Исследование влияния косозубого вооружения шарошек бурового инструмента на гидравлическую среду призабойной зоны

Работы по совершенствованию стального армированного вооружения шарошечного бурового долота ведутся с момента его создания в 1908 году. За эти годы было разработано огромное количество конструкций, как геометрий вооружения различного шарошечного бурового инструмента, так и форм отдельных зубчатых элементов, а также способов армирования их основных рабочих поверхностей. При этом основной упор делался на повешение разрушающей способности зубьев, их долговечности и предотвращение эффекта рейкообразования. Однако исследований, направленных на изучение влияния зубчатого вооружения шарошечного бурового инструмента в процессе его работы на гидравлическую среду призабойной зоны, практически не проводилось.

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

В настоящее время ведутся активные работы по созданию шарошечного бурового инструмента, оснащенного косозубым вооружением. Как известно одним из основных преимуществ косозубого вооружения над широко распространенным прямозубым является его способность механически эвакуировать шлам из зоны разрушения породы забоя в том или ином направлении. Однако зубья вооружения большую часть времени проводят не в соприкосновении с горной породой, а взаимодействуя с его гидравлической средой. В связи с этим важным моментом при проектировании зубчатого вооружения шарошечного бурового инструмента является знание и понимание процессов влияния геометрии зубчатого вооружения, вращающихся шарошек на гидравлическую среду призабойной зоны.

С целью изучения этого влияния были проведены предварительные лабораторные испытания. Суть их заключалась в следующем. На станину вертикально-фрезерного станка «6Р12» устанавливалась емкость с жидкостью (рис. 1). В пиноли станка закреплялась торцевая фреза диаметром 42 мм и углом наклона винтовой линии боковых поверхностей зубьев 20 градусов. Фреза опускалась в емкость с жидкостью с таким расчетом, чтобы заглубление торца фрезы составляло порядка 10 мм. При включении станка шпиндель с закрепленной в пиноли торцевой фрезой начинал вращаться. Скорость вращения шпинделя варьировалась от 300 до 600 об/мин., что соответствует линейным скоростям зубьев (относительно оси вращения шарошки) вооружения периферийных рядов шарошек долот, диаметром 295,3 мм при вращении инструмента с оборотами 40–150 об/мин., т.е. низкооборотном роторном бурении.

Все происходящее фиксировалось путем видеосъемки, которая в дальнейшем подвергалась раскадрированию. Результаты представлены на рис. 1. Как видно из стоп-кадров при резком разгоне инструмента, боковые винтовые поверхности зубьев фрезы поднимают жидкость вверх на 20–25 мм, т.е. на расстояние 2–2,5 раза большее, нежели первоначальное заглубление инструмента.

При частоте вращения инструмента 300 об/мин. подъем жидкости происходил на примерно вдвое меньшую величину, чем при 600 об/мин. Провести эксперимент на скоростях, превышающих 1000 об/мин. не удалось, так как подъем и разбрызгивание жидкости были настолько сильными, что зафиксировать их с применением имеющихся технических средств видео фиксации, не представлялось возможным. Если вычислить необходимую скорость вращения фрезы, которая бы эмитировала работу периферийного венца шарошки долота диаметров 295,3 при работе от турбобура с частотой вращения 600 об/мин., то ее скорость должна была быть порядка 2800 об/мин.

Таким образом, проведенные лабораторные испытания свидетельствуют о том, что косозубое вооружение обладает значительным потенциалом, с точки зрения его воздействия на гидравлическую среду забоя, и чем больше скорость вращения инструмента, тем больше это воздействие.

С целью дальнейшего исследования этого воздействия было проведено компьютерное моделирование процесса вращения 3D-моделей периферийных венцов шарошек бурового инструмента с косозубым вооружением различной конфигурации в гидравлической среде (рис. 2).

Для решения поставленной задачи использовался программный комплекс Ansys Fluent. Этот математический CFD (Структурно жидкостная динамика) пакет, предназначен для решения задач гидрогазодинамики и основан на решении уравнения Навье-Стокса разными методами. Метод решения зависит от выбора модели турбулентности. В данном случае использовалась модель турбулентности SST k-omega.

