

УДК 622.232.8

*д.т.н., проф. Литвинский Г. Г.
(ДонГТИ, г. Алчевск, ЛНР)*

ВЫБОР И ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ИСПОЛНИТЕЛЬНОГО ОРГАНА БУРО-ПРОХОДЧЕСКИХ МАШИН И АГРЕГАТОВ

Проведен краткий аналитический обзор развития породоразрушающего инструмента (ПРИ) для буро-проходческих машин и агрегатов (БПМиА). С позиций геомеханики взаимодействия исполнительных органов (ИО) с породами выявлены их основные недостатки. Показаны основные прогрессивные тенденции его совершенствования. На основе анализа геомеханики взаимодействия ПРИ с горными породами сформулированы основные конструкторско-технологические требования к нему. Предложен принцип минимизации сил трения на режущей кромке ПРИ и обоснованы его оптимальные параметры в форме ударного клина с углом заточки до 40...45° для создания пинч-эффекта в виде магистральных разрывных трещин. Предложена новая конструкция ИО с зонно-секторным или в виде спирали Архимеда размещением ударных клиньев на плоской рабочей поверхности ИО. Показана технико-экономическая целесообразность предложенных разработок.

Ключевые слова: бурение, проходка, скважина, горная выработка, породоразрушающий инструмент, ударный клин, исполнительный орган, аналитический обзор, геомеханика взаимодействия, принцип минимизации, оптимальные параметры, пинч-эффект, спираль Архимеда.

1 Обоснование актуальности проблемы, цели и задачи исследований

Освоение сырьевых ресурсов является одной из базовых основ технологического развития человеческой цивилизации. Сооружение подземных горных выработок — доминирующий атрибут технологии подземного строительства и промышленной добычи большинства сырьевых ресурсов. Особенно сложные задачи перед буро-проходческой техникой возникли при переходе на глубокие и сверхглубокие скважины и подземные выработки [1–5].

Как правило, минеральные ресурсы приходится добывать путем проведения многочисленных горных выработок различного назначения, причем в последнее время преобладает тенденция использования все более совершенных проходческих комбайнов, буровых агрегатов и комплексов [6–10]. Требования к горной технике постоянно возрастают, поскольку скорость проведения горных выработок и затраты на их сооружение не удовлетворяют запросы практики. Поэтому для каждого типа горно-геологических условий разрабатываются

многочисленные конструкции буро-проходческих машин и агрегатов (БПМиА), которые оснащены исполнительными органами и породоразрушающим инструментом разнообразных конструкций.

Проходческая техника прошла долгий и сложный путь развития и совершенствования, причем настоящим, хотя и не вполне очевидным, триггером (побудителем) ее развития можно с полным правом считать используемый породоразрушающий инструмент (ПРИ), которым оснащен (вооружен) ее исполнительный орган [8–10].

Каждый очередной переход на более совершенный тип ПРИ вызывал закономерное появление новых видов проходческой техники: если исходные примитивные инструменты (кайло, обушок) предельно определяли начальный уровень ручной технологии, то дальнейшее изменение ПРИ приводило к соответствующему совершенствованию буро-проходческой техники: пики и долота — ударные машины, резцы — ударно-вращательные буры и шнековые комбайны; шарошки — роторные комбайны, буровые станки и т. д. [7].

В настоящее время буровая и проходческая техника столкнулась с необходимостью преодоления целого ряда сложных технических противоречий. В частности, необходимо снизить удельную энергоёмкость разрушения пород, значительно повысить стойкость ПРИ, резко сократить непроизводительные затраты времени на вспомогательные процессы и операции. При этом оказалось, что попытки существенно повысить эффективность буро-проходческой техники приводили к заметному возрастанию массовых, энергетических и габаритных ее показателей.

Еще остается нерешенным ряд технических проблем и задач по развитию и совершенствованию горнопроходческой техники. В первую очередь к таким задачам относятся:

1. Разработка с позиций геомеханики теоретических основ механического разрушения пород.

2. Обоснование наиболее эффективных конструкций породоразрушающего инструмента и способов его воздействия на породный забой.

3. Анализ и оптимизация конструкции исполнительного органа (ИО) буро-проходческих машин.

4. Создание расчетных методов определения и оценки параметров механического разрушения пород для различных типов ПРИ и ИО.

От решения этих задач во многом зависит технический прогресс в ресурсодобывающих отраслях промышленности. Поскольку этот прогресс предопределен техническим уровнем буро-проходческих машин и агрегатов и их главным конструктивным элементом — исполнительным органом, — техническая проблема разработки эффективных БПМиА является весьма актуальной.

Основная идея, положенная в основу решения поставленной технической задачи, состоит в использовании главных положений геомеханики разрушения пород при воздействии на них разных типов ПРИ

для обоснования параметров исполнительного органа БПМиА.

Цель исследования — выбор и обоснование параметров ПРИ, а на его основе — типа и конструкции исполнительного органа буро-проходческих машин.

Объект исследования — конструктивные параметры исполнительного органа БПМиА, **предмет** исследования — закономерности геомеханического взаимодействия исполнительного органа и горных пород.

Основные задачи исследования:

- на основе рассмотрения взаимодействия ПРИ с горной породой выявить тенденции развития и обосновать оптимальные форму, размеры и режимы его работы;

- выполнить анализ существующих исполнительных органов БПМиА с различными типами ПРИ и сформулировать требования к ним;

- обосновать и разработать новый тип исполнительного органа БПМиА, оценить его основные показатели.

