

УДК 622.822.225

Е.П. Фельдман, Н.О. Калугіна, О.В. Чеснокова

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ТЕПЛОПЕРЕНОСУ У ВУГІЛЬНОМУ ПЛАСТІ НА ВЕЛИКИХ ГЛИБИНАХ

Институт физики горных процессов НАН Украины,
49600, г. Днепр ул. Симферопольская, 2-а.

Побудовано математичну модель самонагрівання ділянки вугільного масиву, віддаленої від вибою. Модель побудовано для випадку щільного контакту вугілля з породою на великих глибинах розташування пласта і умов, коли теплота хімічної реакції окислення вугілля передається в навколишнє середовище (уміщальні породи) тільки за механізмом теплопровідності. Густина теплового потоку з вугілля в породу визначається різницею приконтатних температур вугілля і породи за законом Ньютона. Аналіз кінетики теплопереносу у вугільному пласті дозволить дослідити процес його самонагрівання і прогнозувати пожежонебезпеку на великих глибинах.

Ключові слова: вугільний пласт, кінетика теплопереносу, самонагрівання.

Самонагрівання вугілля як в щільному масиві, так і в розпушеному вигляді, відбувається внаслідок екзотермічної реакції окислення вуглеводневої маси. Згідно літературних даних [1, 2, 3], тепловий ефект цієї реакції не нижче $q = 13 \cdot 10^6$ Дж у розрахунку на кубометр кисню, що вступив у реакцію. На відміну від вугілля, відбитого від масиву, до якого забезпечений вільний доступ кисню, вугілля в пласті або у цілику, оточено уміщальними породами, і доступ кисню до такого вугілля можливий лише за рахунок фільтрації повітря через фільтраційні канали як в уміщальних породах, так і в самому вугіллі.

Для скільки-небудь помітного розігрівання такого компактного вугілля джерело кисню (повітря) повинно знаходитися поблизу пласта. Таким джерелом може бути [1], наприклад, вентиляційний штрек, розташований на сусідньому з пластом горизонті, що проходить вприсічку з пластом. Іншим джерелом кисню може бути область крупноамплітудного геологічного порушення, наприклад, насув. Для пласта-супутника джерелом кисню може служити пласт, що відпрацьовується [4, 5]. У всіх цих випадках об'ємну частку кисню в джерелі можна вважати постійною величиною, $c_0 \approx 0,21$.

Тепловий баланс вугільного масиву регулюється співвідношенням тепловиділення і тепловідведення (тепловіддачі). Для компактного вугільного масиву на великих глибинах основну роль у тепловідведенні грає теплопередача від вугілля в уміщальні породи [1, 6]. Роль теплопровідності вугільного масиву і конвективного теплообміну незначна. Для крайової ділянки вугільного пласта, що відпрацьовується, на перший план виходить тепло- і масоперенос поблизу виробленого простору. Цей випадок детально розглянуто в [6]. У даній роботі розглянемо самонагрівання тих ділянок пласта, які віддалені від вибою.

Тепловий потік від вугілля до уміщальних порід описується законом Ньютона, згідно якому цей потік пропорційний різниці температур вугілля і породи.

Зазвичай [1, 6] вважається, що температура уміщальної породи однорідна, тобто вона однакова у всіх ділянках породи. Насправді у рівності Ньютона мова йде про стрибок температури при переході через поверхню контакту вугілля з породою, тобто про температури вугілля і породи у безпосередній близькості до поверхні їх розділу.

Визначення приконтатних температур вимагає, взагалі кажучи, рішення рівнянь теплопровідності як для уміщальної породи, так і для вугілля. Для відносно тонких пластів можна вважати температуру вугілля однорідною у напрямку поперек до простягання. У такому випадку, можна обмежитися аналізом рівняння теплопровідності тільки для породи. Товщину шару породи вважаємо нескінченною, оскільки мова йтиме про великі глибини залягання пласта.

