

6. Сенченков И. К., Жук Я. А. Термомеханический анализ одной модели термовязкопластического деформирования материалов // Прикл. механика. – 1997. – **33**, № 2. – С. 41–48.
7. Жук Я. А., Сенченков И. К., Козлов В. И., Табиева Г. А. Осесимметричная динамическая связанная задача термовязкопластичности // Там же. – 2001. – **37**, № 10. – С. 83–89.
8. Senchenkov I. K., Zhuk Y. A., Karnaukhov V. G. Modeling the thermomechanical behavior of physically nonlinear materials under monoharmonic loading // Int. Appl. Mech. – 2004. – **40**, No 9. – P. 943–969.
9. Расчеты на прочность, устойчивость и колебания в условиях высоких температур / Под ред. И. И. Гольденבלата. – Москва, 1965. – 567 с.
10. Сенченков И. К., Табиева Г. А. Определение параметров модели Боднера-Партома термовязкопластического деформирования материалов // Прикл. механика. – 1996. – **32**, № 2. – С. 64–72.

*Институт механіки ім. С. П. Тимошенка
НАН України, Київ
Миколаївський державний університет*

Надійшло до редакції 17.05.2006

УДК 622.233:536.24

© 2007

**А. А. Кожевников, С. В. Гошовский, А. Ю. Дреус,
И. И. Мартыненко**

Тепловое поле алмазной коронки при бурении с нестационарным режимом промывки скважины

(Представлено академиком НАН Украины А. Ф. Булатом)

The mathematical model and the results of a numerical study of the temperature regime of a diamond drilling tool under nonstationary heat exchange with a washing fluid are presented.

В последнее время интенсивно разрабатываются методы различного рода импульсного воздействия на горную породу при бурении с целью снижения энергоемкости процесса ее разрушения [1, 2]. К таковым, в частности, относятся технологии с использованием нестационарного режима подачи промывочной жидкости, которая осуществляет охлаждение породоразрушающего инструмента и забоя скважины. Температурный фактор при таком режиме является одним из основных критериев, лимитирующих эффективность технологического процесса бурения, поскольку термостойкость алмазов в существующих буровых коронках не превышает температуру 600° С [3]. Таким образом, анализ тепловых процессов на забое скважины является неотъемлемой составляющей работ при проектировании технологий бурения геологоразведочных скважин с нестационарной промывкой.

Проведение экспериментальных исследований в этом направлении сопряжено с рядом объективных трудностей: сложность технической реализации таких экспериментов, поскольку невозможно провести замеры температуры непосредственно на алмазах, определение степени нагрева которых и является конечной целью исследований; значительная трудность выполнения замеров в реальных условиях бурения скважины; высокая стоимость и сложность создания экспериментальных стендов; отсутствие надежных методик измерения температуры для таких процессов и др. Существующие методики расчета температуры породоразрушающего инструмента [3, 4] дают возможность оценить

степень его нагрева при бурении, но ограничиваются случаем постоянного расхода промывочной среды при бурении скважины. Настоящая работа посвящена анализу влияния нестационарного режима промывки скважины на тепловое состояние алмазной буровой коронки.

Рассмотрим случай, когда подача промывочной жидкости в скважину осуществляется в импульсном режиме. Контактная температура породоразрушающих элементов (алмазов) в таких условиях является функцией достаточно большого числа переменных, среди которых основными будут забойная мощность N , расход промывочной жидкости Q , длительность интервала подачи промывочной жидкости τ_1 и длительность интервала паузы τ_2 . Таким образом, выразить функциональную зависимость в аналитическом виде весьма затруднительно. Одним из путей решения проблемы является вычислительный эксперимент на основе математического моделирования.

В работе [5] предложена математическая модель температурного режима алмазной буровой коронки при стационарной промывке с учетом особенностей геометрии коронки и ее теплообмена с промывочной жидкостью. Модель буровой коронки представляет собой ограниченный полый стержень, состоящий из четырех участков: алмазов, участка матрицы с торцевыми промывочными каналами, участка матрицы с боковыми промывочными каналами и корпуса коронки. На один из торцов стержня (контактную поверхность алмазов) поступает тепловой поток мощностью, соответствующей генерируемой на забое мощности N . Теплосъем моделируется распределенными по длине стержня стоками теплоты, мощность которых определяется конкретными геометрическими особенностями участков и гидродинамикой течения промывочной жидкости в них. Оставаясь в рамках физических допущений [5], решим задачу об определении температурного поля коронки для условий, когда промывочная жидкость подается в импульсном режиме.

