную скорость бурения новым БПРИ по сверхкрепким породам. Поскольку ударно-дробящий способ бурения относится к низкочастотному БПРИ, то частота ударов по породе будет в пределах  $n=2...3$  Гц, а глубина проникновения тонкого твёрдосплавного лезвия благодаря пинч-эффекту составит около  $h=3...5$  мм. Тогда скорость  $V_b$  бурения будет равна

$$V_b \approx k_V \cdot n \cdot h = (0,6...0,8) \cdot 2 \text{ с}^{-1} \cdot 5 \text{ мм} \approx (6...8) \text{ мм/с.} \quad (7)$$

В результате можно достигнуть высокой скорости прохождения скважины на уровне предельно технически возможной и равной 20...30 м/час.

По мере уменьшения прочности породы скорость бурения будет увеличиваться за счёт увеличения глубины проникновения клина  $h$ . Однако даже в самых слабых породах вряд ли стоит ожидать увеличения скорости бурения более 50...60 м/час, поскольку «узким местом» тогда станет очистка забоя от бурового шлама и удаление его из скважины.

### 5 Оптимальная конфигурация лезвия БПРИ в проекции на забой. Спираль Архимеда

Приступим к решению следующей довольно нетривиальной задачи, связанной с оптимизацией разрушения породы в процессе поворота БПРИ вокруг оси скважины.

Вначале следует обосновать форму породного забоя скважины. Поскольку одним из важнейших условий оптимальности работы БПРИ является отсутствие поперечных усилий на его лезвии, необходимо обеспечить его воздействие на забой лишь нормальными усилиями. Эти усилия формируются в результате ударов инструмента, направленных вдоль оси скважины. При этом лезвие всегда при любом повороте должно находиться в плоскости, нормальной к оси скважины.

Следовательно, породный забой скважины должен всегда быть перпендикулярным к лезвию БПРИ, т. е. плоским. Любое

отклонение поверхности породного забоя от плоскости неминуемо должно приводить к появлению поперечных усилий, действующих на лезвие БПРИ и снижать его работоспособность из-за повышенного износа, изгиба и поломки.

Рассмотрим особенности разрушения породы под буровой коронкой. Наиболее простой формой лезвия БПРИ в проекции на забой является прямая линия. Такая форма самая удобная с позиций технологии изготовления коронки и её заточки после затупления, поэтому она получила наибольшее распространение на практике, особенно при перфораторном бурении.

Однако разрушение породы в забое происходит, как показывает анализ, крайне нерационально (рис. 10). Так, под буровой коронкой в забое 1 происходят выколы породы 2, образованные следами 3 лезвия. При этом явно выделяются три области разрушения породной поверхности забоя скважины: переизмельчения I, нормального разрушения II и недостаточного разрушения III. Соотношение площадей этих областей составляет ориентировочно  $A_I : A_{II} : A_{III} \approx 10\% : 30\% : 60\%$ .

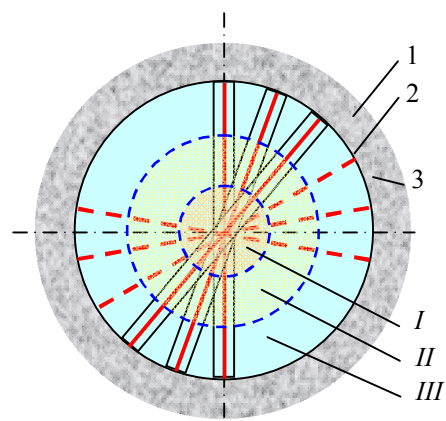


Рисунок 10 Особенности разрушения забоя скважины под буровой коронкой

По мере увеличения зоны поражения забоя лезвием зона переизмельчения увеличивается, а когда происходит полное разрушение породы на периферии забоя, площадь зоны переизмельчения может достигать до  $A_I=80...90\%$ .

