

УДК: 004.942; 622.24

## Моделирование истечения промывочной жидкости из гидромониторных отверстий PDC долот

В. А. Бруяка<sup>1,а</sup>, А. М. Гринев<sup>2</sup>, В. В. Ремнев<sup>2</sup>, Д. В. Сморкалов<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Самарский государственный технический университет,  
факультет машиностроения и автомобильного транспорта,  
Россия, 443100, г. Самара, Молодогвардейская ул., д. 244, главный корпус

<sup>2</sup> ОАО «Волгабурмаш»,  
Россия, 443004, г. Самара, Грозненская ул., д. 1

E-mail: <sup>а</sup> vbruyaka@gmail.com

Получено 12 мая 2013 г.,  
после доработки 12 августа 2013 г.

В статье представлены результаты математического моделирования истечения промывочной жидкости из гидромониторных отверстий PDC-долота. Получены картины распределения скорости и давления жидкости в зоне забоя, исследованы причины размывания внутренней полости гидравлического канала долота.

Ключевые слова: PDC-долото, промывка скважины, затопленная струя, моделирование

### Modelling of an effluence of drilling fluid from hydraulic holes of PDC bits

V. A. Bruyaka<sup>1,а</sup>, A. M. Grinev<sup>2</sup>, V. V. Remnev<sup>2</sup>, D. V. Smorkalov<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Samara State Technical University, Faculty of machine-building and motor transport,  
Main Building, 244 Molodogvardeyskaya str., Samara, 443100, Russia

<sup>2</sup> Public Corporation «Volgaburmash», 1 Groznenskaya str., Samara, 443004, Russia

**Abstract.** — In this article some results of mathematic modelling of an effluence of drilling fluid from hydraulic holes of PDC bit are presented. Distribution of velocity and pressure in borehole bottom are received, and erosion of interior surface of hydraulic channel of PDC bit is researched.

Keywords: PDC bit, flushing-out of well, submerged jet, modelling

Citation: *Computer Research and Modeling*, 2013, vol. 5, no. 4, pp. 649–658 (Russian).

## Введение

При проектировании буровых долот одной из важнейших задач является подбор количества и геометрических параметров гидромониторных отверстий и их насадок для обеспечения эффективного удаления шлама. Многие отечественные исследования, посвященные проблемам очистки скважин от шлама, опираются на разрешающие уравнения для давления, напряжения и прочих величин, полученные путем аналитического интегрирования исходных уравнений движения в упрощенной постановке. Эти уравнения служат, в свою очередь, основой для соотношений, оценивающих эффективность выноса шлама буровым раствором, величины скорости потока в зоне забоя, потери давления на долоте и пр. Так, например, в работах [Бабаян, 2009; Есьман, Габузов, 1991; Козодой, Зубарев, Федоров, 1963; Куликов, 2008, Рябченко, 1977] для оценки эффективности выноса шлама на поверхность при промывке используется формула Риттингера, на основе которой определяются необходимые параметры промывочной жидкости, однако вопросы о характере течения жидкости в зоне забоя и факторах, влияющих на очистку долота от выбуренной породы, авторами указанных работ не рассматривались. В работах [Варламов, 2008; Ledgerwood, Wells, Wiesner, Harris, 2000] проведено экспериментальное исследование течения промывочной жидкости в зоне забоя. На основе полученных результатов был выявлен ряд факторов, наиболее влияющих на процесс очистки зоны забоя и элементов вооружения долота от шлама. Отмечается, что на процессы очистки долота в первую очередь влияют: параметры истекающей струи, определяемые степенью гидродинамического совершенства насадки, волна динамического давления струи, возникающая при ударе о неподвижную стенку, и поперечные потоки жидкости в зоне забоя.

Оптимальный выбор профиля насадок, количества и ориентации гидромониторных отверстий, очевидно, не может опираться лишь на инженерные подходы. Для принятия конструктивных решений, обеспечивающих эффективную очистку долота и вынос шлама на поверхность, необходимо проанализировать картину течения промывочной жидкости в зоне забоя и кольцевом канале скважины. Проведение экспериментальных исследований течения жидкости в зоне забоя при бурении представляет значительные трудности и требует относительно больших материальных и временных затрат. Альтернативой натурным испытаниям является проведение виртуальных экспериментов, в которых необходимые физико-технические условия бурения моделируются в специальных программных пакетах с использованием геометрических моделей реальных объектов (долота и зоны забоя). Указанный способ является менее затратным, однако для получения адекватных результатов моделирования необходимо обеспечить соответствие всех моделей реальным объектам и условиям, что возможно лишь после верификации результатов по экспериментальным данным.

