



**С. П. ГРЕКОВ,**  
доктор техн. наук  
(НИИГД «Респиратор»)



**В. П. ОРЛИКОВА,**  
инж.  
(НИИГД «Респиратор»)

При изучении самовозгорания скопления органических материалов (угля, торфа и др.) исходят из того, что они состоят из зернистого материала, имеющего частицы разных фракций. Хотя органический материал окисляется при любом контакте с кислородом воздуха, самовозгорание наблюдается не всегда. Это объясняется тем, что самовозгорание в скоплении материала происходит отдельными сравнительно небольшими очагами, между которыми материал может быть весьма мало нагрет, или имеет первоначальную температуру, либо температуру окружающего массива. Подобный характер самовозгорания обусловлен неоднородностью фильтрационных, сорбционных и теплопроводных свойств материала в скоплении. Кроме того, различие усло-

УДК 622.822.22:536.24

# Особенности теплоотдачи при очаговом самонагревании органических материалов

Рассмотрен процесс самовозгорания органических зернистых материалов в скоплении их частиц разного размера. Проанализированы методики определения коэффициентов теплообмена при очаговом самонагревании материала.

**Ключевые слова:** самовозгорание, коэффициент теплообмена, органические материалы, очаговое самонагревание.

**Контактная информация:** orlikova.69@yandex.ru

вий взаимодействия с окружающей средой участков, расположенных на поверхности скопления и внутри него, создает естественную неоднородность температурного поля. Так как интенсивность окисления и, следовательно, интенсивность тепловыделения находятся в прямой зависимости от температуры, то участки скопления, где температура выше, имеют тенденцию быстрее самонагреваться, чем участки с более низкой температурой (при тех же условиях контакта с кислородом воздуха). В результате усиливается неравномерность температурного поля.

Даже самая незначительная разница в температуре отдельных участков скопления может со временем стать причиной возникновения отдельных очагов интенсивного разогрева с температурой, превосходящей температуру в остальной части скопления на несколько десятков градусов. Но в силу естественного теплообмена температура в очагах интенсивного разогрева стремится к снижению до температуры окружающей части скопления. При этом интенсивность теплоотдачи из очага так же, как и тепловыделение в нем, находится в прямой зависимости от температуры. Указанная зависимость, в отличие от генерации теплоты, близка к линейной. Следовательно, дальнейшее развитие таких очагов зависит от соотношения скоростей изменения тепловыделения (генерации теплоты) и теплоотдачи (рассеивания теплоты).

**Цель работы** – изучение процесса самовозгорания пожароопасных органических материалов зернистого характера с использованием методов исследования теплообмена скопления угля с окружающей средой.

Обычно значения коэффициентов теплоотдачи при естественной и вынужденной конвекции вычисляют с помощью хорошо известных в научной литературе по теплопередаче соотношений, связывающих безразмерные критерии, характеризующие интенсивность теплообмена на границе газ–твердое вещество [1–3]. При этом, как правило, полагают, что объем пространства, в котором происходит теплообмен, превышает размеры тела, около которого возникает и развивается свободное движение газа. Тогда коэф-

коэффициент теплоотдачи  $\alpha$  вычисляют с помощью критериального уравнения [3]

$$Nu = c(Ra)^n, \quad (1)$$

где  $Nu$  – число Нуссельта;

$Ra$  – число Рэлея;

$$Ra = [g/(va)]d^3 (RT_0/E), \quad (2)$$

$g$  – ускорение силы тяжести, м/с<sup>2</sup>;

$v$  – кинематическая вязкость воздуха, м<sup>2</sup>/с;

$a$  – температуропроводность воздуха, м<sup>2</sup>/с;

$d$  – характерный размер тела, м;

$R$  – универсальная газовая постоянная, Дж/(моль·К);

$T_0$  – температура окружающей среды, К;

$E$  – энергия активации, Дж/моль;

$c$  и  $n$  – коэффициенты, равные 0,54 и 0,25, соответственно при значениях  $Ra$  в пределах  $5 \cdot 10^2 - 2 \cdot 10^7$ .

Используя формулу (1),  $\alpha$ , Вт/(м<sup>2</sup>·К), находят по формуле

$$\alpha = Nu\lambda_B/d, \quad (3)$$

где  $\lambda_B$  – коэффициент теплопроводности воздуха, Вт/(м·К).

