Записки Ленинградского ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции и ордена Трудового Красного Знамени горного института им. Г.В.Плеханова,
1985, т.105

УДК 622.24.051

АНАЛИЗ И РАСЧЕТ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ В ТЕЛЕ АЛМАЗНОЙ КОРОНКИ

Б.Б.КУДРЯШОВ, А.А.ЯКОВЛЕВ

Развитие технологии алмазного бурения, основывающееся на применении высокоскоростных режимов, нового породоразрушающего инструмента и использовании низкотеплоемких очистных агентов (газожидкостных систем) предъявляет повышенные требования к работоспособности и, в первую очередь, к нормализации температурного режима работы алмазного породоразрушающего инструмента [1-6].

В статье предложена общая математическая модель распределения температуры в теле алмазного породоразрушающего инструмента, включая алмазы, матрицу и корпус коронки с учетом их теплофизических свойств.

В процессе бурения породоразрушающий инструмент нагревается за счет совершаемой на забое механической работы. Физический КПД разрушения горных пород при бурении, по данным Л.А.Шрейнера, составляет не более 0,01 % [5]. Это позволяет считать, что вся механическая энергия, реализуемая на забое, переходит в тепловую. Генерируемое на забое тепло поступает через алмазы в тело коронки и частично в породу. Очистной агент, омывающий инструмент, в результате конвективного теплообмена отводит поступающее тепло. В определенный момент достигается тепловой баланс: количество поступающего в единицу времени тепла становится равным отводимому очистным агентом, и в теле инструмента устанавливается постоянное поле температур, т.е. имеет место установившийся стационарный режим теплообмена.

Рассмотрим одномерную задачу установившегося распределения температурного поля по высоте алмазной коронки. За начало системы координат примем точку контакта режущих граней буровых алмазов с породой забоя.

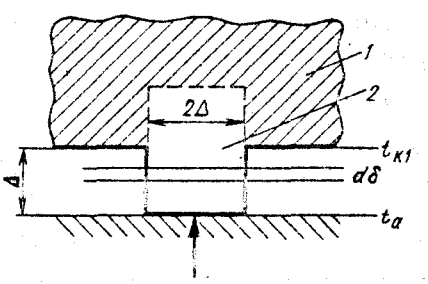


Рис.1. К расчету температурного поля в теле объемного алмаза
1 – матрица коронки; 2 – алмаз

Для упрощения теоретических выкладок примем ряд допущений:

1) единичный объемный алмаз – ограниченный цилиндр, имеющий общую контактную поверхность с матрицей, на свободный торец которого поступает тепловой поток q_1 (рис.1);

2) матрица и корпус коронки – система, состоящая из двух полых ограниченных цилиндров 1 и 2 (рис.2), соприкасающихся торцами. На свободный торец

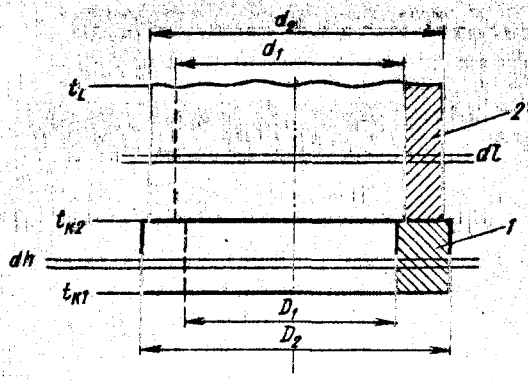


Рис.2. Схема матрицы (цилиндр 1) и корпуса (цилиндр 2) алмазной коронки
t_L – температура на конце корпуса коронки, °С

цилиндра I поступает тепловой поток q_2 с объемных алмазов, а через контактирующие площади цилиндров I и 2 проходит тепловой поток q_3;

3) свободный торец цилиндра 2 теплоизолирован, поскольку ленточную резьбу можно считать существенным тепловым сопротивлением.

С учетом принятых допущений тепловой поток, поступающий в объемные алмазы в единицу времени в процессе бурения,

$$q_1 = -\lambda_a F_a \, dt_1 / d\delta ,$$

где λ_a – коэффициент теплопроводности алмазов, Вт/(м·°С); F_a – суммарная площадь поперечного сечения объемных алмазов, м^2; t_1 – текущая координата температуры по высоте в теле объемных алмазов, °С; δ – текущая координата выпуска алмазов из матрицы, м.