В результате неравномерности разрушения породы в забое:

- возрастают в 1,5...2 раза непроизводительные затраты энергии на переизмельчение породного шлама в забое;
- происходят неравномерное затупление и износ лезвия инструмента, быстро прогрессирующий на его концах, что резко (в разы) снижает производительность бурения;
- большие затраты времени на смену затупленных коронок и расход дефицитных материалов.

Основная причина этих недостатков заключается в неравномерности разрушения породы в забое. Следовательно, для устранения этой причины необходимо обеспечить **равномерность работы** каждого участка лезвия коронки. Теоретически это условие можно выполнить, если произвольный участок лезвия будет разрушать один и тот же объём породы.

Основная идея оптимизации состоит в том, чтобы на каждый элементарный участок ударной кромки коронки приходилась одна и та же разрушаемая («заметаемая») площадь (рис. 11).

Для разработки математической модели оптимизации разрушения рассмотрим элементарное кольцо произвольного радиуса  $r$  шириной  $dr$  внутри скважины единичного радиуса (рис. 11). Пусть это кольцо пересекает кромка лезвия коронки под углом  $\varphi$ , а искомое уравнение лезвия в полярной системе координат будет  $r = f(\varphi)$ .

Площадь элементарного кольца в принятых обозначениях равна

$$dA = 2\pi \cdot r \cdot dr, \quad (8)$$

а элементарная длина кромки лезвия, формирующего разрушение в заданном кольце, составит

$$dl = \sqrt{dr^2 + r^2 \cdot d\varphi^2}. \quad (9)$$

Согласно сформулированному критерию оптимизации, элементарная длина  $dl$  должна быть пропорциональна разрушаемой площади  $dA$ :

$$dl = dA / b; \quad (10)$$

$$\sqrt{dr^2 + r^2 \cdot d\varphi^2} = 2\pi \cdot r \cdot dr / b,$$

где  $b$  — размерная постоянная, определяемая из граничных условий, м.

Производя алгебраические упрощения второго уравнения (10), приходим к дифференциальному уравнению

$$\frac{d\varphi}{dr} - \frac{\sqrt{a^2 r^2 - 1}}{r} = 0, \quad 1/м., \quad 1/м., \quad (11)$$

где  $a = 2\pi / b$ , 1/м.

Искомое уравнение кривой  $\varphi = f(r)$  получим после решения уравнения (11) с граничными условиями (при  $r = r_0$   $\varphi = \varphi_0$ ), для чего находим определённый интеграл

$$\varphi = \int \frac{\sqrt{a^2 r^2 - 1}}{r} \cdot dr = \quad (12)$$

$$= \sqrt{a^2 r^2 - 1} + \arcsin(ar)^{-1} + C,$$

где  $C = \varphi_0 - \sqrt{a^2 r_0^2 - 1} - \arcsin(ar_0)^{-1}$  — постоянная, определяемая из граничных условий.

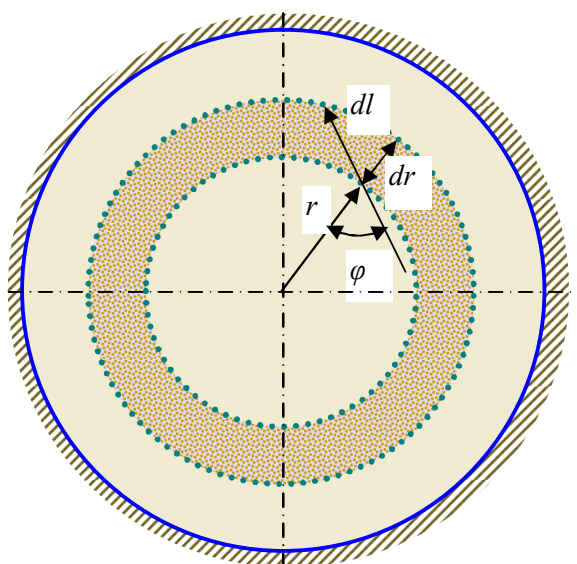


Рисунок 11 Математическая модель оптимизации разрушения забоя скважины

Решение, как следует из (12), существует лишь при условии  $a^2 r^2 \geq 1$ . Постоянная интегрирования  $C$  может изменяться в пределах  $0 \leq \varphi_0 \leq 2\pi$ . Чтобы получить наглядное представление о виде достаточно сложной функции  $\varphi = f(r)$  (12), построим её график в координатах  $r, \varphi$  (рис. 12).