Многие зарубежные исследования гидродинамики промывочной жидкости в зоне забоя и оптимизации системы промывки долота опираются на результаты численного моделирования течения с помощью гидродинамических программных кодов. Так, в [Ledgerwood, Wells, Wiesner, Harris, 2000] авторы моделировали несколько схем промывки шарошечного долота, отличающихся направлением струй, истекающих из гидромониторных насадок. Характеристики насадок передавались в качестве параметров в гидродинамический решатель. В работе [King, Bratu, Delbast, Besson, Chabard, 1990] численный анализ проводился в пакете IDEAS. В результате расчетов получено поле скоростей жидкости в зоне забоя, вычислено давление на стенку скважины. В работе [Crouse, Chia, 1985] выполнено численное исследование течения промывочной жидкости с помощью специально разработанного программного кода. В структуру модели было включено уравнение, отражающее процесс изнашивания долота вследствие воздействия породы. В результате расчетов получены картины обтекания жидкости в зоне забоя, подтверждающие важность поперечных потоков для удаления шлама.

Несмотря на большое количество исследований, посвященных проблемам истечения промывочной жидкости из гидромониторных отверстий долот, вопросы совместного влияния нескольких струй и схемы расположения гидромониторных отверстий на характер очистки зоны

забоя от выбуренной породы остаются не до конца изученными. Качество очистки забоя также зависит и от степени турбулизации жидкости в призабойной зоне: чем она выше, тем лучше и быстрее очищается забой скважины от выбуренной породы. Кроме этого, для PDC-долот известна проблема размыва внутренней полости основного гидравлического канала возле мест разделения потока и входа в раздающие каналы долота. Моделирование течения потока промывочной жидкости в гидромониторных каналах, зоне забоя и затрубном пространстве позволяет относительно быстро оценивать эффективность конструктивных решений по расположению, углу наклона и количеству отверстий и проанализировать причины размыва внутренней полости гидромониторного канала долота.

## Математическая модель

Для промывочной жидкости используется модель однофазной несжимаемой сплошной среды, движение которой в замкнутой области забоя и кольцевом канале скважины удовлетворяет законам сохранения массы и количества движения. Течение считается адиабатическим, температура потока постоянна. К основным уравнениям математической модели относятся уравнение движения (уравнение Навье–Стокса) и уравнение, отражающее закон сохранения массы (уравнение неразрывности). Так как среда несжимаема, плотность считается постоянной величиной. Вязкость не является постоянной вследствие того, что промывочная жидкость является неньютоновской — ее реологическая модель будет обсуждаться далее.

Вследствие больших скоростей истечения жидкости из гидромониторных отверстий долота значительного воздействия струи на элементы вооружения и сложной пространственной структуры расчетной области течение будет турбулентным. Для учета турбулентности потока используется стандартная модель Рейнольдса, в соответствии с которой в уравнениях движения для каждой компоненты вектора скорости потока рассматривается сумма его осредненного по времени значения и пульсационного значения. В этой связи уравнение движения записывается в виде

$$\frac{\partial \bar{V}_i}{\partial t} + \bar{V}_j \frac{\partial \bar{V}_i}{\partial x_j} = F_i - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 \bar{V}_i}{\partial x_i \partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} (-\rho \overline{V'_i V'_j}), \quad (1)$$

где  $\bar{V}_i, V'_i$  — соответственно осредненное по времени значение компоненты вектора скорости и ее пульсационная составляющая,  $F_i$  — компонента вектора массовых сил,  $\rho$  — плотность,  $\bar{p}$  — осредненное по времени значение давления,  $\nu = \mu / \rho$  — кинематическая вязкость.