Для отдачи тепла в очистной агент с боковых поверхностей объемных алмазов на элементарном участке $d\delta$ справедливо

$$dq_1 = \alpha_a \Pi_a (t_1 - t_{ср}) \, d\delta ,$$

где Π_a – суммарный периметр объемных алмазов, м; α_a – коэффициент теплоотдачи с боковых поверхностей объемных алмазов, Вт/(м^2·°С); $t_{ср}$ – средняя температура очистного агента, омывающего работающую алмазную коронку, °С.

Для изменения теплового потока на бесконечно малом участке выпуска объемных алмазов справедливо уравнение

$$-\lambda_a F_a \frac{d^2 t_1}{d\delta^2} = \alpha_a \Pi_a (t_1 - t_{ср}) .$$

Преобразуя его и приняв $m_1^2 = \alpha_a \Pi_a / \lambda_a F_a$, приведем его к общепринятой форме неоднородного линейного дифференциального уравнения 2-го порядка с постоянными коэффициентами $d^2 t_1 / d\delta^2 + m_1^2 t_1 = m_1^2 t_{ср}$, общее решение которого имеет вид

$$t_1 = C_1 e^{m_1 \delta} + C_2 e^{-m_1 \delta} + t_{ср} .$$

Приняв граничные условия

$$-\lambda_a F_a \, dt_1 / d\delta = \begin{cases} q_1 & \text{при } \delta = 0 \\ q_2 & \text{при } \delta = \Delta \end{cases}$$

(здесь Δ – выпуск объемных алмазов из тела матрицы коронки, м) и определив постоянные интегрирования C_1 и C_2, получим выражение для распределения температуры в теле объемных алмазов по высоте

$$t_1 = \frac{q_1 e^{-m_1\Delta} - q_2}{n_1\left(e^{m_1\Delta} - e^{-m_1\Delta}\right)} e^{m_1\delta} + \frac{q_1 e^{m_1\Delta} - q_2}{n_1\left(e^{m_1\Delta} - e^{-m_1\Delta}\right)} e^{-m_1\delta} + t_{ср}, \qquad (1)$$

где $n_1 = \lambda_a F_a m_1$, Вт/(м·°С).

Принимая $\delta = 0$ и $\delta = \Delta$, получим выражение для температуры режущей грани алмаза ($\delta = 0$)

$$t_a = \frac{q_1\left(e^{m_1\Delta} + e^{-m_1\Delta}\right) - 2q_2}{n_1\left(e^{m_1\Delta} - e^{-m_1\Delta}\right)} + t_{ср} \qquad (2)$$

и температуры на контакте алмазов с матрицей ($\delta = \Delta$)

$$t_{к1} = \frac{2q_1 - q_2\left(e^{m_1\Delta} + e^{-m_1\Delta}\right)}{n_1\left(e^{m_1\Delta} - e^{-m_1\Delta}\right)} + t_{ср}. \qquad (3)$$

Аналогично решается уравнение теплового баланса для бесконечно малого участка (по высоте) матрицы алмазной коронки:

$$-\lambda_м F_м \frac{d^2 t_2}{dh^2} = \left(\alpha_1 \Pi_1 + \alpha_2 \Pi_2 + \alpha_3 \Pi_3\right)\left(t_2 - t_{ср}\right),$$

где $\lambda_м$ – коэффициент теплопроводности материала матрицы, Вт/(м·°С); $F_м$ – площадь поперечного сечения матрицы без учета промывочных окон, м^2; t_2 – текущая координата температуры по высоте матрицы, °С; h – текущая координата высоты матрицы, м; α_1 и α_2 – коэффициенты теплоотдачи в зазорах соответственно между матрицей и керном и между матрицей коронки и стенками скважины, Вт/(м^2·°С); α_3 – коэффициент теплоотдачи в промывочных каналах коронки, Вт/(м^2·°С); Π_1 и Π_2 – периметры внутренней и наружной поверхностей матрицы без учета промывочных каналов, м; Π_3 – периметр боковых поверхностей промывочных каналов матрицы, м.

