

УМОВИ СТАЦІОНАРНОСТІ ПРОЦЕСУ  
ГОРІННЯ У ПОРИСТОМУ СЕРЕДОВИЩІ© 2009 Брик Д.В., к.т.н.,  
Стефаник Ю.В., д.т.н.  
(ІТГК НАНУ)

*Розглянуто можливості використання покладів горючих копалин шляхом їх підземної термічної переробки. Запропоновано математичну модель стаціонарного процесу горіння на прикладі вугілля. Показано, що в ідеальних умовах теплова потужність залежить від розмірів зони горіння та вмісту у ній горючих компонентів.*

*There is considered the possibility of utilization of underground fuel deposits usury the thermic influence. One suggest the mathematical model of such stationary combustion process on the example of coal. There is determined that in ideal conditions the thermal capacity is determined by the combustion zone dimensions us well as by the combustible components content.*

Ключові слова: геотехнологія, вуглеводні, вогнище горіння, стаціонарний режим, вугілля, пласт.

При геотехнологічних способах вилучення вуглеводнів з надр Землі, наприклад, за допомогою підземної газифікації вугілля (ПГВ) або при теплових методах вилучення нафти з нафтового пласта важливо знати, як проходить процес горіння в підземних умовах у пористому середовищі пласта. Так, наприклад, стосовно нафтового пласта для вилучення значної кількості нафти, яка залишається у надрах землі після виробки нафтових покладів традиційними методами, використовують теплові методи видобутку нафти і роль таких методів у перспективі буде зростати [1]. Одним із напрямків теплового методу підвищення нафтовіддачі є дія на пласт внутрішньопластовим фронтом горіння. Ще у 1934 р. [2] в колишньому СРСР була спроба здійснити теплову дію на нафтовий пласт його газифікацією за допомогою запалювання нафти у родовищі. Створення і пересування вогнища горіння за рахунок часткового спалювання нафти у пластових умовах сприяє більш повному витісненню нафти з пористих пластів. Локальне нагрівання пласта здійснюється, звичайно, створенням підземного вогнища горіння.

Для підвищення нафтовіддачі нафтового пласта застосовується кероване підземне вогнище горіння. При цьому зона горіння у пористому середовищі при нагнітанні повітря у свердловину розповсюджується досить повільно навколо призабійної зони цієї свердловини в глибину пласта.

Але при генеруванні тепла в пласт необхідно знати способи керування пересувним вогнищем горіння (джерелом тепла) у пористому середовищі [2]. Тому як для ПГВ, так і для нафтовіддачі доцільно з'ясувати характер розповсюдження гарячої зони у вугільному чи нафтовому пласті з врахуванням немінучих теплових втрат.

Горіння у пласті суттєво відрізняється від горіння в атмосфері. Гірські породи, які вміщують горючий компонент (вугілля, нафту, бітум, сланці) є негорючим баластом в зоні горіння і тому ініціювання горіння в підземних умовах вимагає їх попереднього нагріву зовнішнім джерелом тепла до температури займання палива, що міститься у них, з подальшим нагнітанням окиснювача (повітря або кисню) у зону пласта для підтримки процесу горіння. Теплова

потужність підземного вогнища горіння регулюється подачею реагенту в зону горіння. Для реалізації прикладних завдань, наприклад при підземному горінні нафти, бітумів або при підземній газифікації твердих горючих копалин (вугілля, сланців і т.д.) необхідно знати параметри стаціонарного вогнища горіння, а саме:

- взаємозв'язок між температурою, яка встановлюється після досягнення стаціонарного режиму, і тепловою потужністю вогнища горіння;
- конвективну швидкість вигорання пластового палива;
- необхідну кількість окиснювача, що нагнітається у зону горіння при умові, що вся кількість реагенту, який подається, бере участь у підземному горінні.

Умова повної витрати окиснювача потрібна для розрахунку його мінімальної кількості, необхідної, щоб довести наперед визначений об'єм твердого палива до температури самозаймання з врахуванням теплових втрат на границях розглянутого об'єму.

Верхня межа теплової потужності підземного вогнища горіння обмежується законами кінетики процесу горіння. За цією межею збільшення витрат окиснювача неефективне, оскільки значна його частина буде проскакувати крізь зону горіння, не встигаючи взяти участь у процесі горіння. Стаціонарне вогнище горіння має місце при збалансуванні тепловиділення  $Q_1$  і теплових втрат  $Q_2$  у зоні горіння. Якщо  $Q_1 > Q_2$ , тоді температура у зоні підземного горіння зростає, а при  $Q_1 < Q_2$  – поступово знижується, що призводить до припинення процесу горіння.

У потоці окиснювача – кисню, повітря або їх суміші з водяною парою та іншими реагентами підземне вогнище горіння буде пересуватися за потоком газу внаслідок двох причин:

- поступового вигорання нерухомого палива і проникнення окиснювача у наступні шари породи;
- конвективного переносу тепла та нагріву порід гарячими продуктами горіння.

