

УДК 622.24.051

А. О. Казьмин, М. В. Супрун, инженеры

Институт сверхтвердых материалов им. В. Н. Бакуля НАН Украины, г. Киев, Украина

К РАСЧЕТУ ПРОМЫВКИ ДОЛОТ РЕЖУЩЕ-ИСТИРАЮЩЕГО ТИПА

The paper subscribes the correlation between a temperature of the cutter and a drilling fluid velocity. The correlation contains some heat-and-physical features of the fluid and constructive variables of a cutters. This allows to use it in more precision calculations with wash systems of new drills.

При проектировании бурового долота стремятся получить оптимальную конструкцию, обеспечивающую высокую скорость проходки и равномерный износ вооружения. Создание равноизносостойкого инструмента – фундаментальная задача в бурении. При этом изучению и решению подлежит целый комплекс вопросов: исследование конструкции, профиля, свойств породоразрушающего вооружения и промывочной системы долота.

Как правило, при выполнении инженерных расчетов по промывке буровых долот пользуются простой формулой

$$Q = \frac{V}{S}, \quad (1)$$

где V – скорость движения промывочной жидкости в критическом сечении, м/с;

Q – расход жидкости, л/с;

S – площадь сечения, м².

Использование формулы базируется на следующих утверждениях. Из практики известно, что для обеспечения удовлетворительной промывки забоя скважины (выноса шлама на поверхность) оптимальный расход жидкости находится в диапазонах, указанных в таблице.

Таблица. Расход промывочной жидкости.

| Диаметр долота (D), мм | Расход жидкости (Q), л/мин |
|----------------------------|--------------------------------|
| 139,7 | 10–15 |
| 152,0 | 15–20 |
| 163,5 | 20–25 |
| 215,0 | 20–30 |
| 292,3 | 30–40 |

При этом, согласно экспериментальным данным и результатам промышленного бурения скважин, в долотах со стальным корпусом при скорости жидкости более 20–25 м/с (в зависимости от свойств применяемого раствора и разбуриваемой породы) наблюдается гидро-размыв материала корпуса (рис. 1).

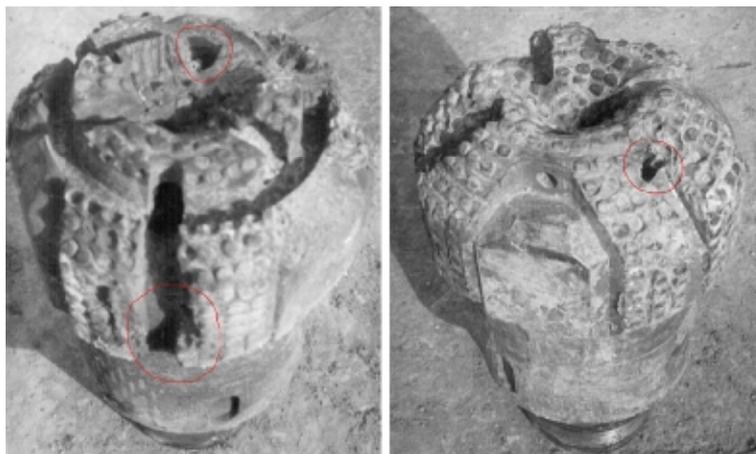


Рис.1. Гидроразрыв корпуса при больших скоростях движения жидкости.

При таком подходе практически не учитываются вопросы влияния промывки и охлаждения на износостойкость вооружения долота. Согласно исследованиям [1], основной причиной износа алмазов в импрегнированных долотах и коронках является графитизация алмаза вследствие действия высоких контактных температур, возникающих в процессе бурения. Эти данные подтверждаются Н. В. Цыпиным [2]. Информацию о высоких контактных температурах, возникающих при бурении славутичем, можно найти в работах В. Ф. Кошовского [3], откуда, согласно экспериментальным данным, температура в зоне контакта достигает 1500 °С, что значительно превышает температуру начала графитизации алмаза. Э. Н. Алчиным и Н. Ф. Кагармановым [4] была предложена формула для расчета профиля корпуса, обеспечивающего оптимальный теплообмен работающего долота с учетом возможности возникновения температур приводящих к графитизации алмаза

$$y = \pm \frac{1}{B} \sqrt{R^{3,6} \left(\frac{1 + 2pRnk_1}{1 + 2pRnk_2} \right)^2 - B^2 dR} + C, \quad (2)$$

где R – радиус долота (координата x профиля);

n – скорость вращения, об/мин;

k_1, k_2 – экспериментальные составляющие коэффициента трения;

B – функция, зависящая от теплофизических свойств промывочной жидкости;

C – постоянная интегрирования, определяемая из граничных условий.