2 Тенденции развития и совершенствования породоразрушающего инструмента (ПРИ)

Вся обозримая история развития техники, в том числе процесс создания буро-проходческих машин и агрегатов (БПМиА), отражает устранение постоянно существующего технического противоречия между достигнутым уровнем технологии и постоянно возрастающими запросами промышленности. Анализ исторических этапов развития ПРИ показывает, что вначале (от древности вплоть до конца XIX века) преобладали лопастные долота с простейшим ударно-поворотным способом бурения скважин. Способ сводился к подъёму долота, повороту вокруг оси и сбрасыванию его на забой для выкалывания породы. Производительность была низкой, а глубина проходки скважин — малой (рис. 1).

Коренные изменения в буровой технике произошли во время второй технической революции (последняя треть XIX — начало XX вв.), что было «...непосредственно

вызвано к жизни превышением потребности над возможностью удовлетворить её прежними средствами производства» (Маркс К., Энгельс Ф. Сочинения. М., 1973. Том 47. С. 461). Появление электромоторов и двигателей внутреннего сгорания позволило перейти к вращательному, а далее — к комбинированным способам бурения: ударно-вращательному и вращательно-ударному, от лопастного долота — к резцам и коронкам различных конструкций.

Основные положения теоретических основ разрушения горных пород буровым породоразрушающим инструментом были изложены в работах [8, 10 и др.]. В результате было установлено, что от выбранного способа взаимодействия ПРИ с породами забоя скважины во многом зависит производительность разрушения пород и скорость проходки горной выработки.

В мягких и средней крепости породах производительным оказался вращательный способ бурения, основанный на применении резцов, срезающих породную «стружку» с забоя. По сути, схема такого бурения аналогична работе обычного резца металлорежущего станка (рис. 2).

Резцы нашли применение для условий вязких, пластичных и малоабразивных пород 1–5-й категорий твердости, для чего используются долота с твердосплавными вставками, резцами, PDC элементами.

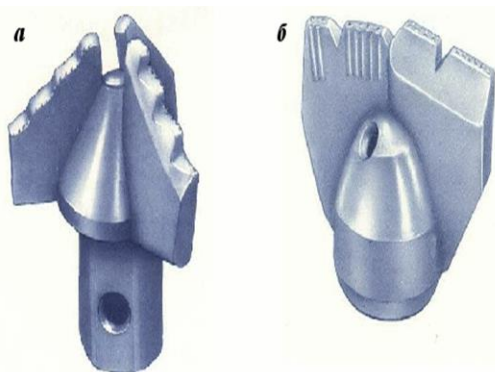


Рисунок 1 Буровые лопастные долота для ударного бурения пород: а — трёхлопастное; б — двухлопастное



Рисунок 2 Резцы для вращательного бурения с твердосплавными вставками

Однако в породах повышенной прочности резцы быстро выходят из строя в результате износа и затупления, поскольку высокие силы трения при вращении режущей кромки по абразивному породному забою вызывают из-за бурного местного тепловыделения ее нагрев, размягчение, износ и затупление.

Очевидно, сам процесс бурения способом резания самопроизвольно формирует механизм нелинейной положительной обратной связи «трение — нагрев — затупление». В терминах физики нелинейных динамических процессов при **резании** породы реализуется так называемый **режим с обострением** в виде динамического закона, при котором взаимозависимые параметры (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.

Исходя из этого, для бурения в породах средней и высокой прочности пришлось перейти на ударно-вращательный способ, когда вращение буровой коронки дополнительно сопровождается ударными нагрузками на породу. За счет удара режущая кромка коронки углублялась и внедрялась в породу, а при ее вращении происходили

срез и откалывание неровностей выемки. Тем самым обеспечивается комбинированное ударно-скалывающее воздействие на породы забоя скважины (рис. 3).

Как показано в работах [11–13], такие конструкции коронок при ударе по забою не производят раскола в породе, а создают в ней лишь лунки смятия и дробления. Низкая эффективность существующих коронок объясняется тупыми углами заточки режущей кромки ($>90...120^\circ$), что исключает возможность появления раскольных трещин и последующих лунок выкола. Эффективность такого типа ПРИ поэтому была достаточно низкой. Попытки выполнить лезвия коронок более острыми были обречены на неудачу, поскольку, в условиях постоянного прижатия к забою напорными усилиями, тангенциальное скольжение режущих кромок приводило к их быстрому нагреву, «выкрашиванию», затуплению и выходу из строя.

Апофеозом развития вращательной техники бурения следует по праву считать изобретение шарошки в 1909 году американским инженером Говардом Хьюзом, что кардинально изменило не только особенности взаимодействия ПРИ 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 к забою с большим напорным усилием (рис. 4).



Рисунок 3 Крестообразные коронки для ударно-скалывающего бурения шпуров



Рисунок 4 Одно-, двух- и трехшарошечное долото для бурения скважин

Шарошки оказывают дробяще-скалывающее воздействие на породу и их применяют для бурения скважин в породах любой абразивности и твердости.

Для проходческих комбайнов нашли применение дисковые шарошки (рис. 5) диаметром 300...500 мм и более. Обращает на себя внимание притупленная форма дисков, которая обусловлена стремлением повысить их устойчивость крутильным усилиям при движении по круговым траекториям на поверхности породного забоя.