Звичайно, відчутний розігрів і, тим більше, ендегенна пожежа на великих глибинах - явище порівняно рідке, обумовлене накладанням ряду теплофізичних і механічних характеристик вугілля, породи і геотехнічних факторів. Однак такі явища зустрічаються і супроводжуються матеріальними втратами і людськими жертвами.

Аналіз моделі, викладеної нижче, дозволить оцінити ступінь впливу і пріоритетність зазначених параметрів і характеристик в динаміці самонагрівання, а також визначити тривалість цього процесу, зокрема час досягнення критичної температури самозаймання вугілля в пожежонебезпечній ділянці пласта.

Будемо вважати, що джерело кисню з об'ємною часткою c_0 знаходиться на визначеній відстані l_0 від досліджуваної ділянки вугільного пласта. Кисень надходить у пласт по фільтраційних каналах, в уміщальних породах і самому вугіллі. Середньозважений коефіцієнт фільтрації позначимо через D_f . Час «доставки» кисню від джерела до вугілля

$$t_d = \frac{l_0^2}{D_f}. \quad (1)$$

Відповідно, швидкість зміни концентрації c кисню у вугіллі за рахунок надходження від джерела s :

$$\left. \frac{dc}{dt} \right|_s = \frac{c_0 - c}{t_\alpha}. \quad (2)$$

Для грубої оцінки часу «доставки» можна прийняти $l_0 \sim 1\text{м}$, $D_f \sim 3 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{сек}$ [7], тому t_d порядку десяти годин.

Зменшення концентрації кисню, «доставленого» до осередку самонагрівання, відбувається в результаті хімічної реакції окислення вугілля. Встановлено [2], що на температурному інтервалі від 20° до 150°C ця реакція - першого порядку. Це означає, що швидкість сорбції кисню вугіллям пропорційна концентрації (об'ємної частці) кисню в порожнинах вугільного масиву [1]:

$$\left. \frac{dc}{dt} \right|_0 = -k(T)c, \quad (3)$$

де $k(T)$ – константа швидкості сорбції кисню, сильно, (експоненціально) згідно із законом Арреніуса [2, 8, 9] залежить від температури (T -абсолютна температура вугілля), t - час.

У цілому, швидкість зміни концентрації кисню в нашій моделі визначається сумою $\left. \frac{dc}{dt} \right|_s$ і $\left. \frac{dc}{dt} \right|_0$:

$$\frac{dc}{dt} = \frac{c_0 - c(t)}{t_\alpha} - k(T)c(t). \quad (4)$$

Далі, необхідно записати рівняння для визначення температури вугілля і для температури уміщальної породи. З цією метою, зробимо ряд спрощуючих припущень. Будемо вважати, що теплоперенос відбувається тільки поперек пласта (вісь z), тобто знехтуємо теплопереносом по простяганню пласта. Понад те, з огляду на порівняльну тонкість пласта (його товщина $h \sim 1\text{м}$) можна вважати температуру вугілля однаковою по товщині пласта. Отже, можна обмежитися описом нагріву і охолодження пласта в цілому, не виписуючи рівняння теплопровідності вугілля.

$$\left. \frac{dT}{dt} \right|_{ox} = \frac{qc(t)k(T)\Pi}{C_v}. \quad (5)$$

Пустотність масиву Π введена тому, що кисень міститься лише в порожнинах вугілля, а тепловий ефект реакції розраховується на одиницю об'єму вугільного масиву; C_v - питома теплоємність вугілля у розрахунку на одиницю його об'єму.