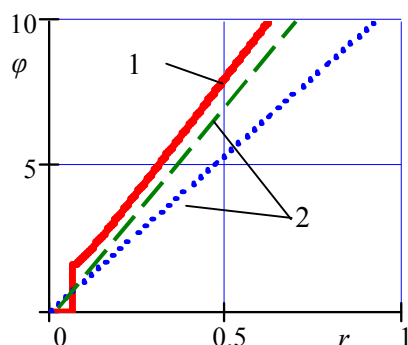


Рисунок 12 Графики функций по уравнению:  
1 — искомой функции  $\varphi = f(r)$  (12);  
2 — спирали Архимеда  $\varphi = kr$

Рядом с графиком функции (12) построены два луча, выходящих из начала координат  $\varphi = ar$ . Как следует из сравнения графиков, сложная по записи функция (12) с достаточной точностью может быть описана простейшим уравнением луча  $\varphi = kr$ , за исключением небольшого участка в начале координат, т. е. там, где нарушено условие существования решения в виде неравенства  $a^2 r^2 \geq 1$ .

Как известно из аналитической геометрии, простейшее уравнение прямой является уравнением луча в декартовой системе координат  $\varphi = ar$ . А прямой луч при переходе в полярную систему координат оказывается не чем иным, как знаменитой **спиралью Архимеда**. Древнегреческий учёный Архимед из Сиракуз (III век до н. э.) вывел уравнение спирали при изучении формы закрученной раковины. Архимедова спираль напрямую связана с числами Фибоначчи («золотым сечением») и часто встречается в природе (от ДНК человека до строения галактик в космосе), широко при-

меняется в технике (при конструировании фрез, кулачковых механизмов, самоцентрирующихся патронов и др.).

Если принять во внимание, что обычно  $r \gg 1/a$ , то после несложных преобразований уравнение (11) значительно упростится

$$\frac{d\varphi}{dr} - a = 0, \quad (13)$$

а его решение даёт простейшее уравнение луча в декартовой и спирали Архимеда в полярной системах координат  $\varphi = ar$ .

Следовательно, ударная кромка буровой коронки должна соответствовать полученному уравнению, что гарантирует равномерное истирание и износ по всей её длине. Оказывается, как следует из нашего решения (12), архимедова спираль обладает ещё одним особым свойством — каждый её элементарный участок длиной  $dl$  на любом расстоянии от центра «замечает» одинаковую площадь ограничивающего её кольца при вращении вокруг центра  $r = 0$ .

Отношение площади кольца произвольной ширины к длине дуги вписанной в него спирали есть величина инвариантная и не зависит от радиуса расположения кольца.

Отсюда приходим к важному выводу: **оптимальная форма лезвия БПРИ в проекции на плоскость забоя скважины должна иметь вид спирали Архимеда** (за исключением небольшой области в центре скважины).

При конструировании БПРИ возможны различные варианты выполнения ударных кромок (рис. 13).

Коронки должны создавать необходимый минимум удельного давления на породу, способствовать удалению бурового шлама, продольной устойчивости и др. В частности, следует всегда стремиться к выполнению БПРИ с максимально возможной суммарной длиной лезвия, что пропорционально снижает её износ и увеличивает срок службы. Однако это требует увеличения в такой же степени общей энергии удара и силовых параметров бурового оборудования.

