

*Породоразрушающий
инструмент*

Долота РДС

Новый взгляд на режущие элементы буровых долот

- Бурение недр для поиска углеводородов требует выполнения операции спуска долот на колонне бурильных трубах или на гибких НКТ и их вращения с помощью поверхностной буровой установки или забойного двигателя и турбины. Выбор наилучшего долота для определенных условий является одной из проблем, с которой приходится сталкиваться нефтяным компаниям и буровым подрядчикам при планировании строительства скважины.
- Основной инструмент буровых инженеров, то есть долото для вращательного бурения, которое в широком смысле слова классифицируется как долото с фиксированными режущими элементами или как шарошечное долото, предназначен и изготовлен для различных пород и широкого спектра условий. Все, кто покупают и используют долота, должны понимать разницу между различными типами и конструкциями (рис. 1).

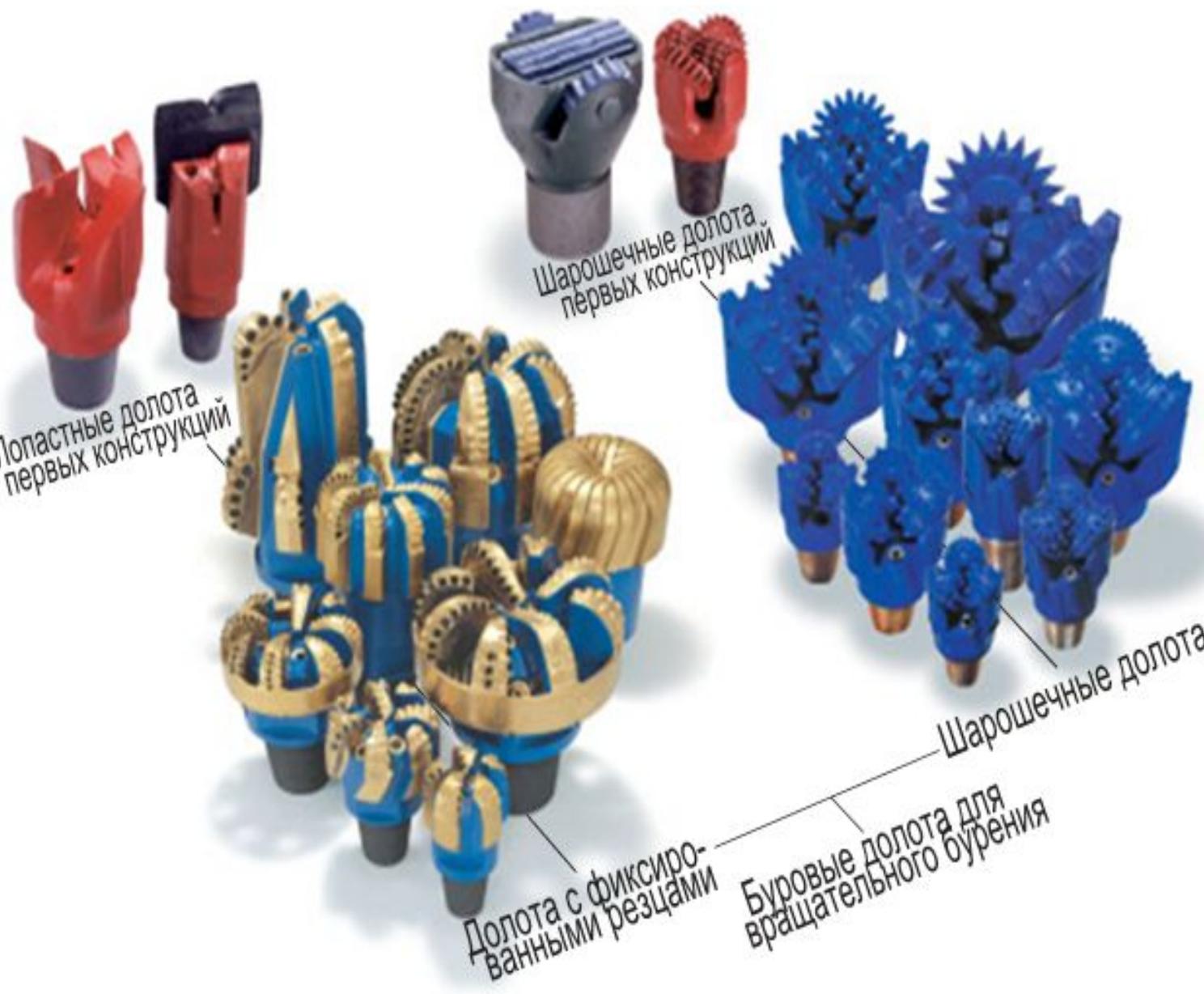
Лопастные долота
первых конструкций

Шарошечные долота
первых конструкций

Долота с фиксиро-
ванными резцами

Буровые долота для
вращательного бурения

Шарошечные долота



Долота с фиксированными резцами, или лопастные долота, имеют лопасти, составляющие с корпусом одно целое и вращающиеся одновременно с ним. Стальные лопастные долота, которые также называют долотами типа «рыбий хвост» из-за их характерного вида, применялись для вращательного бурения до 1900 года, и они резали мягкие породы, как плуг нарезает борозды в грунте. Современные долота с фиксированными резцами с поверхностями, армированными алмазами, также «пропахивают» породы; долота, в которых алмазы импрегнированы в матрице лопастей, «истирают» породы; долота PDC срезают породу аналогично токарному станку.

Шарошечные долота имеют металлические шарошки, которые независимо вращаются во время вращения долота на забое. Каждое долото имеет режущие элементы, т.е. упрочненные твердым сплавом стальные зубья или вставки из карбида вольфрама, которые раскалывают, разрушают, долбят или крошат породу подобно зубилу или скребку, в зависимости от твердости породы. Шарошечные долота обеспечивают более глубокое бурение, и их часто считают долотами для проходки твердых пород, поскольку они могут бурить более твердые породы, чем режущие долота ранних конструкций.

Буровые долота составляют только долю— от одного до пяти процентов—от общей стоимости скважины, но являются основным компонентом экономики строительства скважины. Время, необходимое для бурения скважины, напрямую зависит от скорости бурения долота и от продолжительности его работы до износа. На основе отношения стоимости проходки одного фута инвестирование в правильно выбранное долото значительно снизит время бурения и количество спуско-подъемных операций. Для бурения неглубоких скважин с помощью наземных установок могут вполне подходить менее дорогие стандартные шарошечные долота. Усовершенствованные шарошечные долота или долота PDC с более высокой механической скоростью проходки и большим сроком службы, даже если они стоят дороже, могут быть самым экономически выгодным выбором при бурении в море и более глубоких скважин, где высока стоимость времени использования буровой установки и стоимость спуско-подъемных операций, необходимых для замены долот. Независимо от применения стоимость покупки оптимизированных долот затем многократно окупается.

Первое шарошечное долото с тремя шарошками было запатентовано компанией «Ховард Хьюз» в 1909 году. Компания «Си Эс Рид» (C.S. Reed) усовершенствовала шарошечное долото в 1916 и 1917 году путем применения сменных двойных дисков и четырех вращающихся шарошек. Эти первые шаги в деле эволюции долот позволили продвинуть вращательное бурение за пределы границ глубины и срока службы стальных лопастных долот. С тех пор усовершенствования затрагивали то конструкцию шарошек, то структуру резцов. Эти усовершенствования предусматривали: армирование шарошек более твердым металлом, навариваемым на стальные зубцы; применение антифрикционных роликовых подшипников с шариковым замковым подшипником, удерживающим шарошки; вставок из карбида вольфрама, самосмазывающихся герметичных роликовых подшипников и подшипников скольжения.

Эта тенденция продолжается в настоящее время, о чем свидетельствуют новые конструкции подшипников и систем герметизации, усовершенствованные системы удержания шарошек, улучшенные режущие элементы с упрочнением карбидом вольфрама и алмазным композитом, которые обеспечивают превосходные рабочие характеристики и надежность, особенно в труднопроходимых твердых породах, при высокоскоростном бурении с использованием забойных двигателей или турбин.

Комплексное применение отдельных элементов и усовершенствований в конструкции долот для специфических условий позволяет улучшить процесс бурения и увеличить срок службы долот путем увеличения величины нагрузки на долото и повышения стойкости шарошечных долот.

*Долота с фиксированными резцами также были подвержены эволюции по отношению к первым лопастным долотам за счет использования природных алмазов и синтетических поликристаллических алмазов (PDC) на режущих элементах. Долота с фиксированными резцами не имеют подвижных деталей, а только режущие поверхности, которые подвержены износу, и в некоторых случаях они могут бурить быстро в течение длительного периода времени. Природные алмазы впервые использовали примерно в 1910 году для специальных керноотборных долот, которые бурят ствол скважины по кольцу, а полученный столб породы, или керн, извлекают с помощью специальной колонковой трубы для оценки породы. Алмазные долота для сплошного бурения на забое скважины были внедрены в начале двадцатых годов двадцатого века. **На основе технологии, разработанной компанией «Дженерал Электрик», которая позволяет импрегнировать синтетические алмазы в карбид вольфрама, первые долота PDC получили промышленное применение в начале семидесятых годов прошлого столетия.***

Усовершенствования в долотах с фиксированными резцами стали возможными благодаря применению улучшенных материалов и технологий производства в сочетании с лучшим пониманием вопросов стабильности долот и динамики промывочной жидкости. Усовершенствованные режущее вооружение и конструкции долот сводят к минимуму неустойчивое забойное движение или вибрацию, обеспечивая более быстрое и эффективное бурение. Для режущих элементов обеспечивается совместимость с разбуриваемыми породами или с условиями бурения. Было создано новое поколение долот PDC, отвечающих сложным требованиям наклонно-направленного бурения, а усиленные долота с импрегнированными алмазами также находят новые области применения.

Усовершенствование гидравлики долота и режущего вооружения позволили получить более совершенную конструкцию шарошечных долот и долот с фиксированными резцами. Полномасштабное испытание и компьютерное моделирование улучшили наше понимание взаимосвязи потока промывочной жидкости, очистки долота и удаления шлама, что позволило еще больше повысить производительность бурового долота. Компьютерное моделирование расчетной динамики промывочной жидкости (CFD), подобное моделированию, примененному для проектирования корпусов автомобилей, самолетов и морских судов, позволило проектировщикам оптимизировать гидравлику шарошечных долот и долот с фиксированными резцами для получения более высокой механической скорости проходки.

Усовершенствованные программы проектирования в настоящее время позволяют коррелировать литологию и прочность пород с различными типами долот, чтобы помочь операторам в выборе необходимых долот. Базы данных большой емкости регистрируют и отслеживают ход бурения и полученные результаты, что помогает в выборе шарошечных долот и долот с фиксированными резцами, и создают основу для непрерывного усовершенствования и последующего развития.

По мере улучшения конструкции и технологии изготовления исчезают границы между шарошечными долотами и долотами с фиксированными резцами. Исследования и разработки позволяют повысить надежность, усовершенствовать интегрированную конструкцию, улучшить гидравлику и стабильность для всех типов долот. Хотя это наделяет бурильщиков большими возможностями, это также значительно усложняет процедуру выбора долот.

Буровые долота и новые скважинные инструменты в сочетании с опытом сервисных служб экономят операторам время и деньги. В данной статье делается обзор шарошечных долот, долот PDC с фиксированными резцами и алмазных долот, а также последних разработок, включая весь диапазон конструкций, материалов и методов изготовления, которые значительно улучшают буровые характеристики и помогают бурильщику подобрать долота для определенного типа породы или условий бурения.

Технология шарошечного долота

В 1800-х гг. бурение с помощью установок канатного бурения и долот ударного бурения было медленным и ограничено малыми глубинами. Усовершенствование заключалось в использовании долот «рыбий хвост» и установок вращательного бурения с постоянной циркуляцией для удаления шлама, но стальные лопастные долота, лучше всего работавшие в мягких породах, даже тогда быстро изнашивались. В 1900-х гг. получило быстрое развитие применение режущего вооружения на шарошках, которые вращались независимо, прокатываясь через забой скважины во время вращения долота. Эти долота работали дольше и могли бурить глубже. Однако первые долота с вращающимися шарошками не отличались долговечностью и надежностью — шпильки и винты служили для крепления компонентов долота в его ранних конструкциях — но они превосходили по производительности лопастные долота. Для снижения трения использовали простые подшипники со стальными втулками или муфтами.

Первоначальные усовершенствования затронули режущее вооружение. В начале тридцатых годов прошлого столетия были сконструированы взаимодействующие шарошки. При наличии зазора с соседними шарошками резцы могут быть длиннее и могут обеспечивать дополнительное очищающее действие в мягких породах.

До этого зубцы должны были быть короткими, чтобы не допустить контакта друг с другом во время вращения шарошки. Примерно в это же время изготовители начали подвергать сталь тепловой обработке и наплавлять более твердый металл на стальные зубья для бурения пород с высоким сжимающим усилием.

Есть два типа режущего вооружения шарошек: фрезерованные стальные зубцы, литые или цельнокованные с износостойкими режущими элементами из карбидо-композитов, и вставки из карбида вольфрама, отформованные отдельно и впрессованные в точно просверленные отверстия на поверхности шарошки. Долота со стальными зубьями и долота со вставками применяют для бурения мягких пород, пород средней твердости и твердых пород (рис.2). Долота со стальными зубьями используют в мягких породах с низкой прочностью на сжатие, а также в породах средней твердости и в твердых породах с высокой прочностью на сжатие. Долота со вставками применяют для бурения пород от мягких и полутвердых до твердых, полуабразивных и сильно абразивных.



Рис. 2. Режущие элементы, представленне стальными зубьями и вставками. Стальные зубья литые, кованные или фрезерованные из того же металла, из которого изготовлены шарошки (*верхние долота*). Покрытие из карбида вольфрама наварено на стальные зубья для повышения долговечности. Взаимодействующие шарошки обеспечивают увеличение длины режущего вооружения и улучшение дополнительного очищающего воздействия. В мягких породах большие расстояния между резцами также способствуют процессу очистки долота. Металлокерамические вставки из карбида вольфрама формируют отдельно и механически плотно впрессовывают в несколько меньшие отверстия на поверхности шарошки (*нижние долота*). Имеются также вставки с головками из более абразивостойких слоев из синтетических поликристаллических алмазов.

Режущее вооружение, которое разрушает или вызывает дробление твердой породы от сжимающей нагрузки, должно быть тупоносным и коротким, чтобы предотвратить поломку резца, и быть близко расположенным друг от друга. Мягкие породы позволяют использовать острые и длинные зубцы, обеспечивающие проникновение в породу и ее удаление путем долбления и скобления. Каждое режущее действие применяют с различной интенсивностью, в зависимости от породы. Резцы стремятся обеспечить долбление и скопление в условиях, когда шарошки не обеспечивают истинного движения качения. Баланс между механизмами разрушения породы достигается путем регулирования угла опоры, формы шарошки и смещения для контроля порядка вращения шарошек (рис.3). Опоры представлены валами или осеподобными структурами, вокруг которых вращаются шарошки. Смещение, или угол перекоса, является мерой определения смещения опор, обеспечивающих отсутствие пересечения оси каждой шарошки с осями других шарошек в центре долота. По мере усовершенствования режущих элементов и повышения агрессивности бурения со стороны долот, ограничивающим фактором стал срок службы подшипников. В середине тридцатых годов прошлого столетия были созданы роликовые подшипники (рис.4). Длительность рейса долота возросла с 6 или 8 часов до 20–25 часов с соответствующим увеличением проходки за рейс и снижением расходов.

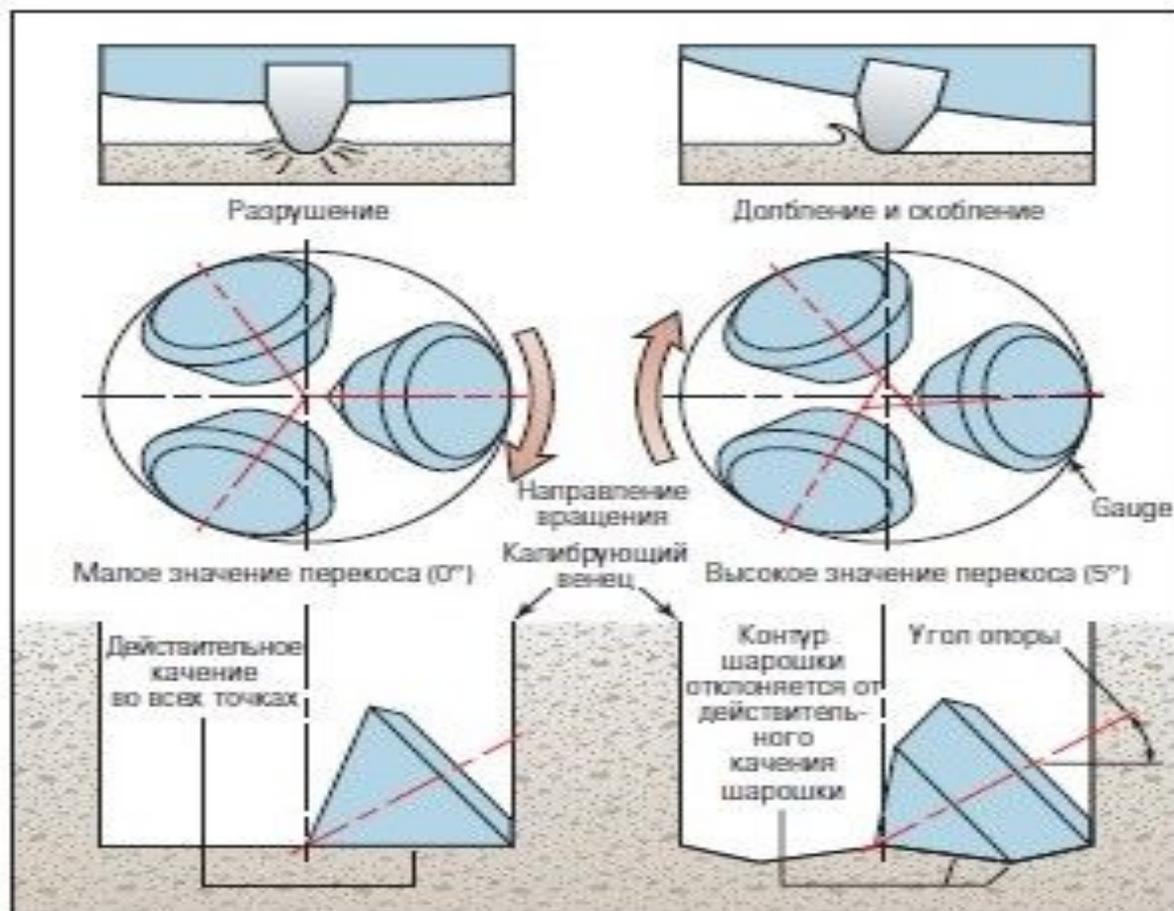


Рис. 3. Характер бурения с помощью шарошечных долот. Шарошечные долота удаляют породу путем долбления и скобления или разрушением. Вращающиеся шарошки создают разрушающее действие. Когда шарошки отходят от действительного действия качения, режущее вооружение больше переходит на долбление и скобление. Угол перекоса или смещения и форма шарошки служат причиной того, что шарошки периодически прекращают вращение во время вращения долота. В результате этого режущие элементы скользят по забою скважины и скоблят породу. Углы смещения меняются от 5° для мягких пород до 0° для твердых пород. Долота для мягких пород используют более длинные режущие элементы со смещенными углами шарошек, которые снижают возможность действительного движения качения. Короткие резы на шарошках, которые обеспечивают большую степень качения, создают действие разрушения в твердых породах.