Так как уравнение (1) содержит неизвестные величины — осредненные по времени пульсационные компоненты  $\overline{V'_i V'_j}$ , необходимо добавить разрешающее уравнение для них, которое можно записать в виде [Лойцянский, 2003]

$$\begin{aligned} \frac{\partial \tau_{in}}{\partial t} + \bar{V}_j \frac{\partial \tau_{in}}{\partial x_j} = & - \left( \tau_{ij} \frac{\partial \bar{V}_n}{\partial x_j} + \tau_{nj} \frac{\partial \bar{V}_i}{\partial x_j} \right) - 2\nu \frac{\partial V'_i}{\partial x_j} \frac{\partial V'_n}{\partial x_j} + \frac{p'}{\rho} \left( \frac{\partial V'_n}{\partial x_i} + \frac{\partial V'_i}{\partial x_n} \right) - \\ & - \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \overline{V'_i V'_n V'_j} + \frac{\delta_{ij}}{\rho} \overline{V'_n p'} + \frac{\delta_{nj}}{\rho} \overline{V'_i p'} - \nu \frac{\partial \tau_{in}}{\partial x_j} \right), \end{aligned} \quad (2)$$

где  $\tau_{in} = \overline{V'_i V'_n}$ .

Для замыкания уравнения (2) необходимо выбрать подходящую модель турбулентности. Использование двухпараметрических ( $k - \varepsilon$ ) или ( $k - \omega$ )-моделей в данном случае может приводить к ошибочным численным результатам ввиду большой закрученности потока. В настоящей работе использована модель турбулентности SST, подробно описанная в [Menter, 1994].

На практике момент перехода от ламинарного режима течения к турбулентному определяется критерием Рейнольдса, определяющим соотношение вязких и инерционных сил в потоке. Для неньютоновских жидкостей используется модифицированный критерий Рейнольдса, который учитывает пластические свойства среды и рассчитывается по формуле

$$\text{Re}^* = \frac{\rho V d}{\eta + \frac{\tau_0 d}{6V\eta}}, \quad (3)$$

где  $\tau_0$  — предельное напряжение сдвига.

В [Бабаян, 2009] указывается на более объективный способ расчета модифицированного критерия Рейнольдса с использованием числа Хедстрема ( $He$ ):

$$\text{Re}^* = 2100 + 7.3He^{0.58}, \quad (4)$$

где  $He = d^2 \tau_0 \rho / \eta^2$ .

Для замыкания системы уравнений модели необходимо добавить соотношение, определяющее связь между реологическими характеристиками промывочной жидкости, которая в действительности представляет собой двухфазную полидисперсную систему, содержащую твердые частицы во взвешенном состоянии. Кроме этого, вязкость промывочной жидкости может зависеть не только от скорости деформации, но и от времени, то есть проявлять тиксотропные или реопектические свойства. В [Бабаян, 2009] отмечается, что практически все промывочные жидкости обладают тиксотропными свойствами. Показателем тиксотропии с технической точки зрения служит СНС — статическое напряжение сдвига. В рамках данной математической модели твердая фракция промывочной жидкости и ее тиксотропные свойства не учитываются.

Среди известных реологических моделей промывочных жидкостей наибольшим распространением в отечественной и зарубежной практике пользуются модели Шведова–Бингама и Оствальда де Ваале, которые описывают поведение вязкопластических и псевдопластических жидкостей. Так, в модели Шведова–Бингама постулируется наличие некоторого предельного напряжения сдвига  $\tau_0$ , после достижения которого наступает текучесть среды. При  $\tau < \tau_0$  текучесть отсутствует. Реологическое уравнение для такой жидкости записывается в виде

$$\tau = \tau_0 + \mu' \dot{\epsilon}, \quad (5)$$

где  $\mu'$  — пластическая вязкость,  $\dot{\epsilon} = du / dy$  — скорость сдвига.

В модели псевдопластической жидкости Оствальда де Ваале среда лишена предельного напряжения текучести, а ее «кажущаяся» вязкость (отношение напряжения сдвига к скорости сдвига) зависит от скорости сдвига. Реологическое уравнение для такой жидкости записывается в виде

$$\tau = K \dot{\epsilon}^n, \quad (6)$$

где  $K$  — мера консистенции жидкости,  $n$  — параметр, характеризующий степень неньютоновского поведения материала.

В промывочной системе могут быть использованы различные жидкости, отличающиеся по плотности, вязкости и другим показателям. Для каждого типа промывочной жидкости необходимо знать соответствующие выбранной реологической модели константы: для модели Шведова–Бингама — величину пластической вязкости  $\mu'$  и предельное напряжение сдвига  $\tau_0$ , для модели Оствальда де Ваале — константы  $K$  и  $n$  и т. д. Все эти величины можно получить измерениями реологических свойств жидкости с помощью вискозиметра. Результаты измерений реологических констант по наиболее характерным промывочным жидкостям представлены в таблице 1. В настоящей математической модели для промывочной жидкости использована модель Шведова–Бингама.

