

УДК 622.243:536.24

А. А. Кожевников, докт. техн. наук¹; **А. Ю. Дреус**, канд. техн. наук²;
С. В. Гошовский, докт. техн. наук³; **И. И. Мартыненко**, канд. техн. наук⁴.

¹ *Национальный горный университет, г. Днепропетровск, Украина*

² *Днепропетровский национальный университет, г. Днепропетровск, Украина*

³ *Украинский государственный геологоразведочный институт, г. Киев, Украина*

⁴ *Государственная геологическая служба, г. Киев, Украина*

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ СЕКТОРА МАТРИЦЫ АЛМАЗНОЙ КОРОНКИ ПРИ ЕГО ДВИЖЕНИИ ПО ЗАБОЮ ПРИ БУРЕНИИ СКВАЖИНЫ

The 2-D mathematical model and results of numerical studies of temperature fields in the core bit and rock are present.

Введение

Исследования закономерностей износа алмазных буровых коронок, например [1], показывают, что одним из факторов преждевременного выхода породоразрушающего инструмента из строя является прижог и расплавление матрицы алмазных коронок. При этом следует заметить, что износ торца матрицы коронок происходит неравномерно, так как набегающая и сбегающая части сектора матрицы работают в разных теплофизических условиях. Распределение температурных полей в секторе и, следовательно, тепловая нагрузка на различные участки будет определяться интенсивностью теплообмена с промывочной средой, геометрическими размерами, мощностью тепловыделения на контакте, теплофизическими характеристиками и др. Исследование теплового состояния системы взаимодействующих тел представляет собой важную технологическую задачу с точки зрения обеспечения ресурсосберегающих режимов работы инструмента, для решения которой можно использовать методы вычислительной теплофизики.

Состояние вопроса

Проблеме моделирования теплофизических процессов на контакте с генерированием тепла посвящено достаточно большое количество исследований. Одной из первых работ по расчету температурных полей в теле буровой коронки является [2]. Предложенный подход оказался достаточно плодотворным и послужил основой для целого ряда математических моделей разной степени детализации и сложности, например, в работах [3, 4, 5]. В [6] выполнен анализ таких моделей, и после уточнения параметров физической модели предложено их развитие для расчета нестационарных тепловых процессов на забое при бурении скважины. Исследования нестационарных температурных режимов буровой коронки выполнено в [7], где показано, что в условиях переменного режима охлаждения могут развиваться критические с точки зрения работоспособности породоразрушающих элементов температуры. Общей отличительной чертой названных моделей является их одномерность по пространственной координате. Таким образом, они позволяют получить по высоте коронки только значения некоторой усредненной по поперечному сечению инструмента температуры.

В работе [8] рассмотрен вопрос о взаимодействии матрицы алмазной буровой коронки с горной породой забоя скважины с точки зрения термоупругости. Показано, что вследствие интенсивного тепловыделения на контакте возможна деформация поверхности забоя в направлении матрицы, что в свою очередь отрицательно влияет на эффективность технологического процесса. Для исследования такого рода эффектов следует рассматривать тепловую задачу в динамике с учетом неравномерного нагрева сектора матрицы и неоднородности тепловых полей в призабойном слое породы и инструменте.

В работах [9, 10] представлены результаты исследования тепловых процессов в породоразрушающем инструменте на основе двумерных компьютерных моделей, позволяющих оценить его тепловое состояние и распределение тепловых потоков. Однако эти исследования выполнены для стационарных условий контакта инструмента и породы в статической постановке и не учитывают кинематический аспект движения буровой коронки, заключающийся в том, что «горячий» сектор коронки набегает на «холодную» породу, охлажденную промывочной жидкостью при прохождении над данным участком забоя торцевого промывочного канала.

Цель работы

Целью настоящей статьи является исследование нестационарных температурных полей в системе «сектор матрицы – горная порода» с помощью методов математического моделирования процессов теплопереноса. Ниже представлены математическая модель и результаты численного моделирования процессов теплопереноса при бурении скважины в двумерной постановке с учетом несимметричности температурного поля сектора матрицы вследствие его движения по поверхности забоя.

