

Совершенствование вооружения шарошечных расширителей, используемых при сооружении подводных переходов магистральных газонефтепроводов

В статье рассмотрен процесс сооружения подводных переходов при помощи метода наклонно-направленного бурения (ННБ).

Метод ННБ позволяет минимизировать время сооружения подводных переходов магистральных трубопроводов, однако у него существуют целый ряд как технических, так и технологических недостатков, для оценки которых были исследованы условия и основные принципы работы применяемого при сооружении подводных переходов бурового инструмента.



Дмитрий Юрьевич СЕРИКОВ –
д.т.н., доцент РГУ нефти и газа (НИУ)
имени И. М. Губкина

По результатам исследования сделаны выводы о том, что оснащение шарошечных расширителей специально ориентированным косозубым вооружением дает возможность повысить механическую скорость бурения и проходку на инструмент при формировании скважин больших диаметров, что в конечном итоге позволяет сократить время и снизить стоимость сооружения подводных переходов магистральных трубопроводов.

В процессе сооружения магистральных трубопроводов встает задача пересечения различных водных преград, таких как каналы, реки, озера, обширные болотистые территории и т. д.

В этом случае наиболее экологичным, экономичным и безопасным способом преодоления этих мест является метод наклонно-направленного бурения (ННБ).

Метод наклонно-направленного бурения (рис. 1) позволяет минимизировать время сооружения подводного перехода магистрального трубопровода (ППМТ).

Применение данного метода ограничивается лишь сложностью разбуривания отдельных категорий пород и техническими возможностями применяемого бурового оборудования. Так, например, на сегодняшний день в ПАО «Транснефть» эксплуатируется свыше 150 ППМТ, выполненных этим методом.

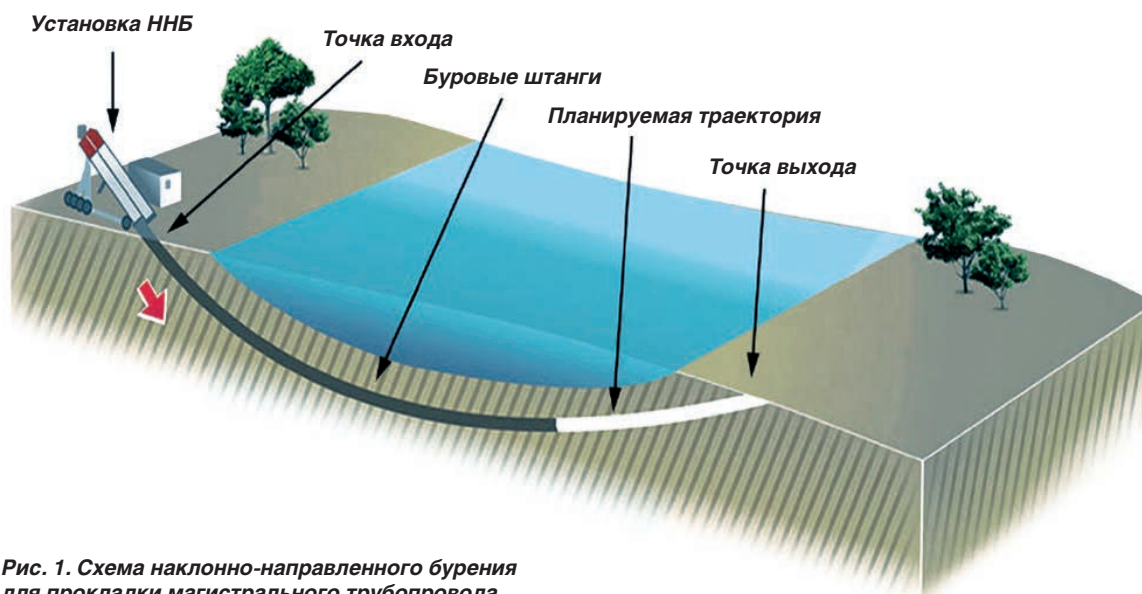


Рис. 1. Схема наклонно-направленного бурения для прокладки магистрального трубопровода

Метод ННБ скважин для прокладки магистрального трубопровода осуществляется путем использования специального и различного бурового оборудования в несколько этапов. В начале производят бурение пилотной скважины небольшого диаметра на всю длину перехода. Затем осуществляют ее расширение до формирования требуемого технологического диаметра, большего диаметра трубопровода (рис. 2). Далее происходит калибрование и зачистка стенок скважины, с целью обеспечения беспрепятственного протаскивания трубопровода.

Как правило, бурение пилотной скважины осуществляется обычными буровыми долотами различных типоразмеров, выбор типа и размера которых зависит в основном от твердости и абразивности разбуриваемых пород.