Нестационарное температурное поле по высоте коронки описывается следующей системой дифференциальных уравнений:

$$c_j \rho_j \frac{\partial t_j}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_j \frac{\partial t_j}{\partial x} \right) - A_j(\tau)(t_j - t_w), \quad j = 1, 2, 3, 4, \quad (1)$$

где индексы $j = 1, 2, 3, 4$ соответствуют участкам: алмазам, участку матрицы с торцевыми промывочными каналами, участку матрицы с боковыми промывочными каналами и корпусу коронки соответственно; τ — время; x — текущая координата по высоте коронки (начало оси координат x соответствует точке контакта алмазов с поверхностью забоя); t — температура соответствующего участка; λ — теплопроводность конструкционных материалов; ρ — плотность материалов; c — удельная массовая теплоемкость материалов коронки; $A_1(\tau) = 0$; $A_2(\tau) = \alpha_2(\tau)\Pi_2/F_2$; $A_3(\tau) = \alpha_3(\tau)\Pi_3/F_3$; $A_4(\tau) = (\alpha_4(\tau)\Pi_4 + \alpha_5(\tau)\Pi_5)/F_4$; Π_2 — суммарный периметр торцевых промывочных каналов; Π_3 — суммарный периметр боковых промывочных каналов на внутренней и наружной поверхностях матрицы; Π_4, Π_5 — периметры внутренней и наружной поверхностей корпуса; F_2 — площадь сечения матрицы за вычетом площади торцевых промывочных каналов; F_3 — площадь сечения матрицы за вычетом площади сечения боковых промывочных каналов; F_4 — площадь сечения корпуса коронки; α_2, α_3 — коэффициенты теплоотдачи в торцевых и боковых промывочных каналах соответственно; α_4, α_5 — коэффициенты теплоотдачи в зазорах между корпусом и керном и корпусом и стенкой скважины; t_w — средняя по высоте коронки температура промывочной жидкости.

Начальные условия для системы (1) запишем в виде

$$t_j|_{\tau=0} = t_0, \quad j = 1, 2, 3, 4, \quad (2)$$

где t_0 — начальная температура инструмента.

Граничные условия для системы (1) на контакте алмаз — горная порода

$$\lambda_a F_1 \frac{\partial t_1}{\partial x} \Big|_{x=0} = -k_p N, \quad (3)$$

где λ_a — коэффициенты теплопроводности алмазов; k_p — коэффициент распределения генерируемого на забое тепла между коронкой и горной породой; F_1 — суммарная площадь сечения контактирующих алмазов с забоем скважины. На стыках соответствующих участков условия теплового баланса

$$t_1|_{x=l_1} = t_2|_{x=l_1}, \quad \lambda_1 F_1 \frac{\partial t_1}{\partial x} \Big|_{x=l_1} = \lambda_2 F_2 \frac{\partial t_2}{\partial x} \Big|_{x=l_1}, \quad (4)$$

$$t_2|_{x=l_2} = t_3|_{x=l_2}, \quad \lambda_2 F_2 \frac{\partial t_2}{\partial x} \Big|_{x=l_2} = \lambda_2 F_3 \frac{\partial t_3}{\partial x} \Big|_{x=l_2} - \alpha_2(\tau) F_T (t_3|_{x=l_2} - t_w), \quad (5)$$

$$t_3|_{x=l_3} = t_4|_{x=l_3}, \quad \lambda_2 F_3 \frac{\partial t_3}{\partial x} \Big|_{x=l_3} = \lambda_3 F_4 \frac{\partial t_4}{\partial x} \Big|_{x=l_3}. \quad (6)$$

Здесь $l_1 = l_a$; l_a — выступ алмазов из матрицы; $l_2 = l_1 + l_{m1}$; l_{m1} — высота промывочного окна; $l_3 = l_2 + l_{m2}$; l_{m2} — высота матрицы без торцевого промывочного канала; F_T — площадь верхней теплоотдающей поверхности промывочного окна.

На свободном торце коронки предполагаем равенство теплового потока нулю, поскольку резьба для соединения коронки с колонковыми трубами является хорошим тепловым сопротивлением

$$\frac{\partial t_3}{\partial x} \Big|_{x=L} = 0, \quad (7)$$

где $L = l_3 + l_k$; l_k — высота корпуса. Для определения коэффициентов распределения тепловых потоков и коэффициентов конвективного теплообмена на каждом из участков используем методику [3, 5].