Математическая модель и алгоритм расчета

Рассмотрим задачу о распределении тепла в движущемся секторе матрицы коронки в рамках плоской двумерной задачи. Расчетная область представлена на рис. 1. Начало неподвижной системы координат поместим в центр контактирующей с породой нижней плоскости сектора и свяжем эту систему с сектором коронки. При таком выборе системы координат для моделирования движения сектора матрицы (область W_1) высотой H и длиной $2L$ по поверхности породы (область W_2) с постоянной скоростью w используем принцип обратимости и предположим, что слой породы движется относительно неподвижного сектора матрицы. Протяженность расчетной области W_2 и глубина расчетного слоя породы соответственно $2l$ и h .

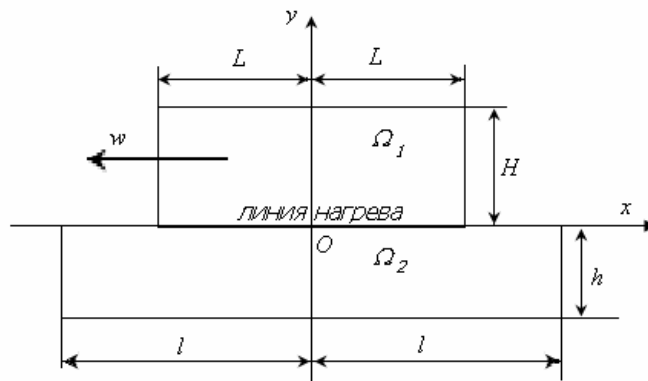


Рис. 1. Схема к расчету нагрева сектора матрицы алмазной буровой коронки и породы.

При работе инструмента, начиная с некоторого нулевого момента времени, на границе тел генерируется тепло с удельной мощностью q . Сделаем некоторые допущения:

коэффициенты конвективного теплообмена одинаковы для поверхности сектора матрицы алмазной буровой коронки и для поверхности забоя;

источники тепловыделения равномерно распределены по всей плоскости нагрева и постоянны по величине на протяжении всего времени контакта;

будем пренебрегать зависимостью теплофизических свойств материала коронки и горной породы от температуры и их анизотропией в призабойном слое породы;

температура промывочной жидкости постоянна по высоте сектора коронки.

Нестационарные температурные поля в областях W_1 и W_2 описываются системой нестационарных двумерных уравнений теплопроводности

$$\begin{aligned} c_1 r_1 \frac{\partial t_1}{\partial t} &= I_1 \left(\frac{\partial^2 t_1}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t_1}{\partial y^2} \right) \quad x, y \in \Omega_1 \quad t > 0, \\ c_2 r_2 \frac{\partial t_2}{\partial t} + c_2 r_2 w \frac{\partial t_2}{\partial x} &= I_2 \left(\frac{\partial^2 t_2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t_2}{\partial y^2} \right) \quad x, y \in \Omega_2 \quad t > 0. \end{aligned} \quad (1)$$

где c – теплоемкости; ρ – плотности;
 λ – коэффициенты теплопроводности;
 τ – время, индексы «1» и «2» относятся соответственно к сектору матрицы и горной породе.

Во втором уравнении системы (1) учитывается перенос тепла за счет движения со скоростью w .

Систему (1) следует дополнить граничными и начальными условиями.

