

# Совершенствование шарошечного бурового инструмента, оснащенного косозубым вооружением

Российская Федерация является одним из мировых лидеров по добыче углеводородного сырья и других стратегически важных полезных ископаемых.

Дальнейшее динамичное и инновационное развитие экономики страны, в условиях обострения мировой конкуренции, нуждается в серьезном качественном совершенствовании нефтяной, газовой и других базовых отраслей промышленности, являющихся мощным фундаментом экономики нашей страны.



**Дмитрий Юрьевич СЕРИКОВ** –  
д.т.н., профессор кафедры «Машины и оборудование нефтяной и газовой промышленности»  
РГУ нефти и газа (НИУ) имени И. М. Губкина

**Р**азвитие нефтегазовой отрасли во многом связано с увеличением объемов и уменьшением стоимости

проведения буровых работ. Одним из важнейших элементов нефтегазового оборудования, непосредственно разрушающим горную породу и формирующим ствол скважины, является породоразрушающий буровой инструмент. В нашей стране и за рубежом основные объемы бурения осуществляется буровыми долотами различных типов и конструкций. Поэтому в среде буровиков нередко можно услышать фразу: «Его Величество Долото». Несмотря на тот факт, что в последнее время значительно увеличились объемы буровых работ, осуществляемых алмазным буровым инструментом, использование шарошечного инструмента все еще занимает существенное место в общей номенклатуре применяемого бурового инструмента. В особенности это касается расширителей скважин и буровых долот больших типоразмеров от

393,7 до 660,4 мм и более, где стоимость изготовления алмазного инструмента значительно увеличивается, а процесс бурения требует существенного увеличения крутящего момента и, как следствие, энергетических затрат.

## Плакат 1.

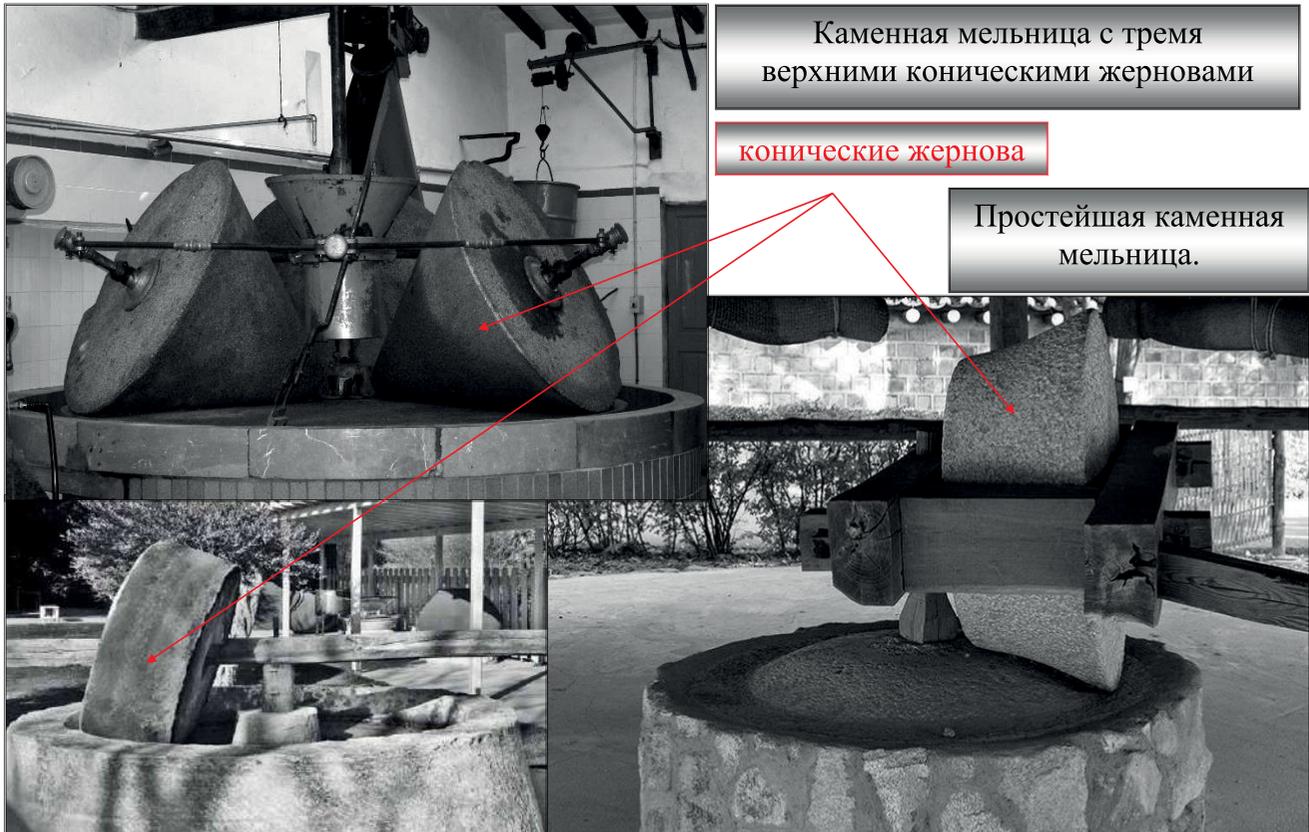
Вероятно, прародителями всех шарошечных буровых долот являются древние каменные мельницы с конусными жерновами, используемые для производства оливкового масла и многих других целей. И по сей день в некоторых регионах Средиземноморья можно встретить эти уникальные механизмы, перемалывающие оливки огромными вращающимися камнями в форме конусов, превращающих оливки в жидкую массу. Они могут быть с одним, двумя или тремя верхними жерновами в зависимости от величины мельницы и типа привода. Такому техническому долголетию – мельницы обязаны простому и эффективному кинематическому решению, движению конуса вокруг вертикальной оси вращения.

Тем не менее, первые шарошечные долота, основанные на этом принципе, появились лишь в начале 20 века. Революционным было применение зубчатого вооружения на шарошках, которые вращались независимо, перекатываясь по забою скважины во время вращения долота. Первое шарошечное долото с двумя шарошками было запатентовано компанией «Howard Hughes» в 1908 году, а с тремя в 1909 году.