Герметизированный роликовый подшипник

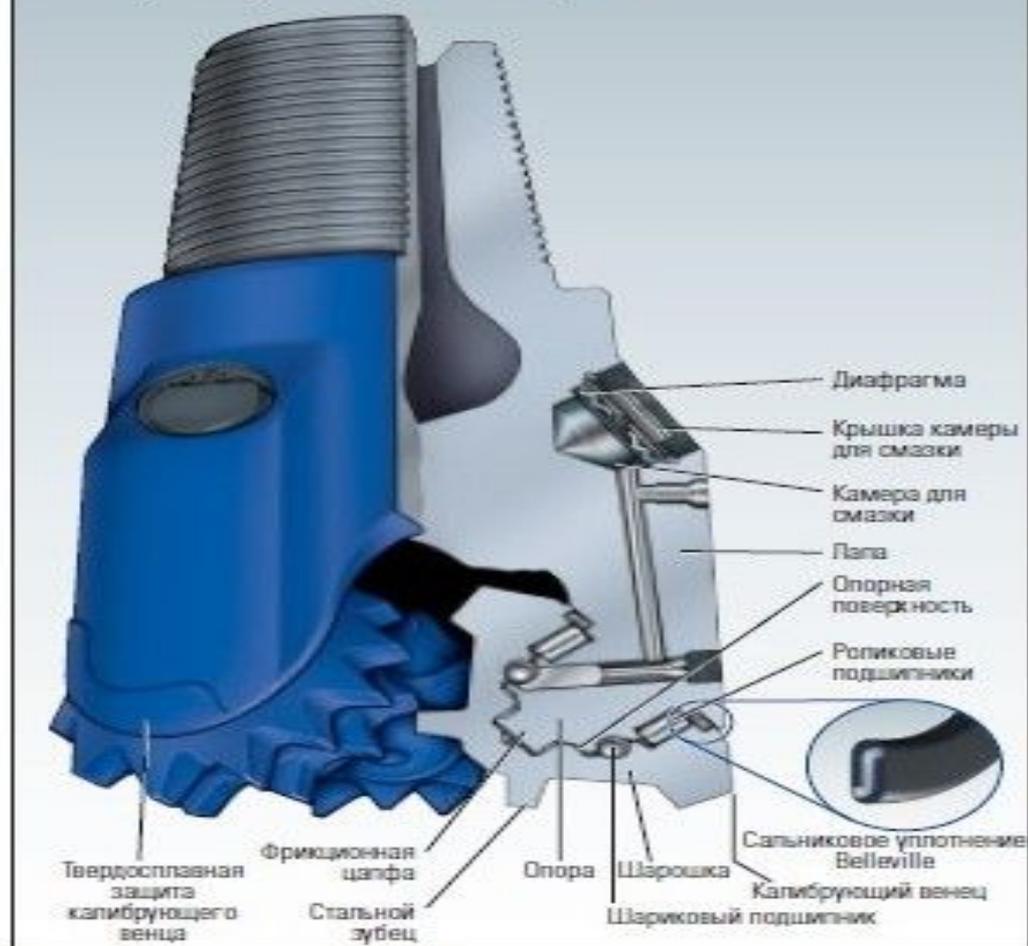


Рис. 4. Подшипники качения. Долота с тремя шарошками, которые являются наиболее распространенными шарошечными долотами, очень мало напоминают шарошечные долота первых конструкций. Роликовые подшипники несут большую часть нагрузок, и шариковые подшипники, установленные через отверстие в опоре, удерживают шарошки на месте. Опорная поверхность и фрикционная цапфа несут осевую нагрузку и стабилизируют подшипники. Сальниковые уплотнения удерживают смазку внутри подшипников и предотвращают попадание внутрь бурового раствора и твердых частиц. Первые резиновые уплотнения были усилены внутренним металлическим кольцом или пружиной Belleville. Позднее стали использовать круглые и радиальные уплотнения из эластомера. Камеры в лапах обеспечивают смазку. В сальниках нет перепада давления, и гидростатическое давление передается через диафрагму для выравнивания давления между подшипниками и в затрубном пространстве скважины.

Насадки для промывочной жидкости впервые стали использоваться в 1950 году для улучшения очистки долота и ствола скважины и для увеличения механической скорости проходки с помощью сильной струи бурового раствора, направляемой на забой скважины для отделения шлама, удерживаемого внизу гидростатическим давлением. Вставки из карбида вольфрама, внедренные в 1951 году, стали настоящей находкой для бурения твердых пород. Вставки из карбида вольфрама — при совсем небольшой потере в прочности — были прочнее и более устойчивы к износу, чем самые лучшие стальные долота, и они могли разбуривать протяженные интервалы до износа. Впервые режущее вооружение стало иметь больший срок службы, чем подшипники. Однако буровой раствор и твердые частицы оказывали вредное воздействие на подшипники, особенно при бурении в сложных условиях. Хотя для смазки компонентов подшипника и для удлинения срока службы долота использовали специальную смазку, явление усталости материалов и износ поверхности и дорожек роликовых подшипников на лапах и шарошках ограничивали долговечность подшипников, поэтому для долот со вставками потребовался новый подход. В шестидесятые годы прошлого столетия были добавлены сальники для удержания смазки в подшипниках и для предотвращения попадания внутрь промывочной жидкости или твердых частиц.

Камеры для смазки в каждой лапе обеспечивали постоянную смазку. Диафрагменная система компенсации выравнивала давление в сальниках. Открытые или негерметичные роликовые подшипники, охлаждаемые и смазываемые буровыми растворами, все еще используются в долотах со стальными зубьями для бурения малой стоимости.

В настоящее время менее пористые материалы из карбидов изготавливают путем внедрения тонких частиц карбида вольфрама в кобальтовую матрицу и спекания при высокой температуре в вакууме или в водородной атмосфере. Содержание кобальта и размер частиц меняют для получения десятка стандартных классов материалов из сцементированного карбида. Эти металлические композиты сочетают твердость при ограниченной деформации с прочностью, предотвращающей растрескивание.

Зерна малого размера и малое содержание кобальта увеличивает твердость и сопротивление износу за счет прочности. Крупные зерна и высокое содержание кобальта снижает твердость и сопротивление износу, но увеличивает прочность. Нужно подбирать правильное соотношение — слишком мягкий материал будет причиной преждевременного износа, слишком твердый материал служит причиной поломок вставок в условиях тяжелых нагрузок. В результате можно получить устойчивые к износу и воздействию эрозии вставки для твердых пород и прочные вставки для мягких пород (рис.5).

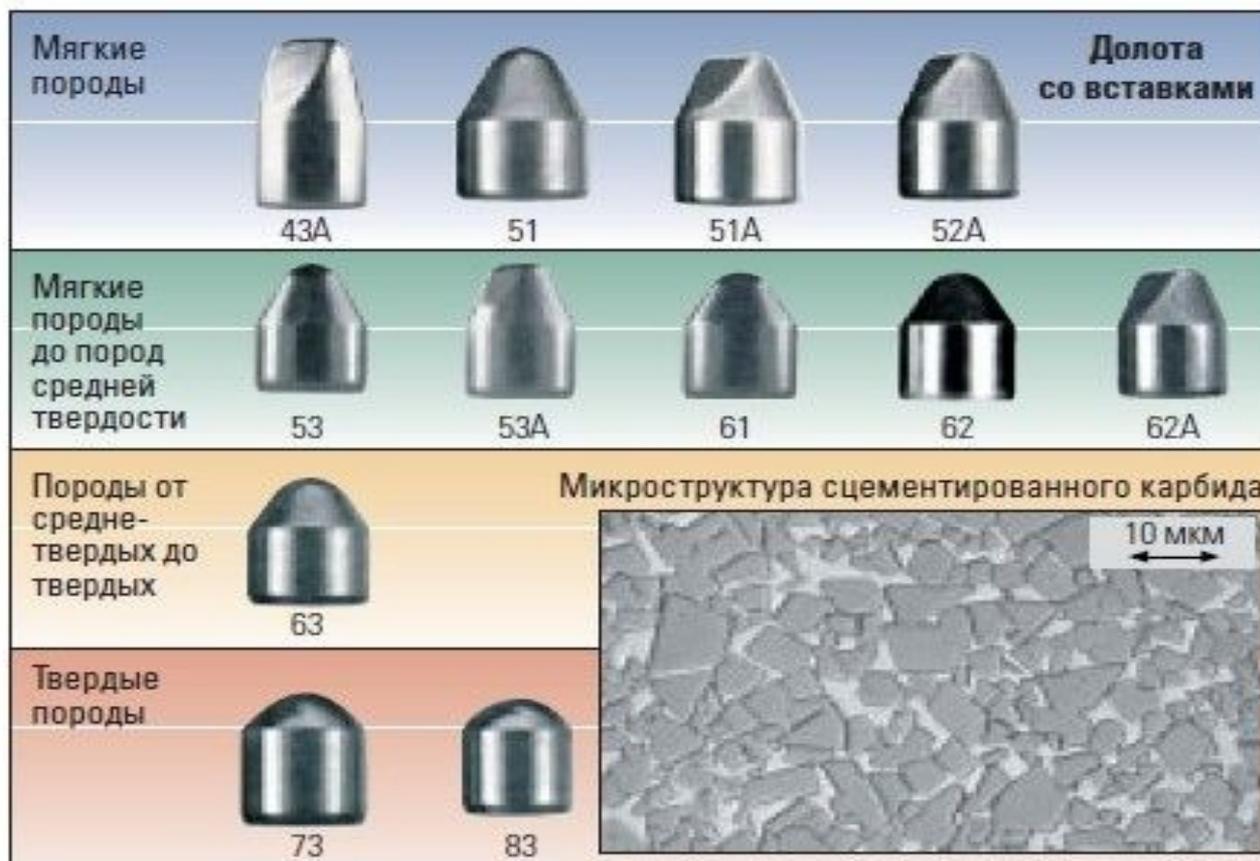


Рис. 5. Разновидности вставок. Долговечность вставок зависит от степени развития порошковой металлургии, которая устраняет дефекты, оптимизирует химические процессы сцепления и позволяет получать точные отношения между твердостью и прочностью для всех условий применения. Менее пористый материал из цементированного карбида наплавляют на стальные зубья или спекают его в виде вставок, устойчивых к износу и воздействию эрозии, для бурения твердых пород или для получения более прочных вставок для бурения мягких пород. Тщательный контроль процесса обеспечивает получение точных характеристик материалов и размеров зерен, а высокотемпературная изостатическая запрессовка устраняет возникновение поровых дефектов в цементированном карбиде (вставка).

Более качественное режущее вооружение и агрессивное бурение в глубоководных твердых породах требует применения больших нагрузок на долото и подшипников более высокого качества. Подшипники скольжения и применение уплотнительных колец, сжатых по объему более чем на 15%, было внедрено в конце шестидесятых годов — начале семидесятых годов прошлого столетия, что открыло новую эру в применении шарошечных долот. Подшипники скольжения более долговечны и пригодны для более высоких нагрузок, чем роликовые подшипники, так как нагрузки распределяются на большой площади — на опоре и на внутренней поверхности шарошки, а не просто на роликах (рис.6). Первые долота с подшипниками скольжения пробурили такой же метраж в скважине, который был под силу трем-пяти стандартным долотам с роликовыми подшипниками, но они были дороже. Но общая экономия была получена от увеличенного метража проходки на долото и от меньшего количества спускоподъемных операций, необходимых для замены долот.

В начале семидесятых годов прошлого столетия компания «Рид Тул» (Reed Tool), которая в настоящее время имеет название Reed-Hycalog, создала плавающие бериллиево-медные муфты, обладающие лучшими характеристиками в отношении нагрузок, пластичности и сопротивления износу, а также высокой тепловой проводимостью, обеспечивающей рассеяние тепла.

Герметизированный подшипник скольжения

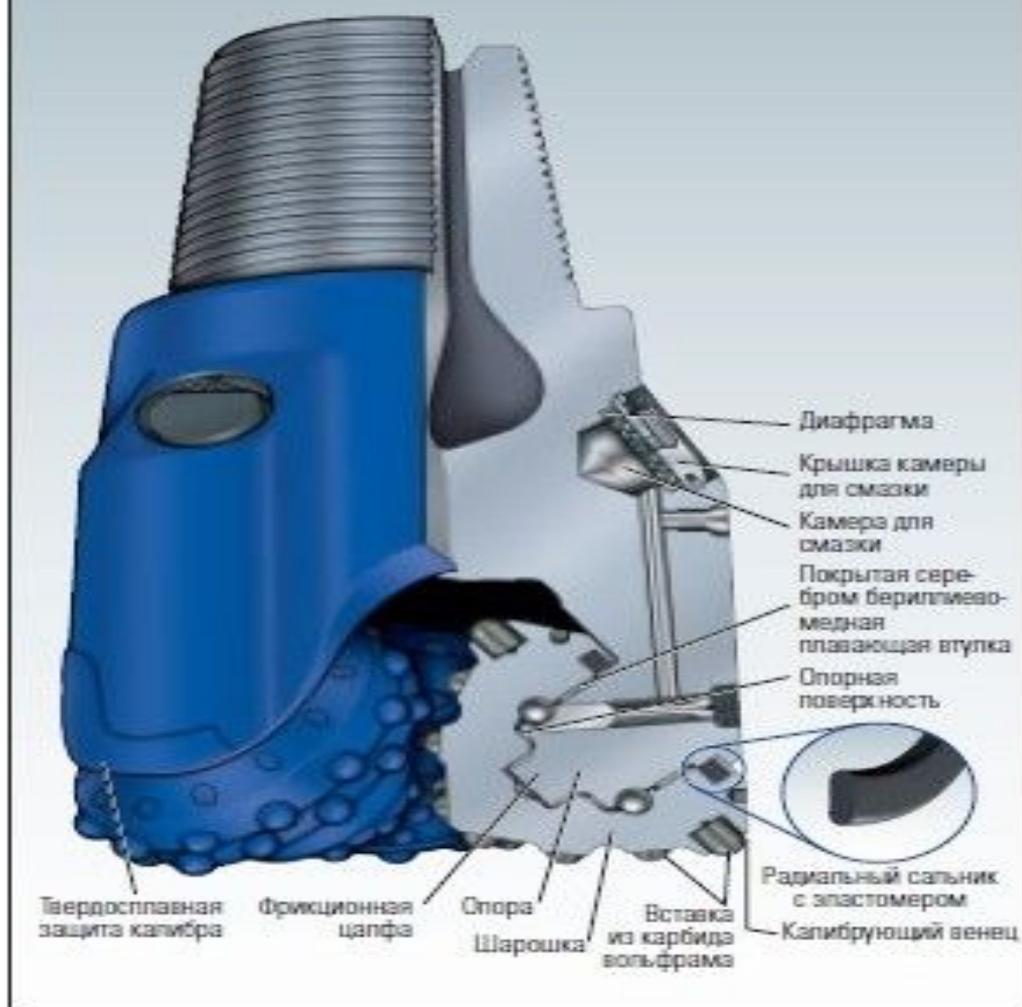


Рис. 6. Подшипники скольжения. Подшипники без роликов, устраняющих трение, долговечны и могут работать в условиях высоких нагрузок, поскольку нагрузки распределяются по большой площади подшипника. Эти упорные подшипники используют в долотах диаметром до 12 1/4 дюйма. Плавающие бериллиево-медные муфты рассеивают тепло и снижают относительную скорость между опорами и шарошками. Серебряное покрытие действует как твердая смазка с целью еще большего снижения трения и износа. Радиальные сальники из эластомера используют в связи с тем, что они требуют меньшей степени сжатия, чем круглые сальники, и они не выделяют так много тепла.

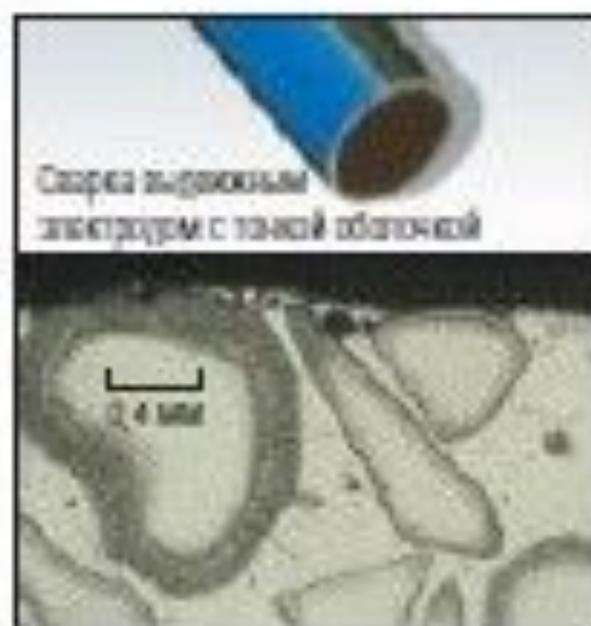
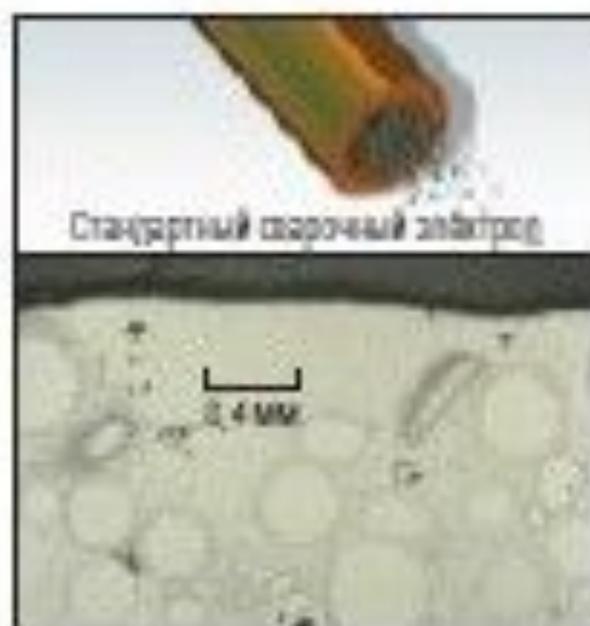
По сравнению со стандартными подшипниками скольжения эти плавающие муфты вращаются между опорой и поверхностью шарошки, что обеспечивает наличие четырех точек соприкосновения и удвоение числа скользящих площадей, в связи с чем снижается относительная скорость и износ. Примерно в это же самое время Reed запатентовала овальный сальник с поперечным сечением, в котором радиальные размеры превышают осевые. Радиальные сальники требуют менее 10% сжатия для эффективной герметизации, что снижает износ. Более низкая величина давления на поверхностях контакта также снижает трение и выделение тепла, поэтому сальники работают при более низких температурах. В настоящее время многие конструкции долот используют сальники, которые основаны на этой радиальной концепции. Корпуса шарошечных долот ранее отливали или ковали из цельного куска металла вместе с шарошками и иногда с лопастями. После разработки конструкции долота с тремя шарошками производители стали изготавливать отдельные лапы и шарошки, которые затем собирали и сваривали вместе. Это послужило основой для почти шестидесятилетнего периода отработки все более точного процесса изготовления (рис.7).

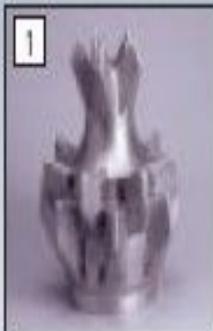


Рис. 7. Изготовление шарошечных долот. Шарошки со стальными зубьями и резцы куют из стальных горячекатаных болванок (вверху слева). В результате горячей обработки упрочняют гнезда для подшипников. Формы шарошек придают с помощью контурной обработки и расточки, затем их подвергают сложной операции фрезерования отдельных зубьев (вверху справа). Карбид вольфрама приваривают вручную на каждый зуб для повышения сопротивления износу. Для долот со вставками вставки с цементированным карбидом подвергают процедуре заплавления и подгоняют на поверхности шарошки, запрессовывая их в точно просверленные отверстия слегка уменьшенного диаметра (внизу слева). Лапы и шарошки собирают и приваривают вместе (внизу справа).

Более строгие допуски дляковки, фрезерования, тепловой обработки, спекания, шлифовки, сварки и порошковой металлургии являются в настоящее время фундаментом для получения высокоэффективных шарошечных долот. Компания Reed впервые начала применять шлифующие поверхности подшипников в одном типе долот для обеспечения постоянства форм и устранения эксцентриситета. Компания Reed также создала запатентованные методы для полировки подшипников, которые улучшают поверхностную полировку, concentricity и контроль размеров. Кассетные зажимы обеспечивают повторяемый метод крепления деталей в станке. Держатель, или кассета, укрепляется на токарном станке и фиксирует детали надежно и точно. Более крупные детали обрабатываются с помощью статического точения, т.е. движущийся токарный станок обрабатывает неподвижные детали. Метод статического точения является в настоящее время стандартным методом при производстве шарошечных долот. Таким же образом сварка с помощью роботов обеспечивает окончательное нанесение наплавленных слоев, что невозможно при ручной сварке. Усовершенствование производства в порошковой металлургии оказало влияние на улучшение характеристик твердых сплавов для долот со стальными зубьями.

Наварные слои на зубья долот потребовали применения ручной сварки с помощью композитных электродов, изготовленных из стального и карбидного порошков. Этот трудный процесс ограничивает выдержанность и эффективность характеристик долот со стальными зубьями. Композитные электроды Armor Clad, созданные компанией Reed-Hycalog, позволили удвоить скорость сварки со снижением тепловой деградации частиц карбида (рис.8). Запатентованный процесс нанесения порошкового металла на резцы (PMS) сочетает технологии порошкового металла и традиционнойковки, обеспечивая получение долот с совершенной геометрией резцов и с превосходными характеристиками. Этот метод изготовления, который обуславливает быстрое уплотнение в твердом состоянии шарошек окончательной формы и их зубьев, устраняет многие ограничения, присущие стандартной конструкции долота, и позволяет использовать выбор совершенных материалов, которые улучшают целостность режущего вооружения (рис.9). Зубья с выдержанной толщиной твердого сплава для повышения сопротивления износу являются основным преимуществом технологии сплавления порошкового металла на зубьях.





