УДК 622.416:537.86

Э.П. Фельдман, И.Г. Старикова

КИНЕТИКА ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА УГОЛЬНОГО ПЛАСТА С УЧЕТОМ ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ В ОКРУЖАЮЩИЕ СРЕДЫ

Институт физики горных процессов НАН Украины

Установлены закономерности кинетики распределения температуры по простиранию угольного пласта с учетом его теплового контакта с вмещающими породами и выработанным пространством.

Ключевые слова: эндогенный пожар, температура, коэффициент теплоотдачи, длина остывания

Эндогенные пожары на угольных предприятиях являются одним из сложных видов аварии. Самовозгорание угля в выработках угольных шахт происходит в полостях внезапных выбросов, а также в примыкающих к выработке целиках. Особенно опасны участки в зонах геологических нарушений. За последние 15 лет на шахтах Украины регистрируются от 6 до 36 эндогенных пожаров в год.

Существующие методы прогноза эндогенных пожаров угля, основанные на определении температуры поверхности угольного массива, концентрации в атмосфере углекислого газа и непредельных углеводородов, не позволяют однозначно указывать координаты очагов самовозгорания. Это, в свою очередь, снижает эффективность локализации и ликвидации очага горения угля [1].

Известные методы расчета температурного режима угольных пластов [2] либо вообще не учитывают теплопередачу в окружающую среду, либо учитывают лишь тепловой поток через границу раздела уголь–воздух. Между тем теплоотдача через границу уголь–вмещающие породы может существенно, а в случае пластов малой мощности – кардинально изменить температурный режим угольных пластов. Решающую роль в критерии возникновения эндогенного пожара в угольном пласте может сыграть такой физический параметр, как коэффициент теплоотдачи от угля в породу.

Цель данной работы – определение эффективности нагрева или охлаждения угольного пласта с учетом его теплопроводности и теплопередачи в окружающие породы и в выработанное пространство.

Предполагаемая работа является необходимым подготовительным этапом при решении проблемы самовозгорания угля и возникновения пожаров в горных выработках.

При построении математической модели будем исходить из известных упрощающих предположений [2].

1. Пласт угля представляет собой однородную среду с эффективной теплопроводностью λ, плотностью γ и удельной теплоемкостью C_γ.

2. В начальный момент времени температура в пласте равна T_0. Так как мощность пласта обычно мала (по сравнению с длиной остывания, см. далее), то неоднородностью температуры по поперечному сечению пласта пренебрегаем. Тем самым мы сводим проблему к задаче об одномерном распределении температуры по простиранию пласта.

3. Рассматриваемый пласт представляет собой полуограниченную среду по простиранию, а сверху и снизу пласт ограничен породой, температура которой предполагается неизменной и равной T_0.

4. Пласт граничит (при $x = 0$) с выработанным пространством. Температура рудничной атмосферы T_e в этом пространстве предполагается неизменной и либо большей T_0 (нагрев пласта), либо меньшей T_0 (охлаждение пласта).

Температура T пласта подчиняется уравнению теплопроводности:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (0 \le x < \infty), \tag{1}$$

где a – коэффициент температуропроводности угля.

Естественное граничное условие на бесконечности состоит в том, что:

$$\lim_{x \to \infty} T(x,t) = T_0 .$$

На груди забоя при $x = 0$ происходит теплопередача от угольного пласта в выработанное пространство. Согласно гипотезе Ньютона плотность теплового потока через границу пропорциональна разности температур приграничных слоев контактирующих сред:

$$q = \alpha_1 (T(0,t) - T_e) ,$$

где в нашем случае α_1 – коэффициент теплопередачи от угля в рудничную атмосферу.

Из теории теплопроводности известно, что плотность теплового потока пропорциональна градиенту температуры, т.е.

$$q = \lambda \frac{\partial T(x,t)}{\partial x} .$$

Приравнивая эти выражения на границе ($x = 0$), приходим к следующему граничному условию:

$$\frac{\lambda}{\alpha_1} \frac{\partial T(x,t)}{\partial x} \mathrm{I}_{x=0} = T(0,t) - T_e$$

Отношение коэффициента теплопроводности λ к коэффициенту теплоотдачи во внешнюю среду имеет размерность длины и может быть названо «длиной остывания», $l_1 = \lambda/\alpha_1$. Итак, граничное условие при $x = 0$ записывается в виде

$$l_1 \frac{\partial T(x,t)}{\partial x} \mathrm{I}_{x=0} = T(0,t) - T_e, \qquad (2)$$

где l_1 – длина остывания на границе уголь–воздух.

Учет теплопередачи от угля во вмещающие породы базируется на соотношении Ньютона

$$q = \alpha_2 (T_s - T_0),$$

где l_2 – длина остывания породы, T_s – температура угля на границе с породой, T_0 – температура породы, совпадающая, по предположению, с начальной температурой угольного пласта.