Как следует из выражений (1) и (2), все параметры, кроме  $d$  и  $E$ , относятся к характеристике газа, а теплофизические характеристики тела не учитывают. Это допустимо, когда пожароопасное скопление угля в шахте находится в свободном пространстве (например, в необрушенном старом гезенке либо при хранении органических материалов на воздухе в одиночных мешках) и предполагается, что весь материал равномерно нагревается по всему объему. В этом случае коэффициенты теплоотдачи, вычисленные по формуле (3), представлены в табл. 1. В качестве размера пожароопасного скопления угля принято  $d = 0,17$  м, а для других органических материалов  $d = 0,065$  м.

Когда скопление частиц материала, подверженного самовозгоранию, граничит с частицами такого же или другого материала, разделенных тонким слоем фильтрующего через этот материал воздуха, коэффициенты теплоотдачи находят из зависимостей [4–7] для определения условий возгорания материалов по темпу их охлаждения. При этом исходят из характеристик нагревающегося материала и экспериментально найденных значений его критической температуры самонагревания  $T_{кр}$ , теплоты реакции окисления  $q$ , предэкспоненциального множителя  $k_0$ , энергии

активации  $E$ , поверхности частиц  $S_r$ , в единице объема  $V$ .

С использованием перечисленных параметров коэффициент теплоотдачи авторы [8, 9] рекомендуют находить по зависимости

$$\alpha = mc_V\rho / (S_r / V), \quad (4)$$

где  $m$  – темп охлаждения материала, с<sup>-1</sup>; определяется по формуле, предложенной В. И. Горшковым [10],

$$m = [eE/(RT_0^2)](qk_0/c_V)\exp[-E/(RT_{кр})], \quad (5)$$

$e$  – основание натурального логарифма;

$c_V$  – теплоемкость материала, Дж/(кг·К).

Используя зависимости (4) – (6) и данные о теплофизических свойствах материалов, приведенные автором [10] из разных источников, найдем значения  $\alpha$ . При вычислении полагали, что размеры частиц материала в скоплении, при которых начинается процесс самовозгорания, имеют значения порядка  $1 \cdot 10^{-4}$ – $1 \cdot 10^{-3}$  м, а соответствующие значения параметра  $S_r/V$  – от 40000 до 4000 м<sup>-1</sup>. Теплофизические данные о материалах и вычисленные значения  $\alpha$  приведены в табл. 2.

Академик А. Н. Щербань при изучении теплоотдачи от горных пород к шахтному воздуху предложил использовать для определения коэффициента нестационарного теплообмена зависимость [11]

$$k_\tau = \lambda[0,375 + (R/\sqrt{\pi a \tau})]/R, \quad (6)$$

где  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности породы, Вт/(м·К);

$R$  – радиус выработки, м;

$a$  – температуропроводность породы, м<sup>2</sup>/с;

$\tau$  – время с момента обнажения породы, с.

Для случая теплообмена скопления органического материала, подверженного самовозго-

Таблица 1

Марка угля	$E \cdot 10^{-5}$ , Дж/моль	$Ra \cdot 10^{-6}$	$Nu$	$\alpha$ , Вт/(м <sup>2</sup> ·К)
Г	0,17	20,7	35,4	5,48
СС	0,16	22,8	37,3	5,62
ГЖ	0,16	22,0	37,0	5,57
Ж	0,18	19,8	36,0	5,42
Д	0,16	22,4	37,1	5,59
КЖ	0,17	20,5	35,3	5,47
К	0,18	19,9	36,1	5,43
Т	0,17	21,6	36,8	5,54
А	0,15	24,2	37,9	5,71

Таблица 2

Марка угля	$T_{кр}, K$	$q \cdot 10^{-6}, Дж/кг$	$k_0, c^{-1}$	$qk_0 \cdot 10^{-6}, Вт/кг$	$\rho, кг/м^3$	$m, c^{-1}$	$\alpha, Вт/(м^2 \cdot K) \text{ при } (S_r/V) \cdot 10^{-3}, м^{-1}$		
							40	8	4
Г	360	13,56	2,62	35,5	1315	4,88	149,8	359,5	1498,0
СС	375	27,04	0,38	10,3	1312	3,15	96,4	231,3	963,6
ГЖ	366	24,88	0,79	19,6	1364	3,89	123,8	297,2	1238,3
Ж	357	17,68	2,47	43,7	1323	4,86	150,0	360,1	1500,4
Д	368	22,01	0,80	17,6	1300	3,88	117,7	282,5	1176,9
КЖ	358	17,09	0,67	11,4	1331	1,37	42,6	102,1	425,6
К	358	20,18	1,51	30,5	1342	3,65	114,2	274,1	1142,3
Т	370	25,55	0,59	15,1	1381	3,67	118,4	284,2	1184,3
А	380	31,78	0,26	8,26	1374	2,82	90,4	217,0	904,2

Примечание.  $c_V = 1400 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{K)}$ .