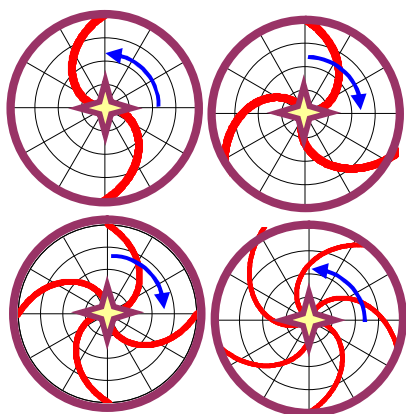


Рисунок 13 Многолучевые ударные кромки буровых коронок ( $n=2, 3, 4, 5\dots$ ) по спиралам Архимеда

В ряде случаев из конструкторско-эксплуатационных соображений может возникнуть необходимость изменить скорость износа лезвия вдоль радиуса скважины. С целью изучения такой возможности обобщим полученные ранее зависимости, для чего запишем обобщённое уравнение архимедовой спирали в виде

$$r = k\varphi^\alpha, \quad (14)$$

где  $k$  — размерный параметр,  $1/\text{м}$ ;  
 $\alpha$  — показатель кривизны, имеющий смысл отклонения искомой кривой от спирали Архимеда,  $0 < \alpha < \infty$ .

При  $\alpha = 0$  спираль вырождается в радиальный луч, исходящий из начала координат, а при  $\alpha \rightarrow \infty$  получаем спираль с бесконечной кривизной (сингулярность) в центре координат.

Общее представление об этих кривых даёт рисунок 14. На рисунке сопоставлены архимедовы спирали с разными показателями кривизны  $\alpha$ . Чем меньше кривизна  $\alpha$ , тем быстрее «распрямляется» спираль по мере возрастания радиуса.

Чтобы судить, как меняются параметры поражения  $A_L$  при вращении разных спиралей вокруг центра скважины, построены графики на рисунке 15.

Параметр «поражения» забоя  $A_L$ , показывающий размер «заметаемой» площа-

ди  $A$ , приходящийся на единицу длины лезвия буровой коронки  $L$ , можно вычислить по формуле

$$A_L = A/L. \quad (15)$$

Определяем «заметаемую» спиралью площадь между радиусами  $r_0, r_1$ :

$$A = \pi(r_1^2 - r_0^2) = \pi \cdot k^2 (\varphi_1^{2\alpha} - \varphi_0^{2\alpha}), \quad (16)$$

а длину спирали находим по формуле

$$L(r) = \int_{\varphi_0}^{\varphi_1} \sqrt{(1 + \alpha^2 k^2 \xi^{2\alpha-2})} d\xi, \quad (17)$$

где  $r_0, r_1, \varphi_0, \varphi_1$  — соответственно радиальные и угловые границы рассматриваемой площади.

В качестве аргумента для графиков принято расстояние до центра скважины  $r$ , а функцией  $A_L$  является отношение площади скважины  $A$ , которую при вращении вокруг центра «заметает» спираль, к её длине  $L$ . Из сопоставления графиков становится понятным, что спиральное лезвие коронки с показателем кривизны  $\alpha < 1$  быстрее (примерно в 2 раза) будет изнашиваться ближе к периферии скважины, а при показателе кривизны  $\alpha > 1$  износ ударного лезвия будет преобладать в центральной области скважины.

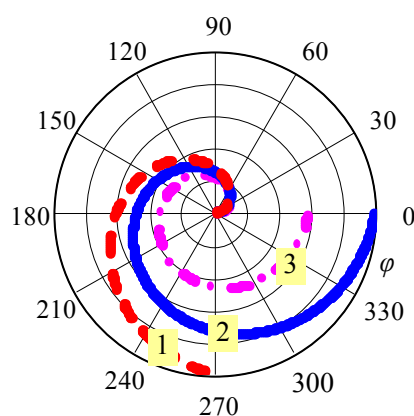


Рисунок 14 Особенности поведения обобщённых спиралей Архимеда:  
 1)  $\alpha=0,7$ ; 2)  $\alpha=1,0$ ; 3)  $\alpha=1,2$