Расширение пилотной скважины осуществляется уже при помощи расширителей специальных конструкций, позволяющих наиболее эффективно разрушать породу в условиях проходки горизонтальных и параболических скважин большого диаметра (рис. 3).

На сегодняшний день существует множество конструкций шарошечных расширителей, предназначенных именно для формирования параболических стволов для прокладки ППМТ. Отличительными особенностями всех этих конструкций являются: тип вооружения, форма шарошек, одно- или многоярусность расположения породоразрушающих элементов, системы промывки и т. д. Многие конструкции шарошечных расширителей предусматривают замену шарошек и представляют собой сборно-разборные конструкции. Это обстоятельство хоть и приводит к удорожанию инструмента, но позволяет осуществлять ремонт и замену шарошек непосредственно на месте проведения буровых работ, варьировать типом вооружения в зависимости от изменения твердости, абразивности горных пород или возникновения трекинга (образования забойной рейки) в процессе проходки скважины. А возможность многократного использования инструмента в конечном итоге позволяет снизить затраты на приобретение данного вида бурового инструмента.

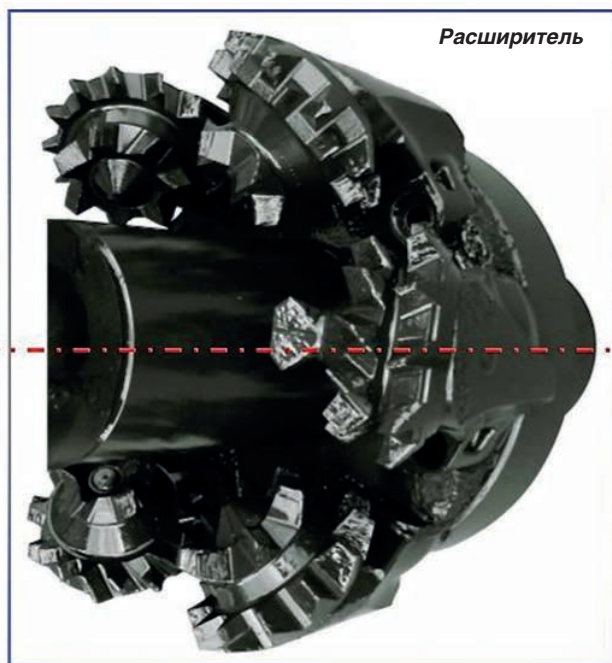


Рис. 2. Пилотное долото и шестишарошечный расширитель

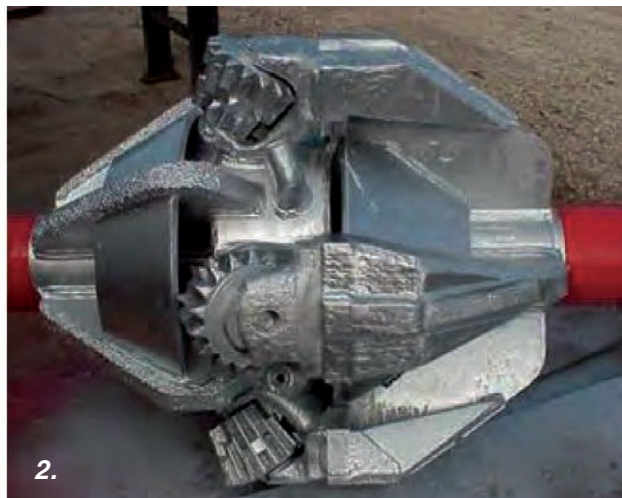


Рис. 3. Шарошечные расширители, используемые при ННБ: многоярусный для одноэтапного расширения (1) и одноярусный фирмы INROCK (2)



Одними из мировых лидеров по проектированию и изготовлению шарошечных расширителей со сменными породоразрушающими элементами являются такие производители как: НПП «БУРИНТЕХ», ОАО «Волгабурмаш», а из зарубежных наиболее выделяется: Baker Hughes Kristensen, Smith Tool, Reed Tool, Security DBS, NRB – NewRockBits, INROCK (рис. 3.2). Тем не менее, все эти сборно-разборные конструкции значительно дороже конструкций, предназначенных для одноразового использования, что в условиях сооружения ППМТ малых диаметров и протяженности мелкими подрядными организациями делает их применение экономически не целесообразным.

В связи с этим многие сервисные компании, самостоятельно или совместно с проектно-конструкторскими и научно-исследовательскими центрами, проектируют и создают свои собственные недорогие одноразовые конструкции шарошечных расширителей. Как правило, при создании таких конструкций используют имеющиеся в наличии у предприятий, осуществляющих различного рода буровые работы, стандартного нового или уже использованного оборудования и инструмента: шарошечные долота, переводники, утяжеленные бурильные трубы (УБТ), буровые головки и т. д. В подавляющем большинстве такие одноразовые конструкции шарошечных расширителей состоят из корпуса, изготовленного из УБТ и приваренных к нему отдельных элементов стандартных шарошечных буровых долот.