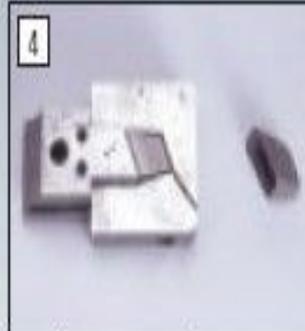
1
Цельный алюминиевый образец



2
Алюминиевый кожух формы



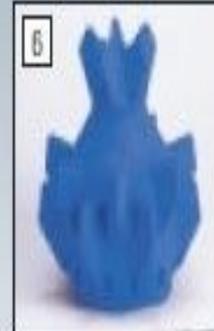
3
Кожух из эластомера



4
Инжекционная форма и твердосплавная головка



5
Твердосплавная головка в выточке образца



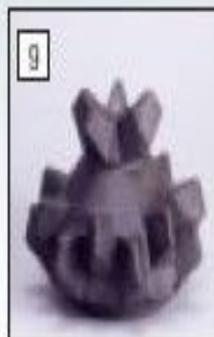
6
Предварительно отформованная форма для холодного изостатического прессования



7
Предварительно нагретая пресс-форма



8
Горячая запрессовка



9
Окончательная форма шарошки и резцов



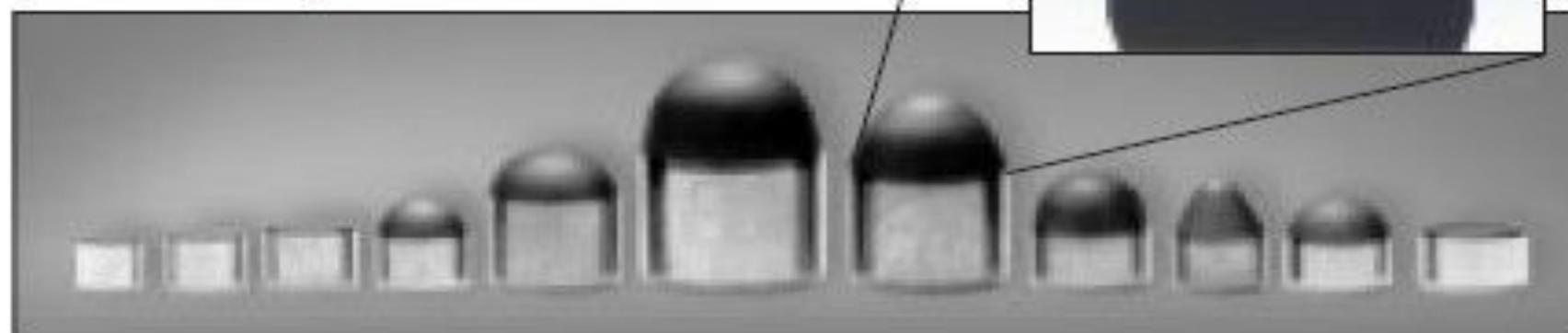
Этот процесс хорошо подходит для автоматического процесса, при этом устраняются ручные сварочные работы. В отличие от вручную наплавленного твердого сплава, объем карбида и микроструктура идентичны на каждом зубце каждой шарошки. Этот процесс позволяет усовершенствовать несколько аспектов конструкции шарошечных долот. Возможность получения нужной окончательной формы позволяет обеспечить рентабельное производство сложного режущего вооружения, т.е. агрессивных форм, места и ориентации, которые невозможны при обычных фрезерных работах. Последние достижения технологии порошкового сплавления твердого сплава включают усовершенствованную рецептуру твердого сплава и полное покрытие твердым сплавом. Профилированные вставки с покрытием из алмазного композита совершили переворот в характеристиках режущего вооружения во многих областях применения шарошечных долот. Алмазная технология обеспечивает сопротивление тепловому растрескиванию и износу режущих кромок, а также калибрующих поверхностей, контактирующих с породой.

В усиленных алмазами вставки используются слои классифицированных поликристаллических алмазов на сцементированной карбидной подложке (рис. 10).

Алмазный слой

Карбид-вольфрамовая
подложка

**Калибровочное вооружение и режущие
вставки, покрытые алмазным слоем**

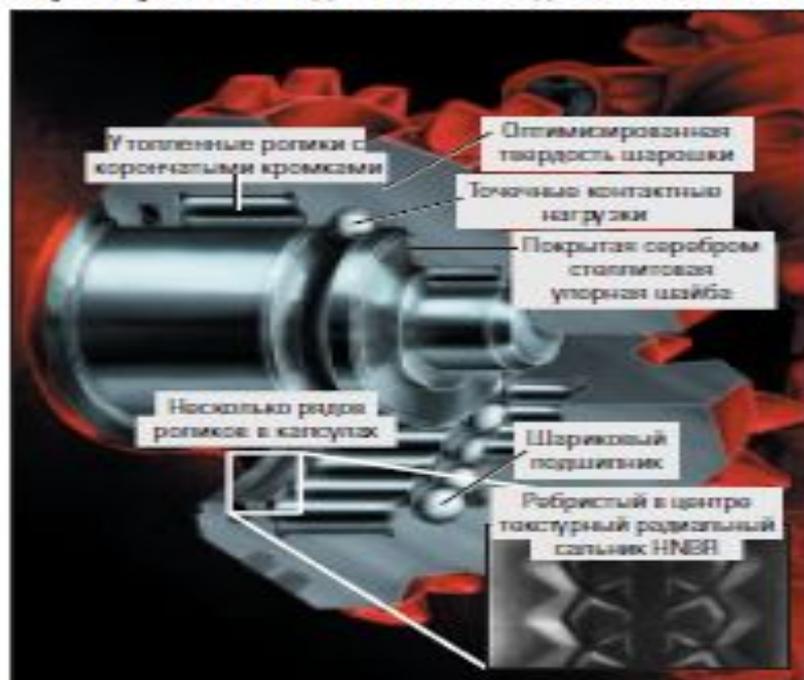


Алмазный слой	Размер алмазных зерен	Алмаз	Кобальт	Карбид вольфрама	Толщина
Верхний	8 микрон	95 %	5 %	0 %	0,010 дюймов
Второй	8 микрон	62 %	16 %	22 %	0,010 дюймов
Третий	8 микрон	42 %	16 %	42 %	0,015 дюймов
Подложка	–	–	18 %	82 %	–

Поверхностный слой почти полностью состоит из алмазов, которые режут породу, и он обладает оптимальными характеристиками в отношении абразивного воздействия, температуры и ударного износа при использовании в шарошечных долотах. Разница в тепловом расширении и упругости между цементированной карбидной подложкой и алмазным композитом обладает совместимостью нагрузок, которые снижаются за счет классифицированных промежуточных слоев. Вставки компании Reed-Nucalog с покрытием изготавливаются по лицензии, использующей запатентованный высокотемпературный процесс высокого давления, подобный процессу, применяемому при изготовлении элементов фиксированных резцов с синтетическими поликристаллическими. К счастью, разработка долговечных вставок с синтетическими поликристаллическими алмазами для шарошечных долот совпала с началом активного применения наклонно-направленного бурения с использованием забойных двигателей. Последние конструкции подшипников и продолжающееся усовершенствование гидравлики также расширяют возможности шарошечных долот и еще более улучшают характеристики бурения.

Новое поколение совершенных долот EMS и EHP (долото с улучшенными характеристиками для забойных двигателей и долото с повышенной производительностью) сочетают использование улучшенных материалов и технологий изготовления с усовершенствованными конструкциями. В этих новых конструкциях сочетаются усовершенствованное режущее вооружение, которое повышает механическую скорость проходки, с современными подшипниками и сальниками, которые улучшают показатели долговечности долота и срока его службы (рис.11). Подшипник с резьбовым кольцом, внедренный компанией Reed-Hycalog, обеспечивает превосходное удержание шарошки в случае выхода из строя сальника. Это стальное покрытое серебром кольцо изготовлено из двух половинок, и поэтому может быть установлено на опоре. Агрессивное режущее действие создает высокие нагрузки на подшипнике. Втулочная структура обладает большей способностью выдерживать внутренние нагрузки, чем шариковые подшипники, в течение длительного времени работы подшипника, особенно при наклонно-направленном бурении. Уменьшенный зазор снижает осевой люфт, сводит к минимуму колебания давления в сальниках и ограничивает миграцию частиц в подшипник, что продляет срок службы сальников.

Долото с усовершенствованными характеристиками для забойных двигателей (EMS)



Долото с повышенной производительностью (ENP)

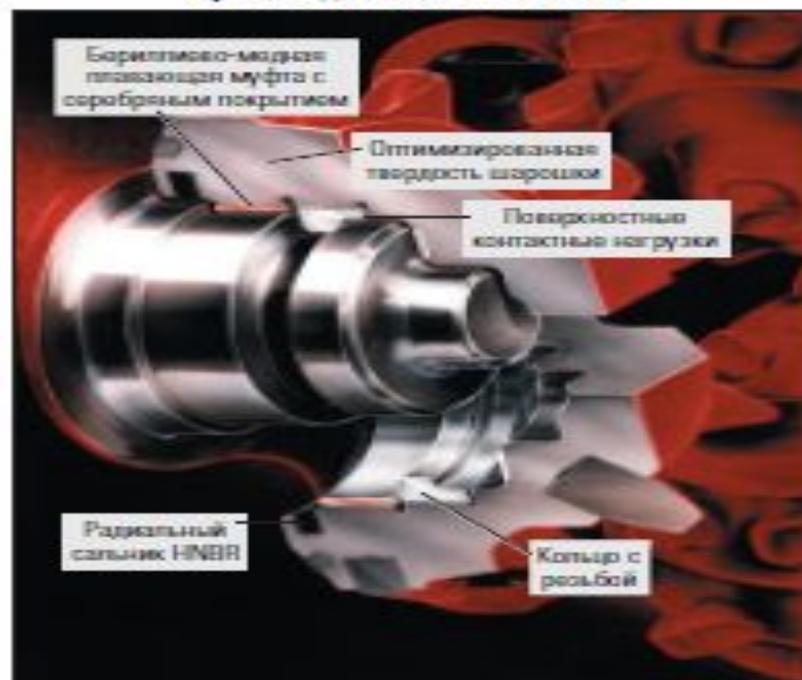


Рис. 11. Усовершенствованная конструкция подшипника. Долота с улучшенными характеристиками для забойных двигателей (EMS) имеют роликовые подшипники. Они долговечны при высоких механических скоростях проходки при использовании высокоскоростных турбин и забойных двигателей, особенно при наклонно-направленном бурении (слева). Чтобы обеспечить длительный срок службы, используют несколько рядов роликов, повышающих долговечность долота, и ребристый в центре текстурный сальник, снижающий трение. Контурные кромки роликов сводят к минимуму контактные нагрузки и снижают образование задиров в металле. Ролики в шарошке заключены в капсулах, что увеличивает диаметр опоры и снижает контактные нагрузки. Сальники HNBR (гидрированная нитриловая бутадиеновая резина) обеспечивают сопротивление абразивному воздействию и температуре выше 300°F (150°C). Текстурированные сальники удерживают смазку и снижают трение; центральные ребра отражают загрязняющие вещества (вставка). В долотах с улучшенными характеристиками (ENP) используются запатентованные подшипники с резьбовыми удерживающими кольцами, которые способны нести большие внутренние нагрузки в отличие от шариковых подшипников, что позволяет снизить число отказов и потерь шарошек (справа). Подшипники с резьбовыми удерживающими кольцами обеспечивают лучшее удержание шарошки в случае выхода из строя сальника. Они характеризуются меньшим осевым люфтом, что снижает колебание давления в сальниках и ограничивает миграцию частиц. Покрытая серебром стеллитовая упорная шайба выдерживает осевые нагрузки и снижает тепловое трение на поверхности опоры.

Твердость покрытых серебром стеллитовых шайб также способствует контролю на-грузок на опоры и снижает трение в районе опорной поверхности подшипника.

Все более возрастающее использование забойных двигателей и турбин служит причиной того, что долота все чаще работают в условиях высокой частоты вращения и скольжения, в результате чего сальники быстро выходят из строя. Исследования показали, что текстурированные сальники могут противостоять износу и сохранять смазку в данных условиях. Такой самосмазывающийся сальник удерживает смазку в текстурированном отсеке, что снижает трение и обеспечивает более длительный срок службы сальника. В условиях бурения при высоких температурах, больших скоростях и в условиях сильной абразивности воздействия тонких частиц или коррозионных химических реагентов также используют металлические уплотнения .

Оптимизация характеристик работы шарошечных долот. Программа бурения пяти скважин для компании «Тотал Фина Эльф» на месторождении Tin Fouye Tabankort (TFT), расположенном в восточной части Алжира, иллюстрирует преимущества, которые позволяют получить новые материалы и конструкции. На месторождении TFT добывают газ из коллектора, залегающего на глубине около 2000м (6560футов) в Ордовикских песчаниках. Компания планировала пробурить горизонтальные скважины с горизонтальным участком около 600м (1970 футов), как часть двухлетней программы уплотнения сетки скважин. Данные бурения указывали на чрезвычайно низкие величины механической скорости бурения и проходки для всех типов долот. Для снижения стоимости оператор, сотрудничая с двумя изготовителями долот, оценил характеристики пород, исторические сведения по бурению и данные по буровым долотам, как шарошечным, так и с фиксированными резцами. Песчаник состоял из угловатых сцепленных зерен кварца с пористостью от 5 до 10%. Низкая скорость проходки в забуриваемой скважине и высокий уровень износа долот указывали на наличие сверхабразивных, возможно чрезвычайно твердых пород. Усиленные ал-мазами вставки были слишком хрупкими для бурения некоторых сверхтвердых пород, но анализы определили, что в этой зоне залегали породы от среднетвердых до твердых.

Абразивность была выше, чем в любом другом ранее классифицированном кварцевом песчанике. Скольжение любого материала, включая алмазы, по этой породе заканчивалось чрезмерным износом, являющимся критическим фактором при выборе долота .

Скорость проходки в ней возросла до 4,8м/час (16футов/час). В шестой скважине шесть долот пробурили 637 м (2090 футов) за 121,5 часа при скорости 5,3 м/час (17 футов/час). По сравнению с соседней скважиной, показатели средней механической скорости проходки на скважину были улучшены более чем на 400%, и было значительно сокращено время на спуско-подъемные операции. Общая экономия на скважину была более 1млн. долларов.

Усовершенствованная гидравлика шарошечного долота

Гидравлика долота выполняет четыре основные функции: разрыхляет шлам, очищает шарошки и резцы, охлаждает долото и выносит шлам из ствола скважины для предотвращения его повторного разрушения. Однако в настоящее время при стандартном размещении насадок поток бурового раствора направляется непосредственно вниз, и не очищает шарошки или ствол скважины до контакта режущего вооружения с породой.

В результате этого осколки породы остаются на забое и могут накапливаться на шарошках или забиваться между элементами режущего вооружения согласно явлению, называемому образованием сальников на долоте, которые препятствуют полному проникновению в не-разрушенную породу. Поэтому конструкция гидравлической системы долота значительно влияет на характер работы шарошечного долота и на оптимальную механическую скорость проходки.

Зависимость между механической скоростью проходки, очисткой долота и удалением шлама была впервые признана при лабораторных испытаниях с долотами рабочих диаметров. Перед установлением выдержанного темпа скорости бурения долота бурят немного быстрее, когда зубья или вставки только начинают резать на полную глубину, постепенно снижая скорость бурения, как только шлам начинает забиваться вокруг резцов и снижать степень проникновения в породу. Эти наблюдения послужили причиной выполнения ряда испытаний для изучения последствий изменения направления насадок и их места. В первом испытании насадки направляли поток непосредственно на резцы. Скорость бурения возросла значительно, демонстрируя важность направления промывочной жидкости для очистки долот и для предотвращения образования сальников.

Для оптимизации характеристик работы долота были испытаны насадки различной длины и ориентации (рис.14). Частично удлиненные насадки были направлены на ведущие элементы шарошек между наружным калибрующим венцом и про-межуточным рядом резцов для очистки долота и забоя скважины перед контактом режущего вооружения с породой. Эта запатентованная технология Mudpick позволила повысить механическую скорость проходки более чем на 20% при лабораторных испытаниях, постоянно обеспечивая более высокую механическую скорость проходки, чем при стандартной конструкции с прямо направленными насадками¹⁵. Удлинения насадок изготовлены ковкой в теле лапы, чтобы избежать использования отдельных дополнительных удлинителей. Исследования и полномасштабные испытания были продолжены, используя изменение местоположения насадок и их направления. Струйные насадки направляли в сторону резцов калибрующего вооружения, чтобы высокоскоростной буровой раствор очищал шарошки до плавного изменения направления и до прохода по породе под шарошками. Гидравлическая конструкция Mudpick II устраняет наличие зон застоя и повышает величину механической скорости проходки более чем на 45% по сравнению со стандартными долотами в мягких породах до пород средней твердости и твердых пород.

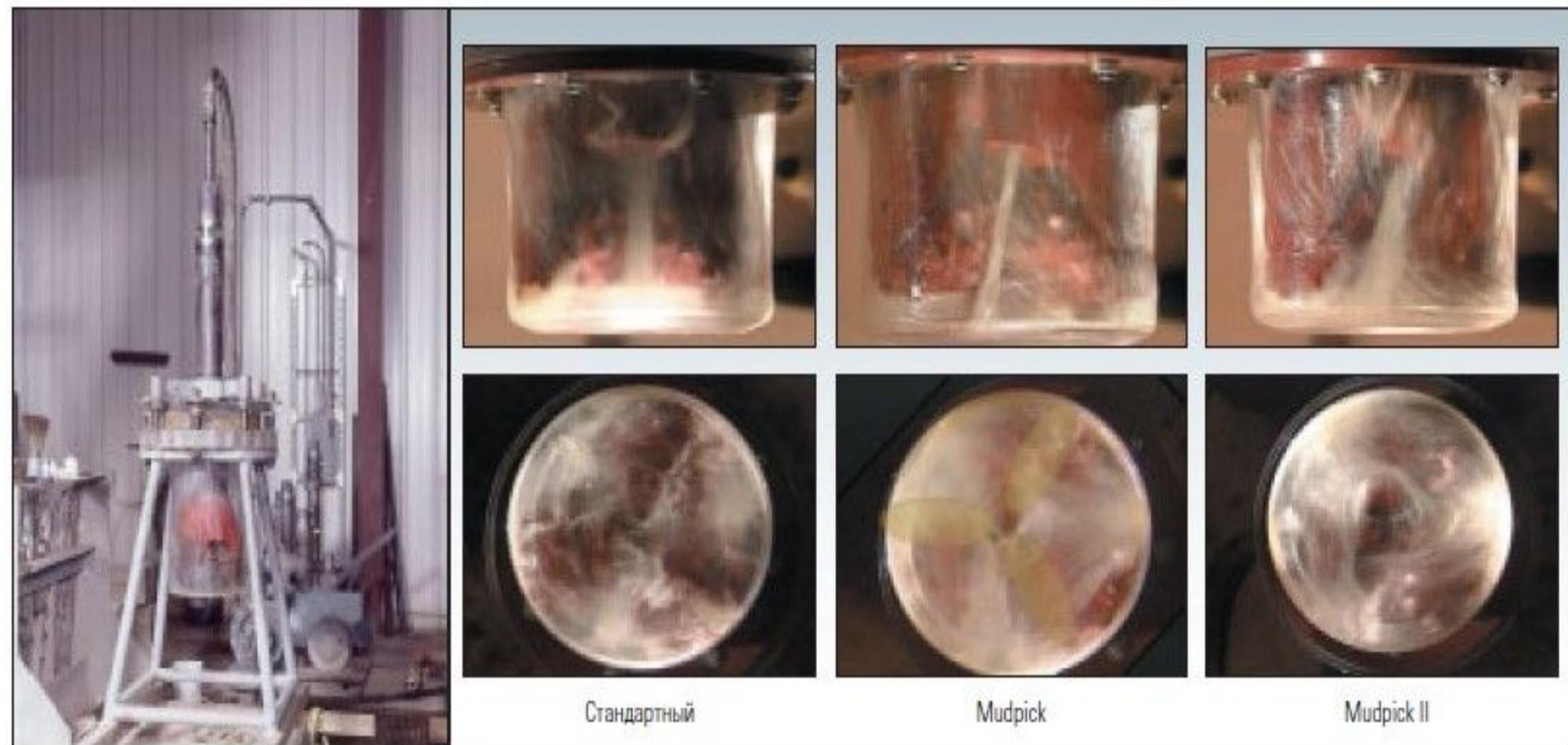


Рис. 14. Усовершенствованная гидравлика долота. Режущее действие может быть самым эффективным, когда осколки породы удаляются немедленно. Поток жидкости вокруг и под долотом можно наблюдать в камере визуализации потока компании Reed-Husalog (крайний слева). При стандартной гидравлике поток направляется на забой или на угол забоя ствола скважины (слева). Жидкость расходится радиально на 360°, и большая часть гидравлической энергии бурового раствора теряется в кольцевом пространстве. Оставшийся поток попадает на участки застоя, которые совпадают с зонами, где резцы контактируют с породой, что снижает скорость потока и эффективность очистки ствола скважины, а также скорость бурения. В конструкции гидравлики Mudpick используются точно направленные и немного удлиненные насадки для очистки резцов и породы до их взаимодействия и перемещения зоны застоя от зоны резания породы (в середине). Гидравлика Mudpick II максимально увеличивает эффективность бурения для долот со вставками (справа). Поток промывочной жидкости очищает калибрующий венец и вставки внутреннего ряда и проходит под резцами, очищая забой скважины. Поток под резцами — максимальный для обеспечения эффективности удаления шлама.

