Перспективная конструкция
гидромониторной насадки шарошечного бурового инструмента

Как известно, интенсивность разрушения и удаления породы в процессе бурения, во многом определяется полем давлений (напряжений), возникающим в призабойной зоне. Оно формируется за счет совместного действия нескольких факторов, таких как: механического воздействия вооружения долота, гидравлического воздействия потоков жидкости из скважины и пласта через забой и горного давления.

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

Существенную роль при разрушении горной породы и дальнейшим транспортировании ее в затрубное пространство, играет механизм отрыва и перемещения частиц на забое. Условием отрыва и успешной эвакуации частиц разрушенной породы в стесненных условиях призабойной зоны, является превышение страгивающей составляющей результирующей силы давления на частицу (удаляющая сила) над удерживающей силой. Последняя определяется как сумма сил сцепления и трения частицы с породой, глинистой коркой, прижимающей силой и силой тяжести частицы.

В процессе проведения буровых работ влиять на баланс удерживающих и удаляющих сил возможно за счет варьирования следующими факторами:

- давлением и скоростью воздействия зубьев вооружения на породу;
- дифференциальным давлением;
- прижимающей силой давления;
- динамическим давлением потока промывочной жидкости на частицу;
- направлением потока, обтекающего частицу;
- сил трения, возникающих на поверхности частицы при движении ее в сторону затрубного пространства.

Роль струи промывочной жидкости в формировании удаляющей силы можно оценить с помощью схемы затопленной струи, истекающей в цилиндрический тупик под углом β к его оси Z в фиксированный момент времени (рис. 1).

Под действием струи на поверхности забоя возникают нормальные σ (кривая 1) и касательные τ (кривая 2) напряжения, неравномерно распределенные по радиусу забоя R. Так же эта неравномерность усугубляется вращением сопла вокруг оси цилиндрического забоя. При различных расстояниях и углах наклона сопла по отношению к поверхности забоя β от 0 до 900 значения напряжений и не должны превышать максимального перепада давлений в насадке, равного $12 \div 13$ МПа.

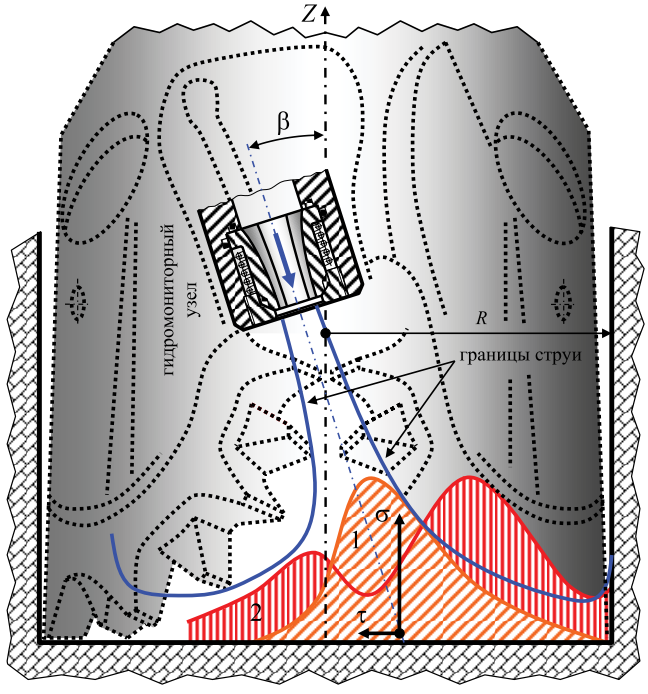

Рис. 1. Принципиальная схема распространения затопленной струи в призабойной зоне
1. Эпюра нормальных напряжений
2. Эпюра касательных напряжений

Эта величина почти на порядок ниже твердости даже мягких горных пород, но сравнима со значениями прочности пород на сдвиг. Поэтому в формировании удаляющей силы нормальные напряжения в породе от торможения струи играют второстепенную роль по сравнению с касательными, возникающими под действием потока, параллельного забою при растекании струи. Особенно важна роль потока вдоль забоя в смыве частиц шлама, предварительно отделенных от основного массива породы зубьями вооружения бурового инструмента. Необходимо добиваться такой организации основных потоков в призабойной зоне, при которой каждая частица шлама беспрепятственно эвакуировалась из зоны разрушения породы без повторного воздействия на нее зубьев вооружения и перемалывания в зазорах между корпусом долота и стенками забоя.

