

УДК 622.23.051.7

**А. А. Кожевников**<sup>1</sup>, д-р техн. наук; **Ю. Н. Вахалин**<sup>2</sup>, канд. техн. наук

<sup>1</sup>Государственное высшее учебное заведение «Национальный горный университет»,  
г. Днепропетровск, Украина

<sup>2</sup> Государственное высшее учебное «Химико-технологический университет»,  
г. Днепропетровск, Украина

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ В ПОРОДЕ ПРИ АЛМАЗНОМ БУРЕНИИ

*Рассмотрен вопрос определения температурных полей на забое скважины при алмазном бурении.*

**Ключевые слова:** горная порода, бурение, алмазная коронка, температурное поле на забое скважины, термоциклическое воздействие.

Температурные процессы, происходящие в зоне резания алмазной коронкой, могут существенно влиять на характер бурения в целом. Превышение допустимой температуры на торце коронки приводит к интенсивному износу и даже сгоранию армирующих алмазов. В то же время реализация определенных температурных сценариев на поверхности породы может способствовать существенному снижению прочности породы и повышению эффективности бурения. Поэтому, необходимо уметь определять температуру как инструмента, так и породы в процессе бурения и использовать температурный фактор для получения наиболее оптимальных режимов бурения.

Цель настоящей работы – получить простые зависимости, позволяющие определять температуру в любой точке забоя работающей коронки в зависимости от геометрии инструмента и режимных параметров, для использования температурных явлений в повышении эффективности бурения.

Изучению температурных полей в алмазной коронке в процессе бурения посвящено большое количество работ. Наиболее полный обзор исследований температурных полей в алмазной коронке приведен в [1]. Общий вывод состоит в том, что в процессе установившегося бурения коронка находится в стационарном тепловом поле.

Иное дело – горная порода. Ей посвящено гораздо меньше исследований и, как правило, они носят экспериментальный характер [2; 3]. При бурении в горной породе наблюдаются нестационарные тепловые поля. Когда над установленным участком забоя проходит сектор коронки, порода одновременно со снятием с нее тонкого слоя, нагревается от определенной температуры, зависящей от длины сектора и характера взаимодействия поверхности инструмента с породой, до максимальной на выходе из сектора. Затем над указанным участком проходит промывочное окно и температура породы резко снижается. Затем цикл повторяется. Таким образом, поверхность горной породы постоянно подвергается термоциклированию. Результаты анализа показывают, что для реальных алмазных коронок можно организовывать довольно жесткие режимы термического удара охлаждением, когда скорость сброса температуры может достигать  $(5-10) \cdot 10^3$  град/с. В этом случае скорость деформации кварцесодержащих пород будет менее  $0,2 \text{ с}^{-1}$ , т. е. порода в результате охлаждения будет подвергаться динамическому разрыву с исключением значительной пластической релаксации. [4]. Если сектор коронки длинный, можно предположить, что порода при прохождении сектора успевает нагреться до постоянной температуры торца коронки и определять ее, например, по известной зависимости Б. Б. Кудряшова [5]:

$$T_k = 2kN/\pi [\lambda_1(\alpha_1 D_1 + \alpha_2 D_2)(D_2^2 - D_1^2)]^{1/2} + \kappa N/2Gc_p + t_0, \quad (1)$$

где  $k$  – коэффициент, учитывающий распределение тепловых потоков между коронкой и породой,

$$k = \lambda_1 a_2^{1/2} / (\lambda_2 a_1^{1/2} + \lambda_1 a_2^{1/2})$$

$\lambda_1, \lambda_2$  – коэффициенты теплопроводности соответственно материалов коронки и буримой породы;  $a_1$  и  $a_2$  – коэффициенты температуропроводности соответственно материалов коронки и породы,  $N$  – мощность, затрачиваемая на забое;  $G$  – массовый расход промывочной среды;  $c_p$  – удельная теплоемкость промывочной среды при постоянном давлении;  $\beta_1, \beta_2$  – коэффициенты теплоотдачи в зазорах соответственно между коронкой и керном, между коронкой и стенками скважины;  $D_1, D_2$  – внутренний и наружный диаметры короночного кольца,  $t_0$  – начальная температура промывочной среды.

Для выяснения природы и характера нагревания поверхности забоя при движении сектора коронки по породе воспользовались подходом, предложенным К. Джонсоном и сформулированным в [6]. При скольжении сектора по породе в зоне контакта генерируется тепло в виде удельного теплового потока  $q$ . Необходимо найти температуру в полупространстве от теплового источника, движущегося по поверхности.