В породах, где срок службы долота ограничивается выходом из строя режущего вооружения, усовершенствованная гидравлическая конструкция позволяет применять режущее вооружение меньшей долговечности без ущерба для проходки. Многие интервалы в настоящее время можно проходить с помощью одного долота. Выбор гидравлики Mudpick или Mudpick II зависит от типа пород. Конструкции Mudpick используют для мягких пород в долотах со стальными зубьями. Гидравлика Mudpick II является стандартной на новых долотах ЕНР со вставками. Текущие исследования направлены на дополнительные усовершенствования в области удаления шлама с тем, чтобы избежать его повторного истирания.

Технология долот с фиксированными резцами.

Современные долота с фиксированными резцами являются «наследниками» лопастных и колонковых долот с природными алмазами. Есть два типа долот с фиксированными резцами: стальные и с матрицей (рис. 15). Эти долота, классифицированные как долота, армированные природными алмазами, синтетическими поликристаллическими алмазами, гибридные долота и долота с импрегнированными алмазами, не имеют движущихся деталей или подшипников, а только лопасти.

В 1953 году компания Nusalog приступила к производству долот для бурения без отбора керна, для армирования которых стали применять природные алмазы. Долота PDC стали поступать в отрасль с 1973 года; улучшенные гибридные конструкции сочетали использование синтетических поликристаллических алмазов с резцами, имеющими алмазные головки. Импрегнированные долота имеют алмазы на поверхности лопасти и около нее. Природные алмазы размещают на долотах со стальными корпусами или предварительно размещают в отформованных карманах перед наплавлением карбидвольфрамовых матриц долот. Вставки с синтетическими поликристаллическими алмазами можно устанавливать в стальные и в матричные долота. Изготовление стальных долот из цельного материала устраняет необходимость в сварке и конструкционные элементы можно обработать на станке до обеспечения заданных допусков. Режущие элементы устанавливают путем запрессовывания в отверстия с плотной посадкой, просверленные с помощью координатно-фрезерных станков с ЧПУ, которые также растачивают главный канал, лопасти, прорези для шлама или каналы для жидкости, карманы для вставок с синтетическими поликристаллическими алмазами калибрующего венца, отверстия для насадок и резьбы.

Типы долот с фиксированными режцами

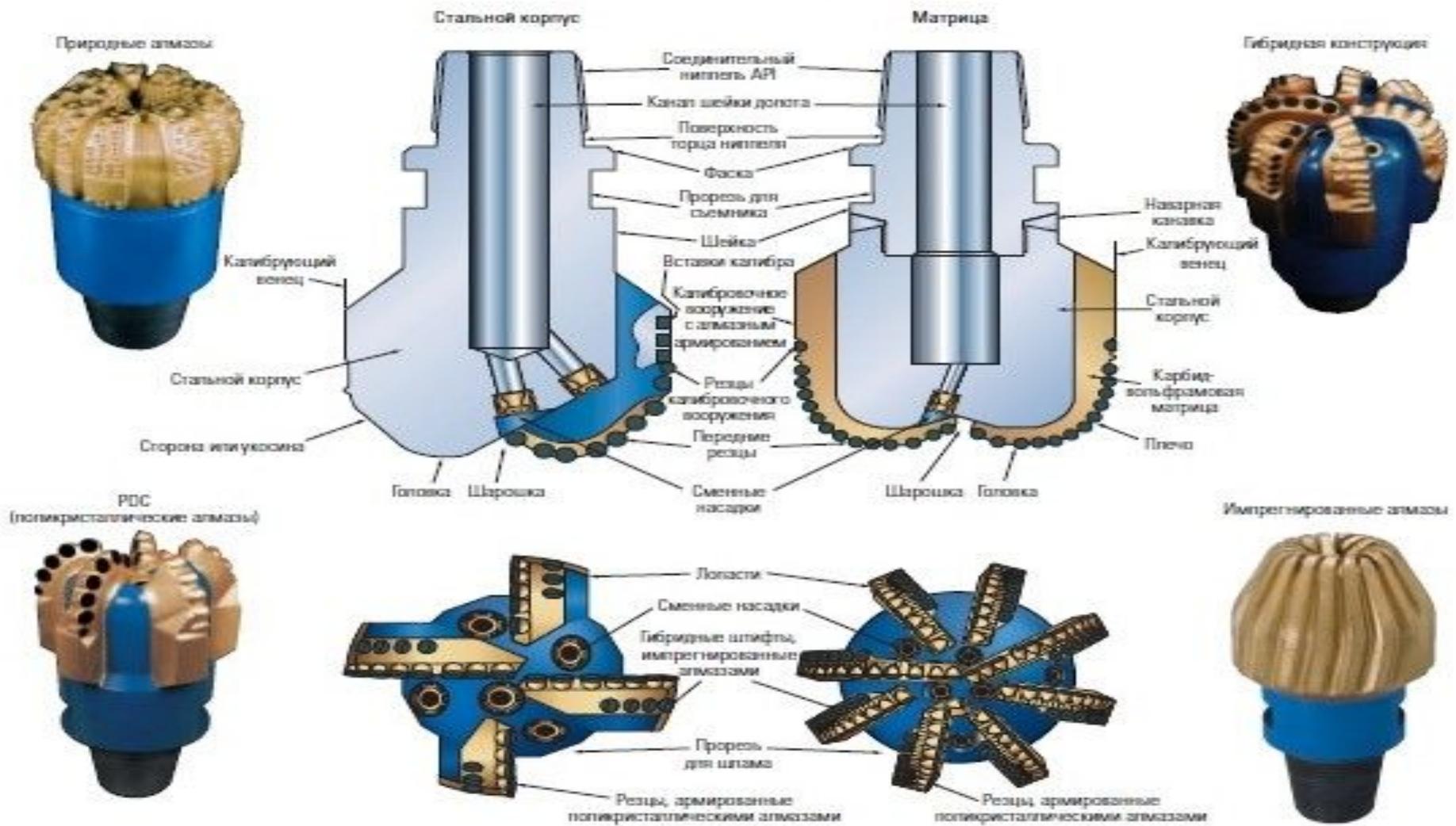
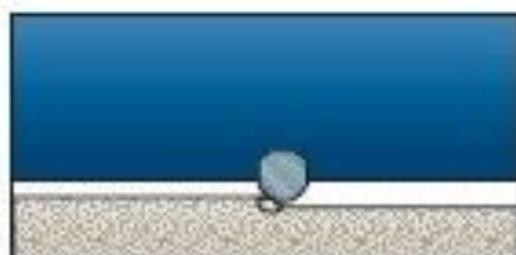


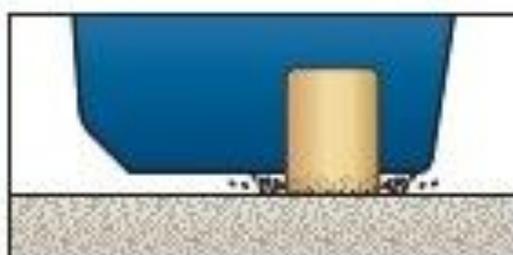
Рис. 15. Долота со стальными и матричными фиксированными режцами. Стальную болванку обрабатывают на токарном станке с компьютерным цифровым управлением для получения стальных корпусов долот (слева). Стальные долота лучше выдерживают ударные или крутильные нагрузки, и их предпочитают применять для бурения мягких пород и для скважин большого диаметра. Процесс порошковой металлургии применяют для наплавления матрицы на долота (справа). Матричные долота, которые более долговечны и которые можно изготавливать в виде сложной конфигурации, предпочитают использовать при бурении с буровым раствором с высоким содержанием твердой фазы, с высоким расходом буровых насосов и с высокой гидравлической мощностью, а также для скважин, требующих протяженных рейсов буровых долот. Буровые долота с природными алмазами (вверху слева) и долота с импрегнированными алмазами (внизу справа) предназначены для бурения пород средней твердости, твердых и очень твердых пород, которые обладают абразивностью от умеренной до очень высокой. Алмазы размещают на поверхности или в карбид-вольфрамовой матрице на поверхности лопасти и около нее. Долота PDC (внизу слева) предназначены для бурения от мягких до твердых пород с абразивностью от низкой до высокой. Гибридные долота (вверху справа) имеют импрегнированные алмазами режцы, которые несут одновременную нагрузку с основными режущими элементами с синтетическими поликристаллическими алмазами.

Сталь мягче карбида вольфрама, но для критических мест можно применять твердый металл. Карбид вольфрама более хрупок, чем сталь, но имеет большее сопротивление к эрозии. Порошки карбида вольфрама и связующий сплав размещают в форму со стальным сердечником или корпусом и сплавляют для получения матричных долот. Частицы карбида сплавляются вместе и образуют связь между внутренним стальным сердечником и наружным кожухом или коронкой из карбида вольфрама. Энергия, необходимая для бурения породы, определяется режущим действием. Из всех основных механизмов разрушения породы резание является наиболее эффективным методом, потому что прочность на растяжение пород обычно меньше прочности на сжатие (рис.16). Долота PDC бурят быстро за счет резания породы, что требует меньше энергии, чем высокие нагрузки, необходимые для разрушения породы за счет сжатия. Долота с природными алмазами и импрегнированные долота бурят медленно путем проделывания борозд и истирания, причем оба процесса требуют высоких нагрузок на долото и высоких значений крутящего момента. Долота с фиксированными резцами стоят дороже, но бурят быстрее и служат дольше, чем шарошечные долота в некоторых твердых и абразивных породах.

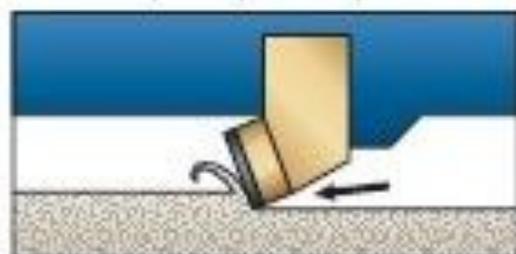
Рис. 16. Процесс бурения с помощью фиксированных резаков. Долота с природными алмазами являются долотами режущего типа, которые бурят за счет образования борозд (вверху слева). Долота с импрегнированными алмазами шлифуют породу как шлифовальный круг или наждачная бумага (вверху справа). Долота с поликристаллическими алмазами бурят быстро путем разания породы как на токарном станке (в середине слева). В целом, легче удалить породу путем разания (внизу слева). Углы обратного и бокового наклона и степень открытого разреза из поликристаллических алмазов по отношению к породе (в середине справа).



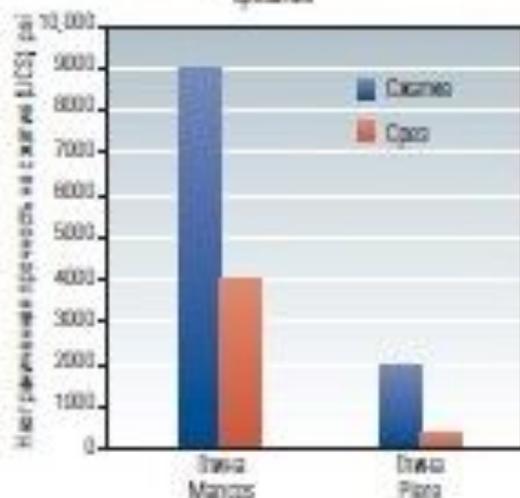
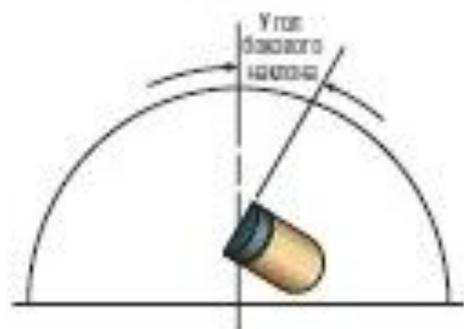
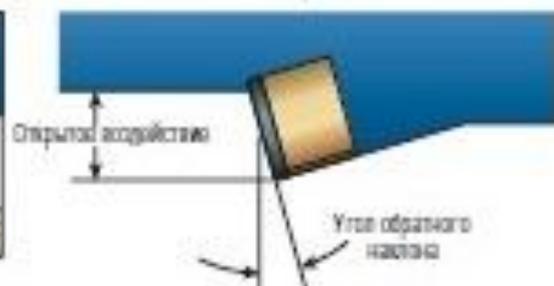
Долото с природными алмазами — процесс образования борозд



Долото с импрегнированными алмазами — шлифовка



Долото с поликристаллическими алмазами — срезание

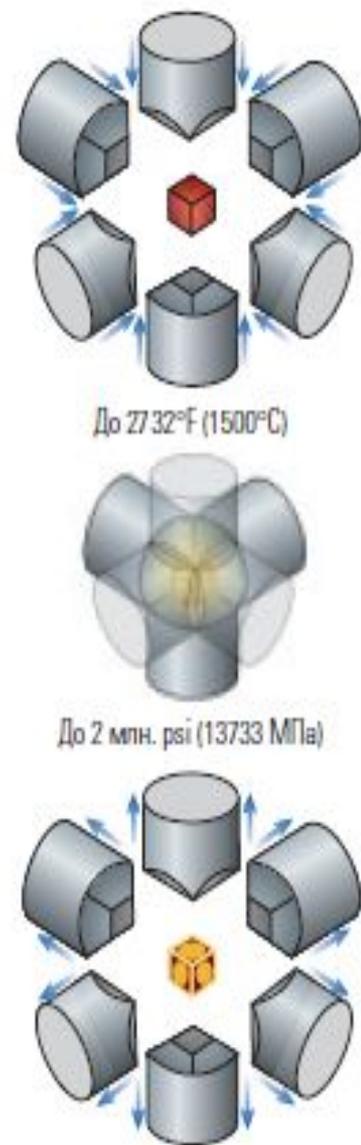
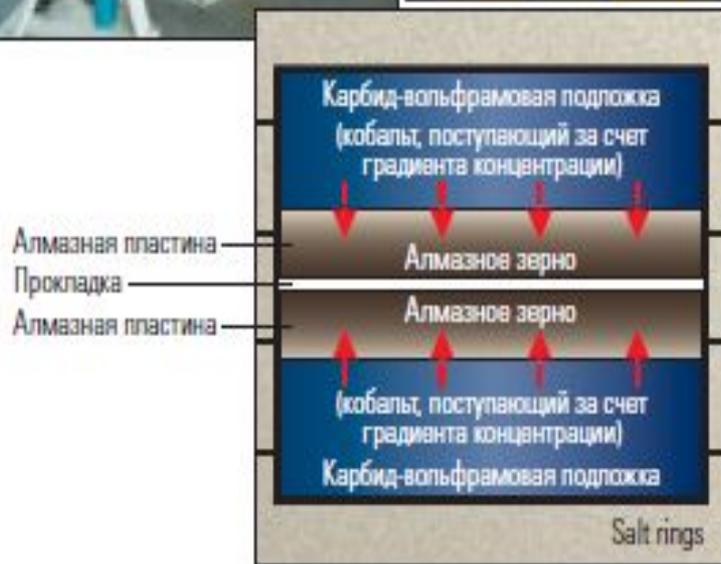
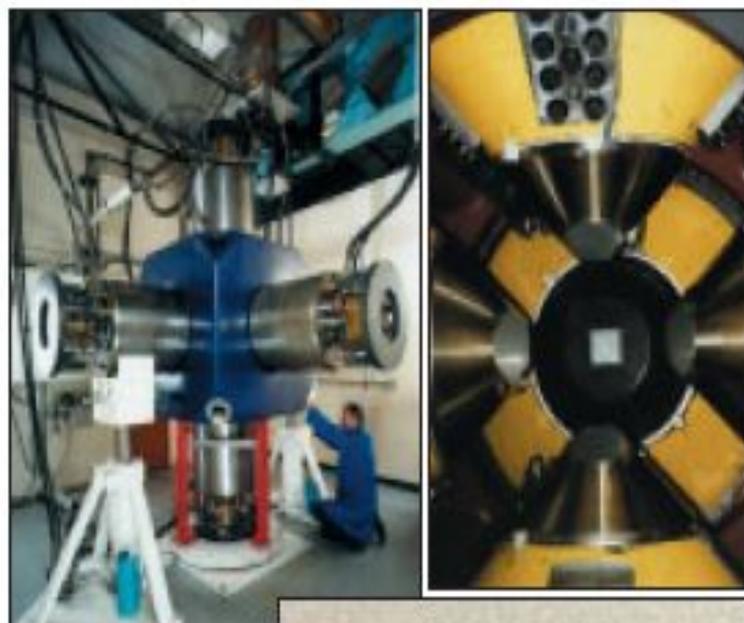


Алмаз, являющийся самым твердым материалом, известным человеку, представляет собой почти чистый кристаллический углерод. Он в десять раз тверже стали, в два раза тверже и в 10 раз более устойчив к износу, чем карбид вольфрама, и в 20 раз прочнее на сжатие, чем гранит, имеет самый низкий коэффициент трения и самую высокую теплопроводность из всех известных материалов. В долотах с природными алмазами используются алмазы промышленного класса, а не ювелирного качества, и это природные камни, которые дробят и обрабатывают для получения алмазов определенного размера и однородной округлой формы. Механическая скорость проходки относительно низкая—максимум около 20 футов/час (6м/час), но правильно спроектированное алмазное долото может бурить до шести суток с проходкой до 15 тыс. футов (4572м) в породах от среднетвердых до твердых. Когда алмазные долота внедрились в первый раз, использовались мельчайшие зерна алмазов. Алмазы размещали в лопастях из карбида вольфрама во время их обработки по методу спекания, но лопасти имели тенденцию к слишком быстрому износу, потере зерен алмаза и к прекращению бурения. Это послужило поводом к применению обычных алмазных долот с более крупными камнями, расположенными в определенном порядке. Однако когда из матрицы теряются расположенные на поверхности природные алмазы, или когда они становятся заполированными, для бурения пород не остается острых и твердых элементов. Механическая скорость проходки снижается, и имеют место отказы из-за износа по диаметру.

В первое время принцип использования долот с природными алмазами не был точно определен, и их конструкции были основаны на интуиции. В настоящее время алмазные долота и размеры алмазов подбирают в соответствии с твердостью пород. В долотах для более мягких пород используются крупные алмазы для получения борозд. Маленькие алмазы больше оказывают шлифовальное воздействие и их применяют для бурения твердых пород. Природные алмазы образуются глубоко в земле в условиях интенсивного тепла и экстремального давления в течение тысяч лет. В начале семидесятых годов прошлого столетия компания «Дженерал Электрик» разработала процесс спекания для получения синтетических алмазов. Тонкие круглые слои перемежающихся слоев углеродного графита и кобальта размещают в небольших формах и прессуют при давлении 2 млн. psi [13 733 МПа], после чего следует нагрев до 2732°F [1500°C] в течение пяти минут. Расплавленный кобальт, действующий в качестве катализатора и растворителя, растворяет графит и откладывает монокристаллические алмазные зерна, которые образуют конгломераты и сцепляются вместе, образуя слой поликристаллического алмаза, или пластину. Отдельные кристаллы, как и природные кристаллы, отделяются при воздействии ударной нагрузки в определенном направлении, но сцепленные поликристаллические алмазы не имеют плоскостей кливажа и они более устойчивы к ударам.