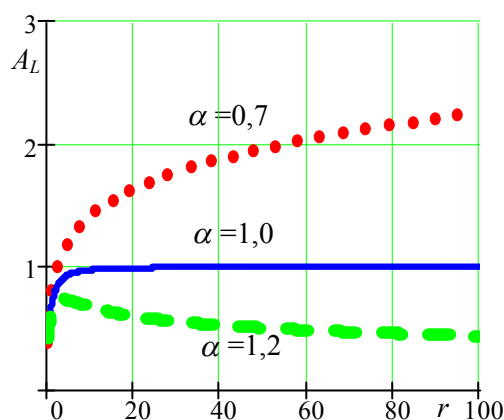


Рисунок 15 Особенности поведения обобщённых спиралей Архимеда:

1)  $\alpha = 0,7$ ; 2)  $\alpha = 1,0$ ; 3)  $\alpha = 1,2$

Оптимальным решением с точки зрения равномерности износа и долговечности эксплуатации, безусловно, является лезвие, выполненное по классической спирали Архимеда, у которой  $\alpha = 1$  и функция поражения  $A_L = Const$ . Даже незначительное (на  $\pm 20 \dots 30 \%$ ) отклонение ударного лезвия от оптимальной формы приводит к многократному (в 2...3 раза) изменению функции поражения  $A_L$ , т. е. к неравномерности износа и, как следствие, пропорциональному уменьшению срока эксплуатации БПРИ. Заметим, что существующие БПРИ работают далеко вне области оптимального износа.

Для оценки оптимальности работы бурового инструмента введём функцию неравномерности поражения забоя скважины лезвием коронки

$$\Delta = \frac{1}{r_1 - r_0} \int_{r_0}^{r_1} \sqrt{\left( \frac{A_L(\xi)}{A_{LC}} - 1 \right)^2} d\xi, \quad (18)$$

где  $A_{LC}$  — усреднённая функция поражения забоя скважины в границах изменения радиуса  $r_0, r_1$ , определяемая по формуле усреднения

$$A_{LC} = \frac{1}{r_1 - r_0} \int_{r_0}^{r_1} A_L(\xi) d\xi. \quad (19)$$

Для буровой коронки, выполненной по классической спирали Архимеда  $\alpha = 1$ , как и следовало ожидать, относительная неравномерность поражения забоя  $\Delta = 0$ .

Предельным случаем является традиционная буровая коронка с прямолинейным долотчатым лезвием (рис. 1, 2, 4) — самая «древняя» по возрасту и до сих пор широко распространённая в горной промышленности. Её параметры «антиоптимальности» зашкаливают и являются предельными. После расчёта по формулам (14)–(19) для долотчатой коронки радиуса  $r$ , опустив промежуточные выкладки, получим такие результаты:

1) показатель кривизны лезвия  $\alpha = 0$ ;

2) длина лезвия  $L = 2r$ ;

3) заметаемая лезвием площадь забоя  $A = \pi \cdot r^2$ ;

4) параметр поражения забоя  $A_L = A/L = \pi \cdot r/2$ ;

5) усреднённая функция поражения забоя скважины в границах изменения радиуса от 0 до  $r$  равна  $A_{LC} = \pi \cdot r/4$ ;

6) функция неравномерности поражения забоя скважины  $\Delta = 1$ .

Таким образом, мы выделяем два предельных случая работы бурового инструмента:

– оптимальной формы по классической спирали Архимеда, у которой показатель кривизны  $\alpha = 1$ , когда достигается минимальная неравномерность поражения забоя  $\Delta = 0$ ;

– традиционной прямолинейной долотчатой формы с показателем кривизны  $\alpha = 0$ , у которой неравномерность поражения забоя  $\Delta = 1$  предельно высока.

Эти разновидности бурения можно рассматривать как антиподы, все остальные варианты воздействия на породный забой скважины занимают промежуточное положение по показателю кривизны  $0 < \alpha < \infty$  и функции неравномерности поражения забоя  $0 < \Delta < 1$ .

В заключение сделаем несколько замечаний гносеологического и методического характера.

Возникает закономерный вопрос: каким образом вот уже в течение более трёх ве-

ков развития горной техники и технологии остались неизменными малоэффективные способы бурения и конструкции бурового долота? Даже зубчатая шарошка — апофеоз инженерной мысли XX века — является, по сути, повторением идеи разрушения забоя радиальными зубьями, т. е. повторением долота с крайне плохой функцией неравномерности поражения забоя  $\Delta = 1$ .