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.

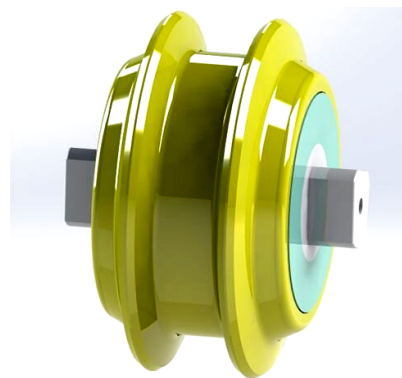


Рисунок 5 Двухдисковая шарошка для исполнительного органа проходческого комбайна

Однако необходимо отметить и явные недостатки такого способа бурения. В первую очередь следует отметить высокую стоимость и сложную конструкцию шарошки, что снижает надежность ее работы. С целью повышения прочности контактную режущую кромку шарошки выполняют из высокопрочного сплава и придают затупленную форму. Поэтому под такой кромкой разрушение породы проходит в режиме ее раздавливания и истирания, что требует чрезмерных напорных усилий на забой, энергозатратно и ведет к быстрому износу.

Анализ особенностей работы с учетом механизма взаимодействия с горными породами позволяет сформулировать основные общие требования к ПРИ:

1) стойкость и прочность при действии статических и динамических усилий сжатия, раскола 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 износе инструмента.

3 Обоснование оптимальных параметров породоразрушающего инструмента (ПРИ)

Рассмотрим работу различных ПРИ с общих позиций геомеханики. Основным процессом при бурении является механическое деформирование и разрушение пород в забое скважины под режущей кромкой инструмента. При этом процессы деформирования и разрушения породы под действием ПРИ весьма сложны и разнообразны: скол, резание, смятие, раздавливание, истирание и усталостный износ, которые могут комбинироваться в различных сочетаниях в зависимости от конструкции и режимов работы ПРИ. Эти сложные деформационные процессы возникают за счёт статического или динамического воздействия ПРИ на породы забоя. Знакопеременное деформирование и разрушение

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

Общеизвестно, что ПРИ разделяется по характеру геомеханического воздействия на породу на следующие типы:

– ударно-дробящего действия (двух- и трехшарошечные буровые долота), разрушение породы происходит за счет перекачивания зубьев шарошек по забою с нанесением ударов;

– дробяще-скалывающего действия (дисковые буровые долота), разрушающие породу дроблением и скалыванием за счет ударного и скалывающего воздействия зубьев на забой;

– режуще-истирающе-скалывающего действия (инструмент, армированный синтетическими и сверхтвёрдыми материалами), а также за счет срезания тонкого слоя породы при внедрении в нее резцов;

– комбинированного действия — за счет совмещения в одном долоте режущих кромок разного действия.

Такого рода классификации, правильные по существу, тем не менее обладают многими недостатками, поскольку опираются лишь на описательно-качественные характеристики взаимодействия ПРИ с породой, не раскрывая и не оценивая базовые количественные параметры разрушения. Поэтому задача разработки научно обоснованной классификации силового взаимодействия ПРИ с породой ждет своего решения.

Оказывается, что разные способы бурения (ударное, режущее, дробящее, скалывающее и их различные комбинации) существенно различаются одним из важнейших критериев работы ПРИ: соотношением напорных N (нормальных к породной

поверхности) и сдвигающих T (касательных к забою) усилий, приложенных к режущей кромке ПРИ в процессе его взаимодействия с породным забоем.

До сих пор этому важнейшему соотношению N и T уделялось недостаточное внимание (рис. 6).

Сдвигающие усилия T на лезвии резца, движущегося со скоростью v , слагаются из сил сопротивления разрушению S и сил трения F :

$$T = S + F. \quad (1)$$

Сдвигающие усилия T возникают при перемещении резца со скоростью v по касательной к поверхности породного забоя скважины. Чаще всего это происходит в результате вращения БПРИ в забое, т. е. в подавляющем большинстве существующих способов разрушения породы.

В свою очередь, силы трения прямо пропорциональны нормальной силе N прижатия резца к породе:

$$F = f \cdot N, \quad (2)$$

где f — коэффициент трения стали по породе, который зависит от условий контакта на фронте разрушения (заточки инструмента, температуры, наличия поверхностно-активных веществ и т. д.).

Опережающая резец трещина раскола появляется только при острой кромке лезвия, в противном случае при затуплении резца откол породы затруднен, а расход энергии резко увеличивается [7].

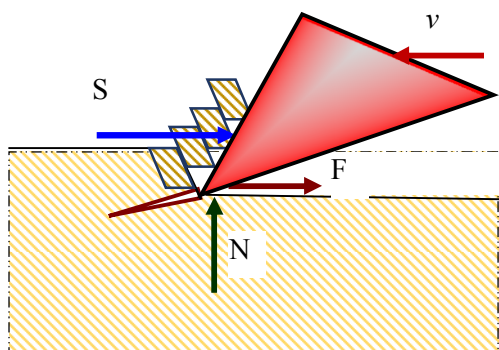


Рисунок 6 Схема работы резца и действующих на него сил [12]

Поэтому при разработке ПРИ необходимо обратить самое пристальное внимание на базовый принцип, состоящий в устранении причин появления сил трения или их минимизации.

На рисунке 7 показан результат действия заостренного ударного клина на породе с образованием магистральной трещины раскола под режущей кромкой ПРИ и призмами выкола.