На линии нагрева сформулируем граничные условия теплового баланса с учетом наличия на границе контакта источника тепла

$$\begin{aligned} t_1|_{y=0} &= t_2|_{y=0, -L < x < L}, \\ I_1 \frac{\partial t_1}{\partial y} \Big|_{y=0} - I_2 \frac{\partial t_2}{\partial y} \Big|_{y=0, -L < x < L} &= q. \end{aligned} \quad (2)$$

Из экспериментальных данных [6] и данных численного моделирования [7] следует, что основной теплосъем при охлаждении коронки происходит на участке матрицы. Таким образом, можно предположить, что на границе $y=H$ температурное поле выровняется, и в этом случае можем принять значение температуры известным из решения одномерной задачи [6, 7]

$$t_1|_{y=H} = t^*(t). \quad (3)$$

В силу малой теплопроводности породы прогреться будет лишь достаточно тонкий ее слой, непосредственно прилегающий к линии нагрева. Таким образом на удалении от линии нагрева по глубине породы температурные поля будут выравниваться и, следовательно, можем сформулировать

$$\frac{\partial t_2}{\partial y} \Big|_{y=-h} = 0, \quad (4)$$

$$\frac{\partial t_2}{\partial x} \Big|_{x=1} = \frac{\partial t_2}{\partial x} \Big|_{x=-1} = 0. \quad (5)$$

На боковых поверхностях сектора матрицы происходит конвективный теплообмен с промывочной жидкостью, которая также омывает и поверхность забоя, неконтактирующую в данный момент времени с матрицей. Граничные условия для данных участков запишутся

$$\begin{aligned} -I_1 \frac{\partial t_1}{\partial x} \Big|_{x=-L} &= a(t_1|_{x=-L} - t_g); \\ -I_1 \frac{\partial t_1}{\partial x} \Big|_{x=L} &= a(t_1|_{x=L} - t_g); \\ -I_2 \frac{\partial t_2}{\partial y} \Big|_{y=0, x \in [-l, -L]} &= a(t_2|_{y=0, x \in [-l, -L]} - t_g); \\ -I_2 \frac{\partial t_2}{\partial y} \Big|_{y=0, x \in [L, l]} &= a(t_2|_{y=0, x \in [L, l]} - t_g); \end{aligned} \quad (6)$$

где α – коэффициент конвективной теплоотдачи;

t_g – температура промывочной жидкости.

Предполагается, что начальная температура обоих контактирующих тел одинакова с известной и равна

$$t_1|_{\tau=0} = t_2|_{\tau=0} = t_0. \quad (7)$$

Система уравнений (1) с граничными и начальными условиями (2)–(7) аппроксимировалась разностными выражениями в соответствии с явной схемой [11]. Для внутренних расчетных узлов

$$t_{1,n+1,i,j} = t_{1,n,i,j} + \frac{I_1}{c_1 r_1} \Delta t \left(\frac{1}{\Delta x^2} (t_{1,n,i-1,j} - 2t_{1,n,i,j} + t_{1,n,i+1,j}) + \frac{1}{\Delta y^2} (t_{1,n,i,j-1} - 2t_{1,n,i,j} + t_{1,n,i,j+1}) \right) \quad (8)$$

$$t_{2,n+1,i,j} = t_{2,n,i,j} - \frac{w}{\Delta x} \Delta \tau (t_{2,n,i,j} - t_{2,n,i-1,j}) + \frac{\lambda_2}{c_2 \rho_2} \Delta \tau \left(\frac{1}{\Delta x^2} (t_{2,n,i-1,j} - 2t_{2,n,i,j} + t_{2,n,i+1,j}) + \frac{1}{\Delta y^2} (t_{2,n,i,j-1} - 2t_{2,n,i,j} + t_{2,n,i,j+1}) \right) \quad (9).$$

где Δx , Δy – шаги расчетной сетки по координатам x и y соответственно; $\Delta \tau$ – шаг по времени. Шаги расчетной сетки выбирались исходя из условий

$$\Delta \tau = \Delta x / w; \max(Fo_{1\Delta x}; Fo_{1\Delta y}; Fo_{2\Delta y}; Fo_{2\Delta y}) \leq \frac{1}{4},$$

где сеточные числа Фурье определяются из соотношений

$$Fo_{k\Delta x} = \frac{\lambda_k \Delta \tau}{c_k \rho_k \Delta x^2}; Fo_{k\Delta y} = \frac{\lambda_k \Delta \tau}{c_k \rho_k \Delta y^2}; k = 1, 2.$$

Для граничных узлов расчетные соотношения получали из аппроксимации соответствующих граничных условий. Особенность алгоритма заключается в необходимости корректировки температуры на границе $y=0$ на каждом временном шаге вследствие смещения температурного поля породы относительно сектора за счет движения со скоростью w .