С точки зрения снижения потерь кинетической энергии затопленной струи, при ее движении от среза насадки до поверхности забоя и далее вдоль него в стесненных условиях, большое значение имеет конструкция шарошечного бурового инструмента, которая во многом определяет поле динамических давлений потоков жидкости в призабойной зоне. Наилучшая организация потоков промывочной жидкости для каждого типоразмера шарошечного бурового инструмента определяется сугубо индивидуально. Наиболее сложным, с точки зрения организации потоков, является шарошечный буровой инструмент большого диаметра (393,7 и выше), оснащенный комбинированной схемой промывки. В таких конструкциях большое значение приобретают следующие конструктивные параметры: расстояние от среза гидромониторных насадок до поверхности забоя, форма корпуса, форма шарошек и геометрия их вооружения, которые в своей совокупности должны способствовать увеличению касательной составляющей напряжения в основных потоках промывочной жидкости.

Удаление частиц породы с забоя осуществляется под действием истекающих из гидромониторных насадок долота струй промывочной жидкости в результате их прямого удара о забой и растекания по его поверхности. Как правило, эти затопленные струи являются вращающимися и турбулентными, и распространяются в призабойной зоне с высокими давлениями (до 100 МПа).

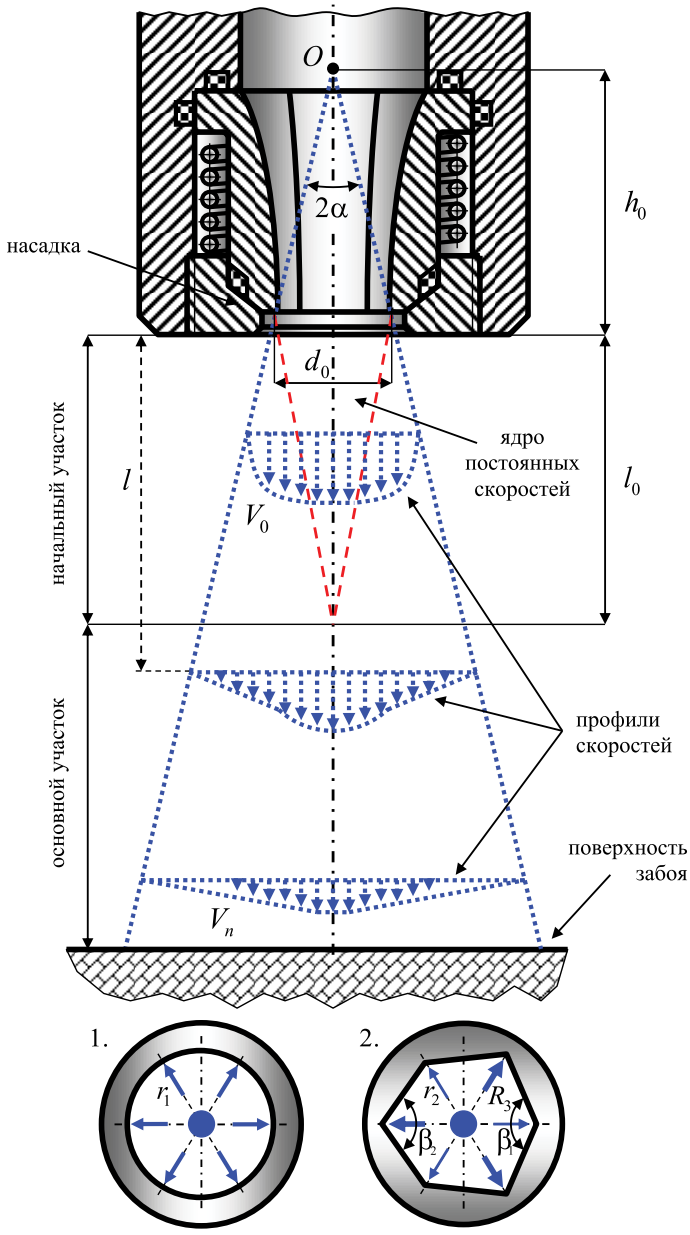

Рис. 2. Схема затопленной струи, истекающей из гидромониторной насадки:
1. Цилиндрической формы
2. Асимметричным шестиугольным сечением

Область распространения струй – тупиковая область забоя, ограниченная стенками скважины, забоем, элементами вооружения и корпуса долота.

Принято считать, что осевая скорость для турбулентной струи, как и энергия струи, изменяется обратно пропорционально расстоянию от полюса струи «0» (рис. 2) рассматриваемого, как воображаемый точечный источник. В тоже время расход увеличивается прямо пропорционально расстоянию.

При этом динамическое давление на оси струи будет выражаться следующими зависимостями, для $l < l_0$:

$$P = \rho \frac{V_0^2}{2};$$