В 1916–1917 годах компания «C.S.Reed» усовершенствовала шарошечное долото путем применения сменных двойных дисков и четырех вращающихся шарошек. Эти долота работали дольше и позволяли осуществлять бурение на значительно большие глубины, нежели их предшественники лопастные долота. Первые долота с вращающимися шарошками не отличались высокой долговечностью и надежностью. Однако, несмотря на то, что в ранних конструкциях шарошечных долот, для крепления их компонентов использовались шпильки и винты, они все равно превосходили по производительности лопастные долота того времени.

Эти первые шаги в деле эволюции шарошечных долот позволили продвинуть вращательное бурение за пределы границ глубин и срока службы стальных лопастных долот.

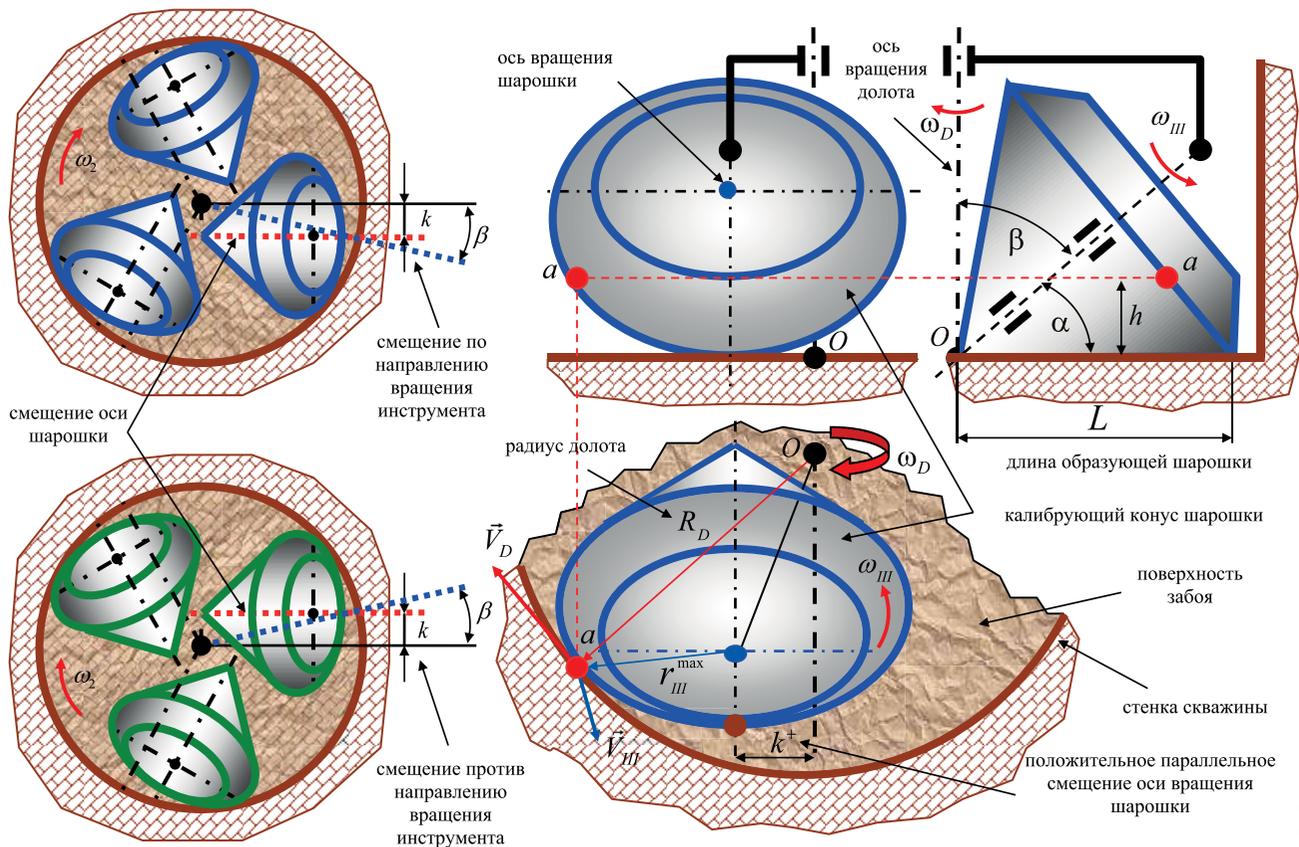
# 1 Простейшие каменные мельницы – прародители шарошечных долот



Плакат 2.

Вооружение ШБИ – это часть конструкции, непосредственно воздействующая и разрушающая породу забоя, работающая в сложных условиях комплекса разноплановых нагрузок. От совершенства конструкции вооружения напрямую зависят одни из самых важных технических показателей бурового инструмента – механическая скорость бурения и проходка.

# 2 Конструктивные особенности размещения шарошек в ШБИ



Одной из основных отличительных особенностей конструкций ШБИ является наличие или отсутствие проскальзывания зубьев вооружения по забою, определяемое как геометрическими параметрами шарошек, так и их пространственной ориентацией относительно оси вращения инструмента. Как правило, ШБИ для мягких и средних пород проектируется таким образом, чтобы при его вращении шарошки перекатывались по забою скважины с одновременным проскальзыванием. С целью увеличения этого проскальзывания у данных типов ШБИ смещают или разворачивают оси вращения шарошек как по направлению вращения инструмента, так и против него. Величина смещения или угол разворота задаются в зависимости от типа и размера инструмента. Однако анализ величин и направлений этих проскальзываний показал, что у подавляющего большинства, существующего ШБИ со смещенными осями вращения шарошек ориентация зубьев прямоугольного вооружения не обеспечивает их эффективную работу в условиях повышенного скольжения.

В настоящее время разработано множество конструкций ШБИ, оснащенных КЗВ, однако лишь единицы из них нашли свое воплощение в серийно выпускаемом инструменте. Главной причиной такой не востребоваемости, вероятно, является сложность нахождения баланса между новыми конструктивными решениями геометрии вооружения и технологическими аспектами его изготовления. Основной целью создания этих конструкций, как правило, является борьба с рейкообразованием на поверхности забоя в процессе работы ШБИ. Таким образом, до настоящего времени так и не удалось создать конструкции, максимально раскрывающую весь потенциал данного типа вооружения.

### Плакат 3.

Для определения конструктивных параметров вооружения ШБИ необходимо исследовать кинематику шарошки. С целью решения этой проблемы была разработана математическая модель, позволяющая отслеживать траекторию движения любой точки вооружения шарошки во время ее движения по забою. С ее помощью были установлены основные закономерности процесса перекатывания шарошки бурового инструмента при бурении скважин, позволяющие определять геометрические параметры вооружения, обеспечивающие повышение эффективности работы ШБИ при бурении пород различной твердости.