Однако, несмотря на простоту и дешевизну изготовления таких конструкций шарошечных расширителей, при их проектировании зачастую не учитывают те существенные изменения в кинематике шарошек, связанных со значительным, нежели чем в долоте, удалением их от центра вращения бурового инструмента. В большинстве случаев это приводит к полному или частичному несоответствию геометрических параметров вооружения бурового инструмента, условиям и характеру взаимодействия зубьев шарошек шарошечных расширителей в процессе разрушения горной породы кольцевого забоя.

Шарошечные расширители относятся к породоразрушающему инструменту дробящескалывающего действия. Конструкции шарошечных расширителей различаются в зависимости от множества факторов: диаметра скважины, типа породы, количество проходов инструмента (этапов расширения) и др. Некоторые наиболее распространенные конструкции шарошечных расширителей представлены на рис. 3. Шарошечные расширители успешно применяются при бурении горных пород, характеризующихся различной твердостью и абразивностью. При этом использование шарошечных расширителей обеспечивает достаточно высокую механическую скорость проходки скважин с параболической траекторией (параболических скважин), зависящую от многих факторов и находящуюся в диапазоне 0,5...4 м/ч, а в некоторых случаях и более.

Общим для всех описанных выше конструкций шарошечных расширителей является их оснащение одно- или многоконусными шарошками, или же целиковыми секциями (лапа с шарошкой) обычных шарошечных буровых долот. Количество используемых в шарошечных расширителях шарошек может быть различным, в зависимости от диаметра и количества ярусов инструмента, и может достигать 10 и более. Тем не менее, их количество и расположение на корпусе шарошечных расширителей не всегда является оптимальным с точки зрения условий разрушения той или иной разбуриваемой горной породы.

С целью повышения работоспособности и эффективности шарошечных расширителей необходимо изучить условия и основные принципы работы данного вида бурового инструмента. Например, рассмотрим кинематику двухъярусного шарошечного расширителя, оснащенного секциями (лапа с шарошкой) классического трехшарошечного долота (рис. 4).

Бурение и расширение параболических скважин с использованием шарошечных расширителей осуществляется со значительно меньшими скоростями вращения.

Осевое усилие необходимое для успешной работы шарошечного расширителя определяется с учетом перераспределения его на каждую шарошку инструмента, нежели рекомендованные для обычного шарошечного долота, секциями которого оснащен шарошечный расширитель. Это объясняется тем, что частота вращения каждой из шарошек шарошечного расширителя существенно увеличивается за счет удаления ее размещения от оси вращения шарошечного расширителя, сообразно увеличению его диаметра.

Определение рекомендуемой скорости вращения шарошечного расширителя осуществляют исходя из следующего соотношения:

$$n_R = (d_D / d_R) \cdot n_D, \quad (1)$$

где: d_D – диаметральный размер долота, секциями (лапа с шарошкой) которого оснащен шарошечный расширитель, мм; n_D – проектная частота вращения шарошечного долота, секциями которого оснащен шарошечный расширитель, об/мин; d_R – диаметральный размер (каждого яруса) или самого шарошечного расширителя, мм.

Осевое усилие на шарошечный расширитель, из расчета на каждую его шарошку, не должно превышать рекомендованных значений для долота секциями (лапа с шарошкой) которого оснащен шарошечный расширитель:

$$P_R = (N / 3) \cdot P_D, \quad (2)$$

где: N – число шарошек в шарошечном расширителе, шт.; P_D – рекомендованное усилие на долото секциями которого оснащен шарошечный расширитель, кН.

Количество ярусов и число шарошек шарошечного расширителя зависит от способов и условий разбуривания пилотной скважины. Увеличение числа ярусов и количества шарошек позволяет существенно снизить вибрационные нагрузки на буровой снаряд, что благоприятно сказывается на ресурсе работы шарошечного расширителя, однако требует одновременного увеличения осевой нагрузки на инструмент, с целью обеспечения эффективного разбуривания горной породы по кольцевому забою большого диаметра.