Система уравнений (1) с условиями (2)–(7) решалась методом сквозного счета на основе конечных разностей с использованием неявной разностной схемы [6]. При этом шаг по временной координате выбирался таким образом, чтобы было расположено не менее пяти расчетных узлов на минимальном из интервалов τ_1 и τ_2 . Расчеты выполнены для коронки А4ДП-76 с зернистостью алмазов 25 шт/карат и массой алмазов 10 карат.

На рис. 1 представлены результаты расчета контактной температуры алмазов при импульсной подаче промывочной жидкости (вода) для различных значений интервалов τ_1 и τ_2 . Максимальный расход промывочной жидкости в расчетах принимался равным $Q = 40$ л/мин при мощности $N = 6,3$ кВт и температуре $t_{ж} = 20^\circ$ С. На этом же рисунке показана температура алмазов при стационарном режиме подачи промывочной жидкости с тем же расходом. Как видно из данных рис. 1, при импульсном режиме промывки как

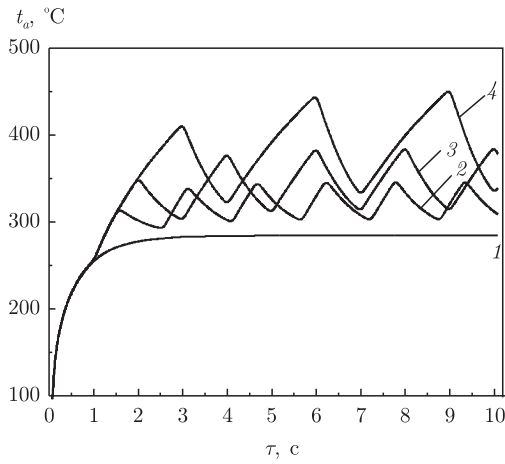


Рис. 1. Изменение контактной температуры алмазов t_a во времени: 1 — $Q = \text{const}$; 2 — $\tau_1 = 0,5$ с, $\tau_2 = 1$ с; 3 — $\tau_1 = \tau_2 = 1$ с; 4 — $\tau_1 = 1$ с, $\tau_2 = 2$ с

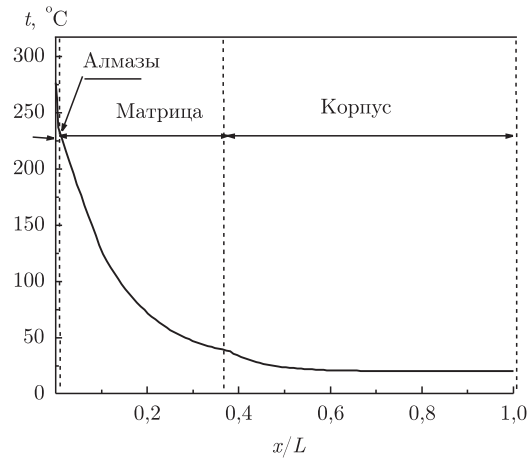


Рис. 2. Распределение температуры по высоте инструмента L при стационарном режиме промывки

максимальное, так и минимальное значение контактной температуры алмазов может значительно превышать температуру при $Q = \text{const}$. Так, например, при $\tau_1 = 1$ с и $\tau_2 = 2$ с разница между $t_{a \text{ max}}$ при импульсной промывке и t_a для стационарного режима составляет 150°C .

Характер распределения температуры по высоте инструмента для принятых выше режимных параметров бурения и стационарного режима охлаждения представлен на рис. 2. На участке матрицы наблюдается резкое падение температуры более чем на 200°C , что свидетельствует о наиболее интенсивном охлаждении коронки именно при течении жидкости по промывочным каналам, расположенным в матрице коронки. Далее, на участке корпуса, температура постепенно выравнивается и приближается к значению температуры охлаждающей жидкости. Таким образом, основную роль в охлаждении коронки играет матрица. Данный характер распределения температуры в теле коронки качественно и количественно соответствует экспериментальным данным по замерам температуры в буровом инструменте [4, 7, 8].