### Плакат 4.

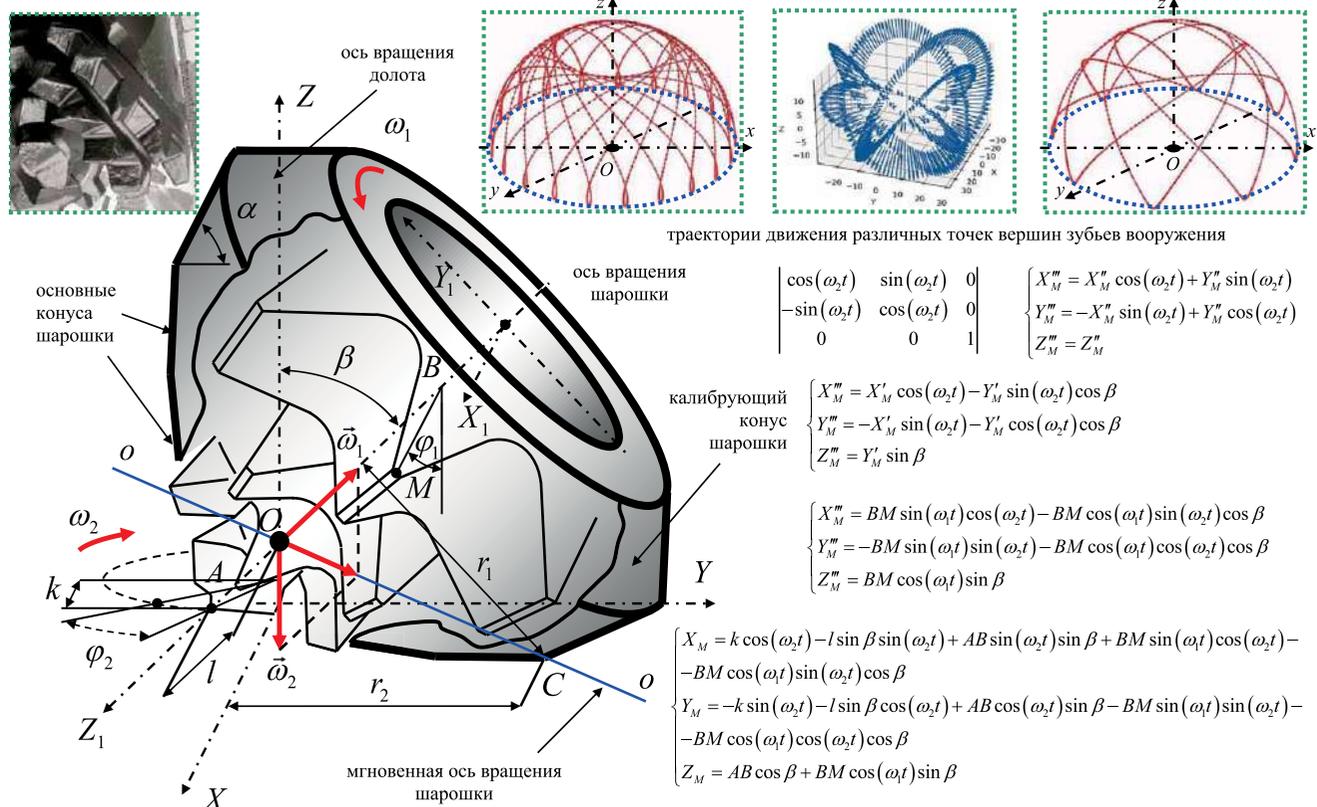
Необходимость определения положения мгновенной оси вращения шарошки, на стадии проектирования ШБИ связана с возможностью управления величинами проскальзывания вооружения каждого из венцов, с целью повышения эффективности работы бурового инструмента.

Зачастую возникает вопрос, каким образом происходит проскальзывание вооружения цельной шарошки, вращающейся вокруг собственной оси и одновременно перекатывающейся по забою.

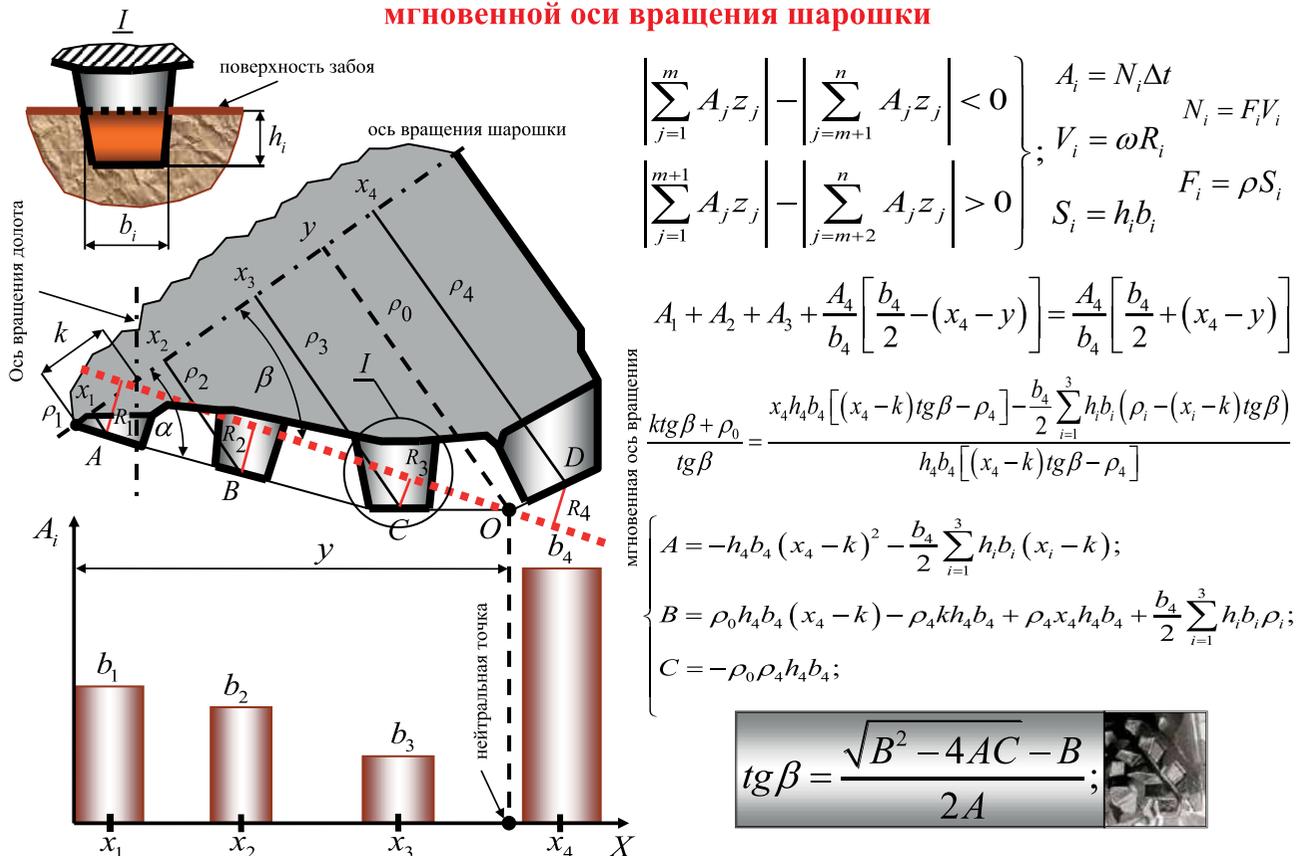
Объяснить это можно на простом примере. Представим, что на прямом участке беговых дорожек стадиона расположены в ряд участники забега. При достижении ими с одинаковой скоростью полукругового участка стадиона выровним их в ряд вдоль воображаемой часовой стрелки, перекрывающей все дорожки и поворачивающейся вокруг центра кругового участка стадиона. В результате, двигаясь по закругленному участку, спортсмены, выравненные воображаемой стрелкой, будут вынуждены вносить коррективы в темпы своего движения.