для $l > l_0$:

$$P = \rho \frac{V_m^2}{2} = \left(\frac{1 + am_0}{1 + am} \right) P_0 = \lambda^2 P_0;$$

где:
a – коэффициент расширения струи;
m_0 – относительное расстояние от насадки (безразмерное);
m – относительная длина ядра струи.

Параметр λ^2 называется коэффициентом уменьшения динамического давления. Таким образом, динамическое давление в центре струи остается постоянным при $l > l_0$, а затем резко уменьшается. Например, для насадок с эллиптическим профилем на расстоянии $10d_0$ динамическое давление уменьшается на половину, а для насадок с прямым входом снижается до 20% от начального значения. На расстояниях $(20 \div 25)d_0$ динамическое давление практически становится равным нулю (рис. 3).

Влияние профиля насадки на длину потенциального ядра l_0 и на угол расширения α значительно. Так, если для насадок с прямым входом коэффициент скорости $\varphi = 0,6$, то для насадок с эллиптическим профилем он достигает значения 0,99. То есть вся энергия срабатываемого перепада давления на долоте преобразуется в кинетическую энергию жидкости.

С целью определения влияния геометрии поперечного сечения гидромониторных насадок на основные характеристики струи, в программном модуле Ansys были построены математические модели двух насадок, с круглым (рис. 2.1) и асимметричным шестиугольным (рис. 2.2) поперечным сечением.

При этом, было выполнено следующее условие: площадь внутреннего отверстия одноименного сечения, для каждой из насадок должна быть одинаковой. То есть, исходя из формул равенства площадей данных фигур:

$$S_K = S_{A6};$$

$$\pi r_1^2 = \frac{3\sqrt{3}}{2} r_2 R_3;$$

где:

S_K – площадь сечения цилиндрической насадки, мм²;

S_{A6} – площадь сечения асимметричной шестигранной насадки, мм²;

r_1 – радиус круглого сечения, мм;

r_2 и R_3 – радиусы описанных окружностей вокруг тупых и острых углов асимметричного шестигранного сечения, мм.

Для проведения CFD (структурно-жидкостная динамика) расчета, использовался комплекс ANSYS Fluent. По рассчитанным ранее геометриям были созданы сеточные модели насадок двух типов (рис. 3).