ранию, в работе [12] предложено использовать зависимость (6), принимая в качестве характерного размера скопления радиус выработки, а в качестве коэффициента теплопроводности – приведенный коэффициент теплопроводности по формуле

$$\lambda_{пр} = \varepsilon \lambda_B + (1 - \varepsilon) \lambda_M, \quad (7)$$

где  $\lambda_M$  – коэффициент теплопроводности органического материала,  $Вт/(м \cdot K)$ ;

$\varepsilon$  – коэффициент порозности скопления материала,

$$\varepsilon = 0,48 / (1 + D_p / 75), \quad (8)$$

$D_p$  – дробимость материала.

Анализ выражения (7) и практика ликвидации эндогенных пожаров показали, что в качестве минимального характерного размера скопления угля следует принимать 0,17 м, а других органических материалов – 0,065 м [13] и использовать средние значения  $a$  и  $\tau$ , характерные для процессов их самовозгорания. В этом случае можно принять второе слагаемое в выражении (6) равным 0,04 и формулу упростить до вида

$$k_{\tau} = \alpha \approx 0,42 \lambda_{пр} / R. \quad (9)$$

Найденное с помощью выражений (6)–(9) среднее значение  $\alpha$  для углей различных марок составляет 0,22  $Вт/(м^2 \cdot K)$  [11, 12].

Специалисты Института физики горных процессов НАН Украины предложили Методику [14], основанную на учете кинетики температуры охлаждения предварительно нагретых угольных

и породных образцов с использованием скорректированных применительно к условиям измерений формул теории теплопроводности. Авторы определили коэффициенты теплоотдачи для таких образцов: уголь–воздух, порода–воздух и уголь–порода. В качестве измерительного устройства использовали электронные весы-влагомер ADS (термовесы).

Результаты исследований теплоотдачи трех образцов углей к воздуху  $\alpha_{y-в}$  и к породам  $\alpha_{y-п}$  по теплофизическим свойствам, близким к углю, показали результаты:  $\alpha_{y-в} = 0,072 \dots 0,097 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{K)}$ ,  $\alpha_{y-п} = 0,46 \dots 0,47 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{K)}$ . Полагая, как и ранее (см. формулу (7)), что коэффициент теплоотдачи пропорционален приведенной теплопроводности теплоотдающих материалов, найдем средние приведенные значения  $\lambda_{пр}$  между их значениями к воздуху и породе (углю) по аналогичной (7) зависимости

$$\alpha_{пр} = \varepsilon \alpha_{y-в} + (1 - \varepsilon) \alpha_{y-п}. \quad (10)$$

Используя средние значения  $\alpha_{y-в} = 0,085 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{K)}$ ,  $\varepsilon = 0,34$  и  $\alpha_{y-п} = 0,46 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{K)}$ , получили согласно формуле (10)  $\alpha_{пр} = 0,33$ .

Если учесть, что между  $\alpha$  и  $\lambda$  существует прямо пропорциональная зависимость ( $\alpha_{пр} \approx 2,7 \lambda_{пр}$ ), как это следует из выражения (7), то для других органических материалов значения  $\alpha$  могут быть найдены таким же образом.

По методикам, полученным специалистами НИИГД «Респиратор» и ИФГП НАН Украины для случаев, когда склонные к самовозгоранию органические материалы имеют небольшие разме-

ры (уголь в насыпи 0,17 м, другие материалы в мешках 0,065 м) и их скопления ограничены такими же или подобными по теплофизическим свойствам материалами, значения коэффициентов теплоотдачи по обоим методикам.

При изучении склонности разных органических материалов к самовозгоранию для каждого материала необходимо определять  $\alpha$  в лабораторных условиях в связи со значительным разрывом их значений.

**Выводы.** Показаны особенности процесса самовозгорания органических материалов зернистого характера в скоплении его частиц разного размера. Проанализированы методики определения коэффициентов теплообмена при очаговом самонагревании материала. Предлагается использовать методики НИИГД «Респиратор» и ИФГП НАН Украины при определении коэффициентов теплоотдачи разных органических материалов.