Результаты расчета и их обсуждение

Ниже представлены результаты численного исследования температурных полей в системе контактирующих тел «сектор матрицы – порода», выполненного на основе приведенной выше математической модели.

В качестве примера для расчета выбран сектор матрицы коронки А4ДП-76 с $2L=0,0273$ м, теплопроводность материала матрицы $\lambda_1=120$ Вт/м·град, теплопроводность породы $I_2=2,38$ Вт/м·град, забойная мощность принята равной $N_3=6$ кВт, расход промывочной жидкости 20 л/мин, обеспечивающий среднее значение коэффициента конвективной теплоотдачи $\alpha=2,053 \cdot 10^4$ Вт/м²·град, $t_g=20$ °С. Скорость движения сектора по коронке принималась равной $w=1,5$ м/с.

На рис. 2 показана эволюция температурного поля сектора и породы во времени с момента начала движения и одновременного генерирования тепла на линии контакта.

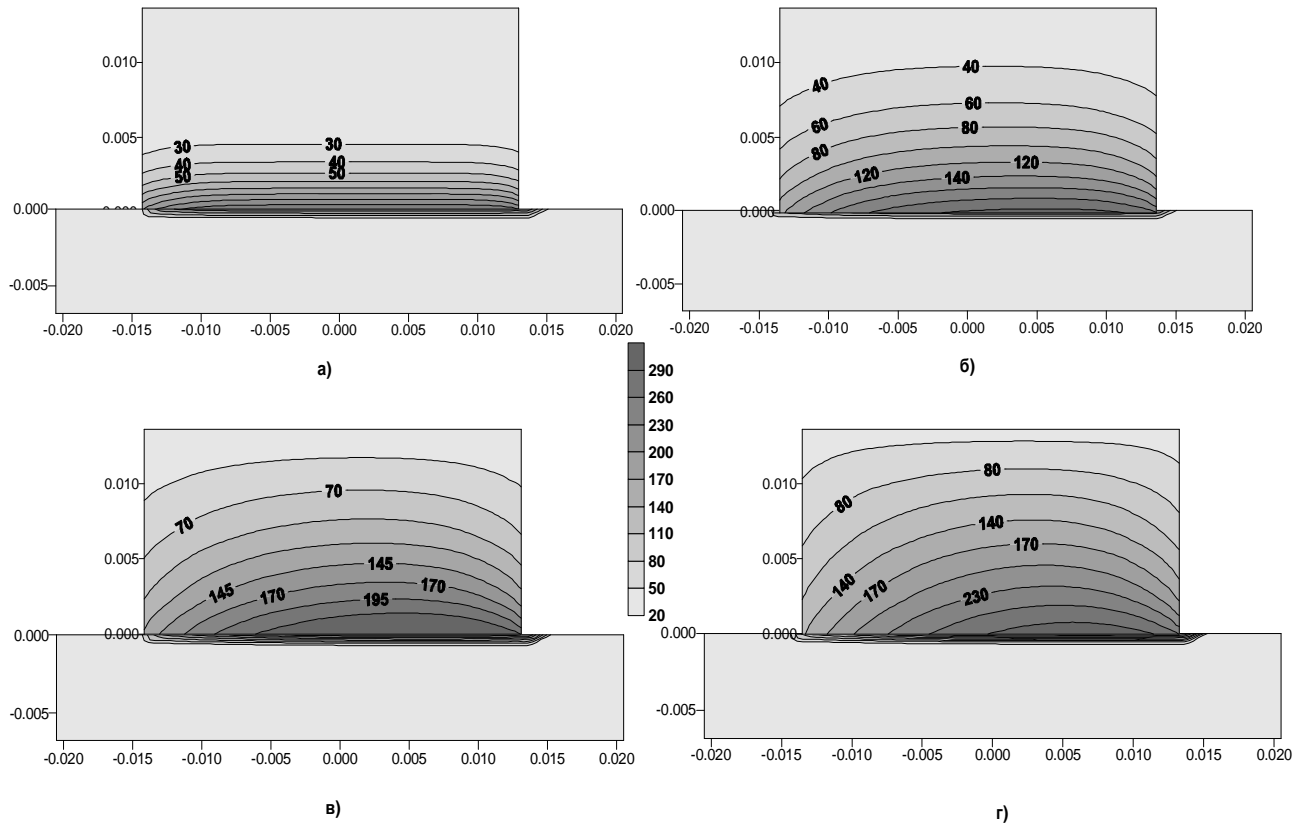


Рис. 2. Температурное поле в $^{\circ}\text{C}$ сектора матрицы коронки:
а) $t = 0,1$ c; б) $t = 0,5$ c; в) $t = 1$ c; г) $t = 5$ c.