Температура также оказывает влияние на реологическое поведение промывочной жидкости. При высоких температурах может изменяться молекулярная структура промывочной жидкости, что может приводить к уменьшению динамического напряжения сдвига и пластической вязкости. В рамках данной модели температура промывочной жидкости принимается постоянной.

В условиях высокого давления, развиваемого насосом промывочной системы, буровой раствор может поглощаться стенками скважины, что может приводить к горизонтальному размыванию зоны забоя. Для математического описания подобных процессов поглощения сплошной среды необходимо модифицировать уравнение «неразрывности» слагаемым, характеризующим отток массы из расчетной области. Учитывая сложную зависимость от давления и температуры интенсивности поглощения промывочной жидкости стенками скважины, в настоящей математической модели данные эффекты не рассматриваются.

Таблица 1

№	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Параметры модели Шведова–Бингама		Параметры для модели Оствальда де Ваале		Способ обработки раствора
		$\mu'$ , Па·с	$\tau_0$ , Па	$n$	$K$ , Па·с <sup><math>n</math></sup>	
1	1.05–1.15	0.012	3	0.477	0.92	Обычный
2	1.16–1.22	0.018	7.7	0.465	1.87	
3	1.05–1.15	0.012	15.4	0.322	5.9	Биополимер
4	1.16–1.22	0.021	21	0.318	7.26	

Исследование течения промывочной жидкости в зоне забоя может быть выполнено как в стационарной, так и в нестационарной постановке. В первом случае достаточно задать только граничные условия, во втором — необходимо учитывать и начальное состояние среды. Для стационарной модели используются следующие граничные условия:

на боковой поверхности зоны забоя и внешней поверхности долота — условие равенства скорости жидкости и скорости твердой стенки (условие «прилипания»);

на входном сечении основного гидравлического канала долота задается массовый расход жидкости (кг/с);

на границе кольцевого канала скважины (верхняя граница расчетной области) задается давление жидкости и условие свободного прохождения жидкости через границу.

Нестационарный случай предполагает учет вращения долота, таким образом, необходимо дополнительно задавать скорость вращения долота, временной интервал для расчета и шаг. При этом результаты предварительного расчета по стационарной модели могут быть использованы как начальные для нестационарного расчета.

## Численное моделирование и результаты

Рассматриваемая модель PDC-долота (рис. 1а) имеет пять гидромониторных отверстий с насадками, имеющими различные выходные диаметры, расположенными как показано на рисунке 1б. Расчетная область формируется как разность между объемом модели долота и объемом окружающего его цилиндра с диаметром, равным наибольшему размеру долота в поперечном направлении и высотой, равной наибольшему продольному размеру долота. При этом в целях уменьшения вычислительных затрат на решение задачи мелкоразмерная геометрия в виде малых фасок, скруглений и поверхностей была упрощена.

Все необходимые этапы численного моделирования, а именно создание сетки, приложение граничных условий, получение численного решения и обработка результатов выполнялись средствами программного комплекса ANSYS. В расчетной области была создана сетка, содержащая около 2 млн ячеек. Вблизи границ был введен пограничный слой толщиной 1 мм, содержащий 5 ячеек по толщине.

В качестве граничных задавались следующие условия: равенство нулю скорости потока на неподвижной стенке, величина объемного расхода бурового раствора на входе в канал долота и давление на поверхности кольцевого канала скважины, равное статическому давлению столба жидкости в скважине. Указанное давление определяется по глубине забоя. Для учета вращения долота соответствующие границы модели были заданы как подвижные, таким образом, модельные уравнения решаются во вращающейся системе координат. Частота вращения принималась равной 250 об/мин, направление — по часовой стрелке.

Граничные условия для параметров SST модели турбулентности устанавливались следующим образом: во входном и выходном сечениях интенсивность турбулентности принималась равной 0.05 и отношение турбулентной вязкости к сдвиговой задавалось равным 10. На твердых стенках кинетическая энергия турбулентности принималась равной нулю, а расчет ее удельной диссипации выполняется программно в зависимости от вязкости и пристенного шага сетки.