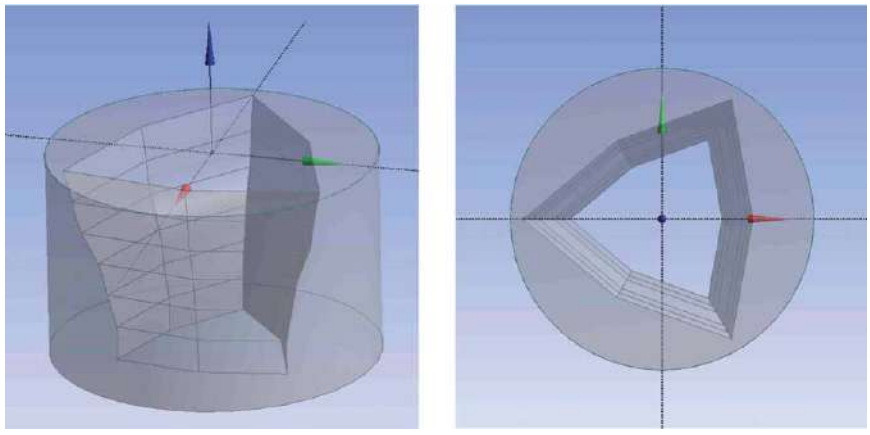

Рис. 3. Расчетная 3D модель гидромониторной насадки конфузорного типа с асимметричным шестиугольным поперечным сечением

Конечно-элементная сетка накладывалась с помощью сеточного генератора Ansys Meshing. Была использована сетка с конечными элементами в виде тетраэдров, при этом на стенках был наложен пограничный слой из призматических элементов. Параметр сеточной модели, отвечающий за качество – максимальная скошенность ячеек не превышает 0,82 (должен находиться в диапазоне от 0 до 0,85). В качестве модели турбулентности для расчета была использована стандартная модель "$k-e$".

В результате выполненных расчетов, были получены картины течения промывочной жидкости из двух типов насадок, с круглым и асимметричным шестигранным поперечным сечением. Определены поля распределения параметров и их величины в каждой точке потока (рис. 4).

Анализ геометрий истекающих струй свидетельствует о том, что в отличие от насадки с классической круглой формой поперечного сечения, асимметричная шестигранная насадка характеризуется большей зоной постоянных скоростей и большим углом расширения струи. Так, например, зона постоянных скоростей для цилиндрической насадки составила $10d_0$ с углом расширения струи 18^0, а для шестигранной соответственно $14d_0$ и 22^0.

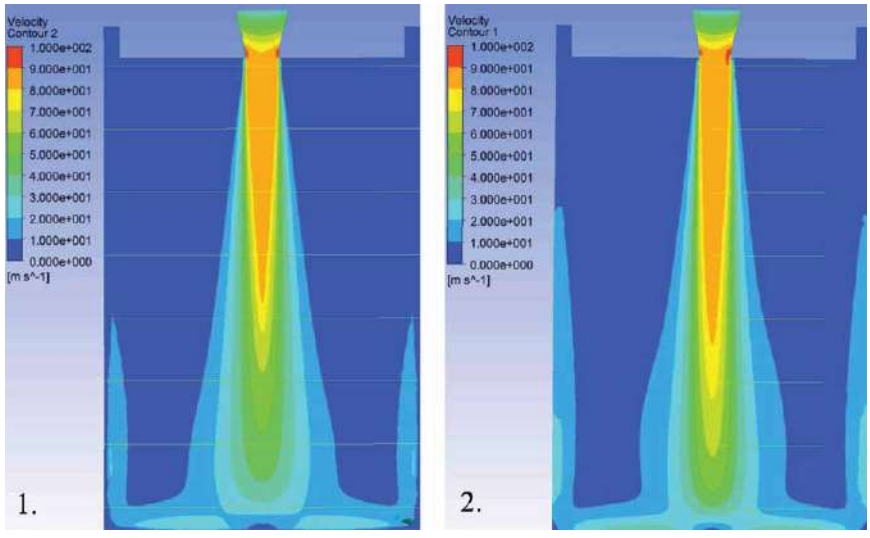

Рис. 4. Поля распределения скоростей в вертикальной плоскости:
1. Насадка с цилиндрическим поперечным сечением
2. Насадка с асимметричным шестигранным сечением

При этом была выявлена следующая закономерность. Струя, истекающая из шестигранной насадки, на выходе из нее так же имеет форму шестиугольника, но по мере удаления от выходного отверстия, стремиться принять форму круга.