Як вже зазначалося раніше, відведення тепла від вугільної маси здійснюється за рахунок віддачі теплової енергії від вугілля в породу через їх контактну поверхню. Густина теплового потоку j пропорційна, згідно Ньютону, стрибку температури при переході через поверхню контакту:

$$j(t) = \alpha(T(t) - T_r(t)), \quad (6)$$

де $T_r(t)$ - температура уміщальної породи безпосередньо на поверхні контакту, α - коефіцієнт тепловіддачі від вугілля до породи, що залежить від фізичних характеристик середовищ, що контактують, а також від стискаючих напруг на контакті, тобто від гірського тиску. За порядком величини коефіцієнт тепловіддачі дорівнює напівсумі теплопровідностей середовищ, що контактують, ділений на товщину перехідного шару від вугілля до породи.

Густина потоку тепла визначається швидкістю зменшення температури вугілля у досліджуваній ділянці:

$$\frac{dT(t)}{dt} = -\frac{2j(t)}{C_v h}, \quad (7)$$

де знак «мінус» означає охолодження, а коефіцієнт 2 враховує тепловіддачу в обидві сторони пласта, покрівлю і підосхву. Підсумовуючи нагрів (5) і охолодження (7), приходимо до такої формули для швидкості зміни температури:

$$\frac{dT(t)}{dt} = \frac{q\Pi c(t)k(T)}{C_v} - \frac{2j(t)}{C_v h}. \quad (8)$$

Використання закону Ньютона дає в результаті наступне рівняння:

$$\frac{dT(t)}{dt} = \frac{q\Pi c(t)k(T)}{C_v} - \frac{2\alpha[T(t) - T_r(t)]}{C_v h}. \quad (9)$$

Для знаходження концентрації $c(t)$, температури вугілля $T(t)$ і приконтактної температури породи T_r , необхідно, крім (4) і (9) додати ще одне рівняння. Таким є рівняння теплопровідності для уміщальної породи

$$\frac{\partial T_r(z,t)}{\partial t} = a_r \frac{\partial^2 T_r(z,t)}{\partial z^2}. \quad (10)$$

Температура $T_r(z,t)$ розглядається на просторовому інтервалі $0 \leq z < \infty$, причому $z = 0$ відповідає контактній поверхні вугілля і породи, так що, за визначенням

$$T_r(0,t) \equiv T(t). \quad (11)$$

Густина теплового потоку на межі виражається через похідну від температури по координаті z , взяту при $z = 0$

$$j(t) = \lambda_r \left. \frac{\partial T_r(z,t)}{\partial z} \right|_{z=0}, \quad (12)$$

де λ_r - коефіцієнт теплопровідності породи.

Виявляється, що для знаходження похідної $\left. \frac{\partial T_r(z,t)}{\partial z} \right|_{z=0}$ не обов'язково вирішувати рівняння (10). Досить використовувати відоме з теорії рівнянь

параболічного типу [10], так зване «імпедансне» співвідношення, що зв'язує зазначену похідну з граничним значенням температури $T_r(t) \equiv T_r(0, t)$. Стосовно нашої задачі це співвідношення має вигляд

$$\left. \frac{\partial T_r(z, t)}{\partial z} \right|_{z=0} = \frac{1}{\sqrt{\pi a_r}} \frac{d}{dt} \int_0^t \frac{T_r(\tau) - T_0}{\sqrt{t - \tau}} d\tau, \quad (13)$$

де a_r – коефіцієнт температуропровідності породи, T_0 – температура породи на віддаленій від поверхні ділянці, вона ж – початкова температура вугілля і породи. Підставляючи (13) в (12) отримуємо формулу для густини теплового потоку через поверхню розділу вугілля і породи

$$j(t) = \frac{\lambda_r}{\sqrt{\pi a_r}} \frac{d}{dt} \int_0^t \frac{T_r(\tau) - T_0}{\sqrt{t - \tau}} d\tau. \quad (14)$$

Прирівнюючи праві частини рівностей (6) і (14), отримуємо шукане рівняння зв'язку $T(t)$ і $T_r(t)$:

$$T(t) - T_r(t) = \frac{\lambda_r}{\sqrt{\pi a_r} \cdot \alpha} \frac{d}{dt} \int_0^t \frac{T_r(\tau) - T_0}{\sqrt{t - \tau}} d\tau. \quad (15)$$

Рівняння (4), (9) і (15) з трьома невідомими $c(t)$, $T(t)$ і $T_r(t)$ і початковими умовами $c(0) = 0$, $T(0) = T_r(0) = T_0$ дають можливість дослідити розвиток процесу самонагрівання пожежонебезпечної ділянки вугільного пласта.