Если рассматривается стационарный процесс, удобно зафиксировать тепловой источник и считать полупространство движущимся со скоростью  $V$  параллельно оси  $x$ . При этом температурное поле становится функцией положения, а не времени. Рассмотрим плоскую задачу об источнике тепла на торце сектора алмазной коронки длиной  $L_c$  (рисунок).

Элемент материала в точке  $(x, z)$  в момент  $\tau$  был расположен в точке  $(x - V\tau, z)$ , в предыдущий момент  $\tau - \tau'$ . Тепло выделяемое источником в точке  $S$  за время  $dt'$  составляет  $q dS dt'$ . Стационарная температура элемента, расположенного в данный момент в точке  $x$ , при мгновенном приложении к границе полупространства распределенных вдоль прямой источников нагревания интенсивностью  $q$  определяется по зависимости [7]

$$T_H = T_0 + (H / 2\pi\lambda\tau) \exp(-R^0 / 4a\tau) \quad (2)$$

где  $T_0$  – начальная температура полупространства,  $q$  – количество теплоты, выделяющейся на единицу длины (удельный тепловой поток),  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности материала полупространства,  $\tau$  – время воздействия источника тепла,  $R$  – радиальная координата точки полупространства,  $a$  – коэффициент температуропроводности материала полупространства.

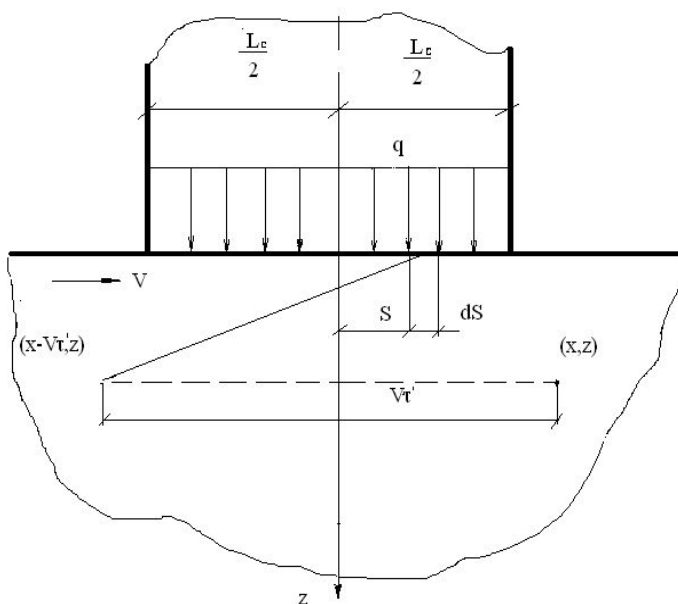


Рис. 1. Схема к расчету температурного поля в полупространстве при нагревании движущимся сектором коронки с удельной интенсивностью нагревания  $q$

Стационарная температура элемента, расположенного в данный момент в точке  $x$  (см. рисунок), находится интегрированием уравнения (2) от  $\tau = -\infty$  до текущего момента  $\tau = 0$ :

$$\Theta(x, z) = \Theta_0 + \frac{q}{2\pi\lambda} \int_{-L_c/2}^{L_c/2} dS \int_{-\infty}^0 \exp\left(-\frac{(x - S - V\tau')^2 + z^2}{4a\tau'}\right) \frac{d\tau'}{\tau'} \quad (3)$$

Максимальная температура наблюдается на поверхности  $z = 0$  и согласно (3) ее можно записать в виде

$$T_H = T_0 + (q L_c / 2\lambda L) F(L, X), \quad (4)$$

где:  $L = VL_c/4a$ ,  $X = Vx/2a$ .

Интегралы (3) вычислил Д. Егер [7]. Параметр  $L$ , известный как число Пекле, интерпретируется как отношение скорости поверхности к скорости диффузии тепла в тело. При больших значениях числа Пекле ( $L > 5$ ) тепло диффундирует лишь на небольшое расстояние в тело за время, которое требуется поверхности для прохождения через нагретую зону. Поток тепла почти перпендикулярен к поверхности во всех точках.

Температуру точки поверхности с учетом (4) определяют так:

$$T_H = T_0 + 2q(a\tau)^{1/2}/\pi^{1/2}\lambda = T_0 + q L_c / 2\lambda \{2/\pi(4a / L_c^{1/2})(1 - x)\}, \quad (5)$$

при этом:  $-L_c/2 \leq x \leq L_c/2$ .