В связи с этим, на основе проведенных исследований можно сделать вывод о том, что использование фасонных гидромониторных насадок позволяет придавать струе промывочной жидкости определенную форму

в горизонтальном сечении, которая сохраняется на значительном расстоянии после выхода из насадки. Данный эффект может быть использован при создании новых гидромониторных узлов для различных систем промывки шарошечных буровых долот, так как форма истекающей струи играет не мало важную роль, в создании и распределении основных потоков промывочной жидкости, как над шарошечным пространством, так и в призабойной зоне в целом. Например, придание струе, истекающей из боковой гидромониторной насадки конфузорного типа формы многоугольника, позволит изначально направить угловые части потока в межшарошечное пространство и в сторону периферийных венцов сопредельных шарошек, тем самым, очищая основные и периферийные венцы сразу двух смежных шарошек. Это позволит существенно улучшить качество очистки вооружения, особенно самоочищающегося, в условиях работы по глинистым породам склонных к сальникоообразованию.

С целью реализации результатов представленных выше исследований была разработана, конструктивна схема шарошечного бурового долота с боковой гидромониторной промывкой, оснащенная насадками с асимметричным шестигранным сечением (рис. 5).

Особенностью данного технического решения, является то, что выходные части каналов насадок в плане имеют форму шестигранника, причем шестигранники выполнены, по меньшей мере, с углами двух размеров, при этом одна из вершин угла меньшего размера каждой из насадок ориентирована в направлении точки пересечения осей двух смежных шарошек, а две другие из вершин углов меньших размеров – в сторону зоны контакта периферийных венцов набегающих и сбегающих шарошек со стенками скважины. С целью предотвращения насадки от проворота и, как следствие, изменения ее ориентации, она жестко зафиксирована относительно втулки и корпуса долота.

На (рис. 6) представлены образцы гидромониторных насадок с шестигранным асимметричным поперечным сечением, а на (рис. 7) опытное трехшарошечное долото 295,3 (11 5/8) STM121 оснащенное этими насадками.