Таке дослідження надасть можливість виявити, який температурний режим реалізується у вугільному пласті при даних умовах, як він змінюється у часі. Це дозволить прогнозувати процес переходу самонагрівання у самозаймання і виявляти можливість формування осередку ендегенної пожежі у вугільних пластах і породних відвалах.

1. Глузберг Е.Н. Теоретические основы прогноза и профилактики шахтных эндогенных пожаров. М. Недра, 1986, 161с.
2. Sian Zhang, Ting Ren, Yuntao Liang, Zhongwei Wang // Fuel, 2016, v.102, P.80. DOI:10.3892/mm.2015.3167.
3. Веселовский В.С., Виноградова Л.П., Орлеанская Г.Л. Физические основы самовозгорания угля и руд. М.: Наука, 1972, 141с.
4. Захаров Е.И., Качурин Н.М. Самовозгорание углей. Монография. Тула, Из-во ТулГУ, 2010, 318с.
5. Ran V.K. Singh. // Procedia Engineering. 2013. V.62. P.78. DOI: 10.1016/j.proeng.2013.08.046.
6. Фельдман Э.П., Старикова И.Г. ХТТ. 2013, №1, С. 16. DOI: 10.7868/S0023117713010039.
7. Щербань А.Н., Кремнев О.А. Исследование коэффициентов теплопроводности в моделях горных выработок. Киев. Из-во АН УССР, 1951. 77с.

8. Hooman K., Maas U. // Fire Safety Journal. 2014. V .67. P.107. DOI: 10.1016/j.firesaf.2014.05.011.
9. Zarrouk S.J., O'Sullivan M.J. // Chemical Engineering Journal. 2006. V.119, P.83. DOI: 10.1615/HeatTransRes.2018020029.
10. Араманович И.Г, Левин В.И. Уравнения математической физики. М.: Наука, 1969. 288 с.

Э.П. Фельдман, Н.А. Калугина, О.В. Чеснокова

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТЕПЛОПЕРЕНОСА В УГОЛЬНОМ ПЛАСТЕ НА БОЛЬШИХ ГЛУБИНАХ

Построена математическая модель самонагревания участка угольного массива, удаленного от забоя. Модель построена для случая плотного контакта угля с породой на больших глубинах расположения пласта и условий, когда теплота химической реакции окисления угля передается в окружающую среду (вмещающие породы) только по механизму теплопроводности. Плотность теплового потока из угля в породу определяется, разностью приконтактных температур угля и породы по закону Ньютона. Анализ кинетики теплопереноса в угольном пласте позволит исследовать процесс его самонагревания и прогнозировать пожароопасность на больших глубинах.

Ключевые слова: угольный пласт, кинетика теплопереноса, самонагревание

E.P. Feldman, N.A. Kalugina, O.V. Chesnokova

MATHEMATICAL MODEL OF HEAT TRANSFER IN A COAL BED ON THE GREAT DEPTH

A mathematical model of self-heating of a coal mass section remote from the bottom was constructed. The model was built for the case of close contact of coal with rock at great depths of the reservoir location and the conditions when the heat of a chemical reaction of coal oxidation is transferred to the environment (host rocks) only by the mechanism of heat conduction. The density of heat flow from coal to rock is determined by the difference in contact temperatures between coal and rock according to Newton's law. Analysis of the kinetics of heat transfer in the coal bed will make it possible to investigate the process of its self-heating and to predict the fire hazard at great depths.

Keywords: coal bed, kinetics of heat transfer, self-heating