Как известно, шарошечные долота, предназначенные для бурения мягких и пород средней категории твердости, оснащаются многоконусными шарошками со смещенными осями вращения относительно оси вращения инструмента. Комбинация этих конструктивных решений позволяет обеспечить гарантированное проскальзывание зубьев вооружения данного типа бурового инструмента по забою в процессе его работы. При этом зубчатое вооружение периферийных венцов шарошек подтормаживает, в то время как вооружение вершинных пробуксовывает. Однако, в случае использования секций этого же шарошечного долота в составе шарошечного расширителя, то есть когда шарошки разнесены на гораздо большее расстояние от центра вращения инструмента, направления и величины проскальзывания вооружения существенно меняются. В подавляющем большинстве случаев, зубья

вооружения периферийных венцов уже пробуксовывают, а зубчатое вооружение части основных и вершинных подтормаживают. Это объясняется тем, что в результате разнесения шарошек относительно оси вращения инструмента (при постоянстве величины угла наклона цапфы) происходит изменение положения мгновенной оси вращения. На рис. 4 представлена кинематическая схема работы многоярусного шарошечного расширителя, где: ω_R – угловая скорость шарошечного расширителя; ω_1 – угловая скорость шарошки первого яруса шарошечного расширителя; ω_2 – угловая скорость шарошки второго яруса шарошечного расширителя; d_1 и d_2 – максимальные диаметры периферийных венцов шарошек первого и второго ярусов шарошечного расширителя соответственно; Ω_1 и Ω_2 – мгновенные угловые скорости шарошек первого и второго ярусов шарошечного расширителя.

В случае если мгновенная ось вращения « $O_1 - O'_1$ » пересекает образующую шарошки (рис. 4), зубчатое

вооружение работает с проскальзыванием по забою, если же мгновенная ось вращения « $O_2 - O'_2$ » совпадает с образующей шарошки (рис. 4), зубчатое вооружение работает в дробяще-скалывающем режиме.

Определение направления и величин скоростей зубьев шарошек является одной из важных задач при проектировании вооружения шарошечного расширителя. Это связано с тем, что для бурения твердых и крепких пород необходимо проектировать вооружение шарошек с таким расчетом, чтобы разрушая породу шарошки перекачивались по забою без проскальзывания, т. е. осуществлялось чистое качение. Обеспечить это возможно только при условии, когда мгновенная ось вращения шарошки будет полностью совпадать с ее образующей (первый ярус по рис. 4).

В свою очередь для бурения мягких пород наоборот необходимо проектировать вооружение шарошек с таким расчетом, чтобы разрушая породу зубчатое вооружение шарошек проскальзывало по забою, т. е. осуществлялось частичное резание породы.