То есть часть спортсменов на внешних дорожках будут увеличивать свою скорость, в то время как

## 3 Математическое моделирование перемещения «перекатывания» шарошки ШБИ по забою в процессе бурения



## Методика определения расположения мгновенной оси вращения шарошки



находящиеся на внутренних – ее уменьшать. И только спортсмен на одной из центральных дорожек продолжит свое движение с первоначальной скоростью.

В связи с этим, была разработана методика определения положения мгновенной оси вращения, основанная на принципе наименьшей затраты мощности. Определено влияние геометрии вооружения на расположение мгновенной оси вращения шарошки, позволяющее вычислять координаты ведущего венца (дорожки спортсмена не меняющего свою скорость) и рассчитывать величины проскальзывания ведомых венцов вооружения, а также установлены математические зависимости между отклоняющими и стабилизирующими силами, возникающими при работе инструмента с КЗВ.

### Плакат 5.

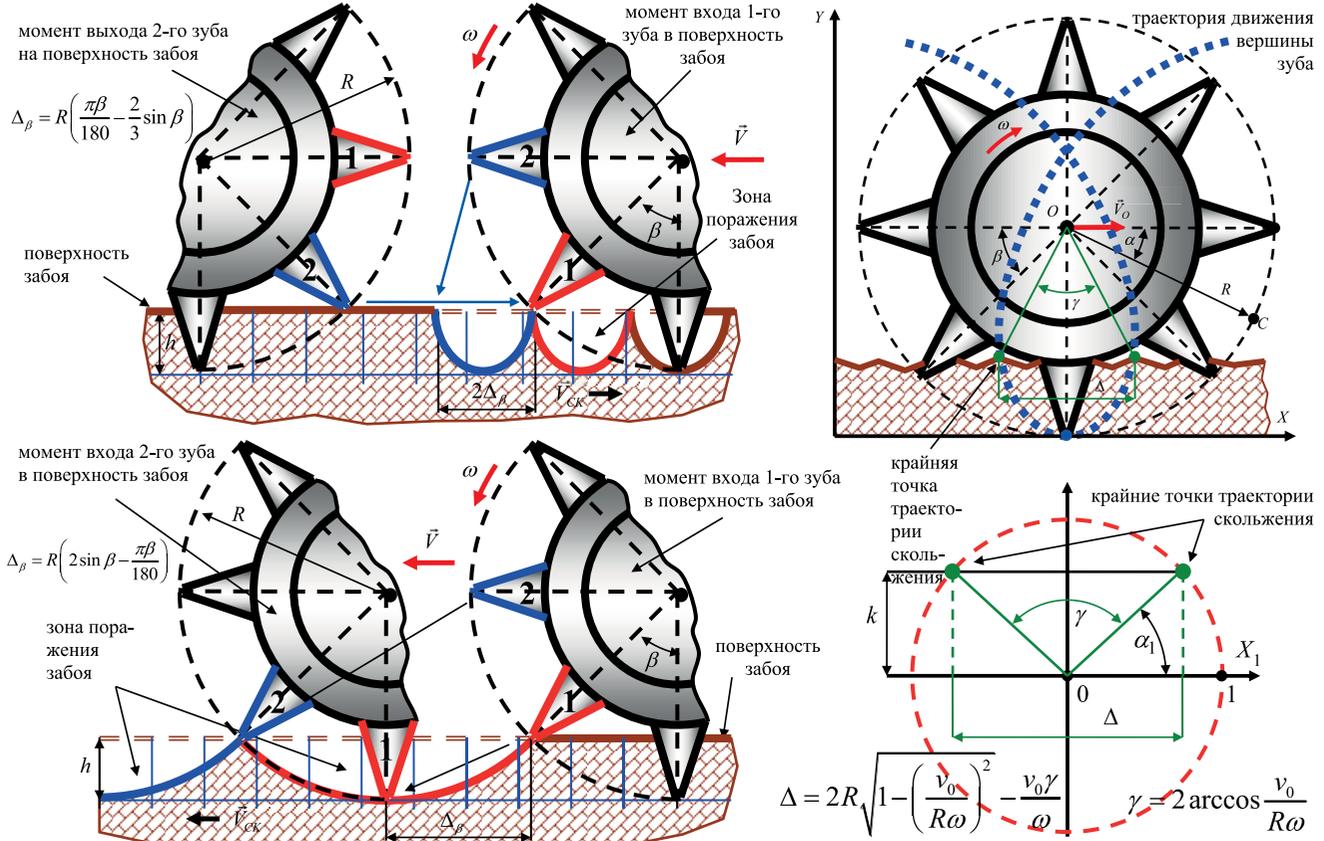
Рассмотрим подробнее процесс «перекачивания» шарошки БИ в условиях «мягкого» забоя, т. е. когда зубья его вооружения углубляются в породу на некоторую величину и одновременно проскальзывают. При этом проскальзывание зубчатого вооружения по направлению вращения ШБИ называется