Суть модели турбулентности SST k-omega заключается в том, что уравнение движения преобразуется к виду, в котором добавлено влияние флуктуации средней скорости

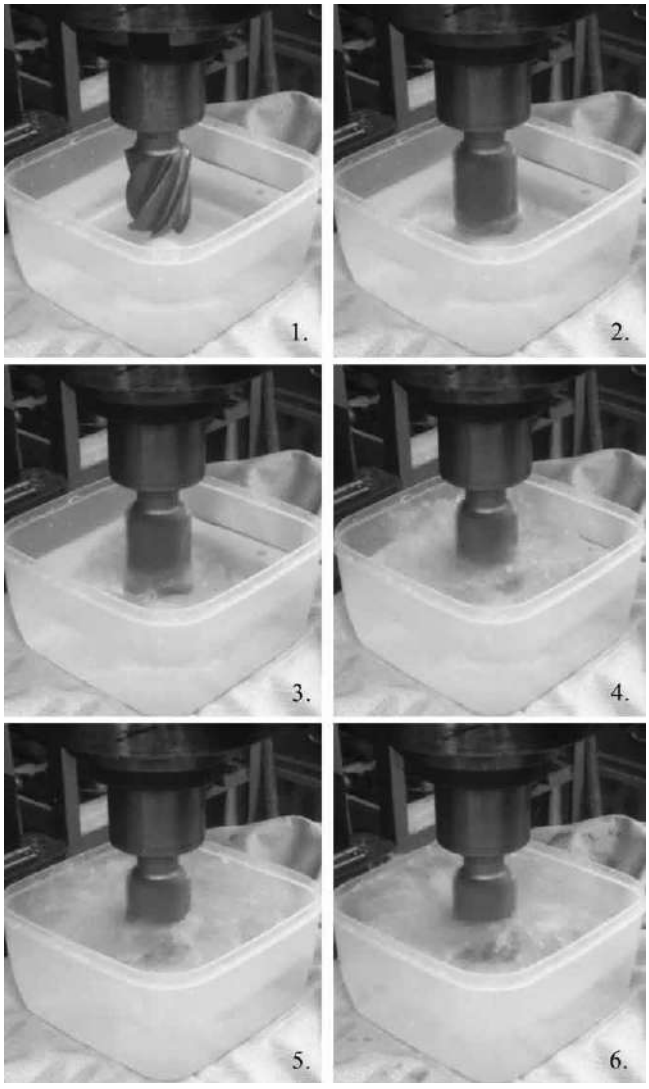

Рис. 1. Стоп кадры видеофиксации работы инструмента при 600 об/мин.
1. 0 об/мин.; 2. 50 об/мин.; 3. 150 об/мин.; 4. 300 об/мин.; 5. 450 об/мин.; 6. 600 об/мин.

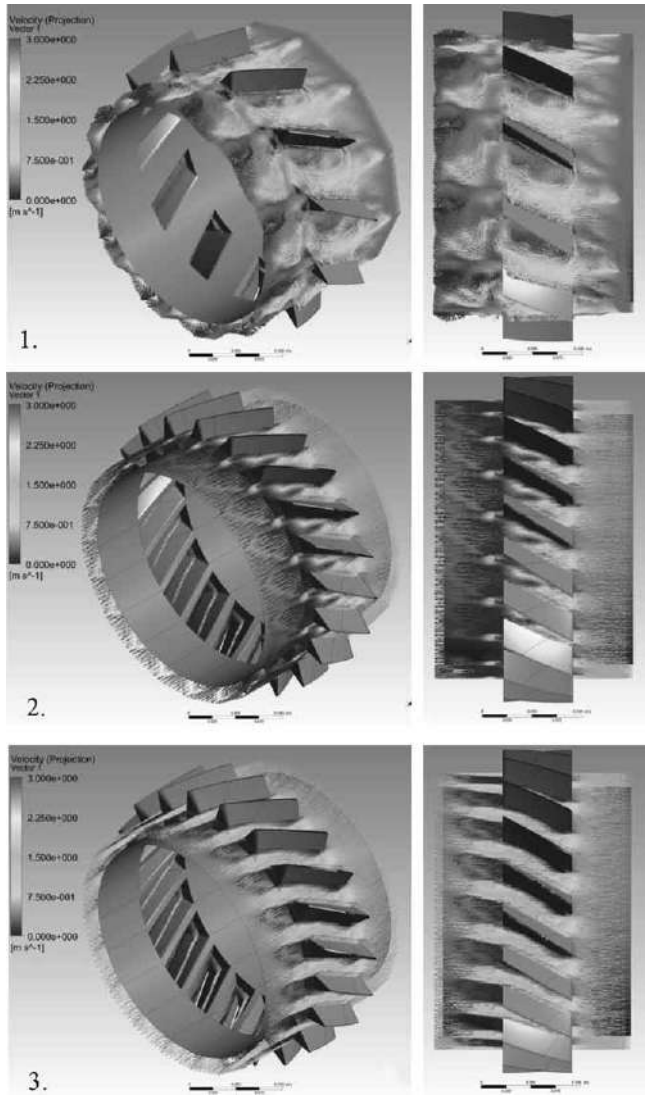

Рис. 2. Модели (3D) венцов шарошек с косозубым вооружением различной конфигурации потока 0,1 м/с. Для решения данной CFD задачи была произведена параметризация в расчетной среде Workbench.