Компания Reed-Hysalog использует внешних поставщиков, но она также производит резцы с синтетическими поликристаллическими алмазами для исследований и для производства долот с помощью двух собственных прессов кубических алмазов (рис.17). Такой подход помогает установить технические характеристики синтетических поликристаллических алмазов, а не прибегать к их оценке и принятию только стандартной продукции. Резцы с синтетическими поликристаллическими алмазами состоят из дисков с синтетическими алмазами и более толстой подложки цементированного карбида. Кобальт обеспечивает сцепление с подложкой с получением однородного материала, который часто сцеплен с более длинным столбиком из цементировочного карбида для их установки. При нагреве кобальт расширяется больше, чем алмаз. При температуре 1292°F [700°C]. Это расширение приводит к нарушению сцепления кобальта и алмаза и поэтому резцы с синтетическими поликристаллическими алмазами необходимо держать при температуре ниже данной величины, чтобы избежать поломок. Чтобы преодолеть это ограничение, производят теплоустойчивые поликристаллические алмазы (TSP) путем обработки новых синтетических алмазов в кислоте для выщелачивания кобальта.

Рис. 17. Синтез поликристаллического алмаза. Компания Reed-Hycalog производит синтетические поликристаллические алмазы, используя два собственных пресса кубических алмазов с шестью независимо контролируемыми рабочими столами, расположенными попарно друг против друга, с помощью которых создают сверхвысокое давление и температуру, чтобы обеспечить сцепление двух алмазов (слева). Резцы с синтетическими поликристаллическими алмазами состоят из сцементированного слоя частиц синтетических алмазов или алмазной пластинки на более толстой карбид-вольфрамовой подложке (в середине). Это режущее оружие используют в таком виде или цементируют на более длинном карбид-вольфрамовом столбике, что усиливает цементирование и обеспечивает большее воздействие резца. Производство синтетических поликристаллических алмазов требует точного контроля давления и температуры (справа). Современное оборудование и собственные технологии синтеза позволяют контролировать характеристики синтетических поликристаллических алмазов, улучшить контроль процесса и осуществлять дальнейшее совершенствование продукта.



Резцы с TSP устойчивы при температуре до 2100°F [1150°C], но их укрепляют на месте механическим способом, так как их нельзя укрепить непосредственно к держателю. Вместо кобальта можно использовать кремний, который вступает в реакцию с частицами алмазов с получением карбида кремния. Карбид кремния сцепляет частицы алмаза, и имеет гораздо меньший коэффициент теплового расширения, чем кобальт. Такая форма TSP устойчива при температуре выше 1150°C, но для нее трудно обеспечить сцепление. Резцы с синтетическими поликристаллическими алмазами более устойчивы к ударной нагрузке, чем природные алмазы, и очень эффективны в твердых, умеренно абразивных породах. Сопротивление абразивности было значительно улучшено после 1994 года вследствие быстрого развития технологии материалов, однако все еще требовался компромисс из-за обратной взаимосвязи между ударными и абразивными характеристиками. Ударное и абразивное сопротивление зависит главным образом от размера зерен алмазов и от обработки. Более крупные зерна делают алмазные элементы более устойчивыми к ударам, но менее устойчивыми к абразивному воздействию. Зерна меньшего размера повышают сопротивление абразивности, но снижают сопротивление ударным нагрузкам.

Компания Reed-Hyscalog оптимизирует алмазные режущие структуры путем смешивания алмазов различных размеров для обеспечения повышенного сопротивления в отношении абразивности и ударного воздействия (рис.18). Эффективность применения синтетических поликристаллических алмазов также ограничивается толщиной алмазной пластины, которая является функцией диффузии кобальта от карбид-вольфрамовой подложки в алмазный слой, а также напряжениями, создаваемыми при тепловом расширении карбида вольфрама и при его усадке. Высокие остаточные напряжения и незаплавленные зерна алмазов в результате неполного проникновения кобальта во время синтеза поликристаллических алмазов могут вызвать расслоение, отслоение и образование трещин в алмазных пластинах, что сокращает срок службы резца и приводит к преждевременному прекращению рейса долота. В усовершенствованных резцах ASTRA используется конструкция неплоских границ (NPI) для преодоления некоторых ограничений, присущих обычным резцам с плоской планарной границей между алмазной пластиной и подложкой (рис.19). Слабыми местами поликристаллических алмазов всегда были толщина алмазной пластины и остаточные напряжения, но усовершенствования в обработке и геометрия NPI позволили увеличить объем алмазов и снизить напряжения в современных резцах.

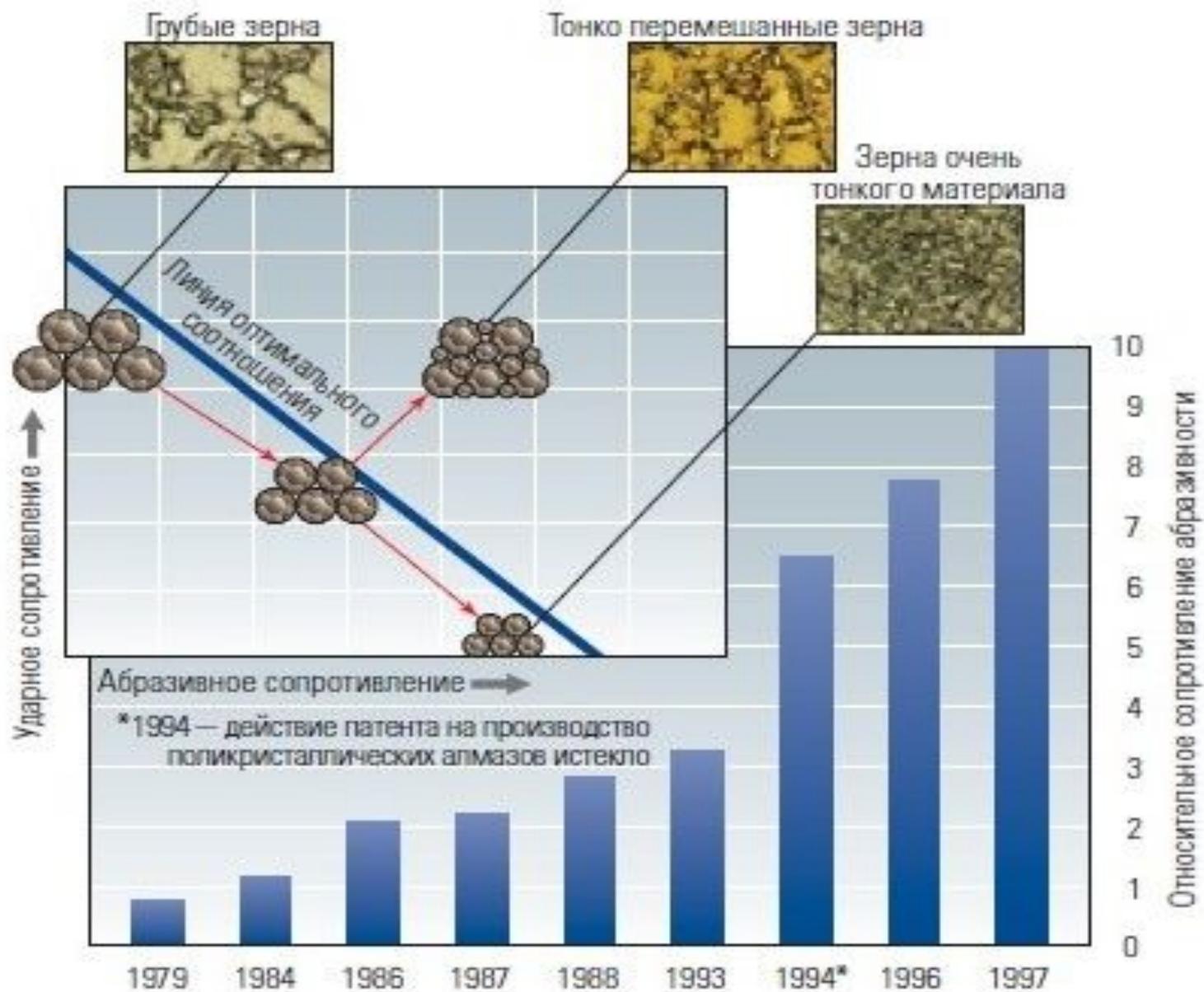




Рис. 19. Усовершенствованные резцы. Эффективность резцов с синтетическими поликристаллическими алмазами повышается не только за счет алмазного материала с лучшим ударным и абразивным сопротивлением, но также за счет геометрии. Непланируемая поверхность обеспечивает механическое зацепление между алмазной пластиной и карбид-вольфрамовой подложкой и представляет собой большую площадь поверхности для диффузии кобальта (слева). Это улучшает профиль напряжений относительно планарных резцов с синтетическими поликристаллическими алмазами, увеличивает сопротивление ударному воздействию и позволяет значительно увеличить объем алмазов. Усовершенствования в ударной жесткости также внесли свой вклад в повышение абразивного сопротивления за счет снижения едва обнаруживаемого микроскалывания алмазных пластин. Однако дело заключается вовсе не в увеличении объема алмазов. Более толстые алмазные пластины имеют меньшее сопротивление к абразивности, поэтому следует оптимизировать характеристики абразивности и износа за счет ударного воздействия. Скошенные резцы снижают первоначальные концентрации напряжений на краях синтетических поликристаллических алмазов (вверху справа).

Геометрия NPI снижает остаточное напряжение от усадки карбида и обеспечивает механическое сцепление на границах алмазов и карбида с увеличением сопротивления ударной нагрузке. Дополнительная площадь поверхности для сцепления и диффузия кобальта обеспечила увеличение объема алмазов на 25–40%. Сильные удары вызывают появление сколов в резцах, особенно когда резцы с синтетическими поликристаллическими алмазами новые, и когда вся нагрузка на долото и режущая сила направлены на угловой наконечник. По мере износа резцов силы распределяются вдоль изношенных краев, снижая напряжения и риск повреждения. Резцы TuffEdge имеют небольшую фаску, которая снижает концентрацию напряжений в момент, когда режущие элементы вступают в контакт с породой и начинают резать. Для всего процесса бурения важную роль играет стабильность долота с синтетическими поликристаллическими алмазами. При проектировании и выборе долот с синтетическими поликристаллическими алмазами важно понимать динамические параметры и характеристики конструкции, которые помогают преодолевать разрушительные движения долота в скважине. Стабильное долото увеличивает механическую скорость бурения и улучшает качество ствола скважины, долото служит дольше, оно снижает возможность повреждения другого забойного оборудования и улучшает контроль наклонно-направленного бурения за счет более ровных характеристик крутящего момента.

На забое долота с синтетическими поликристаллическими алмазами совершают очень хаотичные движения, которые включают боковые, осевые и крутильные вибрации, отмечающиеся отдельно и в комплексе. Забойные вибрации снижают срок службы долота за счет повреждения отдельных резцов с синтетическими поликристаллическими алмазами, они мешают контролю траектории скважины и работе телеметрической системы геофизических исследований скважины в процессе бурения за счет колебаний в крутящем моменте и снижают качество ствола скважины за счет создания ствола неправильной формы и невыдержанного диаметра. Забойные боковые, осевые и крутильные вибрации представляют, соответственно, движения завихрения, подскоков долота и прихвата-скольжения (рис. 20). Когда резцы с синтетическими поликристаллическими алмазами асимметрично внедряются в забой скважины, мгновенный центр вращения перемещается в это место и долото пытается вращаться вокруг точки, не представляющей геометрический центр. Это создает обратнаправленное движение, или завихрение, поскольку центр вращения движется вокруг ствола против направления вращения долота.

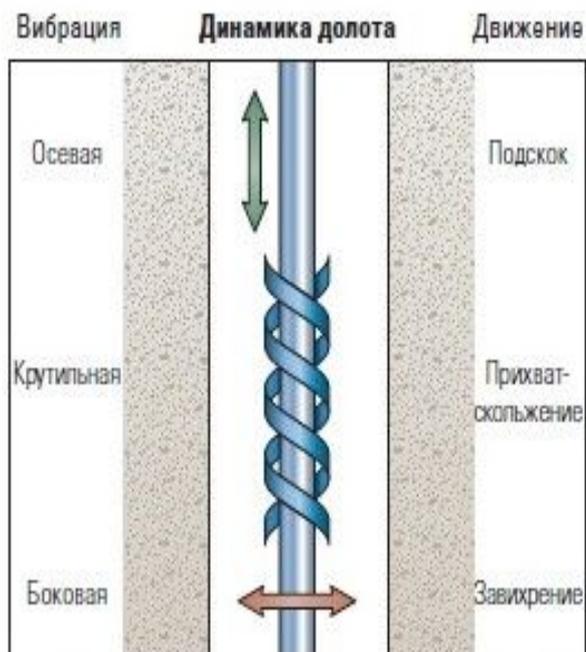


Рис. 20. Забойные вибрации. Динамика долота с синтетическими поликристаллическими алмазами охватывает три основных режима вибрации: осевой, крутильной и боковой, которые происходят, соответственно, от подскоков долота, прихвата-скольжения и от вихревых воздействий (вверху слева). Завихрение — это любое регулярное движение, характеризующееся вращением долота вокруг точки, находящейся за пределами геометрического центра. Завихрение в обратную сторону, при котором центр вращения движется вокруг ствола скважины в сторону, противоположную направлению вращения долота, снижает эффективность работы долота, повреждает резцы с синтетическими поликристаллическими алмазами и является причиной образования прогнозируемого лепесткового характера забоя (вверху справа). Лепестки обычно продолжают по глубине по спирали на стенке скважины (внизу слева), что нельзя путать со спиральным стволом, где центральная линия имеет вид штопора. Стабильное долото выполняет концентрическое круговое резание (внизу справа). Прихват-скольжение является тенденцией долота к замедлению или остановке, набору крутящего момента и затем ускорению, когда оно начинает раскручиваться при освобождении. Подскоки имеют место, когда долото подскакивает вверх и вниз на забое. На забое могут иметь место как отдельные виды движения долота, так и комплексные.

В результате этого создается многолепестковая картина забоя скважины вместо концентрического кругового резания стабильным долотом. Боковые вибрации и высокие ударные нагрузки на заднюю часть резцов с синтетическими поликристаллическими алмазами снижают срок службы долота и могут вызвать его серьезную поломку. Менее разрушительное переднее завихрение происходит, когда мгновенный центр вращения движется по направлению вращения долота. Конструкции стабильного долота снижают боковое движение путем регулировки типа резцов, размера, плотности, ориентации и места таким образом, чтобы дорожки резцов совпадали или чтобы они не слишком сильно углублялись. Обратный наклон резца контролирует степень агрессивности резца по отношению к породе, и его можно использовать для снижения вибрации, но высокие углы также ограничивают глубину резания и механическую скорость бурения. В дополнение к укреплению новых кромок резцов с синтетическими поликристаллическими алмазами резцы TuffEdge со скошенными ведущими кромками снижают агрессивность долота, что также увеличивает стабильность.

Резцы DiamondBack с синтетическими поликристаллическими алмазами, расположенные за основными резцами на одной и той же лопасти и на той же глубине резания, обеспечивают стабильность путем совпадения их дорожек и увеличения объема алмазов на плечах долота, что позволяет получить более короткий и более стабильный профиль. Профиль долота и структура или конфигурация калибрующего вооружения способствуют обеспечению стабильности. Во время лабораторных испытаний профили, которые были плоскими или которые имели глубокие внутренние шарошки, снижали степень вибрации долота. Спиральные площадки калибрующего вооружения снижали способность долота к боковому проникновению или долблению стенок скважины за счет увеличения кругового контакта. Скошенные площадки калибрующего вооружения ограничивают боковую агрессивность и снижают тенденцию долота захватить стенку ствола скважины и привести к нестабильности. Асимметричное положение лопастей помогает разрушению лепестковых структур в стволе скважины. Спиральные лопасти дополняют асимметричность долота, нарушая единую линию контакта резцов, и поэтому долото не может однородно обрабатывать боковую сторону породы и создавать точку вращения в стороне от центра долота.

Забойные условия создают множество сил, действующих на буровое долото. Балансировка долот с помощью конструктивных особенностей лопастей и резцов, которые сводят к минимуму неуравновешенные силы, давно считалось обязательным требованием для обеспечения стабильности. Хотя всевозможные вариации, такие как анизотропия породы и ее твердость, оказывают негативное воздействие на балансировку режущих структур, по балансировка сил будет, крайней мере, ослаблять боковые вибрации, создаваемые долотом. Во многих случаях долота с одной или несколькими стандартными стабилизирующими характеристиками содействовали ослаблению проявления динамики долота и обеспечивали приемлемую работоспособность. Однако, в случае сильных вибраций и значительных ударных воздействий нужны другие меры. Другим методом является применение большого низкофрикционного калибрующего вооружения (LFGP) на одной стороне долота и размещение резцов с синтетическими поли-кристаллическими алмазами таким образом, чтобы неуравновешенные силы были в направлении калибрующего вооружения. Конструкция LFGP с противовихревым действием была разработана в Amoco Research для сведения к минимуму боковых вибраций.

Недостатком этого метода является трудное прогнозирование этих неуравновешенных сил и их направлений. Компромиссом для стабильности долота LFGP могут послужить значительные силы, направленные в сторону, подобные силам, отмечаемым при наклонно-направленном бурении.

Для устранения таких неопределенностей компания Reed-Nucalog использует более сильное низкофрикционное калибрующее вооружение без режущих элементов. Поскольку противовихревые долота не обладают способностью бокового бурения, забойные компоновки должны сводить к минимуму боковые силы для получения оптимальных характеристик бурения. В дополнение к характеристикам стандартной стабильности и к противовихревым LFGP долотам используют такие концепции проектирования, как непрерывное калибрующее вооружение и последовательно расположенные и гибридные резцы для обеспечения стабильности долота. Долота Steeringwheel имеют 360° непрерывный калибрующий венец для центровки долота и для поддержания боковой стабильности (рис.21).

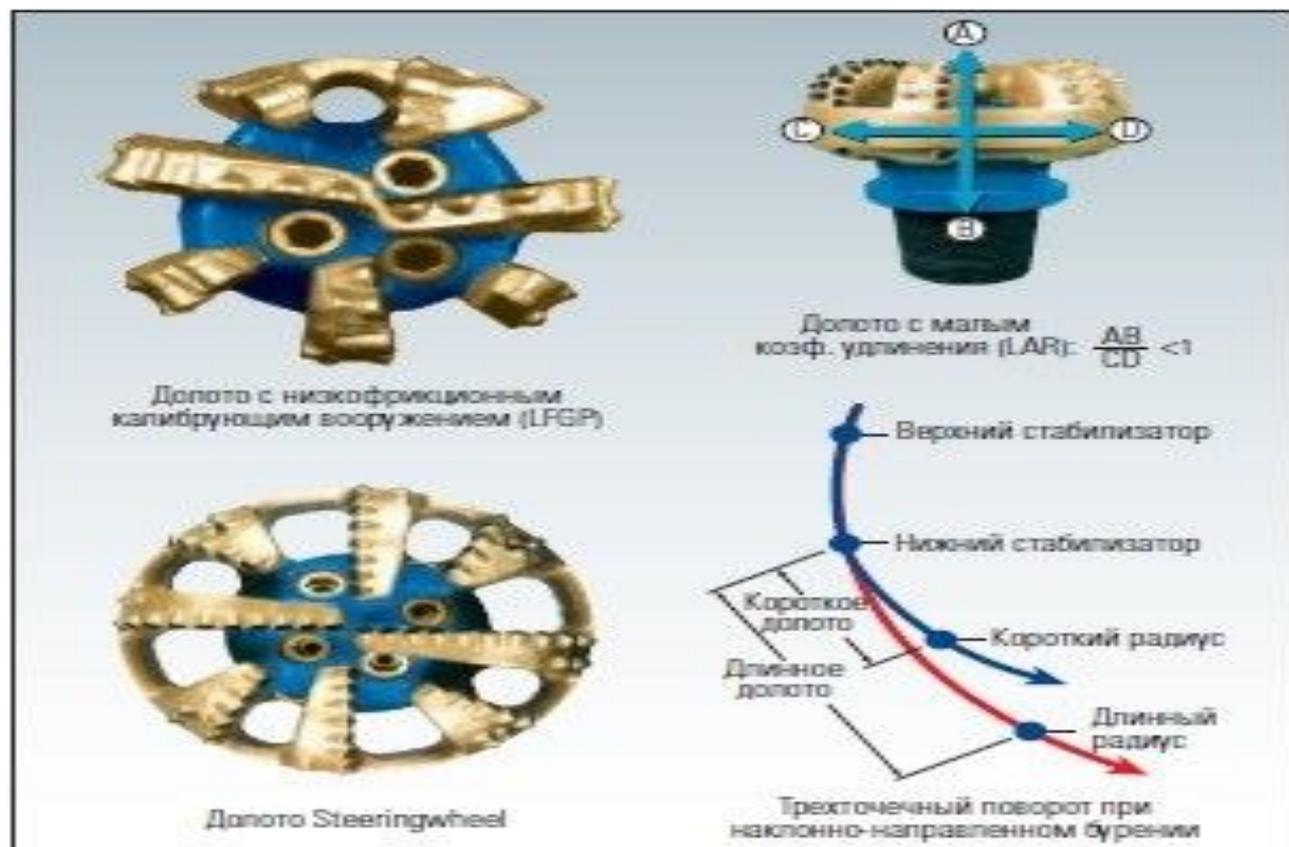


Рис. 21. Стабильность и наклонно-направленное бурение. В стандартных противовихревых долотах используется низкофрикционное калибрующее вооружение большой площади (LFGP) (вверху). Резцы с синтетическими поликристаллическими алмазами размещаются таким образом, чтобы не уравновешенная сила была направлена в сторону этого несущего калибрующего вооружения. Долота Steeringwheel выходят за пределы концепции LFGP, предусмотрев 360° непрерывное кольцевое калибрующее вооружение (внизу слева). Такая концепция предусматривает центровку долота и ограничение боковых движений путем предотвращения наружных резцов от разрушения породы, что снижает возможность завихрения и увеличивает срок службы режущего вооружения. Эти долота бурят ровные стволы скважины с диаметром, выдержанным по калибру, они имеют меньше колебаний крутящего момента и более предсказуемую передачу веса. Равномерные характеристики крутящего момента долот Steeringwheel в сочетании с малым коэффициентом удлинения (LAR) и коротким режущим профилем делают эти конструкции хорошо пригодными для наклонно-направленного бурения (справа вверху и внизу).