Средняя температура на поверхности для рассматриваемого источника

$$T_{cp} \approx T_0 + (2q L_c / 3\pi^{1/2} \lambda)L^{-1/2}. \quad (6)$$

Уравнение (5) базируется на представлении об одномерном потоке тепла в тело и применимо к случаю равномерного распределения источников в любой плоской области. Учитывая, что при алмазном бурении эффективная глубина проникновения тепла в буримый массив почти на порядок меньше поперечных размеров сектора коронки, можно считать приведенные зависимости справедливыми для любой формы поперечного сечения сектора алмазной коронки. По зависимости (5) можно рассчитывать изменение температуры по площадке нагревания забоя во времени и температуру в любой заданной точке забоя, в том числе в точке сбегания сектора с заданного участка породы.

Удельный тепловой поток, поступающий в породу в зависимостях (5), определяют по формуле:

$$q = N(1 - k) \eta / S,$$

где обозначения  $N$ ,  $k$ ,  $S$  те же, что в (1);  $\eta$  – коэффициент преобразования забойной мощности в тепловую,  $\eta = 0,97-0,98$ .

При прохождении над нагретым до температуры  $T_H$  участком породы промывочного окна порода резко охлаждается. Температура на поверхности забоя снижается до  $T_{ox}$ . Эта температура определяется интенсивностью теплосъема (коэффициентом теплоотдачи  $\beta$ ) на забое, температурой охлаждающей среды  $T_{xl}$  и продолжительностью охлаждения  $\tau_{ox}$ . При установившемся режиме работы коронки для определения максимальной температуры породы в формуле (5) следует брать  $T_0 = T_{ox}$ .

В общем виде температурная кривая на забое при работе алмазной коронки имеет пилообразный вид с максимальной точкой, равной значению  $T_H$ , и минимальной  $T_{ox}$ .

Температуру охлаждения забоя при прохождении промывочного окна можно определить по формула [8]

$$T_{ox} = T_H + (T_{xl} - T_H)2\beta (a_2 \tau_{ox})^{1/2} / \lambda_2 \pi^{1/2}, \quad (7)$$

где  $\tau_{ox}$  – продолжительность охлаждения участка забоя,  $\tau_{ox} = \ell_{по} / \pi D_{cp} n$ ,  $\ell_{по}$  – длина промывочного окна,  $D_{cp}$  – средний диаметр коронки,  $n$  – частота вращения коронки.

Коэффициент теплоотдачи  $\beta$  при омывании забоя промывочной жидкостью зависит от геометрических параметров коронки и каналов ее охлаждения, а также теплофизических свойств и расхода промывочной жидкости. Результаты анализа режимов охлаждения забоя показывают, что для коронок диаметром 59 и 76 мм с расходом промывочной жидкости  $Q = 20-80$  л/мин коэффициент теплоотдачи изменяется в диапазоне 9850–43800 Вт/м °С [9].

По зависимостям (5) и (7) рассчитывают температуру в любой точке забоя в любое время работы коронки с учетом геометрии режущей части инструмента (длины сектора и ширины промывочного окна).

Для проверки пригодности полученных зависимостей (5) и (7) для определения температуры в породе в процессе бурения рассчитали максимальную температуру нагревания породы при бурении алмазными коронками 02И4 за различными режимами и сравнили с экспериментальными данными. Экспериментальные исследования температуры на забое скважины в процессе проходки коронками 02И4 выполнили в ДГИНГУ [3]. Температуру горной породы в зоне резания измеряли методом срезаемых термопар.

Результаты измерения температуры по [3], а также рассчитанные значения средней температуры торца коронки по Б. Б. Кудряшову см. формулу (1), и температуры поверхности забоя по полученной зависимости (5) приведены в таблице.

Таблица 1. Температура породы на забое, полученная различными способами

№	Диаметр коронки, мм	Осевая нагрузка, Дан	Частота вращения, об / мин	Расход очистного агента, л/мин	Температура, К				
					При эксперименте в зоне резания по [3]	В торце коронки по Б. Кудряшову [5]	В забое по форм. (5)	$\Delta T_1$	$\Delta T_2$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	76	1000	470	10	1173	775	809	398	364
2				20	993	653	692	340	301
3				70	743	503	531	240	212
4	76	1500	470	10	1283	1024	1068	259	215
5				20	1238	841	915	397	323
6				70	1043	618	676	425	367
7	76	2000	470	10	1328	1274	1324	54	4
8				20	1263	1030	1091	233	172
9				70	1073	732	772	341	301
10	76	1500	277	20	1093	609	633	484	460
11	993	1500	470	15	1253	1149	1194	104	59
12	25			1163	989	1043	174	120	
13	70			993	928	983	65	10	

В таблице величина  $\Delta T_1$  – разность температур между экспериментальными значениями и рассчитанными по формуле (1) Б. Б. Кудряшова;  $\Delta T_2$  – разность температур между экспериментальными значениями и рассчитанными по формуле (5).