Объяснение этому казусу — в неявном господстве традиционной научной доктрины развития науки и техники, в движении по вектору инерции мышления, когда основные усилия инженеров направлены на устранение узких мест и отдельных недостатков, на экстенсивное изменение выходных параметров конструкторско-технологического изделия (увеличение массы, мощности, размеров, энергии и пр.). Тогда как согласно прогрессивной доктрине следует вскрыть основные технические противоречия и на основе отказа от традиционных подходов предложить новые технические решения.

Нетрудно заметить, что в историческом развитии техники и технологии бурения проявился основной движущий закон диалектики — «закон отрицания отрицания», когда новое развивается из старого путём преодоления его антагонистического противоречия. Мы видим вначале смену примитивного ударно-поворотного способа бурения более прогрессивным вращательным (шарошечным), а затем, на более высоком уровне, возврат к идее ударно-поворотного бурения с оптимальными параметрами, позволяющими скачком увеличить его эффективность.

В результате перехода на оптимальные параметры конструкции БПРИ и новую версию ударно-поворотного способа бурения можно существенно увеличить эффективность буровой техники: в 2...5 раз снизить износ и расход БПРИ, энергоёмкость бурения и массу бурильной машины, а в итоге повысить в 2–3 раза техническую скорость проходки скважины.

Однако для эффективного использования возможностей прогрессивного ударно-поворотного способа бурения следует суще-

ственно пересмотреть основные конструкторские и технологические концепции бурения и перейти к созданию принципиально новых конструкций буровых агрегатов, чему будут посвящены последующие публикации.

### **Выводы**

Методологическая особенность проведённых исследований состоит в углублённом изучении закономерностей геомеханического взаимодействия режущей кромки БПРИ с породами скважины при бурении.

Выполненные исследования позволили получить следующие основные результаты, обладающие научной новизной и практической полезностью:

- сформулированы требования к режущему инструменту;
- установлены принципиальные различия в действующих на режущую кромку усилиях при ударно-поворотном и сдвиговом воздействии на породный забой;
- впервые сформулированы критерии оптимизации и конкретизированы требования к оптимальным параметрам БПРИ;
- предложена конструкция нового БПРИ для ударно-скалывающего разрушения породы с симметричными клиновыми гранями и твёрдосплавной вставкой;
- разработана математическая модель оптимизации конфигурации лезвия БПРИ в проекции на забой;
- впервые доказано, что оптимальной формой лезвия БПРИ является спираль Архимеда;
- исследованы иные формы лезвий БПРИ с использованием обобщённой спирали Архимеда.

Задача дальнейших исследований заключается в реализации теоретических результатов в конкретные конструктивные разработки нового бурового агрегата.

Автор выражает благодарность своему другу профессору Латышеву О. Г. (Уральский государственный горный университет) за присланную им монографию [10] и возможность ознакомиться с его работами по проблеме разрушений горных пород.