На рис. 3, 4 представлены результаты расчета максимальной и минимальной контактной температуры алмазов в зависимости от длительности интервала подачи τ_1 и длительности интервала паузы τ_2 промывочной жидкости. В вычислительных экспериментах τ_1 и τ_2 изменялись в пределах от 0,1 с до 10 с. Для удобства ось абсцисс на рис. 3 и 4 представлена в логарифмическом масштабе. Результаты исследования показывают, что с увеличением τ_1 значение максимальной контактной температуры выходит на некоторое постоянное значение для каждого из интервалов τ_2 , что свидетельствует о нецелесообразном дальнейшем увеличении данного параметра. Не рекомендуется для рассмотренных режимных параметров бурения увеличивать интервал паузы более чем 1–2 с, поскольку максимальная температура в этом случае может достигать значений выше предельно допустимых (600°C).

Как показывают графики для минимальных значений контактных температур, представленные на рис. 3, б, 4, б, с увеличением интервала подачи промывочной жидкости значение минимальной температуры стремится к значению температуры алмазов при стационарном режиме подачи промывочной жидкости и в пределе выходит на указанное значение. Полученные данные свидетельствуют, что использование интервала τ_2 менее 0,4 с может

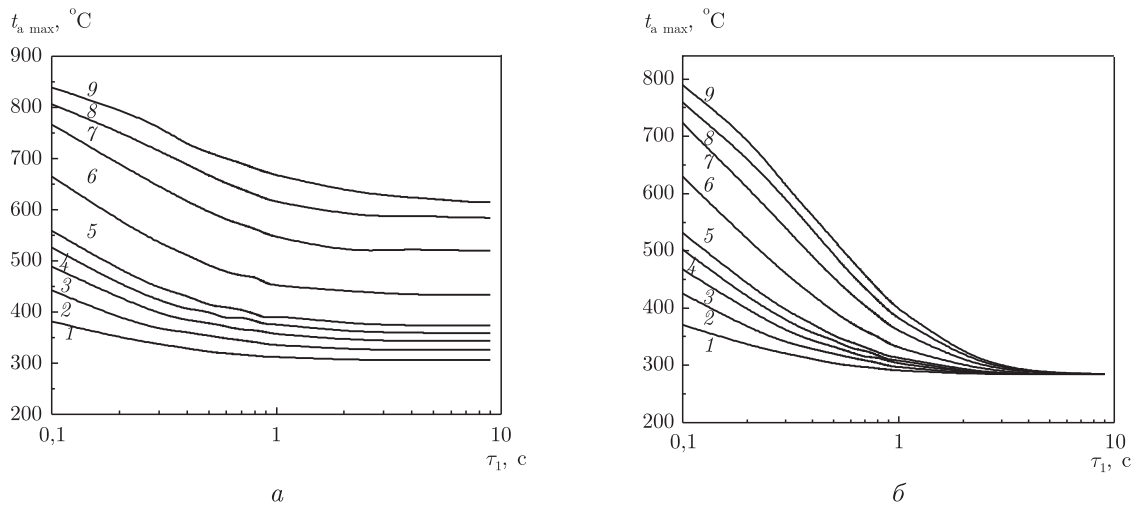


Рис. 3. Максимальная (а) и минимальная (б) контактная температура алмазов в зависимости от τ_1 для различных значений τ_2 : 1 – 0,2 с; 2 – 0,4 с; 3 – 0,6 с; 4 – 0,8 с; 5 – 1 с; 6 – 2 с; 7 – 4 с; 8 – 6 с; 9 – 8 с