Однако при этом большинство исследователей не рассматривают факторы, влияющие на гидромониторное состояние долота, полагая, что обеспечиваются идеальная промывка и охлаждение забоя.

Целью данной статьи является вывод формулы, пригодной для выполнения инженерных расчетов по промывке при проектировании долот типа ИСМ. Соотношение должно учитывать параметры промывочного раствора, конструктивные особенности вооружения и содержать некоторый оптимальный показатель (критерий) качества промывки. Поскольку одним из основных факторов, влияющих на износ, является перегрев вставок [1–3], в качестве такого критерия принята температура рабочего элемента.

Рассмотрим единичную вставку из материала славутич работающего на забое долота. Поверхность вставки омывается буровым раствором. Рассмотрим некоторые параметры характеризующие теплообменные процессы в данной системе.

Коэффициент теплообмена в общем случае можно выразить, как

$$a = \frac{Nu \cdot l}{h}, \quad (3)$$

где a – коэффициент теплообмена (теплоотдачи) на границе жидкость – твердое тело;

Nu – число Нуссельта;

l – коэффициент теплопроводности жидкости;

h – характерный размер (в данном случае – высота выступания вставок).

Теплообмен в рассматриваемой системе будет определяться влиянием вынужденной конвекции. Режим движения жидкости можно считать турбулентным. Согласно [5], число Нуссельта при обтекании цилиндра направленным потоком жидкости удовлетворительно аппроксимируется соотношением

$$Nu = C Re^m Pr^n, \quad (4)$$

где C, m, n – экспериментальные коэффициенты (можно определить по таблицам, приведенным в [5]);

Re – число Рейнольдса;

Pr – число Прандтля.

Подставив соотношение (4) в формулу (3), получим

$$a = \frac{Cl Re^m Pr^n}{h}. \quad (5)$$

Подставляя соотношения, описывающие числа Рейнольдса и Прандтля, получим

$$a = \frac{Cl}{h} \left(\frac{V_R hg}{m} \right)^m \left(\frac{mc_p}{l} \right)^n, \quad (6)$$

приведа к степенному виду

$$a = V_R^m h^{m-1} A(m, n, C), \quad (7)$$

где $A(m, n, C) = l^{1-n} C m^{n-m} c_p^n g^m$;

V_R – скорость течения жидкости между режущими элементами, м/с;

g – удельный вес промывочной жидкости;

m – динамическая вязкость, $H \cdot c / \text{и}^2$;

c_p – удельная теплоемкость, $\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}}$.

Уравнение теплообмена в присутствии потока охлаждающей жидкости [6] имеет вид

$$\vec{q} \cdot \vec{n} = a(T_m - T_{xc}). \quad (8)$$

Соответственно перепад температур между работающей вставкой и охлаждающей жидкостью можно выразить как

$$\Delta T = \frac{q_0}{aF}, \quad (9)$$

где ΔT – разность температур охлаждаемого тела и потока жидкости;

q_0 – количество тепла «отбираемого» промывочной жидкостью у «работающих» вставок, Вт;

F – поверхность теплообмена.

При этом имеет смысл за температуру охлаждающей жидкости принимать температуру близкую к точке кипения промывочного раствора.

Согласно исследованиям [7], тепловой поток, образующийся при работе единичной вставки славутича, описывается соотношением

$$q = \frac{6k_1 k \cdot Pu \cdot V_p}{100pd^2 N}, \quad (10)$$

где k_1 – коэффициент учитывающий долю тепла поступающего в корпус долота. Согласно расчетам авторов, приведенным в других работах, $k_1 \cong 0,78$;

k – коэффициент трения (резания);

P – нагрузка;

u – линейная скорость;

V_p – объемная доля содержания алмазов во вставке;

d – средний диаметр алмазного зерна;

N – количество зерен, одновременно вступающих в контакт.

Параметр N , как и средний диаметр зерна, зависит от технологических особенностей материала вставки. Он определяется маркой порошка и относительной концентрацией содержания алмазов.

Величина q_0 , согласно формуле (9), исчисляется в Вт, размерность q – из формулы (10) – Вт/м². Рассмотрим некоторое значение теплового потока $[q_0] = Bm/m^2$, представляющее собой количество тепла отнесенное к площади поверхности. При обеспечении идеальной промывки должно выполняться тождество

$$q = q_0.$$

Тогда с учетом формулы (7) температуру вставки можно определить как

$$\Delta T = \frac{q_0}{aF} = \frac{q_0}{a} = \frac{q}{a};$$

$$T(V_R) = \frac{qh^{1-m}}{V_R^m A(m, n, C)} + T_{жс}. \quad (11)$$

Используя выражением (10), можно учесть состав режущего элемента и параметры режима бурения. В результате формула примет вид

$$T = \frac{6k_1 k \cdot Pu \cdot V_p}{100pd^2 N} \cdot \frac{h^{1-m}}{V_R^m A(m, n, C)} + T_{жс}. \quad (12)$$