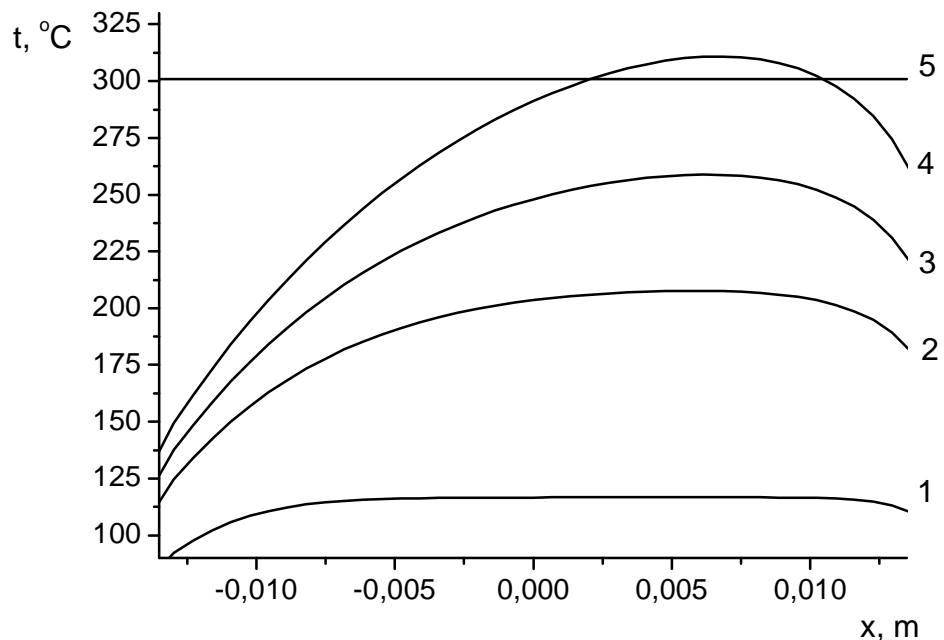


Рис. 3. Температура на линии нагрева: 1 – $t = 0,1$ c; 2 – $t = 0,5$ c; 3 – $t = 1$ c; 4 – $t = 5$ c; 5 – стационарное решение одномерной задачи [3].

В таблице представлены рассчитанные по предложенной модели численные значения температуры набегающего края сектора коронки T_{H} , сбегающего края сектора T_{C} , а также значения максимума температуры T_{max} и координата точки его положения x_{max} .

Рассчитанные по предложенной модели численные значения параметров

τ , с	T_H , °С	T_C , °С	T_{max} , °С	$x_{max} \cdot 10^3$, м
0,1	83,4	110,0	116,7	-2,7
0,5	111,9	180,9	207,6	9,45
1,0	123,3	219,6	258,8	12,15
5,0	133,7	259,8	310,8	13,5
10,0	137,5	270,2	325,0	13,5

Выводы

1. Предложенные в работе математическая модель и алгоритм расчета позволяют выполнить численное исследование теплового состояния сектора матрицы алмазной буровой коронки при его движении по забою при бурении скважины с генерированием тепла на контакте.