Как правило, существующие механические способы разрушения породы (за исключением ударно-поворотного и шарошечного), основаны на перемещении ПРИ по касательной траектории к забою. И даже наиболее прогрессивный способ шарошечного бурения сопровождается крутильно-изгибными усилиями, действующими на диск или зубья шарошки при ее движении по круговой траектории.

Исходя из выполненного анализа работы существующих конструкций ПРИ, можно сделать ряд важных выводов:

– существующие конструкции ПРИ основаны на использовании касательных усилий при непрерывном, зачастую нерегулируемом действии напорных усилий на забой, что приводит к быстрому затуплению и износу режущих кромок, переизмельчению породы и повышает энергозатраты на ее разрушение;

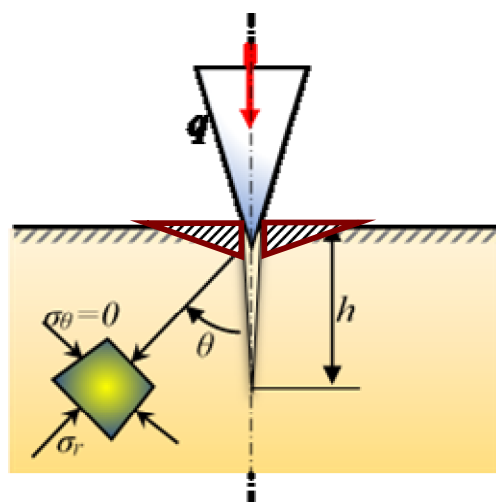


Рисунок 7 Трещины раскола и пинч-эффект под клиновым ПРИ

– касательные (сдвиговые) усилия при работе ПРИ играют сугубо негативную роль и крайне нежелательны из-за создания крутильно-изгибных усилий в теле ПРИ и особенно из-за создания сил трения на его режущем лезвии;

– силы трения рассеивают энергию в тепловой поток, который (из-за разницы в теплопроводности пары «металл — порода» десятки раз) направлен в тело ПРИ и разогревает режущую кромку до температуры плавления, способствует ее затуплению и быстрому износу, чем заметно снижает эффективность работы ПРИ;

– для исключения касательных (сдвиговых) усилий на контакте ПРИ с породой идеальным вариантом разрушения является ударное возвратно-поступательное движение острой кромки по нормали к поверхности породы и создание за счет пинч-эффекта трещин раскола [13].

Старинный ударно-поворотный способ бурения оказался единственным, где минимизированы касательные усилия, поскольку разрушение производится ударом долота по нормали к поверхности забоя, а поворот долота выполняют при поднятом его состоянии без контакта с породой. Таким образом, создают прерывистые условия контакта ПРИ с породой (дискретные напорные усилия) в отличие от всех существующих способов бурения.

Однако ударно-поворотный способ бурения в существующем виде обладает низкой производительностью из-за малой частоты ударов, частых перерывов для уборки шлама и конструктивных недостатков долота. С другой стороны, вращательно-ударные способы бурения хотя и высокопроизводительны, но имеют низкую энергоэффективность и достигли пика возможностей своего совершенствования.

Возникла необходимость **создания нового типа ПРИ** путем устранения технического противоречия между ударно-поворотным и вращательными способами бурения. При этом в первую очередь следует определиться с наиболее эффективным типом ПРИ.

Как следует из работ [11, 12], наиболее перспективным ПРИ можно считать инструмент в форме ударного клина с углом заточки до $40...45^\circ$, который должен обеспечивать прямой удар по породному забою с целью создания за счет пинч-эффекта магистральных продольных разрывных трещин. Если угол заточки (рис. 8) лезвия клина β будет более 45° (а на практике он достигает $100...110^\circ$), то условия для появления пинч-эффекта отсутствуют, разрушение породы происходит по механизму раздавливания и истирания, т. е. крайне энергозатратно [12].

Ударный клин с необходимой заточкой создает разрушение пород под режущей кромкой вдоль ее протяженной линии в условиях почти плоско-деформированного напряженного состояния. Это значительно (в 2–3 и более раз) эффективнее по сравнению с разрушением в условиях объемного напряженного состояния, которое создается при точечном (пикой, зубом шарошки или долота и т. п.) воздействии на породу.

После того, как выбор оптимального ПРИ произведен, возникает задача его конструктивного воплощения на исполнительном органе буро-проходческого агрегата.

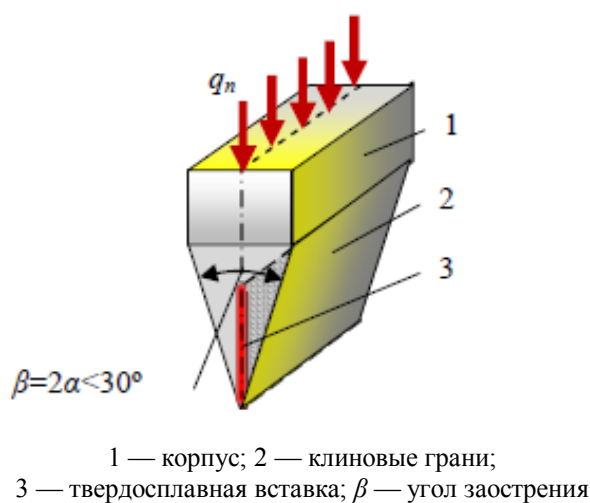


Рисунок 8 Новая конструкция клинового ПРИ [11]

4 Оптимальное размещение клинового ПРИ на забойной поверхности ИО

Исходя из выполненного анализа работы ПРИ, сформулируем **требования к исполнительному органу БПМиА** для его эффективной работы (табл. 1).