После преобразований получим уравнение $d^2 t_2 / dh^2 + m_2^2 t_2 = m_2^2 t_{ср}$, где $m_2^2 = (\alpha_1 \Pi_1 + \alpha_2 \Pi_2 + \alpha_3 \Pi_3)/\lambda_м F_м$, общее решение которого

$$t_2 = C_3 e^{m_2 h} + C_4 e^{-m_2 h} + t_{ср}$$

(здесь C_3 и C_4 – постоянные интегрирования). Это уравнение решается при следующих граничных условиях:

$$-\lambda_м F_м d t_2 / dh = \begin{cases} q_2 & \text{при} \quad h = 0 \\ q_3 & \text{при} \quad h = H. \end{cases}$$

Окончательное выражение для распределения температур в теле матрицы алмазной коронки получим в виде

$$t_2 = \frac{q_2 e^{-m_2 H} - q_3}{n_2\left(e^{m_2 H} - e^{-m_2 H}\right)} e^{m_2 h} + \frac{q_2 e^{m_2 H} - q_3}{n_2\left(e^{m_2 H} - e^{-m_2 H}\right)} e^{-m_2 h} + t_{ср}. \qquad (4)$$

Аналогично предыдущему находим выражение для температуры на торце алмазной коронки ($h = 0$)

$$t_{к1} = \frac{q_2\left(e^{m_2 H} + e^{-m_2 H}\right) - 2q_3}{n_2\left(e^{m_2 H} - e^{-m_2 H}\right)} + t_{ср} \qquad (5)$$

и на контакте матрицы с корпусом коронки ($\ell = H$)

$$t_{к2} = \frac{2q_2 - q_3\left(e^{m_2 H} + e^{-m_2 H}\right)}{n_2\left(e^{m_2 H} - e^{-m_2 H}\right)} + t_{ср}, \qquad (6)$$

где H – высота матрицы алмазной коронки, м; $n_2 = \lambda_м F_м m_2$, Вт/(м·°С).

Уравнение теплового баланса для бесконечно малого участка (по высоте) корпуса алмазной коронки имеет вид

$$-\lambda_к F_к \frac{d^2 t_з}{d\ell^2} = (\alpha_4 \Pi_4 + \alpha_5 \Pi_5)(t_з - t_{ср}), \qquad (7)$$

где $\lambda_к$ – коэффициент теплопроводности материала корпуса, Вт/(м·°С); $F_к$ – площадь поперечного сечения корпуса, м^2; $t_з$ – текущая координата температуры по высоте корпуса коронки, °С; ℓ – текущая координата высоты корпуса, м; α_4 и α_5 – коэффициенты теплоотдачи в зазорах между корпусом коронки и керном и между корпусом и стенками скважины, Вт/(м^2·°С); Π_4 и Π_5 – периметры внутренней и наружной поверхностей корпуса коронки, м.

Преобразуя формулу (7) и вводя обозначение $m_3^2 = \alpha_4 \Pi_4 + \alpha_5 \Pi_5 / \lambda_к F_к$, получим уравнение $d^2 t_з / d\ell^2 + m_3^2 t_з = m_3^2 t_{ср}$, общее решение которого

$$t_з = C_5 e^{m_3 \ell} + C_6 e^{-m_3 \ell} + t_{ср}.$$

Постоянные интегрирования C_5 и C_6 найдем из граничных условий:

$$-\lambda_к F_к \frac{dt_з}{d\ell} = q_3 \quad \text{при } \ell = 0; \qquad -\frac{dt_з}{d\ell} = 0 \quad \text{при } \ell = L,$$

поскольку принято, что зазоры резьбы являются тепловым экраном, и на верхнем торце коронки процесс теплообмена прекращается.

Для распределения температуры (по высоте) в корпусе коронки, после определения C_5 и C_6, получим

$$t_з = \frac{q_3 e^{-m_3 L}}{n_3\left(e^{m_3 L} - e^{-m_3 L}\right)} e^{m_3 \ell} + \frac{q_3 e^{m_3 L}}{n_3\left(e^{m_3 L} - e^{-m_3 L}\right)} e^{-m_3 \ell} + t_{ср}, \qquad (8)$$

где L – высота корпуса коронки, м; $n_3 = \lambda_к F_к m_3$, Вт/(м·°С).