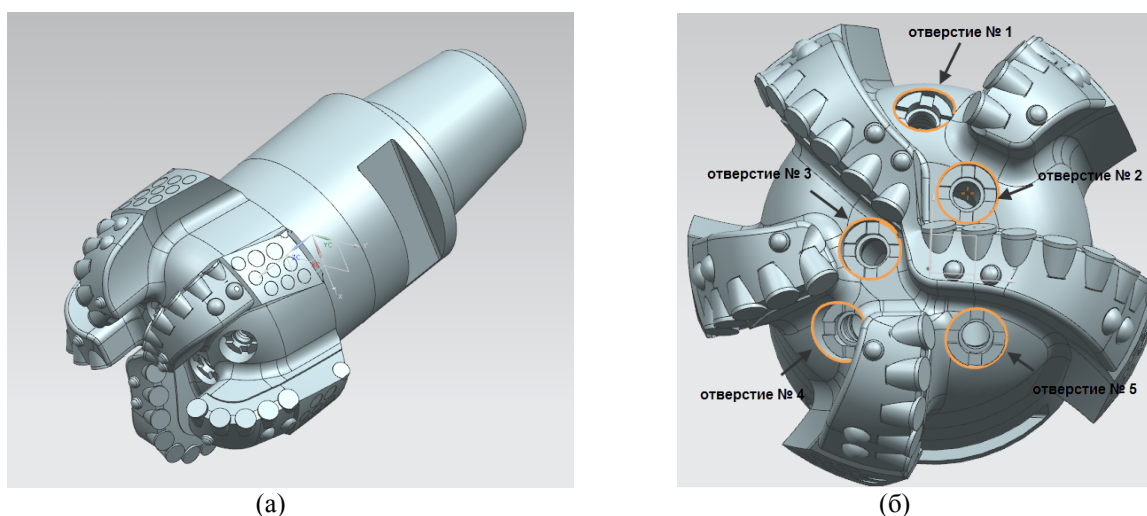


Рис. 1. Геометрическая модель PDC-долота: (а) общий вид долота; (б) расположение гидромониторных отверстий

Уравнения математической модели дискретизировались по методу конечного объема. В численном методе решения использовалась итерационная схема «против потока» (upwind), величина среднеквадратической погрешности для компонент скорости и баланса массы в расчетной ячейке устанавливалась равной  $10^{-5}$ , по достижении которой счет прекращался. Отметим, что решение задач вычислительной гидродинамики подобной размерности требует значительных вычислительных ресурсов, но вместе с этим процесс вычислений хорошо параллелизуется, в связи с чем использование многопроцессорной системы позволяет относительно быстро получить результаты расчета.

Для промывочной жидкости плотности  $\rho = 1.15 \text{ г/см}^3$  при объемном расходе  $Q = 32 \text{ л/с}$  и глубине забоя 500 м линии тока течения в конце первого расчетного шага и через 0.12 с после (что соответствует половине оборота долота) показаны на рисунке 2. Максимум скорости наблюдается в зоне истечения жидкости из насадок и равен 55.22 м/с. Вращательное движение долота снижает эффективность прямого воздействия струй на забой, закручивая их вокруг вертикальной оси, что приводит к большей турбулизации течения в области гребней долота. Кроме этого, часть потока отдельных струй после истечения из насадок практически сразу выносятся в затрубное пространство, тем самым снижая эффективность очистки зубков от породы.

Картина течения в плоскости, перпендикулярной оси долота показана на рисунке 3. Наличие поперечных вихрей в периферийной зоне препятствует образованию «сальника» на зубках долота, однако малые вихри в непосредственной близости к оси вращения имеют незначитель-

ные скорости вращения вместе с потоком и, таким образом, место слияния двух гребней может служить очагом образования шламовой подушки.

Распределение давления жидкости в срединных сечениях гидромониторных отверстий показано на рисунках 4–6. В силу особенностей конструкции PDC-долота гидромониторные отверстия располагаются на различном расстоянии от дна забоя и истекающие из них струи направлены под разными углами к оси вращения долота. Поэтому гидравлическое воздействие струй на забой отличается по силе, а также по интенсивности формирования поперечных потоков в жидкости. Оценкой стабильности струи может служить длина начального участка, в котором скорость жидкости постоянна и равна начальной скорости истечения струи из насадки. Чем больше эта длина, тем более стабильной является струя, что позволяет ей оказывать большее гидравлическое воздействие на забой и формировать более интенсивные поперечные потоки жидкости.