Обеспечивая круговой контакт калибрующего вооружения, маловероятно, что долото сместится к стенке ствола скважины, что будет уменьшать боковые вибрации, продлять срок службы режущих структур и повышать качество ствола скважины. Эти долота создают минимальный реактивный крутящий момент и колебания величин крутящего момента и они бурят ровные стволы скважины, облегчая скольжение инструмента и передачу веса, что важно для управления компоновкой при наклонно-направленном бурении. Долота Steeringwheel сочетают эффективность работы шарошечных долот при наклонно-направленном бурении с высокой механической скоростью бурения долот с синтетическими поликристаллическими алмазами и отвечают всем требованиям в отношении бурения наклонно-направленных и горизонтальных скважин, включая малый коэффициент удлинения (LAR), равномерный крутящий момент и стабильное противовихревое действие. Короткое долото легче повернуть, чем длинное. Долота LAR имеют коэффициент удлинения, т.е. величину длины долота, поделенную на величину диаметра, меньше единицы, и оно может легче обеспечить угол набора и падения зенитного угла и поворота азимутального угла.

Предназначенные главным образом для контроля при наклонно-направленном бурении, долота Steeringwheel имеют короткий калибрующий диаметр и плоский профиль, что удовлетворяет требованиям LAR. Резцы с синтетическими поликристаллическими алмазами, которые следуют друг за другом, стремятся работать по бороздам, созданным ведущими резцами, что восстанавливает стабильность. Однако, глубокие борозды уменьшают режущую эффективность и снижают механическую скорость бурения до 66%. В модифицированных долотах применяется конфигурация с двойными лопастями с умеренным следованием по бороздам для балансировки стабильности и механической скорости бурения (рис. 22). Резцы на основных лопастях удаляют около 80% породы. Резцы на второстепенных лопастях удаляют меньше материала и не снижают механической скорости бурения подобно дополнительным резцам на лопастях сильно вооруженных стандартных долот. Когда модифицированные долота встречаются твердые породы, вторичные долота играют более важную роль. Последовательные резцы снижают нагрузки на основные резцы и улучшают стабильность долота, обеспечивая их больший срок службы. Долота Steeringwheel и Transformation обеспечивают дополнительную стабильность для конструкций LFGP.

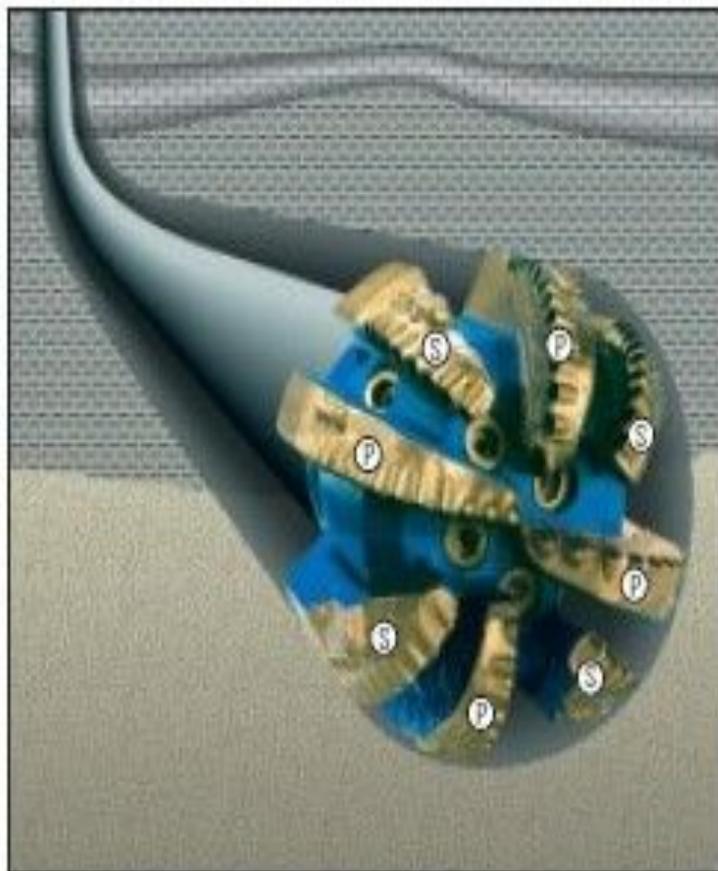
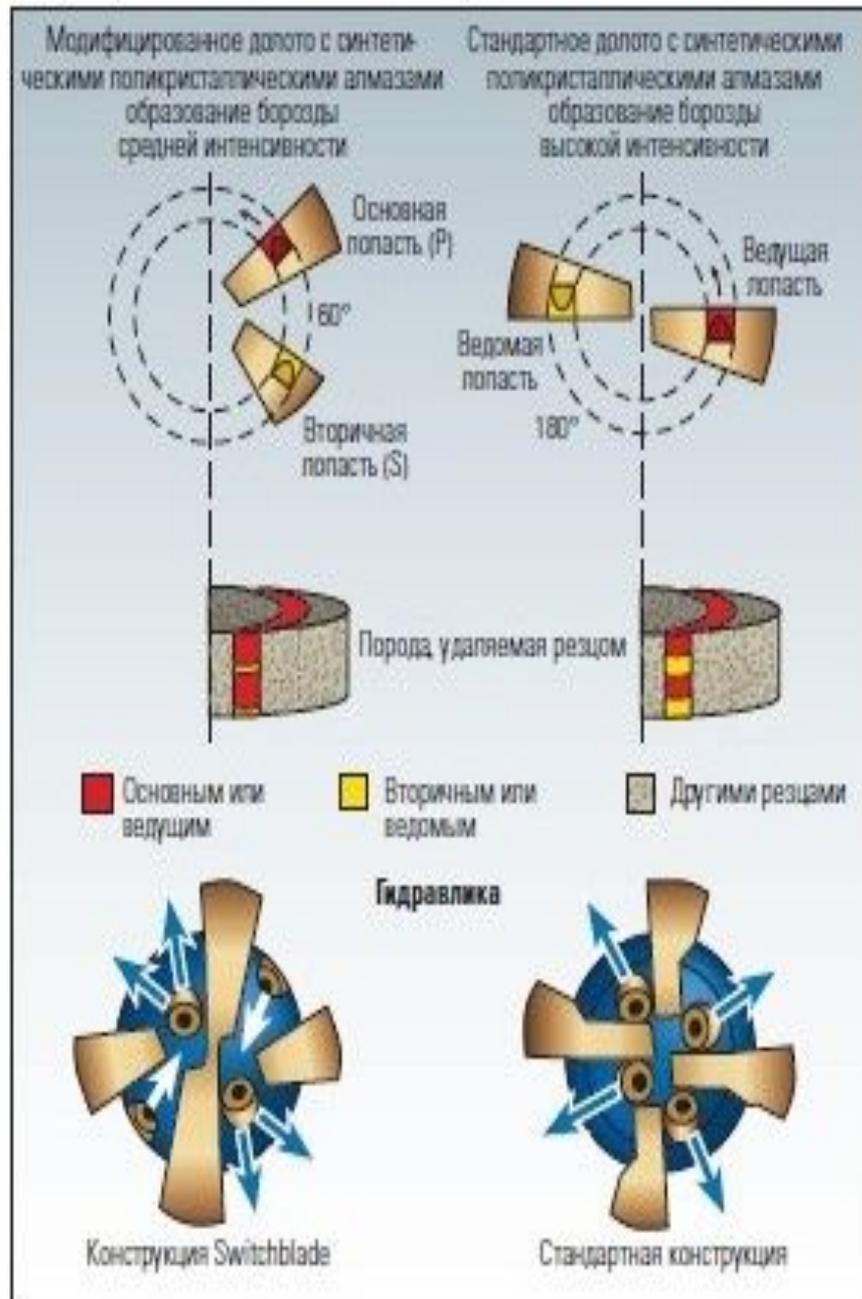
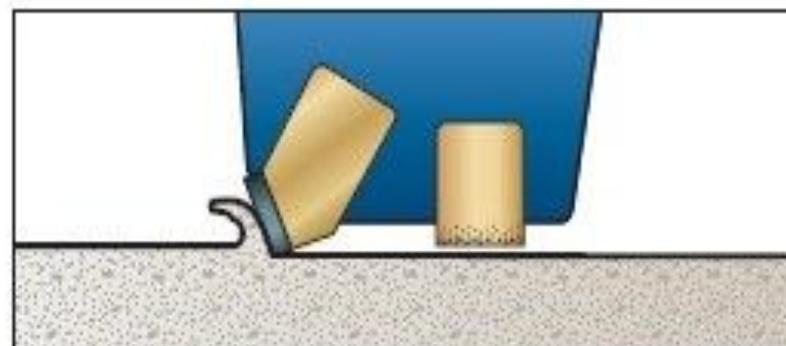


Рис. 22. Работа резцов и усовершенствованная гидравлика. Лопастей стандартных долот с синтетическими поликристаллическими алмазами обычно несут равномерную нагрузку по разрушению породы. Для эффективного бурения переслаивающихся мягких и твердых пород, модифицированные долота имеют пары основных (P) и вторичных (S) лопастей (слева). Различное расстояние между режущими резцами на соседних лопастях позволяет резцам на основных лопастях удалять больше породы, чем резцы на этой же самой дорожке на вторичных лопастях (вверху справа). Это позволяет долоту обеспечивать более высокую скорость бурения в мягких породах и снижать нагрузки на резцы в более

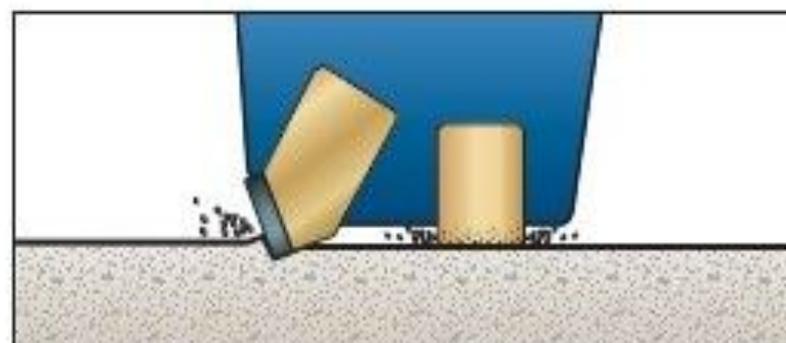


В них используется передовая гидравлика. В запатентованной конструкции перекрестного потока применяются корпусные насадки, направленные на каждую основную лопасть, и внекорпусные насадки перед каждой вторичной лопастью. Промывочная жидкость выходит из наружных насадок, очищая и охлаждая только резцы на вторичных лопастях перед попаданием внутрь. Высокоскоростной поток с внутренних насадок создает перепад давления, или эффект Вентури, который притягивает поток от наружных насадок через долото по суженному месту между лопастями. Основные лопасти получают промывочную жидкость от внутренних и наружных насадок. Эти конструкции Switchblade распределяют гидравлическую энергию более эффективно для улучшения очистки и охлаждения долота и для повышения механической скорости бурения. Гибридные долота сочетают технологии синтетических поликристаллических алмазов и природных алмазов. Отдельные карбид-вольфрамовые режущие элементы с импрегнированными алмазами размещают за основными резцами с синтетическими поликристаллическими алмазами. Каждый импрегнированный резец совместно с резцом с синтетическими поликристаллическими алмазами воспринимает нагрузку на сильно изнашиваемых участках долота. Эти вторичные резцы защищают резцы с синтетическими поликристаллическими алмазами в сложных буровых условиях и снижают износ в твердых абразивных породах (рис.23). Гибридные конструкции улучшают стабильность

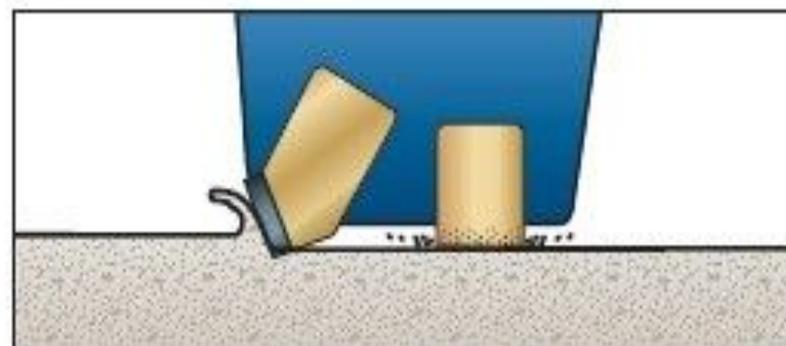
Рис. 23. Гибридные режущие элементы. Объединяя технологии использования синтетических поликристаллических алмазов и вставок с импрегнированными природными алмазами, можно помочь защите резцов с синтетическими поликристаллическими алмазами от абразивного износа и от повреждения со стороны забойных вибраций для повышения износоустойчивости и увеличения срока службы. Когда гибридные долота еще новые, вставки с импрегнированными алмазами не имеют контакта с породой, и долото работает как стандартное долото с синтетическими поликристаллическими алмазами, обеспечивая максимальную механическую скорость бурения (*вверху*). По мере износа резцов с синтетическими поликристаллическими алмазами в твердых породах, алмазные вставки начинают резать породу и принимать все более возрастающую нагрузку, что сводит к минимуму возможность повреждения синтетических поликристаллических алмазов (*в середине*). В мягких породах более эффективные резцы с синтетическими поликристаллическими алмазами вновь принимают на себя большую часть нагрузки и эффективность резания остается высокой (*внизу*).



Новое гибридное долото



Твердая порода



Мягкая порода

долота, предотвращая от слишком глубокого резания, что сводит к минимуму боковые и крутильные вибрации от завихрения и прихвата-скольжения. Резцы с импрегнированными алмазами также принимают на себя большую часть ударной нагрузки от обратного вращения долота, связанного с завихрением. Направленные вверх и вниз осевые вибрации, или подскоки долота, изменяют глубину резания, что приводит к значительному увеличению крутящего момента. Импрегнированные резцы ограничивают проникновение в породу и сглаживают резкие изменения крутящего момента. Импрегнированные резцы установлены ниже, чем резцы с синтетическими поликристаллическими алмазами, поэтому при увеличении нагрузки на долото они вступают в контакт с породой и снижают влияние крутящего момента на изменение величины нагрузки на долото, что является очень важным фактором для наклонно-направленного бурения. Боковые нагрузки, которые воздействуют на долото при бурении с управляемыми забойными двигателями, приводят к ударному повреждению калибрующих резцов с синтетическими поликристаллическими алмазами. Для сохранения эффективного калибрующего вооружения в долотах Reed-Husalog с синтетическими поликристаллическими алмазами используются импрегнированные штифты для дополнительной защиты калибрующего венца.

Наклонно-направленное бурение и специальные долота

Долота с синтетическими поликристаллическими алмазами играют важную роль в наклонно-направленном бурении и являются ключевыми компонентами усовершенствованных систем, при бурении горизонтальных дренажных скважин и скважин с большим отходом от вертикали со сложными профилями. Конфигурации долот, режущее вооружение, гидравлические конструкции и защита калибрующих венцов — это области, в которых технологические достижения улучшили эффективность наклонно-направленного бурения. Для решения задач бурения наклонно-направленных скважин необходимы специально предназначенные для этих целей технологии.

Для оптимальной работы долота во время наклонно-направленного бурения необходимо свести к минимуму колебания величины крутящего момента. Изменяемый крутящий момент в управляемых двигателях снижает степень контроля и не дает возможность осуществлять управление процессом наклонно-направленного бурения. Для компоновок роторного бурения крутящий момент, создаваемый при прихвате-скольжении на долоте, создает нежелательные крутильные вибрации. Влияние крутящего момента можно снизить путем увеличения угла резцов, уменьшения размера резцов и применения гибридных вспомогательных резцов с импрегнированными алмазами.

Гибридная технология также снижает изменения значений крутящего момента. Скошенные резцы TuffEdge используют для сведения к минимуму повреждения синтетических поликристаллических алмазов. В долотах для бурения наклонно-направленных и горизонтальных скважин используются небольшие резцы с синтетическими поликристаллическими алмазами, плоские профили и долота общей короткой длины. Увеличивая площадь контакта в долоте с синтетическими поликристаллическими алмазами путем увеличения количества лопастей, резцов и калибрующего вооружения, также можно снизить степень колебаний значений крутящего момента. Имеются долота для роторных управляемых систем, с помощью которых бурят горизонтальные скважины и скважины с большим отходом от вертикали. Технология Push-the-bit, например, роторная управляемая система PowerDrive контролирует изменение траектории при наклонно-направленном бурении с поверхности при роторном бурении. Вместо применения управляемого двигателя для отклонения или направления долота, нагрузка, создаваемая инструментом, отклоняет долото в нужном направлении. Независимо от крутящего момента траектория долота контролируется забойными клапанами и башмаками.

Эти системы характеризуются меньшими значениями затяжек, они более эффективно передают вес на долото и обеспечивают более высокие механические скорости бурения. Непрерывное вращение труб улучшает очистку скважины и снижает извилистость ствола скважины, что означает меньшую необходимость в проработке ствола и меньшую стоимость использования буровой установки. Роторные управляемые системы позволяют использовать агрессивные долота и обеспечивают возможность оптимизации долот. Специфические особенности долот с синтетическими поликристаллическими алмазами позволяют свести к максимуму характеристики роторной управляемой системы. Долота для этих систем требуют применения малых коэффициентов удлинения и активного калибрующего венца или агрессивного режущего вооружения на калибрующем венце (рис.24). Стандартные долота с синтетическими поликристаллическими алмазами не обладают значительной способностью для бокового резания. Традиционные элементы защиты калибра в виде карбид-вольфрамовых вставок или вставок с импрегнированными алмазами, теплоустойчивых поликристаллических пластинок и предварительно уплощенных резцов с синтетическими поликристаллическими алмазами используют только для сохранения диаметра долота и для бурения скважин полным номинальным диаметром.



Стандартный калибрующий венец



Активный калибрующий венец

Рис. 24. Активный калибрующий венец. Управляемые долота для роторно-го бурения требуют применения агрессивного режущего вооружения на калибровочном венце. Для достижения необходимых траекторий ствола скважины долото должно резать бок ствола, так как роторные управляемые инструменты прикладывают боковые силы для поворота долота в нужном направлении. В отличие от стандартной защиты калибрующего вооружения (*слева*), активный калибрующий венец характеризуется уменьшенным диаметром долота, наличием по всему периметру долота калибрующих резцов с синтетическими поликристаллическими алмазами и с обратными углами наклона вдоль всей длины калибра, а также с зубцами из карбида вольфрама, которые контролируют глубину бокового резания (*справа*). Максимальное количество открытых резцов улучшает боковое резание и увеличивает срок службы долота. Уменьшенные диаметры долота снижают трение и содействуют потоку промывочной жидкости на участке калибрующего венца, что обеспечивает более качественное охлаждение и очистку.

Концепция активного калибрующего венца, впервые разработанная для использования на Северном море, предусматривает наличие резцов с синтетическими поликристаллическими алмазами по всему диаметру с гибридными карбид-вольфрамовыми резцами округлой формы, расположенными непосредственно за ними для защиты, и использование уменьшенного диаметра калибрующего вооружения без защиты с помощью вставок для увеличения степени обнажения резцов. Высокая плотность резцов калибрующего вооружения и малые углы обратного наклона на активном калибрующем венце обеспечивают агрессивную способность бокового резания и улучшают управляемость в отношении изменения траектории скважины. Точки контактов активного калибрующего венца, т.е. резцы и гибридные резцы, снижают трение калибрующего вооружения, его затяжки и крутящий момент долота. Меньшие диаметры калибрующего вооружения улучшают действие потока промывочной жидкости вокруг долота, что способствует охлаждению и очистке калибрующего вооружения и резцов. Активный калибрующий венец используют как в стальных, так и в матричных долотах. Данная методика обеспечивает надежную защиту калибра, однако стальные долота требуют применения устойчивого к эрозии твердосплавного усиления вследствие улучшенной активности потока вокруг калибрующего вооружения.