Температура на контакте матрицы коронки с корпусом ($\ell = 0$)

$$t_{к2} = \frac{q_3\left(e^{m_3 L} + e^{-m_3 L}\right)}{n_3\left(e^{m_3 L} - e^{-m_3 L}\right)} + t_{ср}, \qquad (9)$$

температура на верхнем торце корпуса коронки ($\ell = L$)

$$t_L = q_3 / n_3\left(e^{m_3 L} - e^{-m_3 L}\right) + t_{ср}. \qquad (10)$$

Приравняем выражения (6) и (9) и решим полученное уравнение относительно q_3 :

$$q_3 = n_3 q_2 / (n_3 \operatorname{cth} m_2 H + n_2 \operatorname{cth} m_3 L) \operatorname{sh} m_2 H. \qquad (11)$$

Приравняв (3) и (5) и подставив q_3 из (11), получим окончательное выражение для определения тепловых потоков в матрицу и корпус алмазной коронки соответственно

$$q_2 = n_2 A q_1 \,/\, \mathrm{sh}\, m_1\Delta\,(AB - n_1 n_3); \qquad (12)$$

$$q_3 = n_2 n_3\, \mathrm{sh}\, m_2 H q_1 \,/\, \mathrm{sh}\, m_1\Delta\,(AB - n_1 n_3), \qquad (13)$$

где $A = (n_3 \mathrm{cth} m_2 H + n_2 \mathrm{cth}\, m_3 l)\mathrm{sh}^2 m_2 H$; $B = n_2 \mathrm{cth}\, m_1\Delta + n_1 \mathrm{cth}\, m_2 H$.

Тепловой поток в тело работающего алмаза, как и любого другого резца, зависит от теплофизических свойств резца и буримой породы. Для учета этого обстоятельства в работах [3-6] введено понятие коэффициента распределения тепловых потоков, используя которое для теплового потока в работающие алмазы q_1 можем написать

$$q_1 = k_P N, \qquad (14)$$

где k_P - безразмерный коэффициент распределения тепловых потоков [3, 4],

$$k_P = 1 \Big/ \left(1 + \frac{\lambda_П}{\lambda_а}\sqrt{\frac{a_а}{a_П}}\right);$$

$\lambda_а$ и $\lambda_П$ - коэффициенты теплопроводности соответственно алмазов и горной породы, Вт/(м·°С); $a_а$ и $a_П$ - коэффициенты температуропроводности соответственно алмазов и горной породы, $м^2/с$; N - развиваемая на забое мощность, Вт.

В работах [3-6] показано, что средняя температура очистного агента, омывающего породоразрушающий инструмент, определяется общей развиваемой на забое мощностью, поскольку в восходящем потоке присутствует шлам нагретой в процессе бурения породы забоя, и начальной температурой очистного агента на его подходе к забою:

$$t_{ср} = t_0 + N / 2G c_P, \qquad (15)$$

где t_0 - температура очистного агента на подходе к забою, °С; G - массовый расход очистного агента, кг/с; c_P - удельная массовая теплоемкость очистного агента (для воздуха, газа, газожидкостных систем при постоянном давлении), Дж/(кг·°С).

Подставляя выражения (12), (14) и (15) в формулу (2), найдем температуру режущих граней работающих на забое алмазов

$$t_а = \frac{(AB - n_1 n_3)\,\mathrm{sh}\, 2 m_1\Delta - 2 n_2 A}{2\,\mathrm{sh}^2 m_1\Delta\,(AB - n_1 n_3)\,n_1} k_P N + \frac{N}{2Gc_P} + t_0.$$

Подставляя выражения для тепловых потоков (12)-(14), а также для средней температуры очистного агента (15) в формулы (1), (4) и (8), получим окончательные аналитические выражения для распределения температуры по высоте алмазов, матрицы и короночного кольца.

С помощью этих аналитических выражений были рассчитаны температуры в теле однослойной алмазной коронки типа А4Ш-59 (см. таблицу и рис.3) для следующих условий:

Объемные алмазы	
Зернистость, шт./карат	**40-60**
Масса, каратs	**5,0-7,5**
Средний размер 2Δ, м	**$1{,}22\cdot10^{-3}$**
Коэффициент теплопроводности $\lambda_{\text{Д}}$, Вт/(м·°С)	**146,5**
Матрица коронки	
Внутренний диаметр D_1, м	**0,042**
Наружный диаметр D_2, м	0,059
Высота, м	0,014
Коэффициент теплопроводности $\lambda_{\text{М}}$, Вт/(м·°С)	200,0
Промывочные каналы	
Количество	4
Ширина, м	0,005
Высота, м	0,004
Корпус коронки	
Внутренний диаметр d_1, м	0,044
Наружный диаметр d_2, м	0,057
Высота L, м	0,025
Коэффициент теплопроводности $\lambda_{\text{К}}$, Вт/(м·°С)	45,0
Мощность на забое N, кВт	2,5

В качестве очистных агентов использовались техническая вода с расходом $V_{\text{Ж}}$ = 40 л/мин, сжатый воздух с подачей $V_{\text{В}}$ = 1,5 м^3/мин и пена ($V_{\text{Ж}}$ = = 6,3 л/мин и $V_{\text{В}}$ = 0,7 м^3/мин) со степенью аэрации $V_{\text{В}} / V_{\text{Ж}}$ = 110.