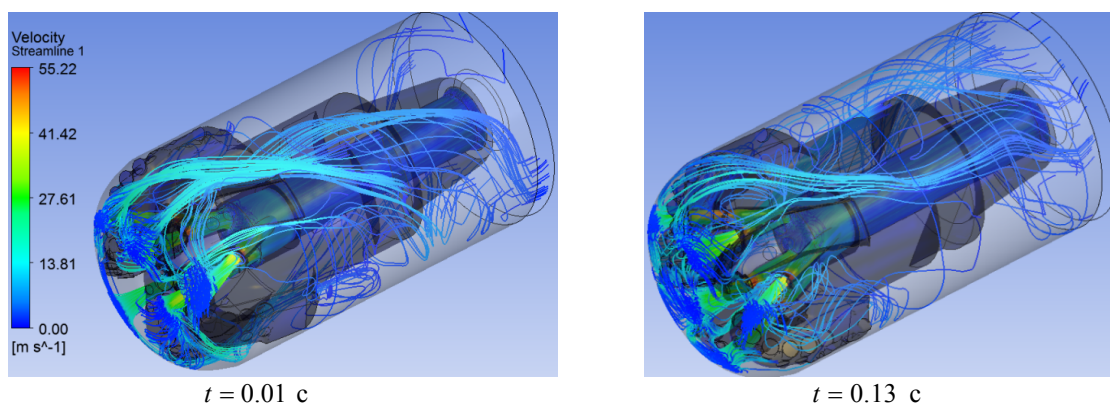


Рис. 2. Линии тока течения жидкости в зоне забоя:  $\rho = 1.15 \text{ г/см}^3$ ,  $Q = 32 \text{ л/с}$ , глубина забоя — 500 м

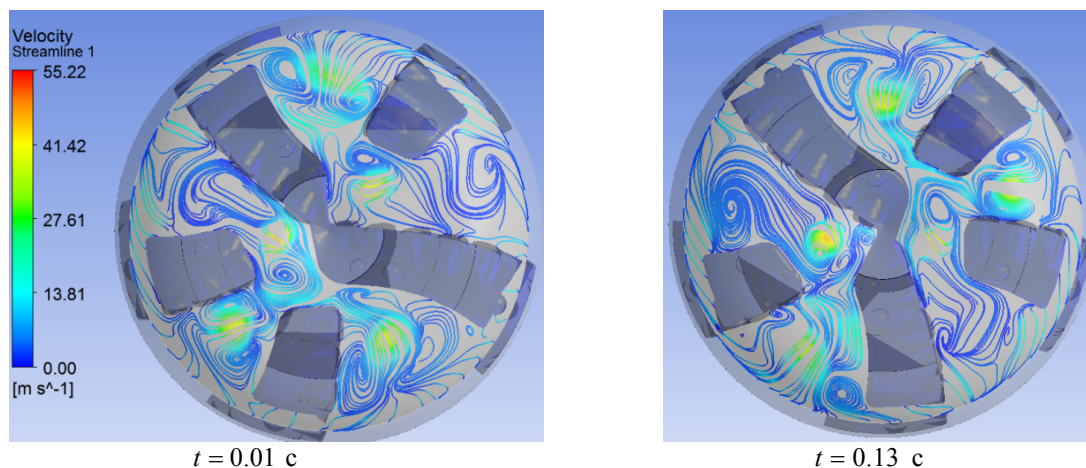


Рис. 3. Линии тока в поперечной плоскости:  $\rho = 1.15 \text{ г/см}^3$ ,  $Q = 32 \text{ л/с}$ , глубина забоя — 500 м

Для некоторых моделей PDC-долот существует проблема размыва внутренней полости центрального гидравлического канала, характерные зоны размыва показаны на рисунке 7. Результаты расчета давления и турбулентной кинетической энергии на указанной поверхности показаны на рисунке 8. На острых краях входных отверстий наблюдается снижение давления, и поток возле этих мест ускоряется, что способствует размыву канала вблизи этих мест. Пульсации скорости, мерой которых служит кинетическая энергия турбулентности, также более выражены вблизи этих краев. Для уменьшения интенсивности размыва вышеуказанных мест можно рекомендовать входы в раздающие каналы долота выполнять закругленными.