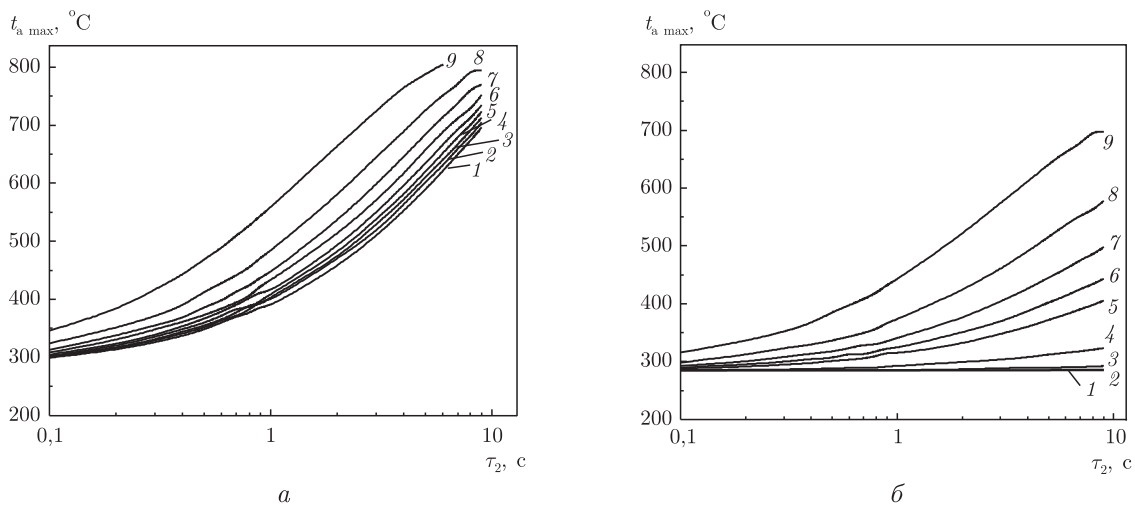


Рис. 4. Максимальная (а) и минимальная (б) контактная температура алмазов в зависимости от τ_2 для различных значений τ_1 : 1 – 8 с; 2 – 6 с; 3 – 4 с; 4 – 2 с; 5 – 1 с; 6 – 0,8 с; 7 – 0,6 с; 8 – 0,4 с; 9 – 0,2 с

привести к критическим режимам бурения, поскольку даже температура $t_{a \min}$ принимает значения, близкие к предельно допустимым.

Полученные результаты позволяют выбрать рациональные параметры импульсного режима промывки скважины, а также могут быть использованы для прогнозирования теплового состояния алмазного породоразрушающего инструмента в случае аварийных режимов подачи промывочной жидкости.

Предложенная математическая модель может быть использована при разработке технологии бурения с нестационарными режимами очистки скважины для анализа теплофизических процессов на забое и определения предельно допустимых технологических параметров.

1. Кожевников А. А., Гошовский С. В., Мартыненко И. И. Импульсные технологии бурения геологоразведочных скважин. – Киев: УкрГГРИ, 2003. – 208 с.

2. *Kolle J.* HydroPulseTM drilling // Technical report for U. S. Department of Energy. Tempres technologies inc., 2004. – 28 p.
3. *Горшков Л. К., Гореликов В. Г.* Температурные режимы алмазного бурения. – Москва: Недра, 1992. – 173 с.
4. *Щербань А. Н., Черняк В. П.* Прогноз и регулирование теплового режима при бурении скважин. – Москва: Недра, 1974. – 248 с.
5. *Математическая модель температурного режима алмазной коронки при бурении скважины / А. А. Кожевников, А. Ю. Дреус, И. И. Мартыненко, Ю. А. Бакаржиев // Матеріали міжнар. конф. “Форум гірників – 2005”. Т. 2. – Дніпропетровськ: Вид. НДУ, 2005. – С. 250–257.*
6. *Самарский А. А., Вабищев П. Н.* Вычислительная теплопередача. – Москва: Эдиториси УРСС, 2003. – 784 с.
7. *Синтетические алмазы в геологоразведочном бурении / Бугаев А. А., Лившиц И. В., Иванов В. В. и др. – Киев: Наук. думка, 1978. – 232 с.*
8. *Кожевников А. А., Вырвинский П. И.* Термомеханическое разрушение горных пород при разведочном бурении с генерирование тепловой энергии // Техника и технология геологоразведочных работ, организация производства. Обзор ОНТИ ВИЭМС. – Москва, 1985. – 36 с.

*Национальный горный университет
Украины, Днепропетровск
Украинский государственный
геологоразведочный институт, Киев
Днепропетровский национальный
университет
Государственная геологическая служба
Украины, Киев*

Поступило в редакцию 26.06.2006

УДК 539.3

© 2007

Ю. В. Коханенко, С. А. Цирук, Л. Г. Величко

Влияние модулей Юнга на краевые эффекты в трехслойном цилиндре

(Представлено академиком НАН Украины А. Н. Гузем)

We study the axisymmetric problem of the theory of end effects for a three-layer cylinder with isotropic layers that is loaded on its end faces by an axial constant load in the exact statement. The influence of Young's moduli of layers on the end effect's length is examined. The inhomogeneous problem of elasticity is solved approximately by the method of finite differences using the concepts of the basic scheme. The analysis of the computed results is carried out.

Рассматривается трехслойный круговой цилиндр с изотропными линейно-упругими слоями. Крайние слои имеют одинаковые характеристики, отличные от характеристик среднего слоя. По торцам $z = \text{const}$ цилиндр нагружен осевой нагрузкой P постоянной интенсивности. На контакте слоев моделируется полное сцепление. В [1, 2] рассмотрены вопросы определения краевых эффектов для конкретных конструкций из композитных материалов.