подтрмаживание, а против – пробуксовка. Для того чтобы повысить эффективность работы ШБИ при бурении мягких, не склонных к образованию забойной рейки горных пород, нужно было разработать такую геометрию зубчатого вооружения шарошек, при работе которой каждый следующий зуб вооружения, вступающий в контакт с забоем, разрушал бы максимально возможный объем породы. Как было отмечено ранее, в отличие от ШБИ, работающего без проскальзывания зубчатого вооружения, то есть когда лунка, формируемая каждым зубом на забое, не накладывается на предыдущую и последующую и имеет немного развальцованную по краям форму самого зуба, у ШБИ, работающего с проскальзыванием зубчатого вооружения, лунка представляет собой углубление параболической формы, геометрия которой зависит от направления и величины проскальзывания каждого конкретного зуба. В дополнение к этому лунки, образующиеся в поверхности забоя в процессе работы ШБИ, могут не только раздвигаться по отношению к величине шага зубьев вооружения проскальзывающего венца, но и сдвигаться, при этом нападывая друг на друга. Поэтому важно контролировать этот процесс и определить такие величины проскальзывания зубчатого вооружения шарошек, которые бы обеспечивали максимально возможный объем поражения забоя при бурении ШБИ. На (плакат 5 вверху слева) представлена схема лункообразования на поверхности забоя при пробуксовке зубьев вооружения шарошки в процессе работы БИ. В этом случае, для достижения максимального поражения забоя в вертикальной плоскости расположение зубьев и величина проскальзывания вооружения должны обеспечивать выполнение следующего условия: место выхода из взаимодействия с породой на поверхность забоя каждого следующего зуба шарошки должно по возможности совпадать с местом входа в нее предыдущего зуба ШБИ.

На этом же плакате (внизу слева) представлена схема лункообразования на поверхности забоя при подтрмаживании зубьев вооружения шарошки в процессе работы ШБИ. В этом случае, для достижения максимального поражения забоя в вертикальной плоскости расположение зубьев и величина проскальзывания вооружения должны обеспечивать выполнение другого условия: место входа во взаимодействие с породой забоя каждого следующего зуба шарошки должно по возможности совпадать с местом выхода из нее предыдущего зуба ШБИ.



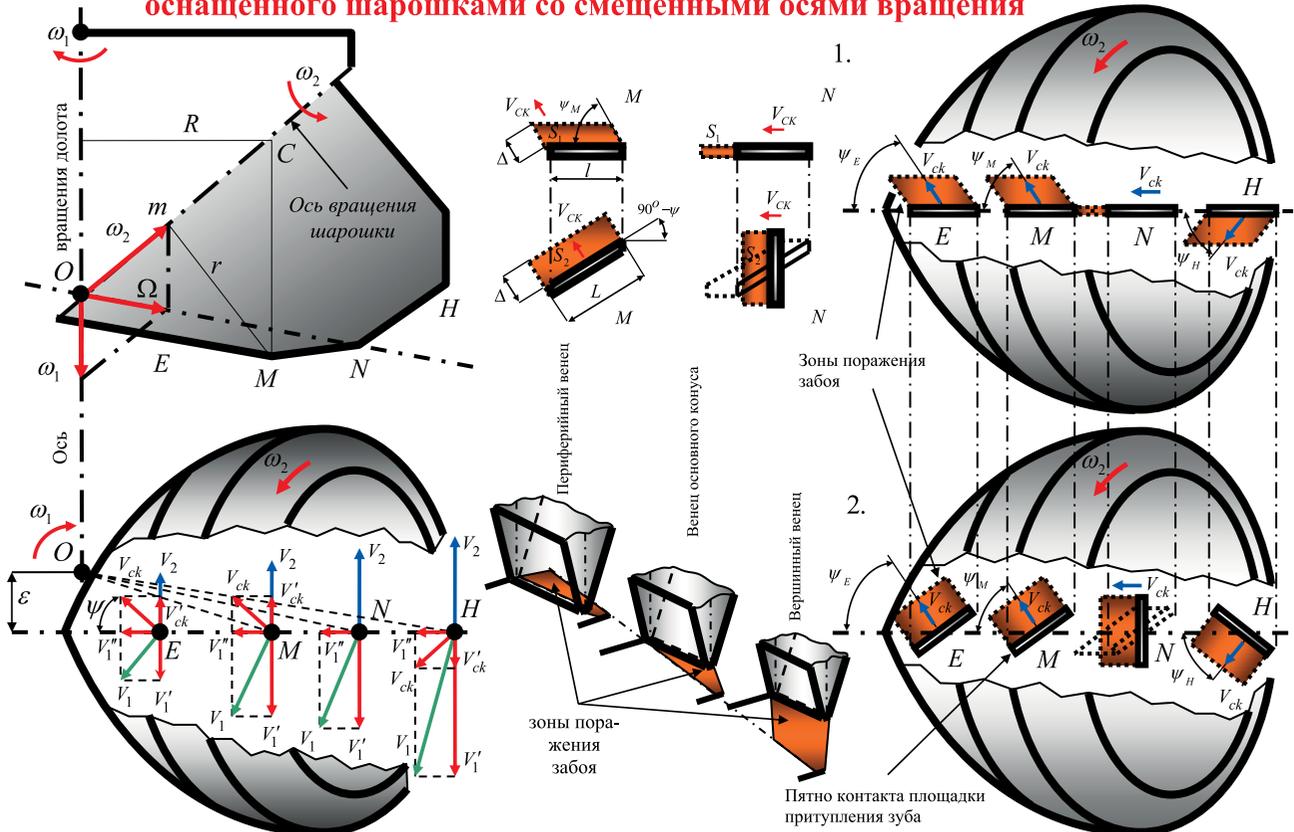
## 5 Анализ процессов пробуксовки и подтормаживания вооружения ШБИ



Плакат 6.