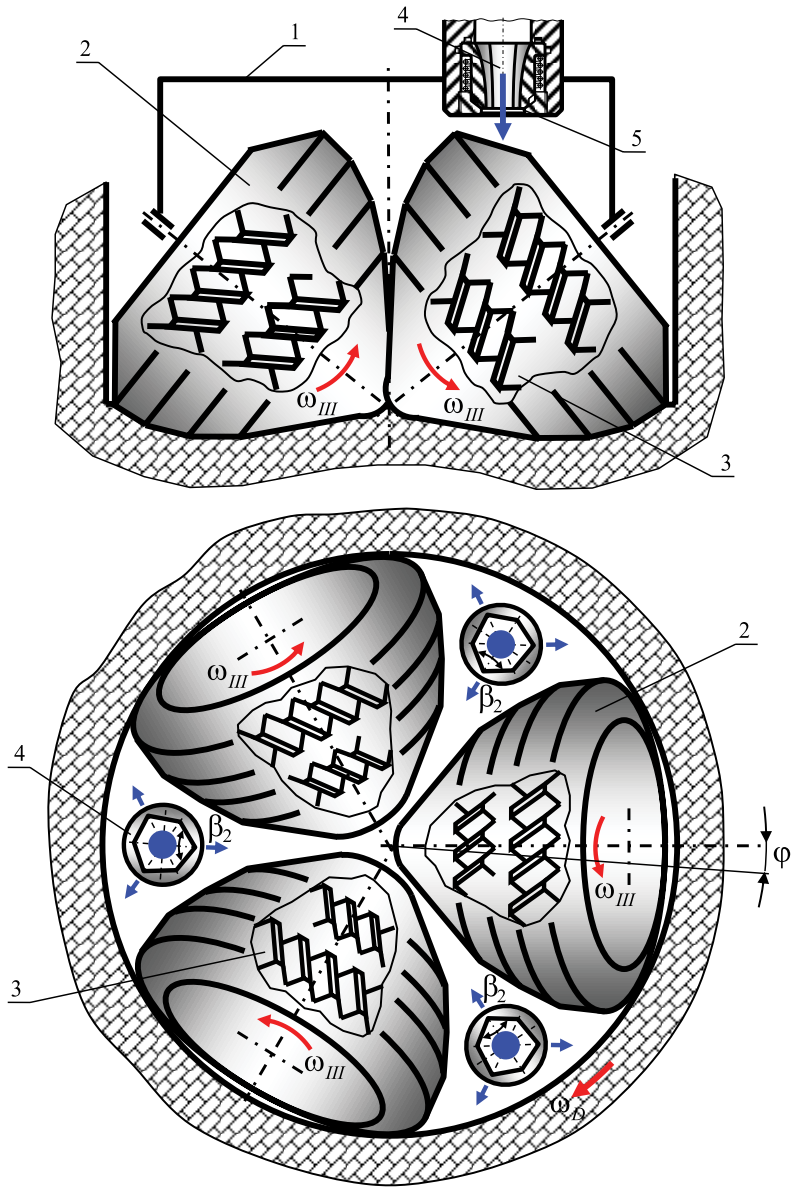

Рис. 5. Принципиальная схема трехшарошечного бурового долота с боковой симметричной гидромониторной схемой промывки, оснащенная насадками с асимметричным шестигранным поперечным сечением

Рис. 6. Гидромониторные насадки с шестигранным асимметричным поперечным сечением ЗАО «Проммашсервис»

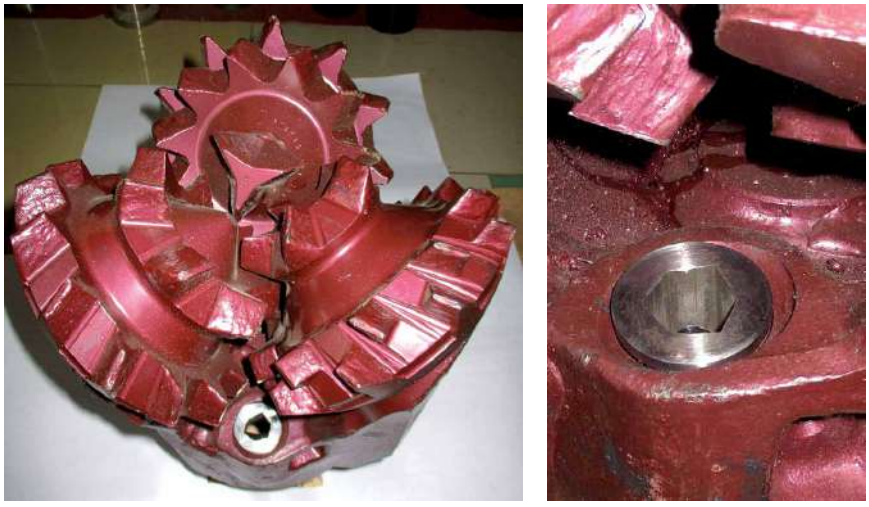

Рис. 7. Опытное трехшарошечное долото 295,3 (11 5/8) STM121 ОАО «Волгабурмаш» с гидромониторными насадками с шестигранным асимметричным поперечным сечением ЗАО «Проммашсервис»

Буровое долото содержит корпус 1, шарошки 2 с зубьями 3 и центральный промывочный узел с насадками 4, жестко зафиксированными относительно корпуса 1 от проворота любым известным способом (рис. 5). Выходная часть каналов 5 в плане выполнена в форме шестигранника, причем шестигранники выполнены, по меньшей мере, с углами двух размеров – β_1 и β_2, при этом одна из вершин углов меньшего размера у всех насадок 4 ориентирована в направлении точки пересечения осей двух смежных шарошек, а две другие вершины углов меньших размеров – в сторону зоны контакта периферийных венцов набегающих и сбегающих шарошек со стенками скважины. На приведенных чертежах представлено 3-х шарошечные долота, у которых насадки имеет шестигранную форму. Это необходимо для сохранения заданной ориентации углов многогранника относительно корпуса 1 и шарошек 3 долота.