Реализацию ИО с размещением ПРИ, соответствующим этим требованиям, нельзя отнести к заурядным проблемам, подтверждением чему является факт отсутствия до сих пор ИО подобного типа в известных буро-проходческих машинах и агрегатах.

Одним из основных недостатков существующих ИО является неравномерность (зональность) разрушения по площади породного забоя. Неравномерность разрушения приводит к тому, что:

– возрастают в 1,5...2 раза непроизводительные затраты энергии на переизмельчение породного шлама в забое;

– происходят неравномерные затупление и износ лезвия инструмента, быстро прогрессирующий на его концах, что резко (в разы) снижает производительность бурения;

– увеличиваются затраты времени на замену затупленных коронок и повышенный расход дефицитных материалов.

Для устранения этой причины необходимо обеспечить равномерность работы каждого участка лезвия коронки. Теоретически это условие можно выполнить, если произвольный участок лезвия коронки будет разрушать один и тот же объем породы при движении по забою.

Основная идея оптимизации ПРИ с целью достижения равномерности разрушения породы ударными клиньями заключается в том, чтобы на каждый элементарный участок лезвия коронки приходилась одна и та же разрушаемая («заметаемая») площадь.

Добиться полного соответствия этим требованиям, как показано в работе [11], можно путем размещения клинового ПРИ на исполнительном органе в виде спиралей Архимеда. В полярной системе координат уравнение спирали Архимеда полностью

соответствует уравнению луча, выходящего из начала декартовой системы координат:

$$\varphi = a \cdot \rho, \quad (3)$$

где φ , ρ — полярный угол и полярный радиус;

a — численный параметр, отвечающий за степень кривизны спирали.

Таблица 1

Базовые конструктивно-технологические требования к ИО БПМиА

Условие	Достижимый эффект
1) выполнить ПРИ в виде ударных клиньев с углом заострения не более 40...50°	наиболее эффективный раскол породы за счет пинч-эффекта с последующим ее выколом
2) исполнительный орган должен быть плоским, перпендикулярным оси выработки	формирует плоский породный забой, сводит к минимуму тангенциальные усилия, облегчает удаление бурового шлама
3) создать ударное воздействие клинового ПРИ перпендикулярно породам забоя, а поворот ПРИ — лишь при подъеме ИО	устранение сдвигающих нагрузок на клинья, полное использование пинч-эффекта для раскола пород
4) ударные клинья выполнить в виде плоских кривых и с ударным воздействием по нормали к забою	минимизация касательных (сдвиговых) усилий, действующих на ПРИ, повышение устойчивости клиньев и глубины раскола породы
5) режущие кромки ударных клиньев выполнить в виде протяженных линий, а соседние клинья располагать параллельно	интенсификация разрушения за счет перехода от трехосного к квазидвухосному НДС пород между кромками
6) расстояние между параллельными ударными клиньями должно быть соразмерным ширине выкола породы после единичного удара	повышение эффективности разрушения за счет взаимодействия смежных клиньев и формирования лунок выкола увеличенного объема

Ударная кромка буровой коронки должна соответствовать уравнению (3), что гарантирует равномерное истирание и износ по всей её длине. Как показано в [11], спираль Архимеда обладает особым свойством — каждый её элементарный участок длиной dl на любом расстоянии от центра «заметает» одинаковую площадь ограничивающего её кольца при вращении спирали вокруг центра $\rho = 0$.

Отношение площади кольца произвольной ширины к длине дуги вписанной в него спирали есть величина инвариантная и не зависит от радиуса расположения кольца [11].

Возможны различные варианты выполнения ударных клиновых кромок (рис. 9) за счет вариации кривизны спиралей и числа их лучей в проекции на породный забой.

Коронки должны создавать необходимый минимум удельного давления на породу, способствовать удалению бурового шлама, продольной устойчивости и др. В частности, следует всегда стремиться к выполнению ПРИ 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 всех связанных с ним силовых параметров бурового оборудования.

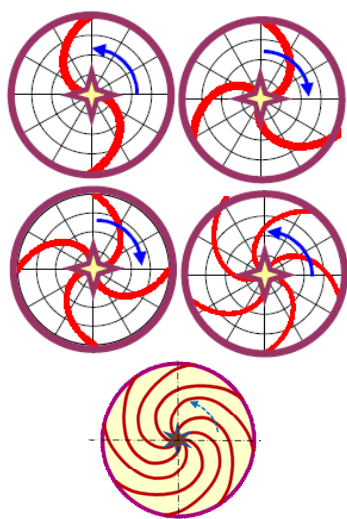


Рисунок 9 Многолучевые ударные кромки буровых коронок ($n = 2, 3, 4, 5 \dots$) по спиральям Архимеда

Рассматривая особенности работы клинового ПРИ, имеющего форму спирали Архимеда, следует отметить, что он может использоваться при всех возможных режимах воздействия на породный забой — от ударно-вращательного до вращательно-ударного.