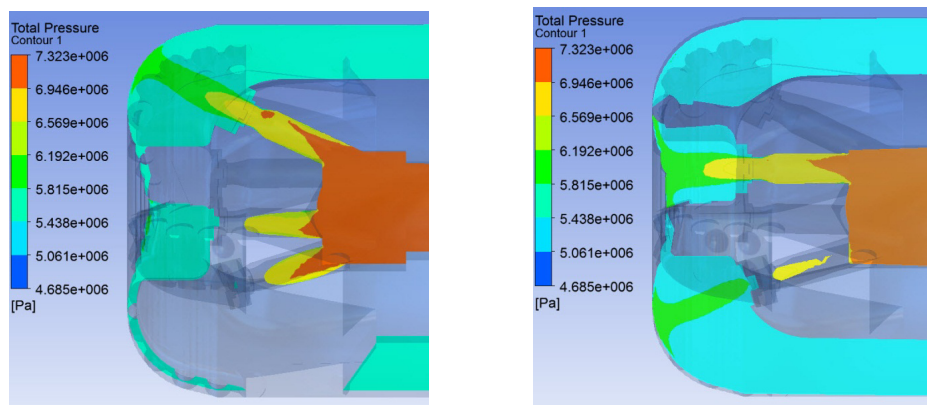


Рис. 4. Поле давления в срединной плоскости отверстий № 1 и № 2:  $\rho = 1.15 \text{ г/см}^3$ ,  $Q = 32 \text{ л/с}$ , глубина забоя — 500 м

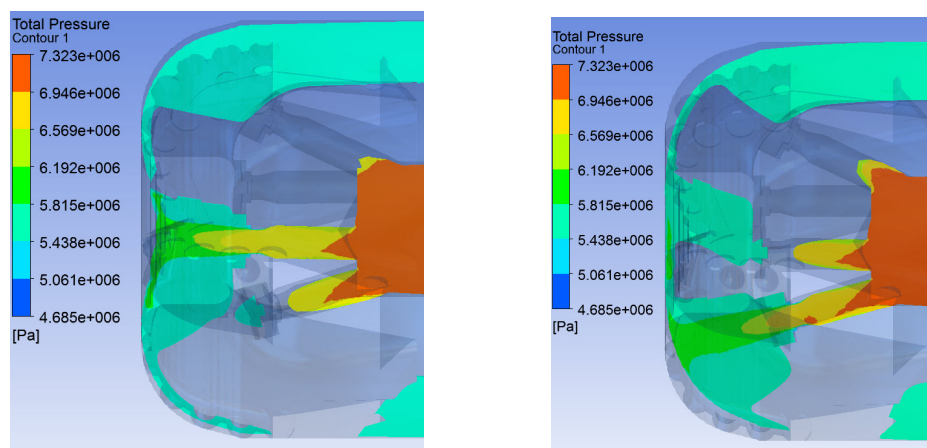


Рис. 5. Поле давления в срединной плоскости отверстий № 3 и № 4:  $\rho = 1.15 \text{ г/см}^3$ ,  $Q = 32 \text{ л/с}$ , глубина забоя — 500 м

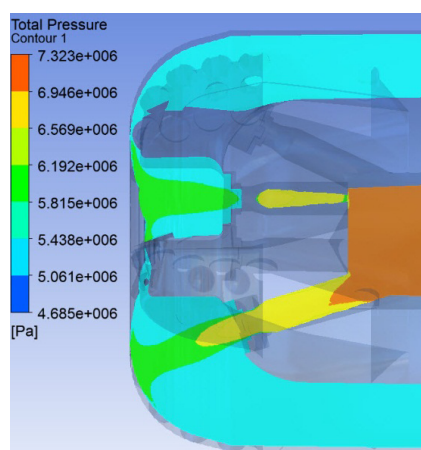
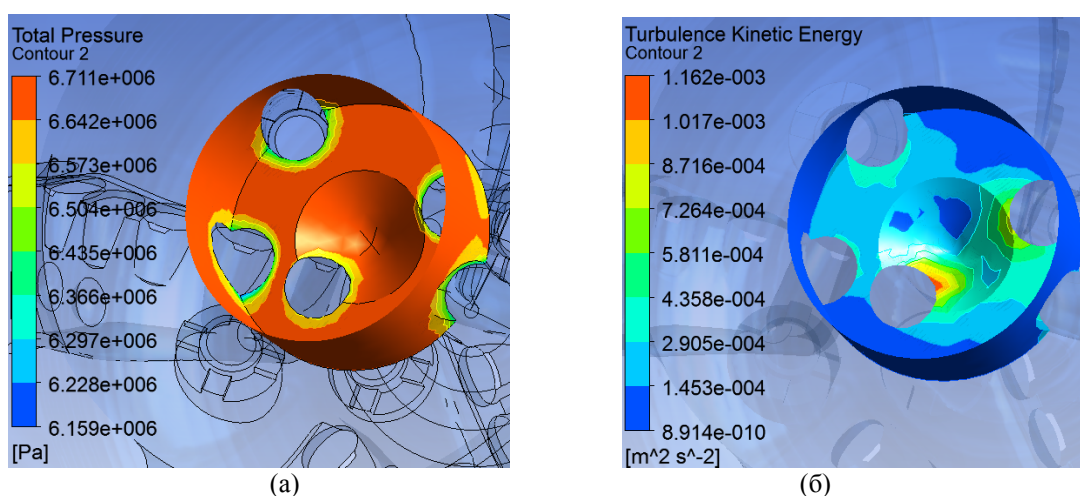