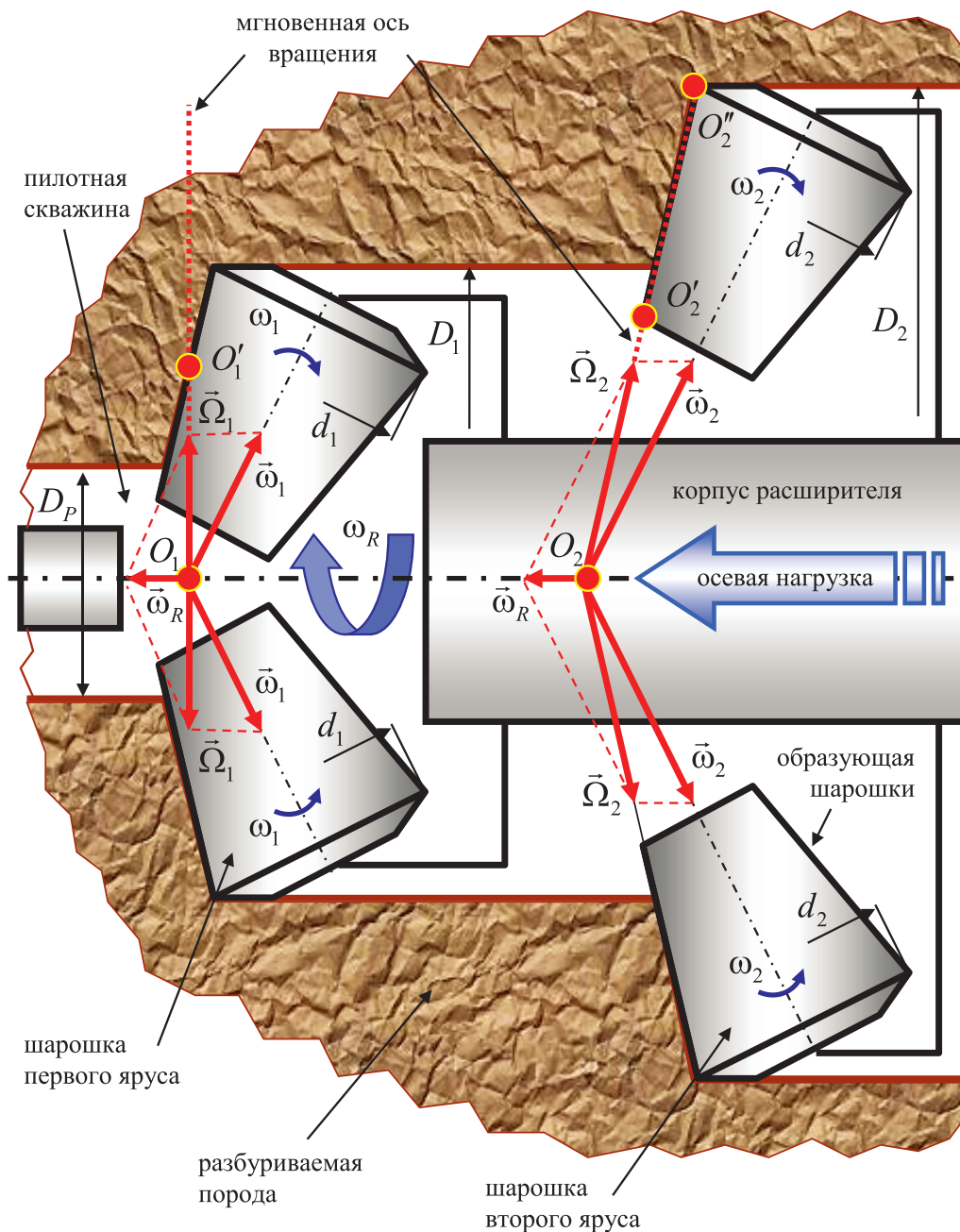


Рис. 4. Кинематическая схема работы многоярусного шарошечного расширителя



Обеспечить это возможно только при условии, когда мгновенная ось вращения шарошки будет пересекать ее образующую (второй ярус по рис. 4).

Еще одной важной составляющей успешного процесса расширения параболических скважин является качественная очистка зубчатого вооружения шарошек и всей зоны работы шарошечного расширителя.

Это связано с тем, что работа шарошечного расширителя сопровождается значительно большими объемами разрушенной породы, в отличие от работы шарошечного долота. Например, объемы разрушенной породы в процессе проходки ствола с диаметральным размером 600 мм более чем в 4 раза превышают, объемы шлама получаемые при бурении скважины диаметром 300 мм.

В связи с этим при проектировании шарошечного расширителя особенно многоярусного исполнения, очень важно максимально эффективно перераспределять и направлять основные потоки промывочной жидкости, с таким расчетом, чтобы избежать образования застойных зон, зашламления и засаливания вооружения инструмента.

Перспективным направлением, позволяющим без существенных затрат повысить эффективность очистки как вооружения шарошечного расширителя, так и всей зоны работы бурового инструмента, является использование косозубого вооружения. В отличие от получившего наибольшее распространение прямозубого вооружения, косозубое вооружение, зубья которого имеют винтообразный наклонный профиль, дает возможность превращать породоразрушающие венцы шарошек в сегментированные щеки малой протяженности. Поэтому косозубое вооружение позволяет в областях с низкими скоростями потоков промывочной жидкости, путем механической эвакуации, транспортировать шлам в нужном направлении, обеспечивая наиболее эффективную работу промывочной системы шарошечного расширителя.

Работа прямозубого вооружения шарошек характеризуется формированием перед набегающей гранью зуба шламового бурта, приблизительно одинаково рассредоточенного по всей ширине зуба и равномерным отвалом. В то же время работа косозубого вооружения сопровождается формированием конусообразного шламового бурта с преобладающим отвалом по направлению наклона зубчатого вооружения шарошек (рис. 5).

Где: $\vec{F}_{1,2,3}$, $\vec{F}_n^{1,2,3}$ и $\vec{F}_\tau^{1,2,3}$ силы воздействия косозубого вооружения на разрушаемую ими породы вследствие проскальзывания вооружения по забюю: в направлении скольжения зуба, ее нормальная и тангенциальная составляющие для каждого из трех венцов шарошки соответственно (рис. 5 вид А).

Это конструктивное решение позволяет не только существенно снизить внутренние напряжения в зубьях, связанных с изгибом, уменьшить вибрации бурового инструмента, но и способствовать перемещению разрушенной породы забюю в заведомо заданном направлении.

Таким образом, существующие на сегодняшний день многочисленные конструкции шарошечных расширителей, оснащенные прямозубым вооружением или созданные с применением секций обычных шарошечных долот, обладают рядом существенных недостатков, таких как: полное или частичное несоответствие геометрии вооружения условиям бурения, недостаточная эффективная работоспособность промывочных систем или их отдельных элементов.

Все это приводит к повышенному износу зубчатого вооружения шарошек, скапливанию разрушенной породы в наиболее проблемных местах забюю и многократному перемальванию его зубьями шарошек, что неминуемо приводит к снижению механической скорости бурения и проходки на инструмент.