Наиболее эффективным режимом, как было показано ранее, является ударно-поворотный, когда после прямого удара лезвиями по породному забою следует подъем коронки, совмещенный с поворотом вокруг ее оси на некоторый угол. При этом направленность ее, по сути, дискретного вращения всегда следует выбирать в сторону выпуклости лучей спирали. Тем самым достигается качественная очистка породного забоя за счет отброса бурового шлама к периферии скважины и выноса его из забоя промывочной жидкостью (буровым раствором).

Кроме того, при движении бурового раствора от центра забоя к стенкам скважины благодаря спиральной форме клиновой кромки происходит естественное «закручивание» потока, он приобретает вращение, чем облегчаются очистка забоя и вынос бурового шлама.

Таким образом, предложенная конструкция ИО с режущей кромкой в виде спирали Архимеда отвечает всем сформулированным выше требованиям (табл. 1), что дает ему неоспоримые преимущества перед известными конструкциями ИО, а именно:

- сведены к минимуму касательные усилия на ударных клиньях, что заметно повышает их стойкость и снижает износ;
- на забое формируются параллельные линии выкола, что упрощает разрушение породного забоя;
- ударные клинья расположены по спирали Архимеда, создавая равномерно распределенную по площади забоя зону поражения;
- обеспечена полная очистка забоя от бурового шлама путем подвода струи промывочного раствора перед каждой кромкой;
- промывочный раствор, попадая между кромок спирали Архимеда, которая выполняет функцию завихрителя, получает вращательный импульс, что облегчает промывку;

– широкий диапазон выбора параметров размещения режущей кромки путем изменения числа лучей и кривизны спирали Архимеда.

На рисунке 10 показан вариант новой буровой коронки, в конструкции которой реализованы сформулированные выше основные требования к ИО. Нарушение одного из требований выразилось в ее конструктивном недостатке — криволинейная, а не плоская, как необходимо, форма обращенного к забою ИО, поскольку на момент разработки принцип минимизации касательных усилий на кромке ПРИ не был четко осознан и сформулирован. Теперь этот недостаток можно легко исправить, выполнив площадь, на которой размещены режущие кромки, плоской. К тому же переход к плоской форме режущих кромок заметно упрощит и удешевит изготовление ИО.

Несмотря на неоспоримые преимущества нового типа ПРИ и ИО буропроходческих машин и агрегатов, нельзя не упомянуть и ряд их недостатков.

В первую очередь следует указать на повышенную сложность такого ПРИ, обусловленную высокими требованиями к исходным материалам и точности изготовления, что ведет к увеличению стоимости. Кроме того, область применения нового ПРИ ограничена скважинами небольшого диаметра (до 100 мм), поскольку трудности с изготовлением ИО и его обслуживанием значительно возрастают.

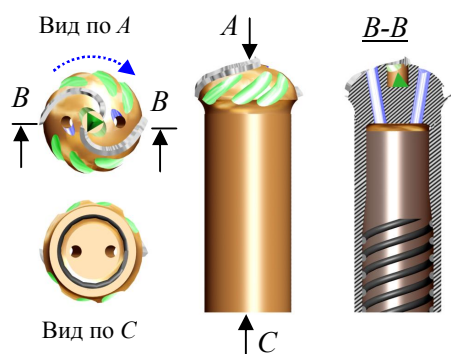


Рисунок 10 Вариант буровой коронки с двулучевой режущей кромкой по спиралам Архимеда

Поэтому для скважин и горных выработок большого диаметра (до 10 и более метров) был разработан в соответствии с требованиями (табл. 1) новый тип ИО, полностью им отвечающий.

Главной конструктивной особенностью нового ИО следует считать секторальное зонирование на его плоскости одинаково ориентированных в каждом секторе прямолинейных ударных клиньев. С этой целью всю площадь ИО делим на равные сектора и размещаем на них ударные клинья, ориентированные параллельно оси симметрии каждого сектора (рис. 11).

Число таких обособленных секторов на плоской круглой поверхности ИО может быть разным: от трех до шести и более. Между секторами целесообразно оставить радиальные зазоры, которые следует использовать как магистральные каналы движения промывочной жидкости для удаления бурового шлама от центра забоя к его периферии (показаны стрелками).

Таким образом, конструкция ИО одновременно должна отвечать задачам не только разрушения породного забоя, но и наиболее эффективного удаления бурового шлама из зоны действия ударных клиньев. Для этого (рис. 11) следует промывочную жидкость (буровой раствор) направить от центра забоя к его периферии по магистральным каналам между секторами, а далее — к расположенным под углом к каналам продольным зазорам между ударными клиньями. Чем дальше расположены наклонные к магистральным каналам зазоры, тем они короче и ближе к периферии забоя, что делает примерно одинаково эффективной промывку всей площади забоя.

Между плоской поверхностью ИО и забоем всегда присутствует слой промывочной жидкости. При ударе ИО по забою под действием главных гидроцилиндров происходит выдавливание промывочной жидкости к периферии по магистральным каналам и зазорам между клиньями.

Число секторов на ИО следует выбирать с учетом обеспечения промывки за-

боя. Оптимальным можно считать 4 сектора со взаимно попарно перпендикулярным расположением ударных клиньев (рис. 11). При числе секторов больше четырех увеличивается число магистральных каналов и ухудшаются условия равномерности поражения породного забоя. При уменьшении числа секторов меньше четырех угол примыкания магистральных каналов к ударным клиньям становится больше 45° , что затрудняет промывку забоя (рис. 12).