Рассмотрим кинематическую схему шарошки со смещенной в плане осью вращения, а также зоны поражения забоя в горизонтальной плоскости при прямозубом и косозубом вооружении. Очевидно, что зубья всех венцов вооружения шарошки, находящихся в соприкосновении с забоем, имеют разнонаправленные вектора суммарных скоростей

## 6 Анализ процесса проскальзывания по забою вооружения ШБИ, оснащенного шарошками со смещенными осями вращения



скольжения. При ориентации зубьев таким образом, чтобы их основные боковые рабочие поверхности были перпендикулярны вектору суммарной скорости скольжения можно значительно увеличить площадь поражения забоя в горизонтальной плоскости. Установлена закономерность влияния угла наклона КЗВ шарошек на площадь поражения забоя в процессе проскальзывания вооружения, позволяющая ориентировать наклонные зубья с таким расчетом, чтобы обеспечивать максимальное поражение забоя зубьями каждого из венцов для увеличения производительности ШБИ.

#### Плакат 7.

Исследование влияния отклоняющих и стабилизирующих сил на распределение крутящих моментов и уравнивание результирующих осевых составляющих сил воздействия породы на косозубое вооружение по шарошкам бурового инструмента позволило улучшить управляемость ШБИ и обеспечить равностойкость его подшипниковых узлов, за счет создания новых конструктивных схем геометрии косозубого вооружения: однонаправленной и разнонаправленной.

#### Плакат 8.

На основе исследования кинематики шарошек буровых снарядов, включающих в себя пилотное долото и надолотный шарошечный расширитель, было установлено, что проскальзывание вооружения шарошек расширителя противоположно этим же венцам пилотного долота. С учетом этой особенности была разработана новая конструкция шестишарошечного наддолотного расширителя, оснащенного разнонаправленным КЗВ и боковой гидромониторной промывкой.

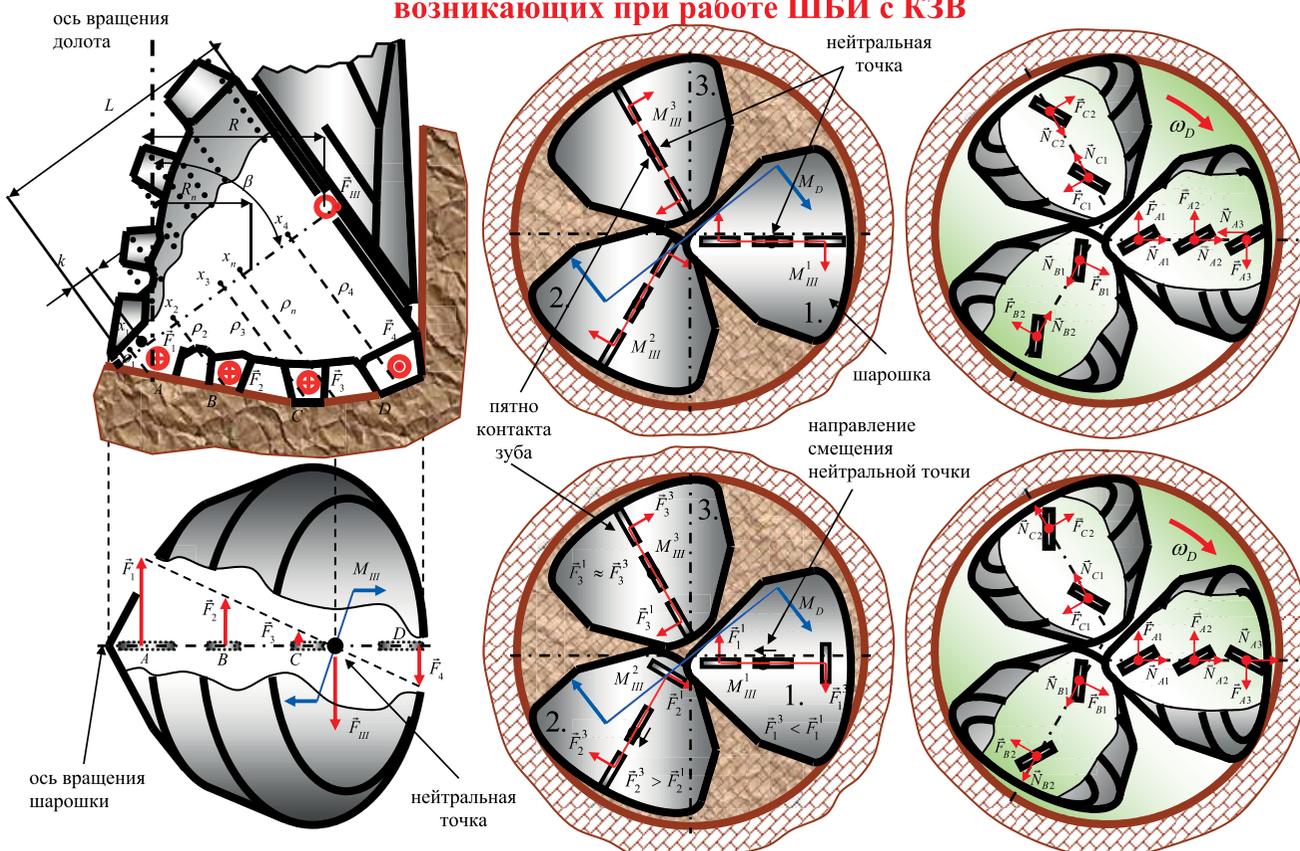
#### Плакат 9.

В процессе сооружения магистральных трубопроводов нередко встает задача пересечения различных водных преград, таких как каналы, реки, озера, обширные болотистые территории. В этом случае наиболее экологичным, экономичным и безопасным способом преодоления этих мест является метод наклонно-направленного бурения. Метод наклонно-направленного бурения 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. Метод ННБ скважин для прокладки магистрального трубопровода осуществляется путем использования различного специального 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. Далее происходит калибрование и зачистка стенок скважины, с целью обеспечения беспрепятственного протаскивания трубопровода.