С целью повышения работоспособности шарошечных расширителей при сооружении ППМТ посредством уменьшения затрат энергии, требующихся для успешного бурения мягких и средних пород, а также повышения качества очистки вооружения инструмента и всей области работы шарошечного расширителя была разработана конструкция шарошечного расширителя, оснащенного специально ориентированным косозубым вооружением (рис. 5).

Одной из отличительных особенностей этой конструкции шарошечного расширителя является использование всех шарошек со смещенными осями вращения и оснащенных определенным образом ориентированным косозубым вооружением, работающим с проскальзыванием. При этом зубчатое вооружение основных и вершинных венцов имеет левосторонний наклон зубьев, в то время как вооружение периферийных – правосторонний.

Шарошечный расширитель представляет собой полый корпус, к которому жестко крепятся секции (лапа с шарошкой), оснащенные стальным, полученным по технологии литья или фрезерования, армированным КВ. При этом косозубое вооружение представляет собой специально ориентированную зубчатую структуру, созданную для успешной работы в условиях проскальзывания вооружения шарошек по забюю. Зубчатое вооружение основных и вершинных венцов имеет левосторонний наклон зубьев (левый подъем винтовой линии), в то время как вооружение периферийных – правосторонний (правый подъем винтовой линии). Промывочная система шарошечного расширителя включает в себя сеть промывочных каналов, гидромониторные насадки и пространства для эвакуации выбуренной породы. Размещение и ориентация гидромониторных насадок осуществлена таким образом, чтобы струи промывочной жидкости промывали зоны работы основных и периферийных породоразрушающих венцов вооружения шарошек под различными углами по отношению к забюю, величина которых зависит от конкретных условий бурения шарошечного расширителя.

Рассмотрим подробнее принцип работы шарошечного расширителя, оснащенного специально ориентированным косозубым вооружением. Под одновременным воздействием осевого усилия и крутящего момента, передаваемых на корпус шарошечного расширителя посредством бурильных штанг, зубья специально ориентированного косозубого вооружения воздействуют на горную породу кольцевого забюю, разрушая ее. Разрушенная порода эвакуируется промывочной жидкостью, подаваемой сквозь полости в корпусе шарошечного расширителя и промывочные патрубки с гидромониторными насадками. Использование в качестве вооружения всех без исключения венцов шарошек специально ориентированного косозубого вооружения позволяет существенно улучшить качество очистки как вооружения, так и всей зоны работы бурового инструмента. В особенности это касается нижней части «вертикального» забюю, что частично обеспечивается использованием косозубого вооружения способного механическим способом перемещать разрушенную породу из зон с малыми скоростями промывочных потоков (застойных зон).

Шарошки шарошечного расширителя спроектированы таким образом, что их геометрические параметры гарантированно обеспечивают осуществление проскальзывания косозубого вооружения по забою.

Конструкция шарошечного расширителя, оснащенного специально ориентированным косозубым вооружением, обеспечивает работу по разрушению породы забоя зубьями вооружения части основных (для шарошек, оснащенных более чем 4 венцами) и периферийных венцов шарошек с пробуксовкой, а оставшихся частей основных и вершинных венцов – с подтормаживанием.

В связи с этим зубья периферийных венцов шарошек шарошечного расширителя пробуксовывают по поверхности разрушаемой ими породы, и посредством шнекового воздействия механически перемещают разрушенную породу по направлению к центральной части забоя, эвакуируя ее из проблемной застойной зоны, как правило, образующейся в нижней части кольцевого забоя. Одновременно с этим, противоположно направленные зубья части основных и вершинных венцов шарошек шарошечного расширителя подтормаживают по поверхности разрушаемой ими породы, и также