(в виде турбулентной кинетической энергии) и процесса уменьшения этой флуктуации за счет вязкости (уравнение для скорости диссипации турбулентной энергии).

Так как все модели являются циклическими и симметричными, поэтому для расчета использовались секции зубчатых венцов с заданием условия симметрии. Вращение венцов моделировалось при двух скоростях: 300 и 600 об/мин. При этом использовалась неньютоновская промывочная жидкость, с плотностью 2200 кг/м^3. Начальная скорость потока 0,1 м/с. Для решения данной CFD задачи была произведена параметризация в расчетной среде Workbench.

На рис. 2 представлены гидродинамические модели течения промывочной жидкости сквозь косозубое вооружение вращающихся венцов различных конструкций.

Для систематизации вооружения были приняты следующие условные обозначения. Венцы с обычным шагом зубчатого вооружения получили маркировку «С», т.е. вооружение для бурения средних пород. Венцы с увеличенным шагом зубьев получили маркировку «М», т.е. вооружение для бурения мягких пород. Венцы с асимметричными зубьями дополнительную литеру «А». При этом, наклон по отношению к оси вращения шарошки (250), высота (38 мм) и угол заострения (400) зубьев всех венцов, с целью корректности экспериментов, были выбраны одинаковыми.

На рис. 3.2 в графическом формате представлены результаты расчетов скоростей промывочной жидкости вдоль межзубного пространства для различных гидродинамических моделей вооружения.

Как видно из графического материала, для всех видов вооружения характерна одна и та же особенность, резкое увеличение скорости потока при попадании его в зону вращения зубьев с последующим плавным незначительным уменьшением на протяжении прохождения межзубного пространства и более существенным падением в зоне выхода из зоны воздействия вооружения. При этом увеличение скорости потока косозубым вооружением типа «С» существенно выше, чем у типа «М», а увеличение скорости промывочной жидкости при прохождении всех типов вооружения зависит от частоты вращения венцов. Чем выше скорость вращения, тем больше прирост скорости течения жидкости.

Однако, имеются и некоторые отличия в работе различных типов вооружения.

>>>

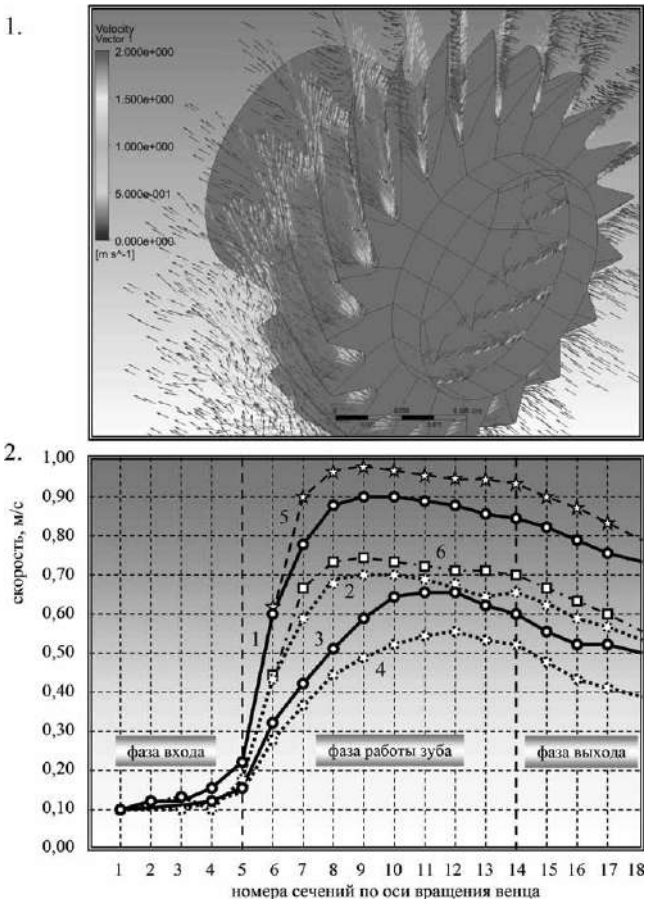

Рис. 3. Распределение скоростей промывочной жидкости в межзубном пространстве, вращающихся венцов вооружения
1. вооружение «С» – 600 об/мин.; 2. вооружение «С» – 300 об/мин.; 3. вооружение «М» – 600 об/мин.; 4. вооружение «М» – 300 об/мин.; 5. вооружение «СА» – 600 об/мин.; 6. вооружение «СА» – 300 об/мин.