### ЛИТЕРАТУРА

1. *Bowes P. C.* Self-heating: evaluating and controlling the hazards / P. C. Bowes. – London, 1984. – 500 p.
2. *Исаченко В. П.* Теплопередача / В. П. Исаченко, В. А. Осипова, А. С. Сукомел. – М.: Энергия, 1975. – 448 с.
3. *Башкирцев М. П.* Основы пожарной теплофизики / М. П. Башкирцев, Н. Ф. Бубырь, Н. А. Минаев, Д. Н. Ончуков. – М.: Стройиздат, 1984. – 200 с.
4. *Киселев Я. С.* Тепловое самовозгорание дисперсных углеродных материалов с неоднородной поверхностью / Я. С. Киселев // Физика горения и взрыв. – 1973. – Т. 9. – № 1. – С. 124–127.
5. *Киселев Я. С.* Особенности кинетики термического окисления древесных материалов при температурах выше и ниже температуры компенсации / Я. С. Киселев, А. А. Топорищев // Теплофизика лесных пожаров: сб. тр. – Новосибирск: ИФТ СЦ АН СССР, 1984. – С. 31–37.
6. *Киселев Я. С.* Компенсационное уравнение и его использование для прогноза самовозгорания целлюлозных материалов / Я. С. Киселев, А. А. Топорищев // Пожарная профилактика и математическая статистика в пожарной охране. – М: ВНИИПО, 1984. – С. 50–59.
7. *Киселев Я. С.* Термоокислительная дезактивация углеродных материалов / Я. С. Киселев, А. С. Абрамов // Журн. прикл. химии. – 1977. – № 10. – С. 2243–2248.
8. *Кондратьев Г. М.* Регулярный тепловой режим / Г. М. Кондратьев. – М.: ГИТТЛ, Гостехиздат, 1954. – 408 с.
9. *Кондратьев Г. М.* Тепловые измерения / Г. М. Кондратьев. – М.: Машгиз, 1957. – 408 с.
10. *Горшков В. И.* Самовозгорание веществ и материалов / В. И. Горшков. – М.: ВНИИПО, 2003. – 446 с.
11. *Щербань А. Н.* Руководство по регулированию теплового режима шахт / А. Н. Щербань, О. А. Кремнев, В. Я. Журавленко. – М.: Недра, 1977. – 359 с.
12. *Греков С. П.* Расчет допустимых утечек воздуха через изолирующие перемычки / С. П. Греков, И. Н. Зинченко, Е. А. Головченко // Уголь Украины. – 2008. – № 2. – С. 25–27.
13. *Пашковский П. С.* Эндогенные пожары в угольных шахтах / П. С. Пашковский. – Донецк: Ноулидж, 2013. – 791 с.
14. *Старикова И. Г.* Методика определения коэффициентов теплоотдачи / И. Г. Старикова // Сучасні аспекти механізації та автоматизації енергоємних виробництв: зб. матеріалів з регіон. наук.-практ. конф., 28.04.2015. – Красноармійськ, 2015. – С. 238–245.

## ПО МАТЕРИАЛАМ ЖУРНАЛА «УГОЛЬ УКРАИНЫ» ПРОШЛЫХ ЛЕТ

### Год 1974

В журнале № 5 в статье А. И. Кизуба «Шахта № 3 «Великомостовская» – передовое предприятие Львовско-Волынского бассейна» описано, что коллектив шахты в ознаменование 25-летия Львовско-Волынского угольного бассейна достиг значительных успехов в выполнении плана угледобычи, в повышении эффективности производства.

В 1973 г. добыто 1213 тыс. т угля, проектная мощность превышена в 1,6 раза. Шахта является пионером в освоении безнишевой выемки угля. В течение восьмой и девятой пятилеток реконструирован подземный транспорт, а коллектив шахты много раз становился победителем во всесоюзном и республиканском соревновании. За три года пятилетки добыто 3,53 млн т угля (план – 3,26 млн т), в том числе 268,9 тыс. т сверх плана. От реализации продукции в оптовых ценах прибыль в размере 7633 тыс. руб., что на 36 тыс. руб. превышает плановую величину. Проанализировав свои возможности, коллектив шахты на четвертый год пятилетки принял повышенный встречный план. Он успешно выполняется, и это позволяет поднять производительность на новую, более высокую ступень.