Первинною, більш простою, задачею буде розрахунок умов стаціонарного горіння. Нерухоме вогнище горіння у пористому середовищі (у пісковиках, пісках, тріщинуватих породах) можна створити шляхом нагнітання окиснювача або горючої суміші у це середовище, яке нагріте до температури займання. Наближене значення температури, яка встановиться у центрі нерухомого вогнища горіння, можна обчислити, якщо вирішити нескладну просторово-симетричну задачу рівномірного згорання палива в об'ємі пористої кулі радіусом  $r_0$  в умовах заданої постійної питомої теплової потужності  $W_0$ . Тоді загальне тепловиділення  $Q$ , яке залежить від об'єму зони горіння, тобто від радіуса  $r < r_0$ , буде:

$$Q = V \cdot W_0 = \frac{4}{3} \pi r^3 \cdot W_0 \quad (1)$$

де  $V$  – об'єм кулеподібної зони спалювання.

Стаціонарні теплопровідні втрати через поверхню кулі радіусом  $r < r_0$  визначаються так:

$$Q_2 = 4\pi r^2 \lambda \frac{dt}{dr}, \quad (2)$$

де  $\lambda$  – теплопровідність матеріалу кулі, кДж/м·год·град.;  $t$  – температура кулі радіусом  $r$ , °С.

В умовах стаціонарності процесу тепловтрати будуть рівні тепловиділенню в об'ємі кулі  $r < r_0$ . Тоді, прирівнюючи рівняння (1) та (2), отримуємо диференціальне рівняння, яке характеризує поширення фронту горіння:

$$\frac{1}{3} r W_0 \cdot dr = \lambda \cdot dt. \quad (3)$$

Інтегруючи рівняння (3) в межах від  $r = 0$  до  $r = r_0$ , знаходимо температуру в центрі кулі  $t_r$ , а саме:

$$t_r - t_0 = \frac{W_0 r_0^2}{6\lambda}, \quad (4)$$

де  $t_0$  – зовнішня температура поверхні кулі, яка приймається рівною 20 °С.

З рівняння (4) питома теплова потужність  $W_0$ , яка достатня для ініціювання самозапалювання, становитиме:

$$W_0 = \frac{6\lambda(t_r - t_0)}{r_0^2}, \quad (5)$$

де  $t_r$  – температура у центрі кулі, яку приймаємо рівною температурі самозапалювання вугілля (~440 °С).

В умовах обмеженої питомої теплової потужності  $W_0$  температура, яка встановиться в центрі кулі, пропорційна квадратові її радіуса. Цим можна пояснити явище самозапалювання пористого палива, накопиченого у великих об'ємах.

Розглянемо деякі конкретні приклади.

**А.** Обчислимо  $W_0$  для відходів вуглевидобутку, заскладованих у териконах з

різним вмістом породи і кускового середньометаморфізованого вугілля, для якого коефіцієнт теплопровідності, в середньому рівний  $\lambda_{\text{сер}}^{\text{вуг}} = 0,42$  кДж/м·год·град. [3], але для породи  $\lambda_{\text{сер}}^{\text{пор}} = 4,8$  кДж/м·год·град. [3]. Тоді середній коефіцієнт теплопровідності териконів ( $\lambda_{\text{сер}}^{\text{тер}}$ ) з різним вмістом вугілля і породи обчислюється по залежності:

$$\lambda_{\text{сер}}^{\text{тер}} = \lambda_{\text{сер}}^{\text{вуг}} \cdot n_{\text{вуг}} + \lambda_{\text{сер}}^{\text{пор}} \cdot n_{\text{пор}} \quad (6)$$

де  $n_{\text{вуг}}$ , % – частка вугілля у териконі,  $n_{\text{пор}}$ , % – частка породи у териконі.

Коли частка вугілля у териконі складає 10, 20 або 30 %, то підставивши ці дані у формулу (6) отримаємо значення середнього коефіцієнту теплопровідності (кДж/м××год·град.) – відповідно 4,36; 3,92; 3,49. Результати обчислень  $W_0^{\text{тер}}$  (для териконів) за формулою (5) показані у табл. 1.

Таблиця 1

Питома теплова потужність ( $W_0$ ) для відходів вуглевидобутку, заскладованих у териконах

Радіус $r_0$ , м	$W_0^{\text{тер}}$ , кДж/м <sup>3</sup> ·год.		
	10 % вугілля + 90 % породи ( $\lambda_{\text{сер}}^{\text{тер}} = 4,36$ )	20 % вугілля + 80 % породи ( $\lambda_{\text{сер}}^{\text{тер}} = 3,92$ )	30 % вугілля + 70 % породи ( $\lambda_{\text{сер}}^{\text{тер}} = 3,49$ )
100	1,10	0,99	0,858
50	4,39	3,95	3,52
25	20,93	18,82	16,75
10	109,9	98,8	87,9

Якщо температура самозаймання вугілля  $t_b = t_r = 440$  °С, а зовнішня температура  $t_0 = 20$  °С, то тоді для ініціювання самозапалювання терикону радіусом 10 м, у якому 30 % вугілля і 70 % породи достатньо буде питомої теплової потужності 87,9 кДж/м<sup>3</sup>·год. або 0,0879 кДж/л·год.