Такая ориентация поперечного сечения промывочного канала позволяет обеспечить наиболее качественную очистку всей площади забоя скважины.

Долото работает следующим образом. Под действием осевой нагрузки и крутящего момента зубья 3 шарошки 2 разрушает породу, которая удаляется с забоя скважины промывочной жидкостью, нагнетаемой через промывочные узлы. При этом благодаря выполнению выходной части насадки 5 с поперечным сечением в форме шестигранника, вершины углов которого ориентированы в сторону межшарошечного пространства и осей вращения шарошек и использованию эффекта прилипания струи к боковым стенкам каналов, обеспечивается создание перепада давления жидкости между центральной и периферийной зонами забоя скважины. Благодаря перепаду давления возникает эжекционный эффект, и обогащенная шламом промывочная жидкость из центральной зоны эффективно удаляется в затрубное пространство, обеспечивая работу вооружения шарошек по чистому забою, что способствует увеличению как скорости бурения, так и проходки на долото путем исключения повторного измельчения шлама вооружением долота. Этому же способствует и очистка вооружения шарошек от налипшего шлама, что особенно часто наблюдается при бурении по вязким породам и приводит к резкому увеличению энергозатрат из-за увеличения необходимого крутящего момента и снижению всех технико-экономических показателей работы долота.

Придание выходной части насадок формы конфузора, а проходному отверстию формы шестигранника с углами двух размеров – β_1 и β_2, при том, что одна из трех вершин углов меньшего размера – β_2 ориентирована в направлении точки пересечения двух смежных осей шарошек, а две другие аналогичные вершины углов меньшего размера β_2 – в сторону периферийных венцов набегающей и сбегающей смежных шарошек позволяет сразу направлять основные части потока промывочной жидкости, выходящей из насадки, в межшарошечное пространство к центру вращения долота, где она омывает вооружение сразу двух смежных шарошек, и на вооружение периферийных венцов шарошек, а далее направляется в затрубное пространство.

Применение предложенной конструкции шарошечного долота с боковыми гидромониторными узлами, благодаря лучшей очистке межвенцовых и межзубцовых впадин шарошек и призабойной зоны в целом от шлама, позволит увеличить механическую скорость бурения и проходку на долото и как следствие снизить себестоимость проведения буровых работ.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Ищук А. Г., Сериков Д. Ю. Шарошечный буровой инструмент. – М.: «МДМпринт», 2021. – 303 с.
2. 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.
3. Ясашин В. А. Повышение эффективности породоразрушающего бурового инструмента конструкторско-технологическими методами. Докторская диссертация. Москва, 2009.
4. Сериков Д. Ю. Совершенствование боковых гидромониторных насадок шарошечных буровых долот // Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса. 2017. – №1. – С. 9–14.
5. Гаек Я., Шидак Э. Теория ранговых критериев. – М.: Наука,1971.
6. Богомолов Р. М., Сериков Д. Ю. Совершенствование вооружения шарошечного бурового долота // Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса: науч.-техн. журн. – М.: ОАО «ВНИИОЭНГ», 2018. – №5. – С. 24–28.
7. Стеклянов Б. Л. Повышение эффективности породоразрушающих буровых инструментов на основе сравнительного анализа кинетических характеристик их вооружения: дис. …докт. техн. наук: 05.15.10 / Стеклянов Борис Леонтьевич. – М., 1988. – 393 с.
8. Сериков Д. Ю., Сморкалов Д. В. Совершенствование центрального промывочного узла трехшарошечного бурового долота // Территория «НЕФТЕГАЗ». – 2014. – №12. – С. 22–28
9. Буримов Ю. Г., Копылов А. С., Орлов А. В. Бурение верхних интервалов глубоких скважин большого диаметра. Москва, 1975.