**Библиографический список**

1. Абубакиров, В. Ф. Буровое оборудование : справочник в 2-х т. Т. 2. Буровой инструмент [Текст] / В. Ф. Абубакиров, Ю. Г. Буримов, А. Н. Гноевых. — М. : ОАО «Издательство "Недра"», 2003. — 494 с.
2. Волик, Д. А. Буровые породоразрушающие инструменты [Текст] : учеб. пособ. для вузов / Д. А. Волик. — М. : РГУ нефти и газа имени И. М. Губкина, 2014. — 94 с.: ил.
3. Абатуров, В. Г. Физико-механические свойства горных пород и породоразрушающий буровой инструмент [Текст] / В. Г. Абатуров. — Тюмень : Нефтегазовый университет, 2007. — 269 с.
4. Волков, А. С. Буровой инструмент [Текст] / А. С. Волков. — М. : Недра, 1980. — 285 с.
5. Lundberg, L. Efficiency of percussive drilling with extension rods [Text] / L. Lundberg. — International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts. — August 1987. — Volume 24, Issue 4. — P. 213–222.
6. Крюков, Г. М. Физика разрушения горных пород при бурении и взрывании. Т. 1. [Текст] / Г. М. Крюков. — М. : Горная книга, 2006. — 330 с.
7. Литвинский, Г. Г. Основы теории резания и разрушения горных пород [Текст] / Г. Г. Литвинский // Сб. науч. трудов ДонГТУ. — Алчевск : ДонГТУ, 2017. — Вып. 8 (51). — С. 5–15.
8. Литвинский, Г. Г. Пинч-эффект при разрушении породы клиновым горным инструментом [Текст] / Г. Г. Литвинский // Сб. науч. трудов ДонГТУ. — Алчевск : ДонГТУ, 2018. — Вып. 9 (52). — С. 5–20.
9. Алмазы и сверхтвёрдые материалы для армирования горных инструментов [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://mydocx.ru/10-138651.html>, 2016.
10. Латышев, О. Г. Разрушение горных пород [Текст] / О. Г. Латышев. — М. : Теплотехник, 2007. — 672 с.

© Литвинский Г. Г.

**Рекомендована к печати д.т.н., проф., зав. каф. ГЭМиО ДонГТУ Корнеевым С. В.,  
д.т.н., проф., зав. каф. СПСиШ ДонНТУ Борщевским С. В.**

Статья поступила в редакцию 01.10.18.

**проф. Литвинський Г. Г.** (ДонДТУ, м. Алчевськ, ЛНР)

**ОПТИМІЗАЦІЯ ПАРАМЕТРІВ БУРОВОГО ІНСТРУМЕНТУ. СПІРАЛЬ АРХІМЕДА**

Виконано короткий ретроспективний екскурс в історію розвитку бурової техніки від ударно-поворотного до шарошечного способу буріння з позицій геомеханічної взаємодії бурового породоруйнівного інструменту (БПРІ) з гірською породою. Проаналізовано особливості роботи БПРІ при різних способах буріння виходячи з виникаючих зусиль на кромці різця. Розкрито основні технічні протиріччя БПРІ, сформульовано вимоги до нього та критерії оптимізації. Розглянуто недоліки руйнування породи під прямолінійним лезом бурової коронки. Запропоновано оптимальну форму леза БПРІ у вигляді гострого клину з тонкою по центру твердосплавною вставкою. Сформульовано критерій ефективності роботи БПРІ, розроблено математичну модель і шляхом вирішення диференційного рівняння доведено оптимальну форму БПРІ у вигляді спіралі Архімеда. Дано оцінку ефективності застосування оптимізованого БПРІ.

**Ключові слова:** теорія буріння, способи буріння, бурова коронка, вимоги до коронки, критерії оптимізації буріння, математична модель буріння, форма леза коронки, спіраль Архімеда, ефективність буріння.

**Prof. Litvinsky G. G.** (DSTU, Alchevsk, LPR)

**OPTIMIZATION OF DRILLING TOOL PARAMETERS. ARCHIMEDES SPIRAL**

A short retrospective digression into the history of development of drilling equipment was made, starting from a swivel-to-roller drilling method from the position of geomechanical interaction of



*a rock-cutting drilling tool (RCDT) with rock. The analysis of the operation features of the RCDT for different drilling methods is given based on the arising forces at the edge of the tool. The main technical contradictions of the RCDT were revealed, requirements for it and optimization criteria have been formulated. The defects of rock destruction under the straight blade of the drill bit are considered. The optimal form of the RCDT blade is proposed in the form of an acute wedge with a thin carbide insert in the center. The criterion of the RCDT work efficiency is formulated, the mathematical model has been developed and by solving the differential equation the optimal form of the RCDT in the form of the Archimedes spiral has been proved. The effectiveness of the optimized RCDT has been assessed.*

**Key words:** *boring theory, drilling methods, drill bit, chisel requirements, drilling optimization criteria, mathematical model of boring, chisel shape, Archimedes spiral, drilling efficiency.*