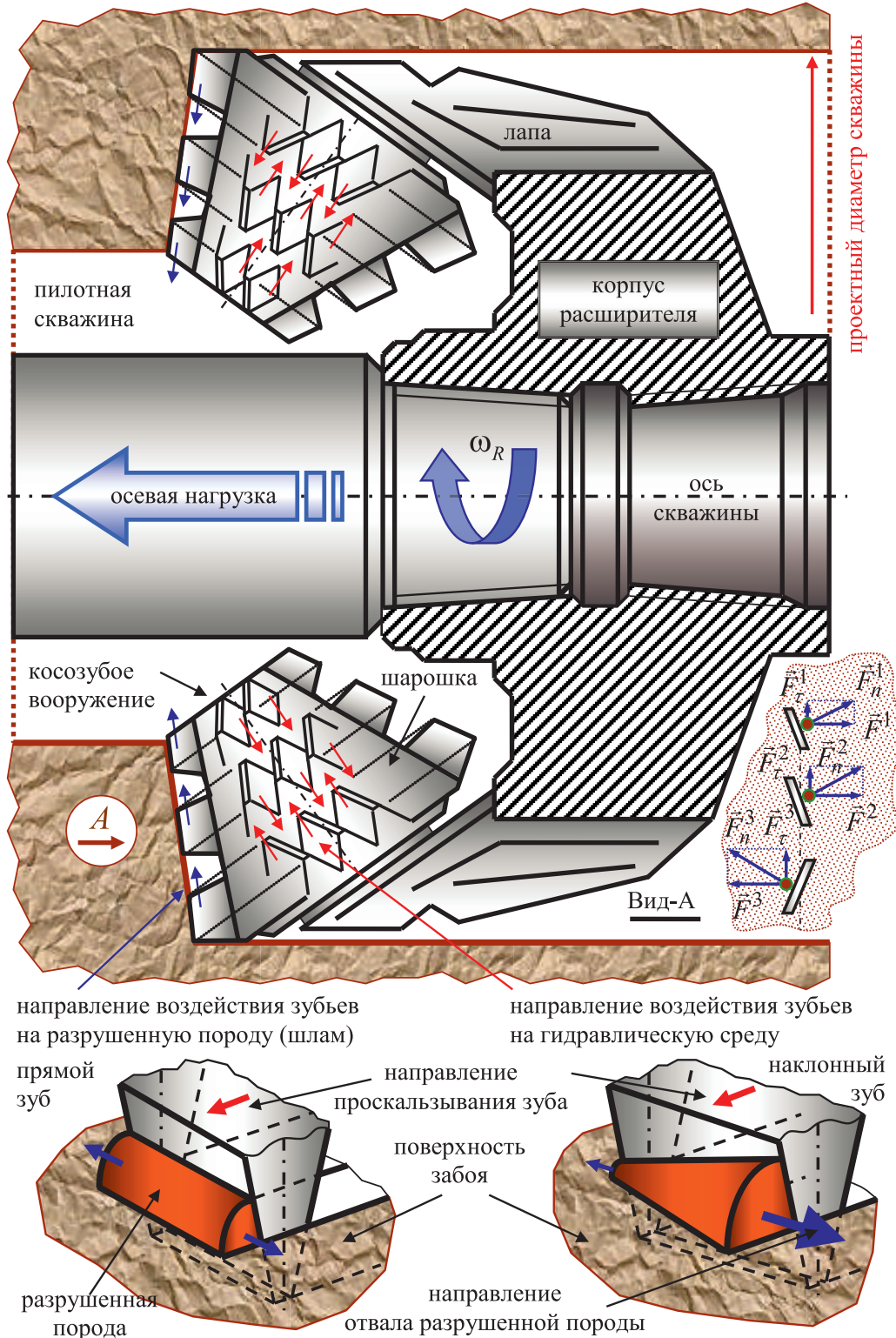


Рис. 5. Принципиальная схема работы специально ориентированного косозубого вооружения



посредством шнекового воздействия механически перемещают разрушенную породу по направлению к центральной части забоя (рис. 5). Это конструктивное решение позволяет обеспечить одинаковую направленность основных потоков промывочной жидкости с направлениями механической эвакуации шлама зубчатым вооружением каждой из шарошек в сторону центральной части разбуриваемого кольцевого забоя.

Однако преимущества специально ориентированного косозубого вооружения на этом не заканчиваются, так как в процессе перемещения косозубого вооружения в гидравлической среде также за счет шнекирования осуществляется эвакуация малых объемов промывочной жидкости, насыщенной частицами выбуренной породы, зубьями вершинных и средних венцов по направлению к стенкам скважины, а периферийными – к ее центру. Это позволяет обеспечить одинаковую направленность основных потоков промывочной жидкости с направлениями механической эвакуации шлама зубчатым вооружением средних и вершинных венцов в сторону центральной части разбуриваемого кольцевого забоя. В тоже время косозубое вооружение периферийных венцов шарошечного расширителя в процессе перемещения косозубого вооружения в гидравлической среде, также за счет шнекирования осуществляет эвакуацию малых объемов промывочной жидкости, насыщенной частицами выбуренной породы по направлению к центру скважины. Это создает демпферную зону, которая не позволяет шламу, находящемуся в основном потоке промывочной жидкости, проникать и скапливаться в застойных зонах, образующихся в области забоя обрабатываемой периферийными венцами шарошек. В результате столкновения противоположно направленных течений в нейтральной межвенцовой области, генерируемых специально ориентированным косозубым вооружением шарошек, поток промывочной жидкости, насыщенной частицами выбуренной породы перенаправляется в шламоотводящие проемы межлапного пространства шарошечного расширителя, и далее выводится на поверхность для последующей очистки.