2. На основе численного исследования впервые показана качественная и количественная картина неоднородного нагрева сектора, что обусловлено набеганием передней части сектора на «холодную» породу. Показано, что по длине сектора коронки в области, прилегающей к линии контакта развиваются значительные градиенты температуры.

3. Результаты исследования показывают, что при выбранных параметрах бурения прогревается лишь тонкий слой горной породы, непосредственно прилегающий к линии контакта. При этом величина теплового следа в породе за сектором коронки незначительна по сравнению с шириной промывочного окна.

4. Представленные результаты численного исследования по предложенной двумерной математической модели могут быть использованы для определения рациональных конструктивных параметров алмазной коронки и ресурсосберегающих режимов бурения.

Литература

1. Пинчук Н. П., Кудря В. А., Мельничук И. П. Методы повышения эффективности бурения геологоразведочных скважин (Опыт концерна «Геологоразведка»). – М.: ЗАО «Геоинформмарк», 2000. – 536 с.
2. Кудряшов Б. Б., Оношко Ю. А. Нагрев и охлаждение алмазных коронок при бурении // Сб. науч. тр. ВИТР. Методика и техника разведки.– 1964. – № 46.
3. Кудряшов Б. Б.; Яковлев А. А. Анализ и расчет температурного поля в теле алмазной коронки // Записки Ленинградского горного института им. Г. В. Плеханова – 1985 – Т. 105.– С. 10 – 15.
4. Горшков Л. К., Гореликов В. Г. Температурные режимы алмазного бурения. – М.: Недра, 1992. – 173 с.
5. Математическая модель температурного режима алмазной коронки при бурении скважины. / А. А. Кожевников, А. Ю. Дреус, И. И. Мартыненко, Ю. А. Бакаржиев//Матеріали міжн. конф. «Форум гірників – 2005», т. 2., Д.: НГУ, 12-14 жовтня.– 2005. – С. 250-257.
6. Забойные факторы алмазного бурения геологоразведочных скважин / Кожевников А. А., Гошовский С. В., Мартыненко И. И. и др. Д.: ЧП «Лири ЛТД», 2006. – 264 с.
7. Тепловое поле алмазной коронки при бурении с нестационарным режимом промывки скважины / Кожевников А. А., Гошовский С. В., Дреус А. Ю. и др. // Доповіді Національної академії наук України, № 2, 2007. – С. 62–67.
8. О термоупругом искажении профиля поверхности забоя скажины при алмазном бурении / Кожевников А. А., Вахалин Ю. Н., Вырвинский П. П. и др. // Сб. науч. трудов ИСМ НАН Украины «Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент – техника и технология его изготовления и применения». Вып. 8.– 2005. – С. 18 – 22.
9. Теплові режими робочих елементів породоруйнівного інструменту в умовах обмеженого теплообміну / Майстренко А. Л, Дутка В. А., Лукаш В. А. и др. // Матеріали V Межд.

- конф. «Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент – техника и технология его изготовления и применения». – К.: ИСМ НАН Украины, К 2002. – С. 105 – 107.
10. Вибір теплових режимів роботи твердосплавних елементів бурових коронок в умовах обмеженого охолодження на основі комп'ютерного моделювання / В.А. Дутка, В. М. Колоніцький, В. А. Лукаш и др. // Сб. науч. трудов ИСМ НАН Украины «Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент – техника и технология его изготовления и применения», вип.7.– 2004. – С. 25 – 29.
11. Беляев Н. М., Рядно А. А. Методы теории теплопроводности.– Ч. 2. – М.: Высш. школа, 1982. – 304 с.

Поступила 24.05.07.