

УДК [614.841.41:622.333:536.12]:001.891.573

Зинченко Игорь Николаевич, кандидат технических наук

Пашковский Олег Петрович, инженер

Глушенко Кристина Валериевна, инженер

Государственный научно-исследовательский институт горноспасательного дела, пожарной безопасности и гражданской защиты «Респиратор»

г. Донецк

ЧИСЛЕННЫЙ МЕТОД РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ОБ ОЧАГОВОМ САМОНАГРЕВАНИИ ШАХТНОЙ ПОРОДЫ

Предложен численный метод расчёта динамики температуры в слое дисперсного вещества в случае присутствия внутреннего точечного источника теплоты. Разработана лабораторная установка для изучения температурных полей при нагревании (самонагревании) твёрдых дисперсных веществ растительного происхождения. Определены параметры теплообмена для породной массы шахты «Колосниковская».

Ключевые слова: Шахтная порода, очаговое самонагревание, температурное поле, точечный источник теплоты, моделирование, теплообмен, коэффициент теплоотдачи, критерий Био.

Более чем за 200 лет с начала открытия Донецкого угольного бассейна открыты и зарегистрированы 1257 терриконов, из которых около 600 действующих (или прекративших отсыпку породной массы 10-15 лет назад), а из них по официальным данным примерно 25 % горящих.

Причиной возгорания породных отвалов высотой более 10 м в большинстве случаев является наличие в отвальной массе горючих веществ: чистого угля (от 5 до 7 % по объёму), сростков угля с породой, древесины, серы и аргиллита. В потоке шахтной отвальной массы содержится от 15 до 30 % горючих веществ, а в потоке отвальной массы обогатительных фабрик – от 20 до 45 % по объёму. В среднем по Донецкому бассейну потери угля в отвальной массе составляют около 1,5 % подземной добычи.

В результате сегрегации отвальных пород по крупности и удельному весу содержание горючих веществ в верхней части отвалов на 15...25 % выше среднего их содержания в потоке. Местный характер скопления горючих веществ определяет очаговое самовозгорание и горение отвальной массы. Кроме того, причиной самовозгорания отвальной массы является не только её химическая активность, но также структура (порозность) отвала, определяющая условия теплообмена с окружающей

средой.

Наиболее интенсивно и устойчиво очаговое горение в зоне отсыпки пород, где температура горения достигает 800...1200 °С. В слоях, расположенных над слоем горения и под ним, температура золы и пород ниже.

В процессе горения, протекающего на глубине 0,5...3 м от поверхности, происходит качественное изменение вещества, слагающего отвалы, с образованием золы, спекшейся массы и обожжённой породы. Большую опасность представляют интенсивно горящие отвалы высотой более 60 м. В результате оползней на склоне на глубине 0,5...3 м вскрываются породы с температурой несколько сот градусов, доступ кислорода к которым до этого был ограничен, что способствует возникновению значительных восходящих конвективных потоков и приводит к интенсивному возгоранию этих пород.

Самовозгорание породных отвалов – сложное явление, обусловленное рядом факторов, которые по характеру влияния подразделяются на две основные группы. Первая группа – генетические факторы, определяющие реакционную способность складированной массы к кислороду при низких температурах, вторая – внешние факторы.

К генетическим факторам относятся: вещественный состав складированной массы, восстанавливаемость углистых компонентов и наличие в складированной массе веществ, тормозящих реакции окисления.

При обследовании породных отвалов ряда шахт и сопоставления их состояния со структурой разрабатываемых пластов установлено, что при разработке пластов с 70 % углистых пород породные отвалы подвержены самовозгоранию и, наоборот, при разработке угольных пластов простого строения (и отсутствия углистого материала в породах кровли и почвы) самовозгорание породных отвалов весьма редко.

Повышенная реакционная способность высокозольных углей и углистых пород к окислителям объясняется тем, что угольное вещество этих компонентов отвальной массы представлено в основном фюзеном, который характеризуется наиболее лёгкой окисляемостью при низких температурах по сравнению с другими ингредиентами ископаемых углей. Другим компонентом, существенно влияющим на скорость окисления при низких температурах и также связанным с генетическими особенностями разрабатываемых пластов, является пирит.

К внешним факторам, влияющим на процесс самонагрева и самовозгорания, а также на интенсивность горения относятся размер, форма отвалов и содержание в породах отвала низкозольного угля.

Размер и форма отвалов влияют прежде всего на интенсивность тепломассообмена в их глубинных зонах. Наряду с гранулометрическим составом отвальной массы эти факторы определяют фильтрующие свойства отвалов и тем самым способствуют или препятствуют генерации

и аккумуляции теплоты, т.е. оказывают действие на протекание процессов, оптимальное соотношение которых во времени приводит к самовозгоранию.

Исследование теплообменных процессов в слое зернистых веществ изучалось на примере углей при наличии химических реакций окисления, сопровождаемых выделением тепла [1, 2]. Часть этих работ выполнялась в изолированных от притока кислорода ёмкостях, где массообмен с окружающей средой ограничен, другая – в проточных реакторах, более отвечающих условиям окисления углей в шахтах. При этом скорости потока, омывающего частицы угля, в разных опытах были порядка $1 \cdot 10^{-3} \dots 1 \cdot 10^{-5}$ м/с, которые считаются наиболее пожароопасными [3], а фракционный состав разными авторами принимался или постоянным во всем объёме и равным 0,1...1 мм [4, 5], или использовался конгломерат частиц («рядовой уголь» [2]), взятый непосредственно после его отбойки различными механизмами.