Конкретные значения коэффициента теплоотдачи α для различных участков определены по рекомендациям [7]. Коэффициент теплоотдачи α для пены определен с применением правила аддитивности.

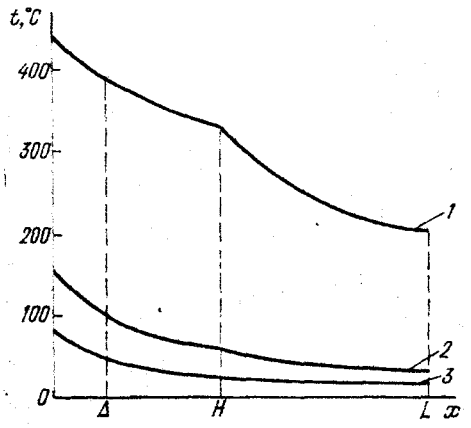


Рис.3. Температурное поле в теле алмазной коронки при различных очистных агентах
1 - сжатый воздух; 2 - пена; 3 - техническая вода

Температуры алмазного инструмента и циркулирующего очистного агента выравниваются на разных расстояниях от режущих граней буровых алмазов в зависимости от вида очистного агента: расстояние минимальное при промывке водой и газожидкостными системами и максимальное при продувке сжатым воздухом.

Итак, математическое описание установившегося температурного поля в теле алмазной коронки в рамках принятых допущений отличается от предыдущих тем, что в нем учитываются все геометрические параметры буровой алмазной коронки, а также различия значений коэффициента теплоотдачи различных поверхностей инструмента.

Расчетные значения температуры в теле алмазной коронки, °С

Очистной агент	$t_{ср}$, °С	Расстояние от режущих граней буровых алмазов						
		0	$\frac{\Delta}{2}$	Δ	$\Delta+\frac{H}{2}$	$\Delta+H$	$\Delta+H+\frac{L}{2}$	$\Delta+H+L$
Техническая вода	20,4	89,4	61,2	43,7	27,8	23,8	21,8	20,4
Сжатый воздух	59,4	433,6	412,2	384,7	353,6	327,7	228,8	201,2
Пена	20	151,0	128,5	101,3	71,9	58,0	36,4	27,4

Построенная на этой базе методика расчета позволит более точно определять предельно допустимые значения забойной мощности и технологических параметров бурения, а также дать более обоснованные рекомендации по конструированию буровых алмазных коронок, предназначенных для форсированных режимов бурения или применения низкотеплоемких очистных агентов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Абдулзаде А.М., Аббасов И.К., Амирасланов З.Г., Ибрагимов А.А. Тепловые явления при бурении коронками истирающе-режущего типа. – Изв. вузов, „Нефть и газ", 1968, № 7.

2. Горшков Л.К. Температурный фактор в алмазном бурении. М., 1977. Деп. в ВИНИТИ, 1977, № 1560-77.

3. Кудряшов Б.Б., Зорэ О.В., Бронзов А.С., Филатов Б.С. Температурный режим шарошечного долота при бурении с продувкой. – Нефтяное хозяйство, 1969, № 8.

4. Кудряшов Б.Б., Касаточкин А.В. Температурный режим алмазного долота при бурении. – Изв. вузов, „Горный журнал", 1967, № 3.

5. Кудряшов Б.Б., Михайлова Н.Д. Влияние промывочной среды на охлаждение буровых коронок при вращательном бурении. – Изв. вузов, „Горный журнал", 1964, № 11.

6. Кудряшов Б.Б., Оношко Ю.А. Нагрев и охлаждение алмазных коронок при бурении. – В кн.: Методика и техника разведки. Сб. научн. трудов / ВИТР, 1964, № 46.

7. Михеев М.А., Михеева И.М. Основы теплопередачи. 2-е изд. М., Энергия, 1977.