Согласно упрощающему предположению 2 в начале статьи $T_s = T(x, t)$. Поэтому полный тепловой поток через элемент боковой поверхности пласта (длиной dx по простиранию) равен

$$Q = \alpha_2 (T(x,t) - T_0) L \,\mathrm{d}x,$$

где L – периметр контура поперечного сечения пласта.

Масса угля этого элемента пласта равна

$$\gamma S \,\mathrm{d}x.$$

где γ – плотность угля, S – площадь поперечного сечения пласта.

Соответствующая скорость изменения температуры угля, обусловленная теплопередачей от угля в породу, составляет

$$\frac{\partial T_d}{\partial t} = -\frac{\alpha_2 (T(x,t) - T_0) L}{C_\gamma \gamma S}, \qquad (3)$$

где C_γ – удельная теплоемкость угля.

Добавочное изменение температуры, определяемое формулой (3), следует внести в правую часть уравнения теплопроводности (1). Таким образом, наши упрощающие предположения позволяют учесть теплоотдачу в окружающие породы не в форме граничных условий, а путем введения добавочного слагаемого в уравнение теплопроводности.

Получается, что добавочное изменение температуры пропорционально коэффициенту теплоотдачи и обратно пропорционально теплоемкости.

Итак, имеем трансформированное уравнение теплопроводности

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} - \frac{\alpha_2}{C_\gamma \gamma} \left[T(x,t) - T_0 \right] \frac{L}{S}. \qquad (4)$$

Преобразуем теперь уравнение (4) к безразмерной форме. С этой целью используем связь между коэффициентами температуропроводности и теплопроводности:

$$a = \frac{\lambda}{C_\gamma \gamma}.$$

Далее введем вторую длину остывания:

$$l_2 = \frac{\lambda}{\alpha_2}.$$

Отношение S/L для стандартной формы поперечного сечения пласта приближенно равно h, где h – половина мощности пласта. Координату x условимся измерять в единицах l_1, а время – в единицах l_1^2/a. После этого уравнение (4) приобретает вид (безразмерные время и координату обозначаем теми же буквами, что и размерные):

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} - b\left[T(x,t) - T_0\right] \quad (5)$$

Уравнение (5) содержит единственный безразмерный параметр

$$b = \frac{l_1^2}{l_2 h}, \quad (6)$$

а граничное условие параметров не содержит:

$$\left.\frac{\partial T(x,t)}{\partial x}\right|_{x=0} = T(0,t) - T_e \quad (7)$$

Уже на данном этапе, до конкретных асимптотического и численного анализов уравнения (5), можно отметить существенный результат, состоящий в том, что удалось объединить несколько теплофизических и геометрических характеристик в один параметр b. Величина этого параметра определяет относительное воздействие на температурный режим угольного пласта теплопередачи вдоль пласта, а также теплоотдачи в выработанное пространство и во вмещающие породы. Если $b << 1$, основной процесс – это теплопроводность вдоль простирания пласта, а при $b >> 1$ главенствует теплоотдача во вмещающие породы. В качественном плане это ясно из простых физических соображений. Например, длина остывания l_2 велика (а параметр b мал), если мал коэффициент теплоотдачи α_2, и тогда роль теплового обмена с породами мала.

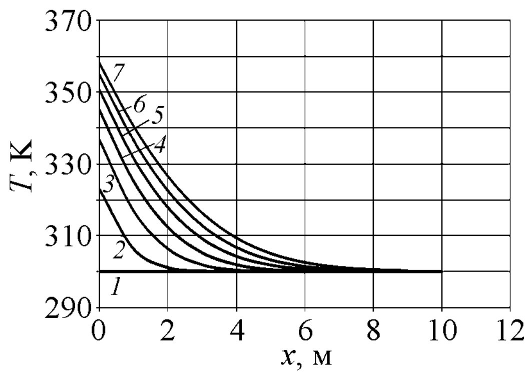
Но в количественном плане выявление параметра b дает возможность найти нужную меру соотношения между различными тепловыми процессами в изучаемой системе.

Решение уравнения (5) с учетом граничного условия (7) находится путем преобразования Лапласа по времени. Опуская промежуточные выкладки (впрочем, имеющие определенный методический интерес), приходим к следующей формуле:

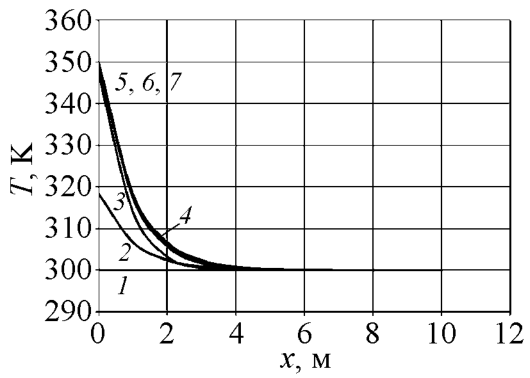
$$T(x,t) = \frac{T_e - T_0}{1+\sqrt{b}} e^{-\sqrt{b}\cdot x} + T_0 - \frac{T_e - T_0}{\pi} \int_0^{\infty} \frac{2ue^{-(u^2+b)t}(\sin ux + u\cos ux)}{(u^2+b)(u^2+1)} \mathrm{d}u \quad (8)$$

Можно проверить, что решение (8) удовлетворяет уравнению, граничным и начальным условиям. Ввиду быстрой сходимости интеграла формула (8) удобна для численных расчетов.