Опыт является важным фактором при принятии решения в отношении выбора бурового долота для наклонно-направленного бурения. Компания «Шлюмберже» в таких случаях использует концепцию PowerSteering, представляющую собой уникальное объединение технологии и опыта. В сложных условиях наклонно-направленного бурения процесс PowerSteering обеспечивает подбор технических характеристик соответствующего долота, модификацию имеющихся долот или конструкции заказного долота.

Иногда существует необходимость расширения имеющихся скважин или бурения скважин большего диаметра ниже обсадной колонны, особенно при необходимости улучшения качества цементировочных работ или при заканчивании скважин в породах, которые характеризуются разбуханием или обрушением. В прошлом использовались механические расширители, которые расширялись для резания ствола скважины большего диаметра. В настоящее время для этих целей применяются асимметричные долота. Асимметричное долото проходит через ствол скважины меньшего диаметра для бурения скважины, которая будет иметь диаметр больше, чем в выше расположенном интервале или обсадной колонне (рис.25).

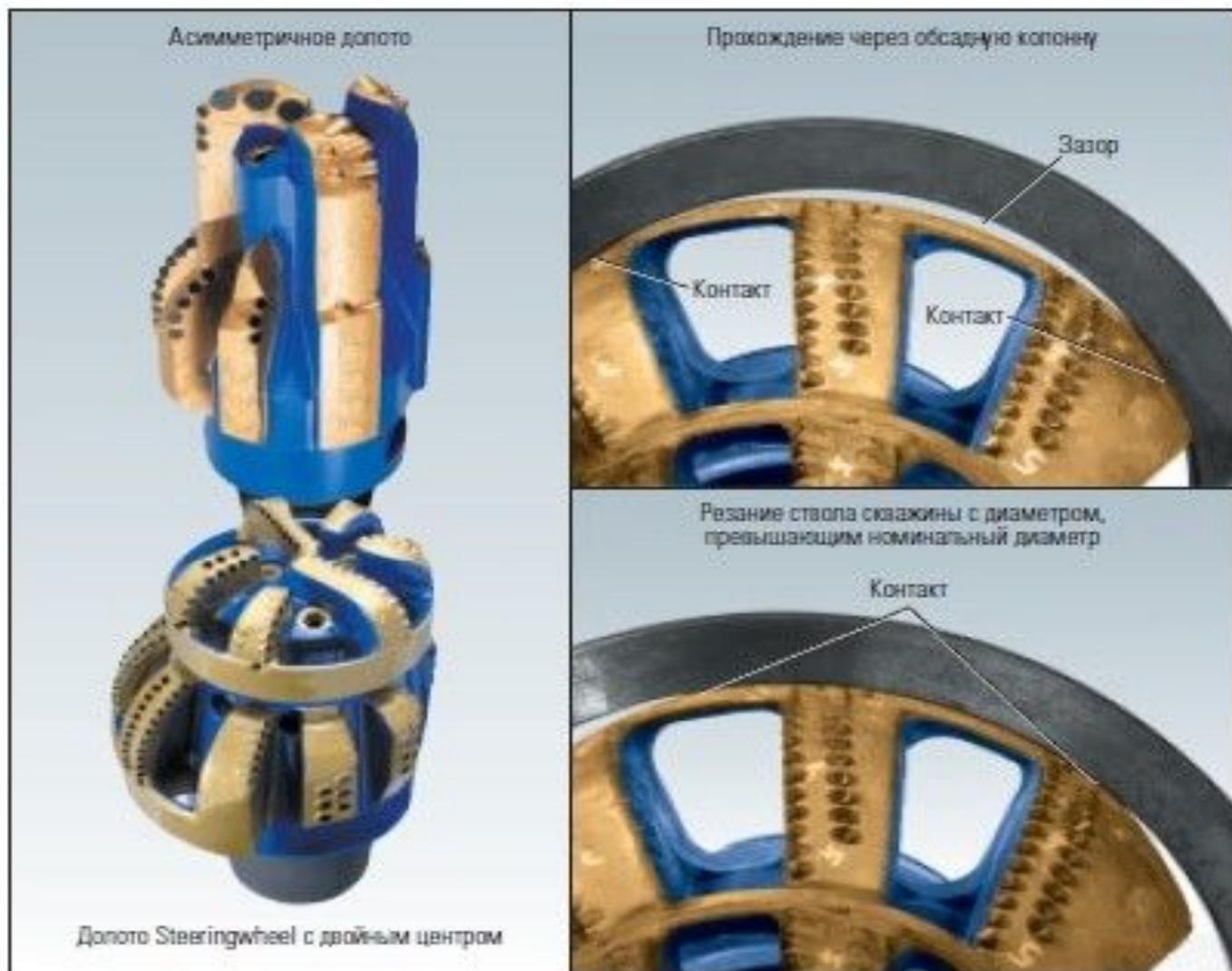


Рис. 25. Эксцентричные долота. Асимметричные долота имеют укрупненную структуру, как у расширителя, на одной стороне, что позволяет бурить скважины большего диаметра ниже обсадной колонны (вверху слева). Без вращения асимметрия позволяет долоту проходить через отверстия меньшего диаметра. Асимметричные долота Steeringwheel предназначены для разбуривания цемента и продолжения бурения наклонно-направленных скважин (внизу слева). Расширительная секция долота предотвращает возникновение контакта резцов с обсадной колонной при разбуривании цементировочного оборудования (вверху справа). Затем резцы на расширителе вращаются с долотом, прорезая ствол скважины диаметром, превышающим номинальный диаметр (внизу справа).

Последние варианты этих долот сочетают характеристики асимметричного расширителя и конструкции Steeringwheel для наклонно-направленного бурения с запатентованным расширителем, которые позволяют бурить скважину большего диаметра без замены долота после разбуривания цемента. Более короткие лопасти расширителя имеют такую форму, которая обеспечивает зазор между обсадной колонной и наружными резцами на самых длинных лопастях.

Долота с импрегнированными алмазами

Выбор долот для очень твердых абразивных пород подразумевает определенный компромисс. Долота с синтетическими поликристаллическими алмазами бурят быстро, но они быстро выходят из строя в абразивных условиях; шарошечные долота бурят медленнее, но могут быстро изнашиваться и бурить скважины с диаметром, меньше номинального. Долота с природными алмазами имеют более высокие показатели по механической скорости бурения и служат дольше, но их выбор ограничен, особенно для перемежающихся пород, где породы мягких прослоев забивают режущую поверхность долота и снижают эффективность бурения. За последние 10 лет о долотах с импрегнированными алмазами почти забыли, но сегодня вокруг них вновь наблюдается оживление.

С лучшей матрицей и алмазным материалом и с новыми технологиями изготовления значительно повысилось сопротивление износу. Долота с импрегнированными алмазами могут быть предназначены для бурения мягких или твердых и абразивных пород. Забойные турбины и двигатели также были усовершенствованы, они дольше служат в скважине и полностью используют преимущества, предлагаемые долговечными импрегнированными долотами.

Первые долота с импрегнированными алмазами, которые применялись еще в девятнадцатом столетии, бурили медленно, и их применяли главным образом в качестве последнего средства, если породы были слишком твердыми, абразивными или глубокими для шарошечных долот, долот с синтетическими поликристаллическими алмазами или долот с природными алмазами, укрепленными на поверхности. В настоящее время зерна алмазов расположены в теле карбид-вольфрамовой матрицы лопасти долота, что обеспечивает большее сопротивление износу. Вместо отдельных резцов вся поверхность долота содержит режущие элементы, установленные на глубине, на которой происходит циркуляция жидкости. Алмазы истирают твердые породы, а режущие элементы лопасти срезают мягкие породы, как долота с синтетическими поликристаллическими алмазами.

Механическая скорость бурения постепенно падает по мере округления кромок лопасти. Матрица истирается и непрерывно обнажает новые острые алмазы. Срок службы долота является функцией объема импрегнированных алмазов, которые могут работать на поверхности долота. Поэтому более высокие лопасти служат дольше. В прошлом долота с импрегнированными алмазами применялись ограниченно, в основном, для бурения твердых и абразивных пород с использованием высокоскоростных турбин. В последние несколько лет диапазон их применения расширился до бурения переслаивающихся песков, глин, карбонатов и угля, а также таких типов пород, как изверженных, метаморфических пород и конгломератов, в которых стали бурить наклонно-направленные скважины с использованием забойных двигателей. В настоящее время долота с импрегнированными алмазами способны бурить породы многих типов (рис.26). Баланс между характеристиками алмазов и матрицы оптимизирует процесс бурения и позволяет получить экономию при бурении, особенно при бурении с высокоскоростными поршневыми двигателями и с турбинами. Для расширения диапазона использования этих долот имеются долота трех профилей, глубокий профиль с двойным конусом, круглый профиль с двойным конусом и плоский профиль.

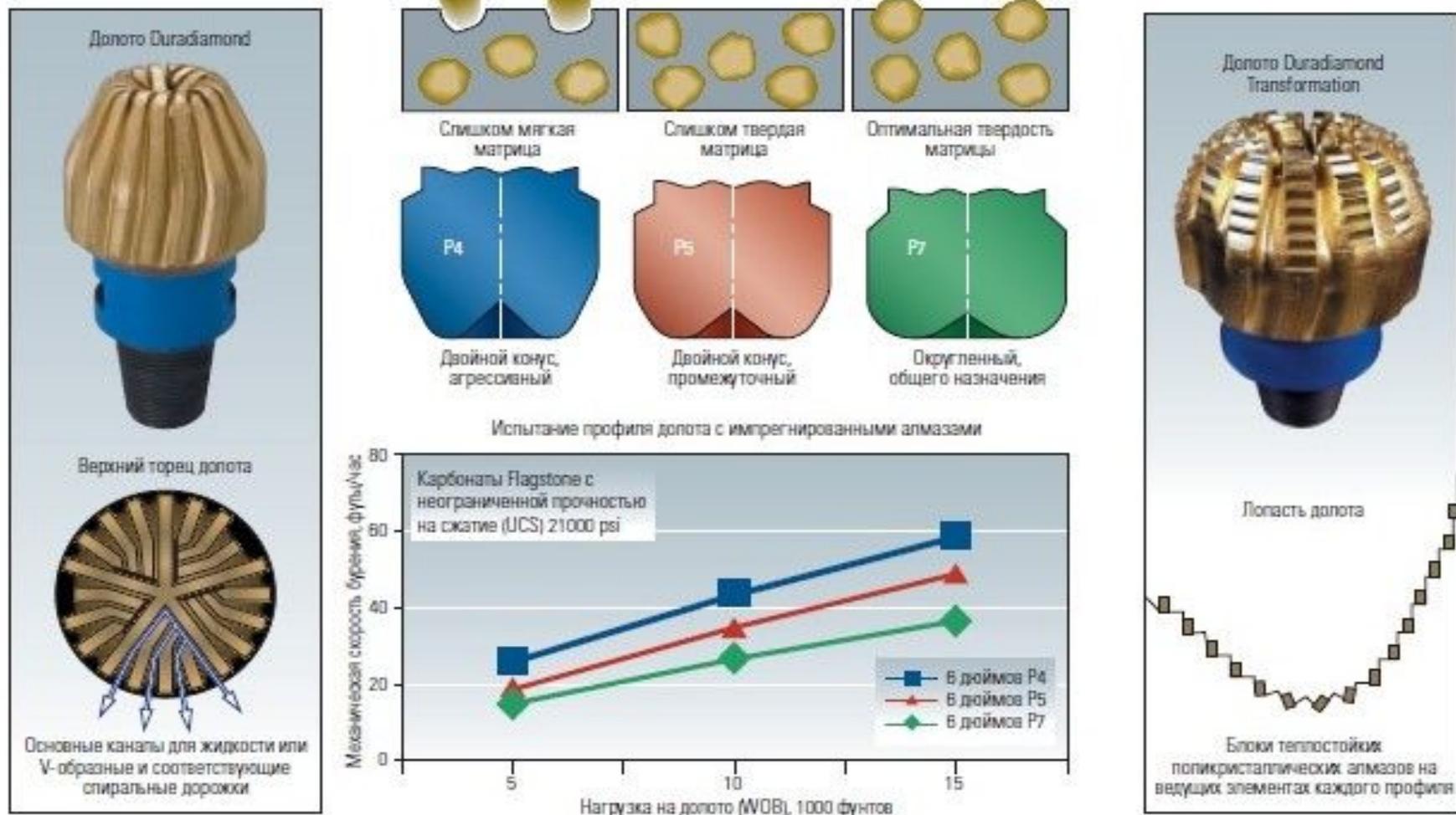


Рис. 26. Импрегнированные долота. Долота с импрегнированными алмазами представляют собой специальные шлифовальные круги. Технология Duradiamond обеспечивает разные варианты бурения любого типа пород. Были разработаны специальные смеси алмазов и карбида вольфрама для повышения механической скорости бурения и для увеличения срока службы долота. Соответствие скорости износа матрицы и алмазов уравновешивает срок службы долота и механическую скорость бурения. Если матрица слишком мягкая, алмазы обнажаются до их износа, что сокращает время работы долота. Если матрица слишком твердая, алмазы не будут обнажаться требуемым образом, и механическая скорость бурения будет малой. Имеется три профиля (в середине). Наиболее агрессивный профиль представлен глубоким двойным конусом (голубой) для бурения более мягких перемежающихся пород и горизонтальных интервалов. Округленный мелкий двойной конус (красный) используют для пород средней твердости. Более плоский округленный профиль (зеленый) является конструкцией общего назначения для более твердых абразивных пород и для интервалов набора зенитного угла в наклонно-направленных скважинах. В долотах Duradiamond (вверху слева) и Duradiamond Transformation (справа вверху и внизу) используется гидравлика радиального потока для обеспечения равномерного потока через верхний торец долота (внизу слева).

Поскольку импрегнированные долота также используют для бурения переслаивающихся пород, возникла потребность в более агрессивном режущем вооружении. Для мягких пород с тонкими твердыми прослоями импрегнированные долота были усилены теплостойкими кубическими или треугольными режущими элементами для повышения агрессивности. В конструкциях долот Duradiamond Transformation используются запатентованные профили с основными, вторичными и третичными лопастями различной высоты. Блоки теплостойких полисинтетических алмазов размещены на профилях на ведущих элементах каждой лопасти для обеспечения остроты этих лопастей. При использовании этих долот бурение начинают с помощью пяти лопастей, затем десятью лопастями и потом пятнадцатью лопастями по мере износа ребер изменяемой высоты. Поскольку в них нет участков низкого давления для прохода промывочной жидкости через долото, вторичные жидкостные каналы соединяются непосредственно с основными жидкостными каналами или V-образными каналами, и поэтому радиальный поток жидкости высокого давления попадает во все жидкостные каналы. Это обеспечивает равномерный поток во всех частях долота и снижает возможность образования пробок. Жидкостные каналы сходятся на уровне различных радиусов, распределяя участки без алмазов и снижая возможность износа по кольцу. V-образные жидкостные каналы легче подвергаются очистке, они обеспечивают максимальный объем лопастей и алмазных зерен для данного сечения потока и создают агрессивную режущую кромку.

Совершенствование характеристик фиксированных резцов

Бурение на месторождении Тупи в дельте реки Маһакат недалеко от г. Баликпапан, Индонезия, осложняется наличием переслаивающихся пород в интервале скважины диаметром 121/4 дюйма. В верхней части этого интервала литология представлена мягкими однородными песками и аргиллитами. Ниже породы представлены однородными песчаниками и глинами средней прочности. По всему интервалу встречаются не поддающиеся прогнозированию прослой известняков и доломитов. Прослой известняков, которые не абразивны и намного мягче доломитов, имеют мощность до 2м (7футов). Прослой очень твердых доломитов обладают низкой пористостью и имеют мощность около 0,5м (1,6фута).

Когда месторождение начали разрабатывать в 1973 году, интервал диаметром 121/4 дюйма проходили с помощью бурового раствора на водной основе и шарошечными долотами диаметром от 8 до 12 дюймов со средней механической скоростью проходки около 9м/час (30футов/час). В восьмидесятые годы прошлого столетия также использовали долота с синтетическими поликристаллическими алмазами и буровые растворы на нефтяной основе. Первые долота с синтетическими поликристаллическими алмазами имели стандартную конструкцию.

Для бурения этого интервала было необходимо использовать три шарошечных долота и три долота с синтетическими поликристаллическими алмазами, что позволило повысить среднюю механическую скорость проходки до 10м/час (33фу-та/час). В конце восьмидесятых—начале девяностых гг. прошлого столетия шарошечные долота заменили, и для бурения данного интервала использовали от трех до четырех до-лот с синтетическими поликристаллическими алмазами. Анализ затупленных долот указывал на то, что высокие ударные нагрузки в твердых доломитовых прослоях служили причиной серьезных поломок в виде отломанных, отколотых и выпавших резцов. После применения обычных противовихревых долот был проведен анализ, результаты которого свидетельствовали об улучшении характеристик бурения. Для снижения вибрации долота, главным образом бокового завихрения, и для бурения данного интервала одним долотом требовались более стабилизированные долота. Однако наличие переслаивающихся пород осложняло вопрос выбора оптимального долота. Характеристики долот, необходимые для проходки твердых прослоев, не соответствовали рабочим характеристикам, требуемым для бурения мягких пород.

Мягкие породы требовали применения эффективной гидравлической очистки, агрессивных профилей, крупных резцов и большего количества алмазов для достижения высоких механических скоростей проходки. Для увеличения срока службы долот при разбурировании прослоев твердых пород необходима противовихревая технология, низкое трение в калибровочном вооружении для обеспечения стабильности и резцы оптимальной конструкции.

Поломки резцов происходят за счет первоначального контакта в твердых прослоях и за счет повышенной вибрации, отмечающейся во время выхода из твердых пород. При входе в твердые породы носовые резцы первыми вступают в контакт, испытывая повышенную нагрузку по сравнению с резцами, которые все еще находятся в мягких породах. Такая перегрузка может быть снижена за счет короткого профиля. При выходе из твердых прослоев повышенную нагрузку испытывают резцы, расположенные на заплечике и в калибровочном вооружении. Такая перегрузка обладает еще более высоким разрушающим воздействием на долото, так как калибровочные резцы имеют больший радиус, чем торцевые резцы, что увеличивает инерцию ударной нагрузки.

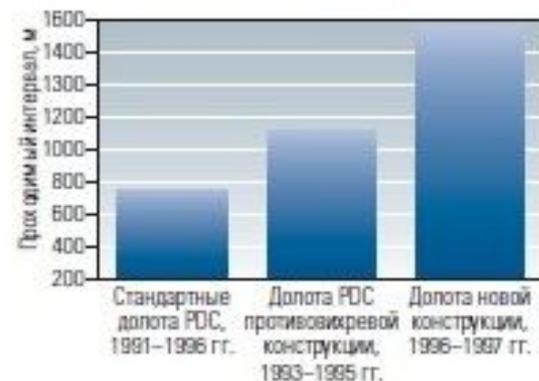
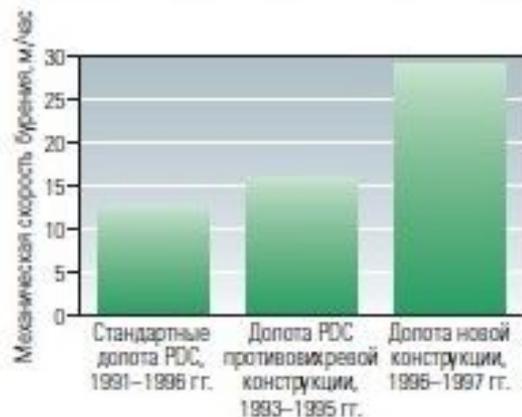
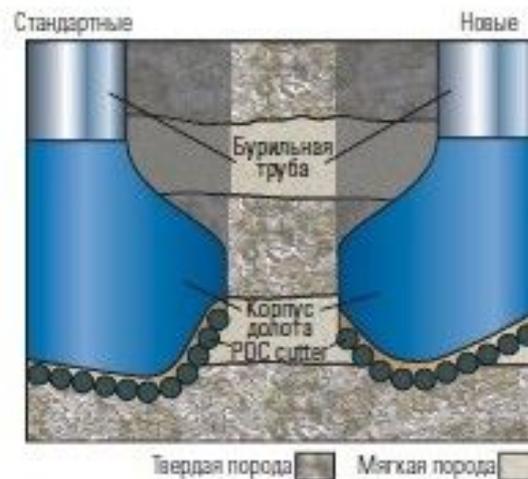


Рис. 27. Усовершенствованные долота с фиксированными резцами. Сочетание технологий, использующих синтетические поликристаллические алмазы, включая технологию LFGP, оптимизированный профиль и гидравлику Switchblade, позволило получить такую конструкцию долота, которая обеспечивает эффективное бурение переслаивающихся пород без ущерба для общих буровых характеристик. Плоский профиль долота сводит к минимуму возможность повреждения резцов при входе и выходе из твердых прослоев путем равномерного распределения нагрузок между внутренней шарошкой и наружным заплечиком. На месторождении Тулу, расположенном недалеко от г. Balikpapan в Индонезии (вверху слева), было использовано два типа долот в период с июня 1991 года по апрель 1997 года, их производительность была проанализирована и сопоставлена с производительностью долот новой конструкции (вверху справа). Первое долото имело стандартную конструкцию с армированием синтетическими поликристаллическими алмазами, с ним было выполнено 14 рейсов; второе долото имело обычную противовихревую конструкцию, и с ним выполнили 42 рейса. Долото новой конструкции к тому времени было использовано в 20 рейсах. Долото новой конструкции пробурело интервал на 180% протяженнее (внизу справа) и бурило на 141% быстрее (внизу слева), чем стандартные долота с синтетическими поликристаллическими алмазами; на 68% длиннее и на 70% быстрее, чем обычные долота противовихревой конструкции.