Рис. 6. Поле давления в срединной плоскости отверстия № 5:  $\rho = 1.15 \text{ г/см}^3$ ,  $Q = 32 \text{ л/с}$ , глубина забоя — 500 м





Рис. 7. Зоны размыва внутренней полости гидравлического канала PDC-долота


 Рис. 8. Распределение некоторых параметров потока по внутренней поверхности дна основного гидравлического канала:  $\rho = 1.15 \text{ г/см}^3$ ,  $Q = 32 \text{ л/с}$ , глубина забоя – 500 м.: (а) давление; (б) турбулентная кинетическая энергия

## Заключение

Таким образом, в результате проведенного моделирования истечения промывочной жидкости из насадок гидромониторных отверстий PDC-долота получены распределения скорости и давления потока жидкости в зависимости от плотности, объемного расхода и глубины бурения. Анализ поперечных потоков на забое выявил наличие поперечных вихрей, способствующих очистке зубков от шлама, однако в месте слияния двух гребней долота формируются условия для образования застойной зоны и очага шламовой подушки. Для улучшения очистки этой области нужно подбирать такие углы наклона струй, которые минимизируют образование вихрей в непосредственной близости к оси вращения долота. Турбулентность потока промывочной жидкости вследствие его высокой скорости обуславливает размывание острых входных кромок гидромониторных каналов. Уменьшению интенсивности этого процесса может способствовать закругление указанных кромок.

## Список литературы

Бабаян Э. В. Буровые технологии / Э. В. Бабаян. — 2-е изд., доп. — Краснодар: Совет. Кубань, 2009. — 896 с.

- Варламов А. П.* Гидродинамические процессы на забое скважины и совершенствование систем промывки буровых долот: автореф. дис. ... д-ра. техн. наук. — Москва, 2008. — 25 с.
- Есьман Б. И., Габузов Г. Г.* Термогидравлические процессы при бурении скважин. — М.: Наука, 1991. — 216 с.
- Козодой А. К., Зубарев А. В., Федоров В. С.* Промывка скважин при бурении. — М.: ГНТИ нефтяной и горно-топливной литературы, 1963. — 172 с.
- Куликов В. В.* Расчет транспортирования шлама в скважине восходящим потоком промывочной жидкости // Научно-технический журнал «Инженер-нефтяник». — 2008. — № 1. — С. 28–29.
- Лойцянский Л. Г.* Механика жидкости и газа: Учеб. для вузов. 7-е изд., испр. — М.: Дрофа, 2003. — 840 с.
- Рябченко В. И.* Выбор оптимальных значений реологических параметров буровых растворов // Буровые растворы и технология промывки скважин. Вып. 12. — Краснодар, 1977. — С. 12–17.
- Уилкинсон У. Л.* Неньютоновские жидкости. — М.: Мир, 1964. — 216 с.
- Crouse R., Chia R.* Optimization of PDC bit Hydraulics by Fluid Simulation // 60th Annual Technical Conference and Exhibition of the Society of Petroleum Engineers held in Las Vegas, 22–25 September 1985.
- King I., Bratu C., Delbast B., Besson A., Chabard J. P.* Hydraulic Optimization of PDC bits // European Petroleum Conference, 21–24 October 1990, The Hague, Netherlands.
- Ledgerwood L. W., Wells M. R., Wiesner B. C., Harris T. M.* Advanced Hydraulics Analysis Optimizes Performance of Roller Cone Drill Bits // 2000 IADC/SPE Drilling Conference held in New Orleans, Louisiana, 23–25 February 2000.
- Menter F. R.* Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications // AIAA Journal. — 1994. — Vol. 32, No. 8. — P. 1598–1605.