**Б.** Значення  $W_0$  для підземних умов, наприклад при підземній газифікації вугілля, що знаходиться у пласті (цілику) з  $\lambda_{\text{цел}}^{\text{вуг}} = 0,94$  кДж/м·год·град. [3] і для вугілля, яке заскладоване у купі з

$\lambda_{\text{кускове}}^{\text{вуг}} = 0,42$  кДж/м·год·град. [3] (середні значення) наведені у табл. 2.

У підземних умовах радіус  $r_0$  гарячої зони буде у 10-20 разів меншим, ніж для териконів. Тому для підтримання процесу горіння вугілля буде потрібна питома теплова потужність осередку горіння порядку  $W_0 = 2,369$  кДж/л·год. А для вугілля, яке знаходиться на складі у штабелях (купах) при  $r_0 = 25$  м,  $W_0 = 2,02$  кДж/м<sup>3</sup>·год. або 0,002 кДж/л·год.

Таблиця 2

**Питома теплова потужність ( $W_0$ ) для вугілля у пласті (цілику) і кускового (заскладованого)**

Радіус, $r_0$ , м	Питома теплова потужність, $W_0$ , кДж/м <sup>3</sup> ·год.	
	для вугілля у пласті (цілику)	для вугілля заскладованого
50	0,95	0,42
25	4,5	2,02
10	23,7	10,6
5	94,8	42,3
1	2368,8	1058,4
0,5	9476,0	4233,6
0,05 <sup>с*</sup>	–	$4,23 \cdot 10^3$

<sup>с\*</sup>В лабораторних умовах газифікації при  $r_0 \approx 0,05$  м для підтримання процесу стійкого горіння буде потрібною значно більша теплова потужність вугілля – порядку  $W_0 = 423$  кДж/л·год.

В. У випадку інших температур вугільного пласта (цілика) відповідно буде іншим і його середній коефіцієнт теплопровідності  $\lambda_{\text{сеп}}^t$  [3, 4]. Наприклад для температур 300, 700, 1110 °С його можна взяти з [3] або обчислити згідно запропонованої авторами формули (дійсна для цих температур  $\pm 50$  °С).

$$\lambda_{\text{сеп}}^t = 0,1641(t/1000)^2 + 0,0897(t/1000) + 0,1113 \quad (7)$$

Питома теплова потужність вугілля у пласті в залежності від його температури приведена у табл. 3 при радіусі зони горіння 1 м.

Таблиця 3

**Питома теплова потужність вугілля у пласті (цілику) в залежності від його температури °С**

Температура, °С	$\lambda_{\text{сеп}}$ , кДж/м·год·град.	$W_0$ , кДж/м <sup>3</sup> ·год.
300	0,641	1077
700	1,06	4325
1100	1,71	11081

Якщо ж температура у зоні горіння повинна підтримуватися на рівні 1100 °С, то тоді  $W_0 = 11081$  кДж/м<sup>3</sup>·год. або 11,081 кДж/л·год. Це – нижня межа, оскільки у формулі враховані лише теплопровідні втрати. Конвективні тепловтрати можуть перевищувати теплопровідні у декілька разів, і тоді граничне значення питомого тепловиділення може зростати до  $W_0 = 60-80$  кДж/л·год.

Хоч реалізація ідеального кулеподібного вогнища горіння недосяжна, наведений приклад наглядно показує, що об'єм або радіус підземного вогнища горіння суттєво впливає на його стійкість і на температуру, яка встановлюється в умовах заданого

питомого тепловиділення. Тому коректне моделювання підземного вогнища горіння одночасно за розмірами, температурою та хімічними процесами є неможливим до здійснення. Із аналізу наведених прикладів витікає, що для утворення стійкого підземного вогнища горіння необхідно створити, за рахунок зовнішніх джерел тепла, якомога більшу, попередньо нагріту, призабіяну зону свердловини.

**Бібліографічний список**

1. Чекалюк Э.Б., Оганов К.А. *Тепловые методы повышения отдачи нефтяных*

залежей. – Киев: Наукова думка, 1979. – 208 с.

2. **Оганов К.А.** Основы теплового воздействия на нефтяной пласт. – М.: Недра, 1967. – 203 с.

3. **Агроскин А.А.** Тепловые и электрические свойства углей. – М.: Металлургиздат, 1959. – 265 с.

4. **Гофман М.В.** Прикладная химия твердого топлива. – Металлургиздат, 1963. – 597 с.

Рукопись поступила в редакцию 25.12.2008