Ударно-поворотный режим работы нового ИО предполагает чередование с частотой 1–2 Гц ударов по забою и подъемов ИО, во время которого происходит его поворот вокруг оси скважины на угол $5 \dots 15^\circ$.

Чтобы проследить за степенью поражения породного забоя ударными клиньями, на рисунке 13 показаны следы после ударов, которые чередуются с поворотами ИО на 15° . Наложение следов от последовательных ударов клиньями (0, 15, 30, 45, 60 и 75°) свидетельствует о возникновении подобия муаровых полос на забое с возрастающей плотностью и хорошей равномерностью. Если угол каждого поворота ИО будет меньше (например, 5°), то равномерность разрушения забоя возрастет еще больше.

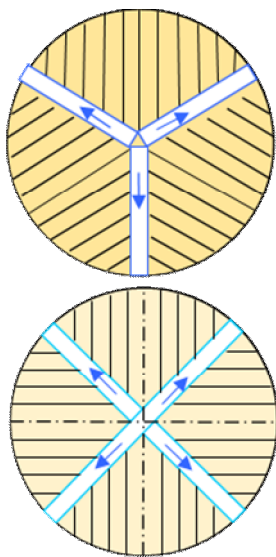


Рисунок 11 Исполнительный орган с секторально-ориентированными ударными клиньями и разбивкой площади на 3 (вверху) и 4 (внизу) сектора

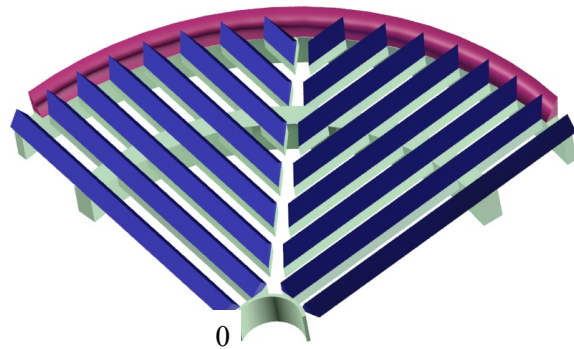


Рисунок 12 Компьютерное моделирование ударных клиньев на исполнительном органе БПМиА

К числу недостатков предложенной конструкции ИО следует отнести неминуемо возникающую неравномерность износа ударных клиньев: больше на периферии забоя и меньше по его центру. Чтобы устранить этот недостаток, следует отказаться от прямолинейной конструкции ударных клиньев и расположить их по спирали Архимеда (рис. 10).

Несмотря на относительно небольшие размеры ударных клиньев, размещенных на исполнительном органе (высота 15...20 мм), при частоте ударов $n = 1 \dots 2$ Гц и разрушении забоя на $h = 1 \dots 5$ мм за цикл можно достигнуть технической скорости проходки

$$V = 3600 \cdot n \cdot h / 1000 = 3,6 \dots 18 \text{ м/ч.}$$

Такой широкий диапазон изменения скорости проходки обусловлен почти обратно пропорциональной ее зависимостью от крепости пород, что показано в работе [12]. Изложенные технические решения по технологически-конструктивным показателям ИО позволяют эффективно использовать его для проходки скважин и круглых выработок не только в крепких, но и в слабых породах. Реализация предложенного типа ИО окажет положительное влияние на технико-экономические показатели буро-проходческой техники и переход ее на новый технический уровень.

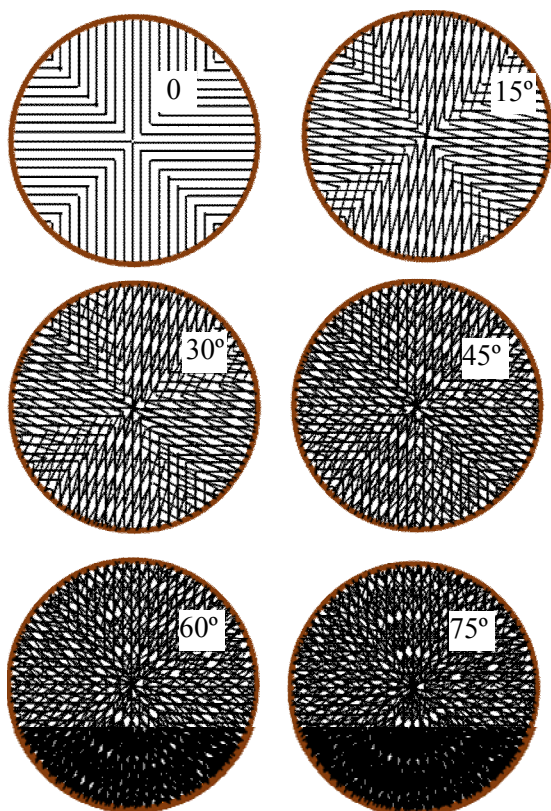


Рисунок 13 Изменение положения ударных клиньев при повороте ИО на 15° и результирующий вид зоны поражения пород в забое

Выводы

Выполненные исследования позволили обосновать следующие результаты:

1. На основании краткого аналитического обзора развития породоразрушающего инструмента (ПРИ) для буропроходческих машин и агрегатов (БРМиА) выявлены основные прогрессивные тенденции его совершенствования.

2. Проведен анализ особенностей работы ПРИ с учетом его взаимодействия с горными породами и сформулированы ос-

новные конструкторско-технологические требования к нему (табл. 1).