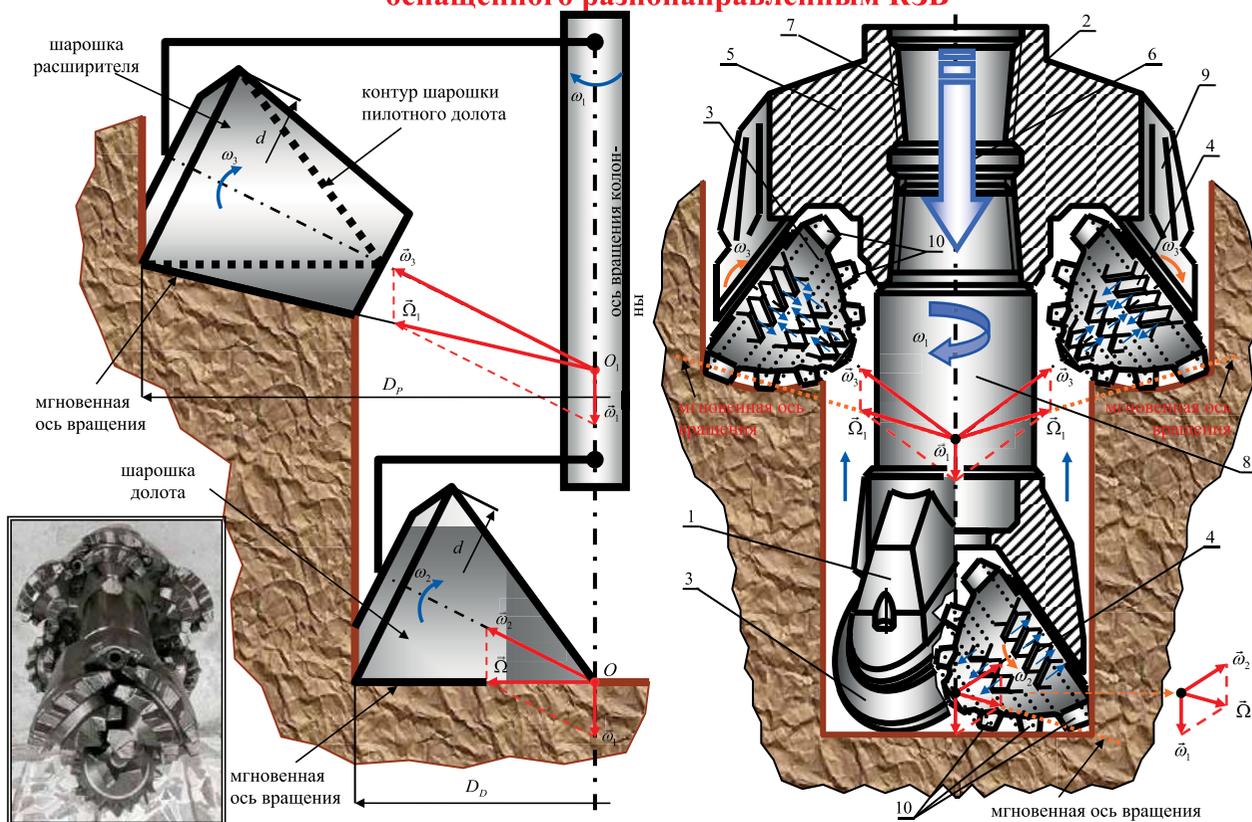
Как правило, бурение пилотной скважины осуществляется обычными буровыми долотами различных типоразмеров, выбор типа и размера которых зависит в основном от твердости и абразивности разбуриваемых пород.

## 7

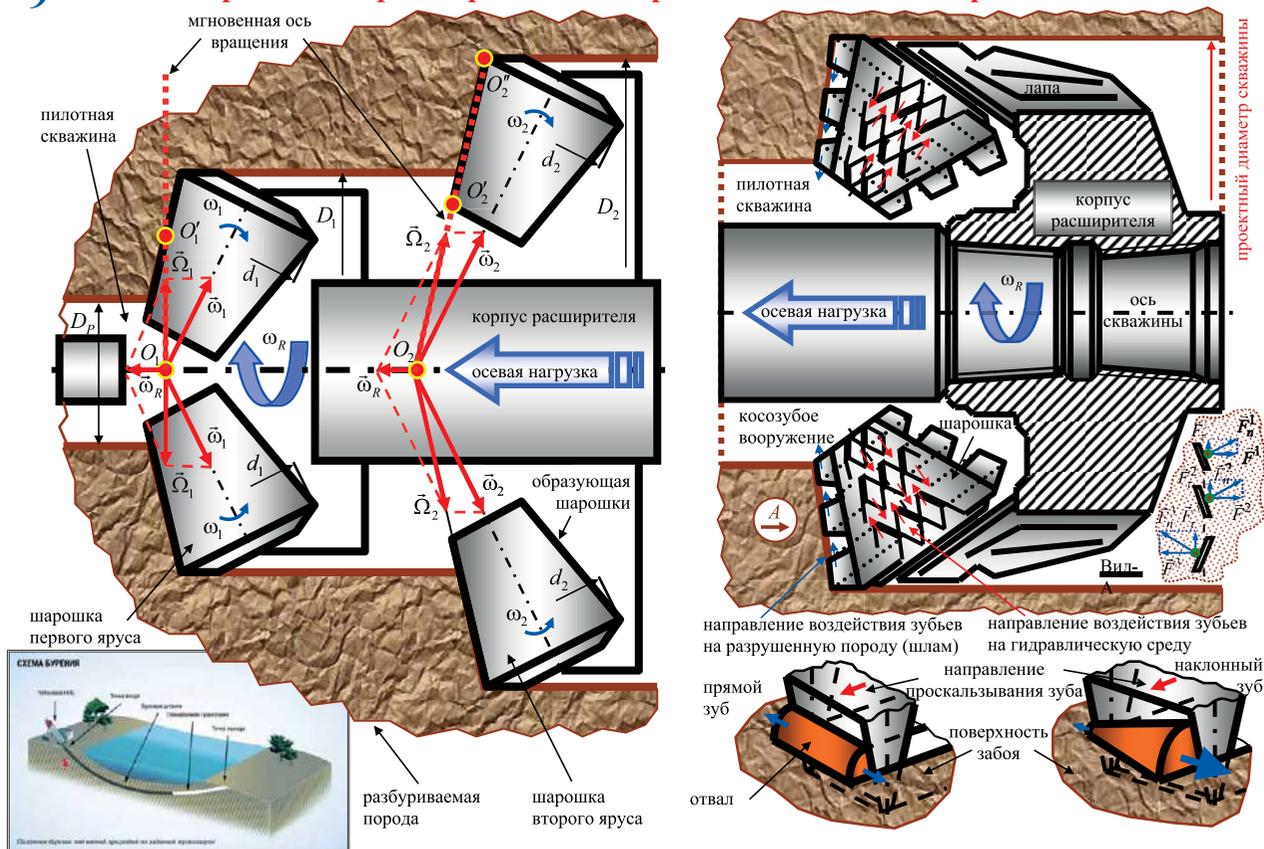
### Анализ влияния отклоняющих и стабилизирующих сил, возникающих при работе ШБИ с КЗВ