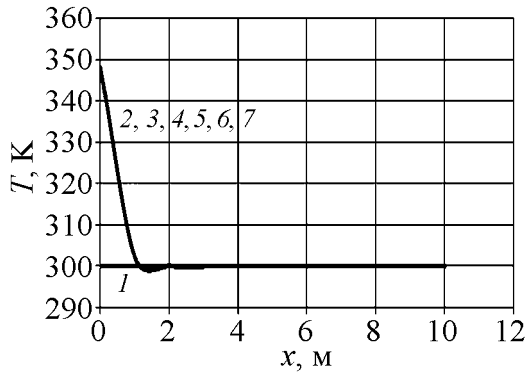
На рис. 1 приведены результаты расчетов зависимости температуры пласта от координаты для семи различных моментов времени. При построении этих графиков мы пользовались следующими экспериментальными данными, взятыми из источников [2, 3]: λ = 0,1–0,4 Вт/м·К, α_1 = 2 Вт/м^2·К, $\alpha_2 \approx$ 8 Вт/м^2·К, a = (1,1–2,8)·10^{-7} м^2/с, h = 0,5 м.



а



б



в

Рис. 1. Зависимость температуры от координаты для различных моментов времени t: *1* – 0, *2* – 1, *3* – 2, *4* – 3, *5* – 4, *6* – 5, *7* – 6; *а* – b = 0; *б* – 1; *в* – 10

Эти данные следует рассматривать как оценочные ввиду их значительного разброса из-за большого количества воздействующих геотехнических факторов. По грубой оценке длина остывания $l_1 \approx$ 1 м, длина остывания $l_2 \approx$ 10 см, масштаб времени l_1^2/a ~ 1 ч, центр распределения параметра b находится вблизи единицы. Температуры T_0 и T_e выбраны равными соответственно 300 и 400 К.

Рассмотрение графиков показывает, что продвижение температурного фронта во всех случаях т. е. для всех b, происходит вначале весьма быстро, а затем замедляется. При увеличении параметра b, т. е. при увеличении коэффициента теплоотдачи во вмещающие породы, либо уменьшении коэффициента теплоотдачи в рудничную атмосферу, либо уменьшении мощности пласта, зона нагрева уменьшается, прижимаясь к источнику нагрева. (Аналогичное явление происходит при охлаждении). Так, при $b = 0$ эффективно разогревается область толщиной ~ 7 м, при $b = 1$ – ~ 4 м, при $b = 10$ – ~ 1 м. Кроме того, при $b >> 1$ фронт нагрева после часового интервала стабилизируется, т. е. не продвигается в глубь пласта.

Важно отметить, что сопоставление расчетных графиков зависимости температуры от координат и от времени с данными измерений температуры позволит определить параметр b, а следовательно, найти, например, коэффициент теплоотдачи от угля в породу α_2, который очень трудно определить другими методами.

1. *Стариков Г.П.* Научные основы метода прогноза очагов самовозгорания угля / Г.П. Стариков, В.В. Завражин, И.Г. Старикова, В.Н. Чистоклетов, А.Д. Меляков // Физико-технические проблемы горного производства. – 2006. – Вып. 9. – С. 102–107.
2. *Глузберг Е.И.* Теоретические основы прогноза и профилактики шахтных эндогенных пожаров / Е.И. Глузберг. – М.: Недра, 1986. – 161 с.
3. *Греков С.П.* Расчет параметров тепло- и массообмена в самонагревающемся угольном скоплении / С.П. Греков, И.Н. Зинченко // Горноспасательное дело. – 2007. – Вып.44. – С. 26–33.

Е.П. Фельдман, І. Г. Старікова

КІНЕТИКА ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМУ ВУГІЛЬНОГО ПЛАСТА З УРАХУВАННЯМ ТЕПЛОПЕРЕДАЧІ В НАВКОЛИШНІ СЕРЕДОВИЩА

Встановлено закономірності кінетики розподілу температури по простяганню вугільного пласта з врахуванням його теплового контакту з вміщаючими породами і виробленим простором.

Ключові слова: ендогенна пожежа, температура, коефіцієнт тепловіддачі, довжина остигання

E.P. Feldman, I.G. Starikova

SPATIAL-TEMPORAL TEMPERATURE REGIME IN A COAL SEAM WITH HEAT TRANSFER INTO ENVIRONMENT

Parameters of spatial-temporal temperature distribution along the strike of a coal seam are determined taking into account its thermal contact with bearing rocks and gob.

Keywords: spontaneous mine fire, temperature, heat transfer coefficient, cooling length

Статья поступила в редакцию 28 января 2010 года