Проведенные исследования позволили установить, что оснащение шарошечных расширителей шарошками со специально ориентированным косозубым вооружением позволяет снизить вибрационные нагрузки, возникающие при работе данного вида бурового инструмента.

Вместе с тем косозубое вооружение, представляющее собой сегментированные шнеки малой протяженности, позволяет механически удалять разрушенную зубьями вооружения шарошек из зоны работы инструмента, препятствуя тем самым многократному перемалыванию шлама и повышенному износу шарошечного расширителя.

Одновременно с этим, выходя из соприкосновения с поверхностью забоя и перемещаясь по объему гидравлической среды косозубое вооружение за счет шнекирования промывочной жидкости, насыщенной частицами выбуренной породы, позволяет перемещать эту взвесь в направлениях, совпадающих с основными потоками промывочной жидкости.

Промысловые сравнительные испытания, осуществленные при бурении вертикальной скважины, шарошечным расширителем совместного производства ОАО «Волгабурмаш» и ЗАО «Проммашсервис» 6PШ-555М со специально ориентированным косозубым вооружением в сравнении с своим базовым аналогом с прямозубым вооружением при роторном способе бурения верхних интервалов двух скважин показал увеличение механической скорости бурения на 19 – 23%.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Метод ННБ обладает целым рядом существенных преимуществ при строительстве ППМТ, однако у него существуют отдельные технические и технологические недостатки, что требует проведения научно-технических работ по дальнейшему совершенствованию техники и технологии ННБ при сооружении ППМТ.
2. Несмотря на то, что на сегодняшний день разработано и достаточно активно используется большое количество конструкций шарошечных расширителей, оснащенных косозубым вооружением, этот вид зубчатого вооружения шарошек все еще имеет значительные резервы с точки зрения повышения его работоспособности и эффективности использования.
3. Оснащение шарошечных расширителей специально ориентированным косозубым вооружением позволяет повысить механическую скорость бурения и проходку на инструмент при формировании скважин больших диаметров, что в конечном итоге дает возможность сократить время и снизить стоимость сооружения ППМТ.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Мустафин Ф. М., Быков Л. И., Васильев Г. Г., Лаврентьев А. Е. и др. Технология сооружения газонефтепроводов / Под ред. Васильева Г. Г. Т.1. Уфа: Нефтегазовое дело. 2007. 632 с.
2. Вафин Д. Р., Сапсай А. Н., Шаталов Д. А. Технико-экономические границы применения метода наклонно-направленного бурения в строительстве подводных переходов магистральных трубопроводов // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. 2017. Т. 7. № 3. С. 66–73.
3. Лурье М. В., Мастобаев Б. Н., Ревель-Муроз П. А., Сощенко А. Е. Проектирование и эксплуатация нефтепроводов. Учебник для нефтегазовых вузов. М.: Издательский дом Недр». 2019. 434 с.
4. Богомолов Р. М. Методы повышения эффективности разрушения горных пород при бурении шарошечными долотами: дис. ...докт. техн. наук. 25.00.15 / Богомолов Родион Михайлович. – М., 2001. – 434 с.
5. Ищук А. Г., Сериков Д. Ю. Шарошечный буровой инструмент. – М.: «МДМпринт», 2021. – 303 с.
6. Шигин А. О. Методология проектирования адаптивных вращательно-подающих органов буровых станков и технологий их применения в сложноструктурных породных массивах: дис. ... докт. техн. наук. 05.05.06 / ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет». М., 2015. 320 с.
7. Стеглянов Б. Л. Повышение эффективности породоразрушающих буровых инструментов на основе сравнительного анализа кинетических характеристик их вооружения: дис. ...докт. техн. наук. 05.15.10 / Стеглянов Борис Леонтьевич. – М., 1988. – 393 с.
8. Буримов Ю. Г., Копылов А. С., Орлов А. В. Бурение верхних интервалов глубоких скважин большого диаметра. Москва, 1975.
9. Сериков Д. Ю. Совершенствование боковых гидромониторных насадок шарошечных буровых долот // Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса: науч.-техн. журн. – М.: ОАО «ВНИИОЭНГ», 2017. – №1. – С. 9–14.
10. Харин О. Н. Лекции по теоретической механике. Часть 1: Учебное пособие / О. Н. Харин. – М.: ГУП Издательство «Нефть и газ» РГУ нефти и газа им. И. М. Губкина, 2001. – С. 65–68.
11. Палий П. А. Буровые долота. Справочник / П. А. Палий, К. Е. Корнеев. – М.: Недра, 1971. – 445 с.