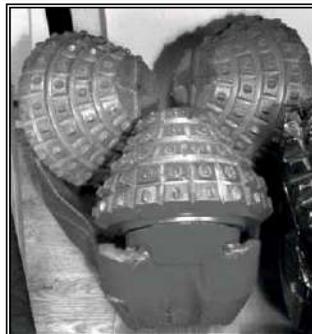
### Новая конструкция шестишарошечного расширителя, оснащенного разнонаправленным КЗВ



### Шарошечные расширители для проходки подводных переходов МТП



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



Бурение и расширение параболических скважин с использованием шарошечных расширителей осуществляется со значительно меньшими скоростями вращения, 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 инструмента, сообразно увеличению его диаметра.

Осевое усилие необходимое для успешной работы шарошечного расширителя определяется с учетом перераспределения его на каждую шарошку инструмента. 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 кольцевым забоям большого диаметра.

На (плакате 9 слева) представлена кинематическая схема работы многоярусного шарошечного расширителя, где помимо других величин:  $\Omega_1$  и  $\Omega_2$  – мгновенные угловые скорости шарошек первого и второго ярусов шарошечного расширителя.

В случае если мгновенная ось вращения « $O_1-O_1'$ » пересекает образующую шарошки (плакат 9 слева), зубчатое вооружение работает с проскальзыванием по забою, если же мгновенная ось вращения « $O_2-O_2'$ » совпадает с образующей шарошки, 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, что бы разрушая породу шарошки перекатывались 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 (второй ярус плаката 9 слева).

В свою очередь для бурения мягких пород наоборот необходимо проектировать вооружение шарошек с таким расчетом, что бы разрушая породу зубчатое вооружение шарошек проскальзывало по забою, т. е. осуществлялось частичное резание породы. Обеспечить это возможно только при условии, когда мгновенная ось вращения шарошки будет пересекать ее образующую (первый ярус плаката 9 слева).

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 шнеки малой протяженности. Поэтому косозубое вооружение позволяет в областях с низкими скоростями



потоков промывочной жидкости (так называемыми «застойными зонами»), путем механической эвакуации, транспортировать шлам в нужном направлении, обеспечивающим 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 (плакат 9 внизу справа). Где  $\vec{F}_n^{1,2,3}$ ,  $\vec{F}_r^{1,2,3}$  и  $\vec{F}_t^{1,2,3}$  силы воздействия косозубого вооружения на разрушаемую ими породу вследствие проскальзывания вооружения по забою: в направлении скольжения зуба, ее нормальная и тангенциальная составляющие для каждого из трех венцов шарошки соответственно (плакат 9 справа 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 забоя в заданном направлении.

#### Плакат 10.

Представлены экспериментальные образцы ШБИ прошедшие испытания в реальных условиях бурения:

- буровой снаряд «пилотное долото Ш295,3М-ГВ + шестишарошечный расширитель 6РШ-555М» показали увеличение механической скорости бурения в сравнении со своими аналогами с прямозубым вооружением на 19–23%;
- шарошечное долото Ш295,3М-ЦГВ с разнонаправленным косозубым вооружением на – 19%;
- шарошечные долота Ш490С-ЦВ и 393,7С-ЦВ, оснащенные центральными гидромониторными насадками диффузорного типа с ассиметричным шестигранным поперечным сечением, на 7–9%;
- шарошечные долота Ш490С-ЦВР-1(М) с центробежно-объемно-армированным вооружением, по проходке на 46%, по механической скорости бурения на 20%;
- шарошечные долота Ш 490ТЗ-ЦВР-9 по проходке в 2,5 раза, по механической скорости бурения в 2 раза.



## Выводы:

- 1 Проведенные в работе исследования позволили повысить эффективность работы различного ШБИ за счет разработки новых конструкций КЗВ, обладающего большей разрушающей способностью и прочностью, а также элементов промывочных систем, позволяющих существенно улучшить очистку, как инструмента, так и всей призабойной зоны в целом.
- 2 Созданы математические модели процессов «перекатывания» шарошек различного ШБИ при разных способах бурения. На их основе определены геометрические параметры вооружения, обеспечивающие повышенную эффективность работы ШБИ при бурении пород различной твердости.
- 3 Разработана методика определения положения мгновенной оси вращения шарошки бурового инструмента, позволяющая выявлять координаты ведущего венца и рассчитывать величины проскальзывания ведомых венцов вооружения.
- 4 Исследовано влияние отклоняющих и стабилизирующих сил, возникающих при работе инструмента с косозубым вооружением, позволившее разработать конструктивные схемы КЗВ ШБИ, обеспечивающие минимальную вероятность отклонения от заданного направления бурения.
- 5 Разработаны и изготовлены опытные образцы различного ШБИ, такие как: шарошечные долота для реактивно-турбинного бурения Ш490С-ЦВР-1 с разноориентированным центробежно-объемно-армированным зубчатым вооружением, Ш490ТЗ-ЦВР-9 с твердосплавным разнонаправленным зубчатым вооружением, трехшарошечные долота Ш295,3М-ЦГВ с разнонаправленным КЗВ, Ш295,3М-ГВ оснащенных гидромониторными насадками конфузорного типа с шестигранным ассиметричным внутренним поперечным сечением, Ш393,7С-ЦВ, Ш490С-ЦВ оснащенные центральными гидромониторными насадками диффузорного типа с шестигранным ассиметричным внутренним поперечным сечением, шестишарошечный расширитель 6РШ-555М с разнонаправленным КЗВ.
- 6 Промышленные испытания опытных образцов всех новых конструкций различного ШБИ с КЗВ, а также элементов промывочных систем, показали их высокую работоспособность и эффективность при различных способах бурения. Некоторые из них были внедрены, другие рекомендованы к внедрению на различных предприятиях нефтегазовой отрасли.