Проанализировав данные таблицы, приходим к выводу, что абсолютно для всех режимов работы коронок значения температуры в породе рассчитанные по формуле (5), ближе к экспериментальным значениям, чем рассчитанные по зависимости (1). При этом по полученным в работе формулам можно определять температуру любой точки породы в любой момент времени при прохождении над ней сектора коронки или промывочного окна и в итоге строить аналогичные экспериментальным кривым [3] соответствующие температурные кривые, отражающие скорость повышения и снижение температуры в любой зоне забоя. Зависимость (1) позволяет определять только лишь среднюю температуру торца коронки.

Из данных таблицы также следует, что значение температуры, полученные экспериментально, в некоторых случаях значительно превышают теоретические. Следовательно, теоретические модели не учитывают дополнительные факторы подогревания породы. Другими словами, модель, основанная на нагревании породы исключительно за счет трения коронки о забой, не вполне корректна. Существуют, видимо, в зоне контакта инструмента с породой еще какие-то дополнительные источники тепла, которые до сих пор не учитывались. Предположительно, к таким источникам относится процесс образования трещин в зоне разрушения, так как вершина любой движущейся трещины является мощным генератором тепла (в вершине трещины, движущейся по кварцу, развивается температура до

4500 К) [10]; не исключается также вариант подогревания породы фактором термоупругой неустойчивости, когда жестко взаимодействуют две шероховатые поверхности и термические деформации частично или полностью подавляются силой прижатия поверхностей. Локальные температурные вспышки от проявлений термоупругой неустойчивости для случаев алмазного бурения могут достигать 400–3650 °С [6].

#### **Выводы**

1. По полученным формулам можно рассчитывать температурное поле на забое скважины (непосредственно в поверхностном слое породы).
2. Рассчитанные по формуле (5) значения температуры более близки к экспериментальным, чем рассчитанные для торца коронки по известной зависимости (1).
3. Рассчитанные значения температуры всегда ниже экспериментальных.
4. Очевидно, трение является не единственным источником, нагревающим породу на забое в процессе работы алмазной коронки.

*Розглянуто питання визначення температурних полів на забої свердловини що вибурюється при алмазному бурінні.*

*Ключові слова:* гірська порода, буріння, алмазна коронка, температурне поле в забої свердловини, термоциклічний вплив.

*The question of definition of temperature fields on rocks of a chink is considered at diamond drilling.*

*Key words:* Rock, drilling, diamond tool, temperature fields, thermal thermocycle.

#### **Литература**

1. Забойные факторы алмазного бурения геологоразведочных скважин: / А. А. Кожевников, С. В. Гошовский, И. И. Мартыненко и др. – Д.: ЧП «Лира ЛТД», 2006. – 264 с.
2. Курочкин П. Н. Исследование температурного режима работы коронки на забое скважины // Методика и техника разведки. – 1967. – № 58. – С. 71–76.
3. Кожевников А. А., Вырвинский П. П. Термомеханическое разрушение горных пород при разведочном бурении с генерированием тепловой энергии трением // Обзор техн. и технол. геол. развед. работ орг. пр-ва. – М.: ВИЭМС, 1985. – 39 с.
4. Полуянский С. А., Алымов Б. Д., Трусков И. В. Плазмозарошечное разрушение крепких горных пород. – К.: Наук. думка, 1979. – 192 с.
5. Кудряшов Б. Б., Оношко Ю. А. Нагрев и охлаждение алмазной коронки при бурении // Методика и техника разведки. – № 46. – Л.: ОНТИ ВИТР, 1964. – С. 49–61.
6. Джонсон К. Механика контактного взаимодействия. – М.: Мир, 1989. – 320 с.
7. Карслоу Г., Егер Д. Теплопроводность твердых тел. – М.: Наука, 1964. – 320 с.
8. Дмитриев А. П., Гончаров С. А. Термическое и комбинированное разрушение горных пород. – М.: Недра, 1978. – 304 с.
9. Кожевников А. А., Бражененко А. М., Мартыненко И. И. Исследование нагрева горной породы при бурении с импульсной промывкой // Уголь Украины. – 2001. – № 1. – С. 14–15.
10. Хайнике Г. Трибохимия : Пер. с англ. – М.: Мир, 1987. – 584 с.

*Поступила 05.06.12*