Теперь следует перейти от единичной вставки к долоту в целом. Обратимся к понятию «коэффициент оснащённости». Согласно [8] коэффициентом оснащённости долота называется соотношение площади породоразрушающего вооружения к площади поверхности долота

$$K_{осн j} = \frac{\sum S_{ij}}{S_j}, \quad (13)$$

где $K_{осн j}$ – коэффициент резания j -й линии резания;

S_{ij}, S_j – соответственно площади породоразрушающего оснащения, попадающего в линию резания, и общая площадь самой линии резания.

Проанализировав вывод формулы (10), приведенный в [7], можно утверждать, что количество тепла q_j , выделяющееся при работе j -й линии резания, будет при прочих равных условиях однозначно определяться количеством зерен в линии резания. Воспользовавшись таким подходом, рассмотрим поверхность единичной вставки. На поверхности вставки с относительной объемной концентрацией $K = 100\%$ и зернистостью алмазов 700/600 выступает в среднем $N = 20$ зерен [7]. Если рассмотреть полоску единичной ширины, проходящую по линии диаметра вставки, в нее соответственно попадает N_{ij} зерен

$$N_{ij} = \frac{S_{ij} \cdot N}{S_{вст}}$$

где S_{ij} – площадь поверхности одной вставки, попадающая в линию резания;

$S_{вст}$ – полная площадь рабочей поверхности вставки.

Тогда на линии резания единичной толщины ΔR будет расположено в среднем N_j зерен

$$\begin{aligned} N_j &= N_{ij} \cdot \frac{S_j}{S_{ij}} \cdot K_{осн j}; \\ N_j &= \frac{N S_j}{S_{вст}} K_{осн j}; \\ N_j &= \frac{2R_j \Delta R \cdot N}{r^2} K_{осн j}, \end{aligned} \quad (14)$$

где R_j – радиус j -й линии резания;

ΔR – ширина линии резания;

r – радиус вставки;

$K_{осн j}$ – коэффициент оснащённости линии резания.

В результате подстановки полученного соотношения в формулу (10) и соответствующих преобразований имеем

$$T(V_R) = \frac{3k_1 k \cdot P u \cdot V_p r^2}{100 p d^2 R_j \Delta R \cdot N \cdot K_{осн j}} \cdot \frac{h^{1-m}}{V_R^m A(m, n, C)} + T_{ж}. \quad (15)$$

Вывод

Выведенная формула представляет собой зависимость температуры нагрева вставки славутича от теплофизических свойств промывочной жидкости и параметров режима промывки – скорости движения жидкости. Также учитываются характеристики самой вставки. Варьируя те или иные параметры, можно оказывать влияние на конечную температуру. Получен критерий, позволяющий приблизительно оценить качество промывочной системы долота в зависимости от режима промывки, параметров нагрузки и конструктивных особенностей вооружения. Зная критические для данного типа породоразрушающих элементов температуры, можно закладывать их в расчет оптимальной системы промывки долота, рассматривая последовательный набор сечений поверхности, а также выдвигать обоснованные рекомендации к режимам промывки при бурении скважины спроектированным долотом.

Литература

1. Л. А. Алексеев, М. Я. Беркович. Взаимосвязь параметров режима бурения и температуры рабочей поверхности долот режущего типа и коронок // Науч. техн. сб. «Бурение». – 1966. – № 6.
2. Цыпин Н. В. Износостойкость композиционных алмазосодержащих материалов для алмазного бурения – К.: – Наук. Думка, 1983.
3. В. Ф. Кошовский, А. А. Лещук. Тепловой режим работы породоразрушающего инструмента//Сверхтвердые и тугоплавкие материалы – К.– 1985.
4. Э. Н. Алчин, Н. Ф. Кагарманов. Расчетный профиль алмазного долота обеспечивающий совершенный теплообмен // Труды БашНИПИ Нефть, Уфа, 1974. – Вып. 36.
5. Уонг Х. Основные формулы и данные по теплообмену для инженеров.–М.: Атомиздат, 1979.
6. Карслоу, Эгер. Теплопроводность твердых тел – М.: Атомиздат, 1979.
7. Отчет по теме № 0954. Разработка метода прогнозирования износостойкости и режущих свойств породоразрушающих элементов долот на основе математического моделирования контактного взаимодействия инструмента с породой – К.: ИСМ НАНУ им. В. Н. Бакуля, 2005.
8. Бочковский А. М. и др. – Анализ оснащённости долот ИСМ // Сверхтв. материалы – К.: 1983 .– № 5.

Поступила 04.07.07.