Свести к минимуму такое воздействие (рис.27) можно за счет проектирования одинаковой глубины и высоты конуса, при этом резцы заплечика, калибровочного вооружения и шарошки будут равномерно испытывать нагрузку на долото и другие нагрузки при выходе долота из твердого прослоя. Долота были оснащены крупными резцами для обеспечения высокой механической скорости проходки в мягких породах, а также максимальным объемом алмазов для обеспечения необходимой долговечности долота и получения возможности проходки всего интервала с помощью одного долота. Технологию LFGR применяли для снижения вибрации и для предотвращения завихрения. Проблему образования сальников на долоте при бурении мягких пород решили с помощью применения гидравлической технологии Switchblade, обеспечивающей улучшенную очистку на торце долота, особенно в области прорези для шлама, находящейся внутри LFGR. Для этих работ выбрали долота со стальными корпусами, так как они обеспечивали упругость в условиях ударных нагрузок и снижали степень повреждения резцов. Новое долото вначале обеспечивало бурение песчаников со скоростью 120 м/час (394 фута/час) и аргиллитов со скоростью 80м/час (262фута/час). Когда порода стала более твердой у подошвы интервала, в песчаниках механическая скорость проходки составляла около 40м/час (131фут/час) и в глинах—до 30м/час (98футов/час). В твердых прослоях доломитов скорость бурения составляла от 0,5 до 1м/час (от 1,6 до 3,3фута/час).

Анализ работы долота новой конструкции позволил определить наличие незначительных повреждений от ударных нагрузок и вообще отсутствие каких-либо повреждений, что свидетельствует о достаточной стабильности долота. В долотах не обнаружено повреждений от воздействия тепла и износа, что указывает на эффективность охлаждения резцов гидравлической системой долота. Оптимизация долота диаметром 121/4 дюйма была очень успешной. В 1997 году компания «ТоталФинаЭльф» изменила буровую программу для месторождения Tupu с переходом на бурение скважин малого диаметра, и при этом интервал диаметром 121/4 дюйма должен был буриться долотами диаметром 81/2 дюйма. Было спроектировано долото меньшего диаметра на основе интегрированной технологии использования синтетических поликристаллических алмазов, чтобы продемонстрировать возможность распространения данной технологии на долота других типоразмеров. После пробного бурения долотами диаметром 81/2 дюйма на месторождении были получены характеристики, соответствующие характеристикам долот большего диаметра.

Конструкция долота, его испытание и выбор

Моделирование сделало возможным добиться большинства усовершенствований, полученных в области проектирования долот и их оптимизации. Программы расчетной динамики промывочной жидкости (CFD) используются для исследований конструкций и для оптимизации потока промывочной жидкости в различных условиях. Методики CFD дополняют лабораторные испытания или служат в качестве альтернативы экспериментальным данным. Моделирование гидравлики долота с помощью методики CFD позволяет получить результаты быстро и с экономией средств, и оно особенно полезно, когда сложные формы и условия потоков трудно воспроизвести экспериментально.

Анализ с помощью методики CFD помог проектированию фиксированных резцов и, например, отработке гидравлики Switchblade, и его все чаще используют для проектирования гидравлики шарошечных долот (рис.28). Результаты моделирования следует оценивать количественно и поэтому методика CFD не может заменить экспериментальное испытание потоков, особенно для существенно других форм и конструкций. Однако, моделирование будет важным инструментом для ускорения процесса проектирования.

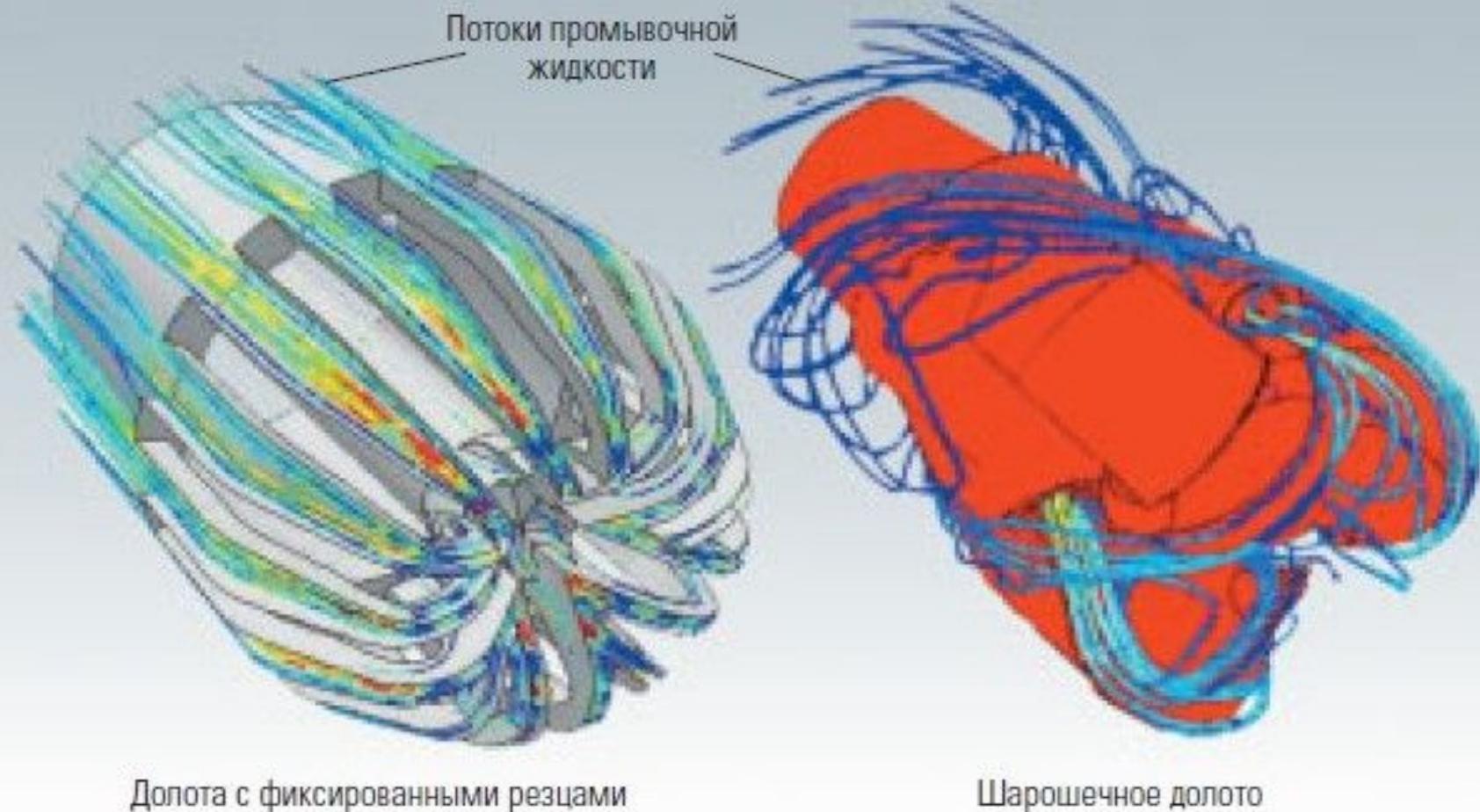


Рис. 28. Расчетная динамика промывочной жидкости (CFD). Как и другие методы анализа по системе конечных элементов, программы CFD моделируют поток промывочной жидкости вокруг долота внутри ствола скважины. В дополнении к моделированию гидравлики долота с синтетическими поликристаллическими алмазами, программы CFD используют для оптимизации удаления шлама и для сведения к минимуму повторного перемалывания шлама в конструкциях Mudpick и Mudpick II. Эта современная программа проектирования снижает расходы времени, необходимого для подготовки новых долот для месторождений.

Ключевыми факторами для моделирования долот с синтетическими поликристаллическими алмазами являются уравнения для сил и взаимодействий между резцами и породой. В течение последних трех лет разрабатывается программа NYDI, которая является усовершенствованным инструментом проектирования для прогнозирования сил, которые возникают в результате взаимодействия между резцами с синтетическими поликристаллическими алмазами и породой. В течение этого времени были оптимизированы алгоритмы с помощью испытаний на одном резце и исследований в лаборатории бурения в условиях высокого давления. В настоящее время программу NYDI используют главным образом для расчета неуравновешенных сил, но с ее помощью возможно определить наличие присущих характеристик стабильности долота. Моделирование работы долота можно выполнять в кинематических (движение) или динамических (сила) режимах. Имеются также другие решения, включая исследование характера движения долота, наклона долота и плотности синтетических поликристаллических алмазов. В настоящее время разрабатывается и проходит испытания модель крутильных нагрузок.

Усовершенствованное программное обеспечение для системы автоматизированного проектирования (САПР) позволяет инженерам выполнять трехмерное проектирование инструментов и долот и создавать математические модели для программирования станков с ЧПУ, которые точно воспроизводят конструкции встали или в карбиде вольфрама. Такие возможности способствуют процессу оптимизации и усовершенствования путем сокращения времени разработки, что позволяет доводить долота от процесса конструирования до изготовления в течение недель, а не месяцев. В прошлом буровые долота оценивали, главным образом, путем испытания отдельных компонентов и ограниченного маломасштабного испытания непосредственно самих долот, после чего следовало промысловое испытание прототипа. Такой подход чреват большими расходами времени и средств. Конструкторские решения часто основывались на неполных или непоследовательных эксплуатационных характеристиках, и окончательный продукт не всегда был оптимизированным. Полномасштабное испытание долот в пробах пород в условиях давления были начаты в TerraTek в Солт-Лейк-Сити, штат Юта, США, в 1977 году. В 1982 году компания Reed построила свою собственную лабораторию бурения в условиях высокого давления (PDL) для заполнения промежутка между испытанием компонентов и эксплуатационным испытанием (рис. 29).



Рис. 29. Лаборатория бурения в условиях высокого давления (PDL). Установки лаборатории PDL, такие как камера визуализации потока и установка испытания на выносимость, применялись при проектировании систем Mudpick, Mudpick II и Switchblade, текстурированной системы герметизации долот и подшипника с резьбовым уплотнением. Основная установка представляет собой треугольную раму, которая поддерживает гидравлические цилиндры, обеспечивающие воздействие сил на долото. Сосуд с высоким давлением, имеющийся в этой конструкции, содержит пробы пород. Два трехпоршневых насоса гидравлической мощностью 500 л.с. создают в системе поток и давление. Давление в сосуде, используемое для моделирования внутрискважинных условий, создается с помощью регулируемого компьютером дросселя, который создает необходимое противодействие. Установка PDL имеет полнофункциональную систему бурового раствора, которая позволяет использовать буровой раствор на водной или нефтяной основе.

Эта установка позволяет операторам принимать высокоэкономичные решения и снижать время разработки рентабельных долот новой конструкции, предоставляя возможности выполнения расширенной оценки подшипников, систем герметизации и смазок.

Отдельные компоненты, такие как втулки, герметизирующие устройства и режущие элементы все еще проходят испытания на специальном оборудовании. Имеется установка испытания на выносливость, которую используют для инструментированных долот полного размера в буровом растворе высокого давления при высокой температуре в течение длительных периодов времени. Затем долота разбирают для определения характеристик износа. Система способна создавать нагрузку на долото и обеспечивать частоту вращения, равные эксплуатационным параметрам. При этом регистрируют параметры температуры, давления и нагрузок. Поскольку с помощью таких испытаний создаются условия для подшипников, подобные эксплуатационным условиям, с помощью результатов испытаний можно вскрыть направления для усовершенствования конструкции. В камере визуализации потока через прозрачное пластмассовое стекло можно видеть характер циркуляции в торцевой зоне долота. Можно выявить области недостаточного или чрезмерного потока и внести поправки в конструкцию до выполнения забойных испытаний прототипа долота.

Традиционно долота выбирают на основе данных и диаграмм, полученных по пробуренным скважинам, но этот подход не учитывает прочность пород. Поскольку акустическая скорость зависит от твердости пород, для определения твердости пород используют диаграммы акустического каротажа. В последнее время были созданы программы, которые используют данные акустических диаграмм для расчета прочности на сжатие в условиях отсутствия давления, т.е. твердости породы при атмосферном давлении. Это является усовершенствованием по отношению к прямому использованию акустических скоростей, но при этом часто не учитывается прочность породы на месте ее залегания. Анализ прочности породы на сжатие является новым количественным методом оценки твердости породы, которую можно использовать для определения необходимых параметров долота. Программа анализа прочности породы (RSA) была разработана в 1993 году для выбора долот PDC, и недавно ее модернизировали для выбора шарошечных долот. С помощью системы RSA можно определить твердость пород с учетом прочности породы на сжатие в условиях давления, что позволяет получить значение, близкое к значению, характерному для пород на месте залегания.

Программа использует диаграммы акустического каротажа и гамма-каротажа, а также данные газового каротажа. Для литологических разностей, для которых предназначена эта программа возможно точное определение значений твердости породы. Обычно программа позволяет получить результат в виде каротажной диаграммы, которая отображает кривые первичных данных от скважинных диаграмм, данные рассчитанной компьютером литологии, рассчитанной прочности на сжатие в условиях давления и различных дополнительных механических параметров пород (рис.30).

Результаты работы с программой RSA используют при проектировании новых конструкций долот и для усовершенствования имеющихся конструкций. Программа наиболее эффективна, когда породы однородны, изотропны и пластичны, что типично для большинства пород, содержащих нефть и газ. Она не дает точных результатов для конгломератов, неуплотненных отложений или очень хрупких и непластичных пород, таких как изверженные и метаморфические, и один анализ прочности на сжатие не может служить показателем наличия абразивных пород или минералов-разрушителей, таких как пирит.

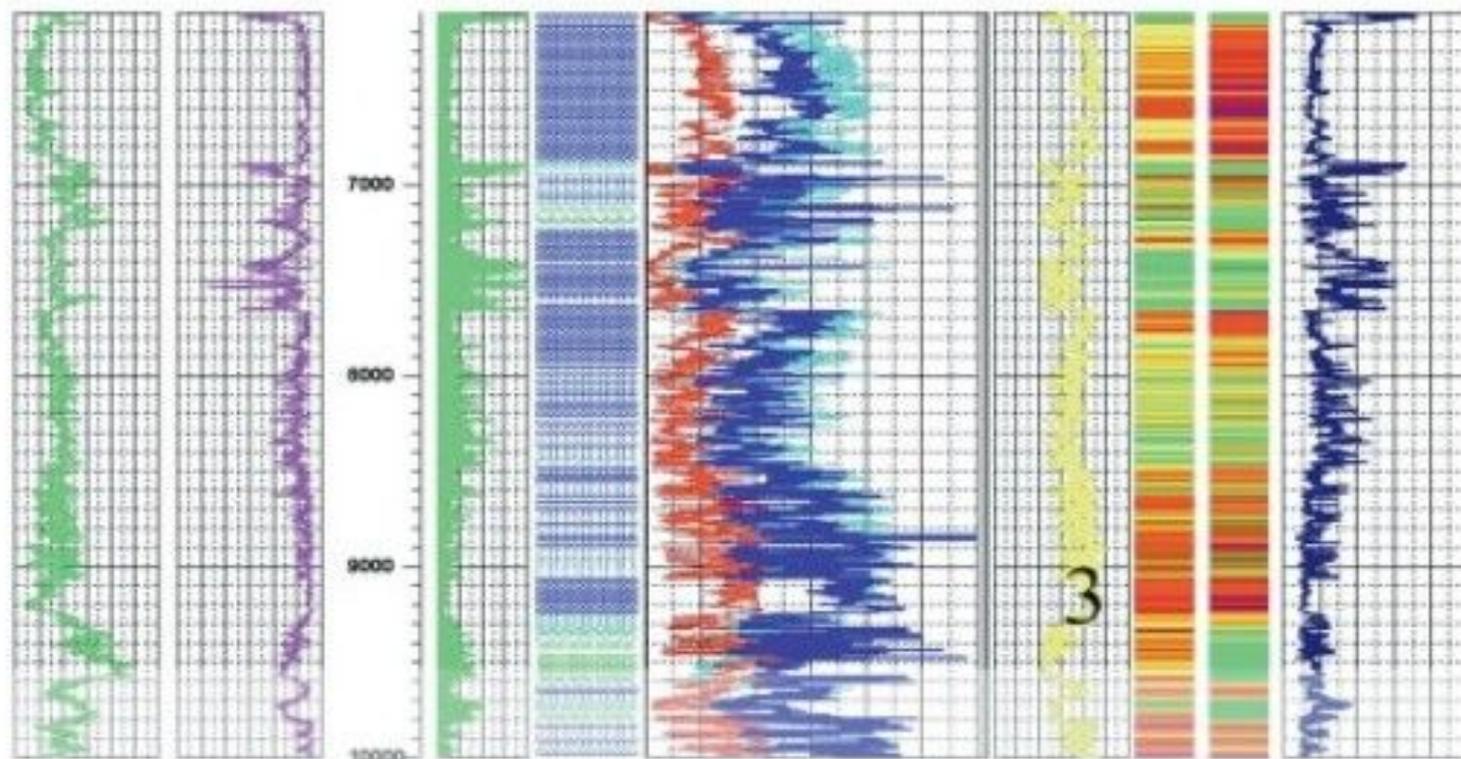
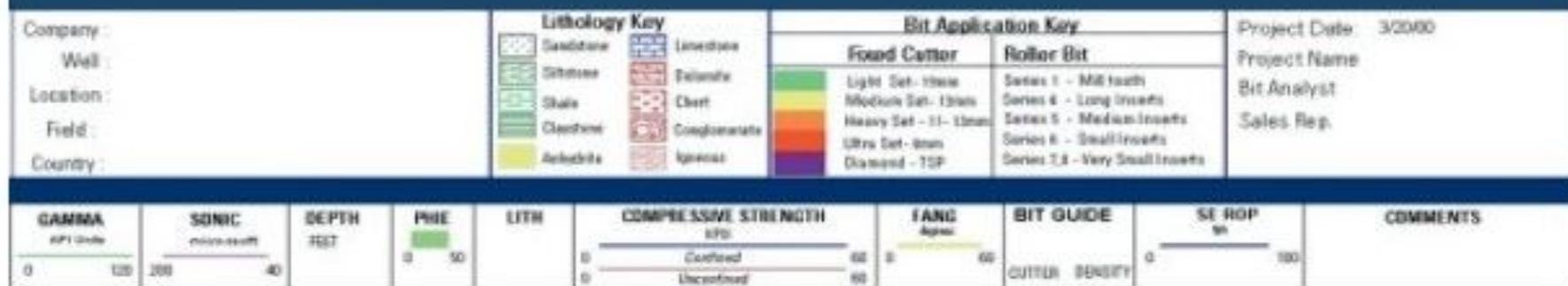


Рис. 30. Анализ прочности породы (RSA). Компьютерная программа анализа была разработана для выбора долот с синтетическими поликристаллическими алмазами. Программа использует данные скважинного акустического каротажа и гамма-каротажа и данные диаграмм газового каротажа для точного определения параметров твердости пород с учетом прочности для условий давлений или твердости пород для условий их залегания. Как правило, программа позволяет получить результат в виде каротажной диаграммы, которая отображает кривые первичных данных от скважинных диаграмм, данные рассчитанной компьютером литологии, рассчитанной прочности на сжатие в условиях давления и различных дополнительных механических параметров пород.