3. Обоснованы оптимальные параметры ПРИ с позиций геомеханики его взаимодействия с породами забоя, в основу которых положен принцип предельного устранения или минимизации причин появления сил трения на режущей кромке ПРИ.

4. Доказана необходимость создания нового типа ПРИ в форме ударного клина с углом заточки до $40...45^\circ$, который должен обеспечивать прямой удар по породному забою с целью создания за счет пинч-эффекта магистральных продольных разрывных трещин.

5. С позиций геомеханики взаимодействия ИО с породами выявлены основные недостатки существующих ИО. Впервые разработаны базовые конструктивно-технологические требования к новому типу ИО, главными из которых являются использование пинч-эффекта и плоская форма ИО с заостренными режущими кромками ударных клиньев в виде спиралей Архимеда.

6. Предложена новая конструкция ИО с зонно-секторным и спиральным размещением ударных клиньев на плоской рабочей поверхности ИО для проходки скважин и выработок большого диаметра.

7. Предварительные технические оценки показывают перспективность перехода при проектировании и использовании рассмотренных типов ИО для буропроходческих агрегатов и машин (табл. 1). Задачей будущего является разработка нового типа проходческих агрегатов ударно-поворотного действия, что будет отражено в последующих публикациях.

Библиографический список

1. Wang, H. *Technologies in deep and ultra-deep well drilling: Present status, challenges and future trend in the 13th Five-Year Plan period (2016–2020)* [Text] / Haige Wang, Yunhua Ge, Lin Shi // *Natural Gas Industry B*, September 2017. — Volume 4, Issue 5. — P. 319–326.
2. Cao, B. *More attention recommended for global deep reservoirs* [Text] / B. Cao, G. Bai, Y. Wang // *Oil&Gas*, 2 Sept., 2013. — P. 78–85.

3. Langdon, Sh. Deepwater Drilling Challenges Demonstrate Learning Curve with New Connection Technology / Sheldon Langdon, John Connor, R. Brett Chandler, Michael J. Jellison // IADC/SPE Drilling Conference and Exhibition. — 2010. — Vol. 2. — P. 647–665.

4. Kelessidis, V. C. Challenges for very deep oil and gas drilling — will there ever be a depth limit? [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.researchgate.net/publication/237762790> (29.01 2020).

5. Волож, Ю. А. Труднодоступные ресурсы нефти и газа — месторождения больших глубин [Текст] / Ю. А. Волож, Б. М. Куандыков // Георесурсы, геоэнергетика, геополитика. — 2014. — № 2 (10). — С. 9.

6. Ильский, А. Л. Буровые машины, механизмы и сооружения [Текст] / А. Л. Ильский, В. М. Касьянов, В. Г. Порошин // Справочно-информационное издание. — М. : Недра, 2002. — 520 с.

7. Малевич, Н. А. Горнопроходческие машины и комплексы [Текст] / Н. А. Малевич. — М. : Недра, 1980. — 384 с.

8. Медведев, И. Ф. Режимы бурения и выбор буровых машин [Текст] / И. Ф. Медведев. — М. : Недра, 1986. — 223 с.

9. Абубакиров, В. Ф. Буровое оборудование : справочник в 2-х т. Т. 2. Буровой инструмент / В. Ф. Абубакиров, Ю. Г. Буримов, А. Н. Гноевых [Текст]. — М. : Недра, 2003. — 494 с.

10. Волик, Д. А. Буровые породоразрушающие инструменты [Текст] : учеб. пособ. для вузов / Д. А. Волик. — М. : РГУ нефти и газа им. И. М. Губкина, 2014. — 94 с. : ил.

11. Литвинский, Г. Г. Оптимизация параметров бурового инструмента. Спираль Архимеда [Текст] / Г. Г. Литвинский // Сб. науч. трудов ДонГТУ. — Алчевск : ДонГТУ, 2018. — Вып. 11 (54). — С. 5–21.

12. 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.

13. 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.

© Литвинский Г. Г.

Рекомендована к печати д.т.н., проф., зав. каф. СЗПСиГ ДонНТУ Борщевским С. В., д.т.н., проф., зав. каф. ГЭМиО ДонГТИ Корнеевым С. В.

Статья поступила в редакцию 20.08.2021.

Doctor of Technical Sciences, Professor Litvinsky G. G. (DonSTI, Alchevsk, LPR)

SELECTION AND JUSTIFICATION OF PARAMETERS OF THE OPERATING MEMBER OF DRILLING MACHINES AND AGGREGATES

A brief analytical review of the development of rock-breaking tool (RBT) for drilling machines and aggregates (DMA) is carried out. From positions of geomechanics interaction of the operating member (OM) with rocks, their main disadvantages are revealed. The main progressive tendencies of its improvement are shown. Based on the analysis of geomechanics interaction of RBT with rocks, the main design and technological requirements for it are formulated. The principle of minimizing the friction forces on the cutting edge of RBT is proposed and its optimal parameters are justified in the form of an impact stake with a grinding angle of up to 40...45° to create a pinch-effect in the form of main ruptural cracks. A new design of the OM with impact stakes allocation on the OM flat surface by a zone-sector or the Archimedes spiral pattern is proposed. The technical and economic feasibility of the proposed developments is shown.

Key words: drilling, sinking, well, mining, rock-breaking tool, impact stake, operating member, analytical review, geomechanics interaction, principle of minimizing, optimal parameters, pinch-effect, Archimedes spiral.