Так, например, для косозубого типа «С» и «СА» при 600 об/мин. характерно резкое скачкообразное увеличение скорости потока при входе его в зону межзубного пространства. Для косозубого вооружения типа «С» и «СА» при 300 об/мин. этот процесс протекает более плавно, а для вооружения «М» зависимость сильно выполаживается. Помимо этого, скорость увеличения жидкости асимметричными зубьями (СА), с асимметрией в сторону вращения венца, незначительно выше, чем у симметричного вооружения, и также зависит от частоты вращения инструмента.

На участке подхода потока к вращающемуся вооружению также зафиксированы некоторые отличия, связанные с большим разгоном жидкости за счет втягивания ее косозубым вооружением, причем, чем больше скорость вращения зубьев, тем больше их влияние на разгонную динамику потока.

Процесс движения жидкости через межзубное пространство при стационарном расчете в установившемся режиме можно разделить на три фазы (рис. 3.2): подход потока к зоне действия зубьев; проход сквозь межзубное пространство; выход из зоны действия зубьев.

Первая фаза характеризуется плавным незначительным возрастанием скорости потока, обусловленной тем, что в установившемся режиме ускоряющаяся зубьями вооружения жидкость вовлекает остальной поток в движение, соответствующее скорости разгоняемого потока.

Также было зафиксировано повышение давления на входе в межзубное пространство. Это связано с тем, что входная кромка зуба вооружения не тонкая, как у лопаточных гидравлических машин, и для того, чтобы начался разгон жидкости, потоку на входе необходимо преодолеть этот барьер и зайти в межзубное пространство для дальнейшего взаимодействия с зубьями вооружения (рис. 3.1).

Вторая фаза характеризуется резким увеличением скорости потока до максимальных значений на расстоянии примерно 1/3 ширины зубчатого венца. Далее происходит плавное постепенное уменьшение скорости потока, вплоть до его выхода из межзубного пространства. При этом было установлено, что потеря скорости потока при прохождении межзубного пространства для вооружения «СА» происходит немного медленнее, чем у вооружения, оснащенного симметричными зубьями «С».

Это связано с тем, что асимметричные зубья вооружения имеют больший наклон основной набегающей рабочей грани, как в плоскости вращения венца, так и по отношению к направлению движения потока. В связи с этим жидкость попадая на более «вертикальную» поверхность имеет большую разгонную осевую составляющую и скользит по ней, приобретая дополнительное ускорение в сторону движения основного потока промывочной жидкости.

И, наконец, третья фаза характеризуется плавным уменьшением скорости потока.

Как отмечалось ранее, увеличение скорости вращения зубчатого венца приводит к увеличению скорости потока жидкости в межзубном пространстве вооружения. Однако, в результате проведенных исследований было выявлено, что прирост скорости потока в косозубом вооружении при частоте вращении венца 600 об/мин. у вооружения «СА» имеет максимальные значения, а для вооружения «М» с той же скоростью вращения зубьев величина прироста скорости потока значительно меньше. Также установлено, что некоторое влияние на увеличение скорости потока имеет асимметрия (в сторону вращения) зубчатого вооружения.

В связи с этим можно сделать вывод о том, что есть некие оптимальные величины углов наклона зубьев, их шаг и асимметрия, при которых достигается максимальный прирост скорости потока бурового раствора в межзубном пространстве вооружения в зависимости от скорости вращения шарошки.

Таким образом, проведенные исследования показали, что оснащение шарошечного бурового инструмента косозубым вооружением может существенно повысить эффективность его работы за счет лучшей работоспособности данного типа вооружения в условиях около нулевых и малых скоростей потока промывочной жидкости, предотвращающей вероятность появления сальникообразования и зон с повышенным зашламлением.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Палий П. А. Буровые долота. Справочник / П. А. Палий, К. Е. Корнеев. – М.: Недра, 1971. – 445 с.
2. Ищук А. Г., Сериков Д. Ю. Шарошечный буровой инструмент. – М.: «МДМпринт», 2021. – 303 с.
3. Мокшин А. С. Шарошечные долота / А. С. Мокшин, Ю. Е. Владиславлев, Э. Л. Комм. – М.: Недра, 1971. – 216 с.
4. 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.
5. Гаек Я., Шидак Э. Теория ранговых критериев. – М.: Наука,1971.