В первом случае критическая температура самонагрева углей различной химической активности и влажности часто достигалась через 0,5...2,5 суток после начала эксперимента [6, 7], затем нагревание резко ускорялось. Во втором – не достигалась и после 50 суток [2], что говорит о существенном влиянии параметров тепло- и массопереноса на самонагревание угля.

В первом случае при тепло- и массоизоляции скопления угля и нагревании его частиц происходит их тепло- и массообмен только с фильтрующимся через уголь воздухом, во втором – с внешней средой, окружающей скопление частиц. При этом разность температур между поверхностью частиц угля и потоком воздуха обеспечивает отвод теплоты, разность концентраций поперек пограничного слоя создаёт поток влаги от поверхности частиц к потоку воздуха и кислорода от потока воздуха к поверхности частиц угля. От параметров тепло- и массообмена в значительной степени зависит интенсивность самонагрева угля и инкубационный период самовозгорания.

Проблема тепломассообмена в твёрдых дисперсных веществах рассмотрена в ряде работ [8 – 11]. При нагревании или охлаждении зернистого вещества коэффициент теплоотдачи представляют в виде критериальных зависимостей

$$Nu = f(Re, Pr); \quad Nu_g = f(Pe), \quad (1)$$

где Nu – число Нуссельта;

Re – число Рейлея;

Pr – число Прандтля.

В случае самонагрева неподвижной среды, когда тепло- и массообмен протекают за счёт молекулярной диффузии, принимают

$$Nu = Nu_g = 2.$$

При рассмотрении условий очагового самонагрева отвальной породной массы надо полагать, что скорость потока в ней весьма мала (действует только фильтрация воздуха за счёт ветровой нагрузки). Поэтому для расчёта объёмного коэффициента теплоотдачи α , Вт/(м²·К), воспользуемся формулой [9, 10]

$$Nu = \frac{6\alpha}{\varphi S \lambda_r}, \quad (2)$$

где $\varphi = 0,8 \dots 0,9$ – коэффициент формы;

$S = S_q / V$ – площадь поверхности в единице объёма, м⁻¹;

S_q – площадь поверхности частиц, м²;

V – объём частиц, м³;

λ_r – коэффициент теплопроводности газа, Вт/(м·К).

Предположим, что частицы, образующие породную массу, одинаковы по размеру и имеют форму куба. Тогда S рассчитывают по формулам

$$S_q = 6a^2; \quad V = a^3; \quad S = \frac{6a^2}{a^3} = \frac{6}{a}, \quad (3)$$

где a – характерный размер частицы породной массы, м.

Подставив (3) в (2), выведем зависимость для определения коэффициента теплоотдачи в случае частиц кубической формы

$$\alpha = \frac{Nu \varphi \lambda_r}{a}. \quad (4)$$

Принимая в качестве газа, заполняющего межкусковое пространство, воздух, имеющий $\lambda_r = 2,1 \cdot 10^{-2}$ Вт/(м·К), и учитывая, что $Nu = 2$, $\varphi = 0,85$, $a = 0,1$ м, имеем $\alpha = 0,36$ Вт/(м²·К).

Поскольку в насыпи шахтной породы имеются куски различных размеров $0,1 \dots 0,001$ м, то воспользовавшись формулой (4), учитывающей теплообмен газа с твёрдым телом, найдём значения α для разных значений S (табл. 1).

Поскольку вещества, из которых состоят породные отвалы разных шахт, не одинаковы и имеют разную теплопроводность и при возникновении очагов самовозгорания рассматривается теплопередача от твёрдых частиц к газу, целесообразнее изучать коэффициенты теплоотдачи и определять для них безразмерные критерии Био

$$Bi = \frac{\alpha}{\lambda_{\pi}} R_{\text{ч}}, \quad (5)$$

где λ_{π} – коэффициент теплопроводности породной массы, Вт/(м²·К);

$R_{\text{ч}} = a/2$ – радиус частицы, м.

Для породных отвалов Донбасса при расчётах примем крайние значения $\lambda_{\pi} = 0,3 \dots 3$ Вт/(м²·К) и получим следующие значения критерия Био (табл. 1).

Таблица 1

Значения коэффициента теплоотдачи и критерия Био для различных фракций твёрдого вещества шахтной породы

a , м	0,2	0,1	0,02	0,01	0,002
$R_{\text{ч}} = a / 2$, м	0,1	0,05	0,01	0,005	0,001
$S_{\text{ч}} / V$, м ⁻¹	30	60	300	600	3000
α , Вт/(м ² ·К)	0,18	0,36	1,8	3,6	18
$Bi _{\lambda=0,3}$	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06
$Bi _{\lambda=3}$	0,006	0,006	0,006	0,006	0,006

Из приведенных в таблице данных следует, что значения критерия Био при одинаковых температурах могут отличаться для разных пород в 10 раз. С изменением же температуры тенденция в изменении критерия Био может быть самой разнообразной. Поэтому представляется практический интерес изучения температурного поля при самонагревании (нагревании) насыпи угольной породы.

На практике в насыпях растительного сырья фиксируют температуру с помощью технических систем контроля. Однако данные термодатчиков показывают температуру на момент измерений и не дают информации о том, как будет развиваться температурный режим в последующие моменты времени. Теоретическое решение поставленной задачи – достаточно сложное, поскольку на процесс самонагревания влияют микробиологические процессы, воздушный и тепловой режимы в хранилище, влагосодержание в растительном сырье и др. Для описания распространения теплоты и прогнозирования динамики температуры в дисперсных средах, которыми являются насыпи растительного сырья, разрабатываются соответствующие математические модели, основанные на классических уравнениях теплопроводности.

Процесс распределения температуры в насыпи при очаговом самонагревании с внутренним источником теплоты может быть адекватно смоделирован в рамках одномерной задачи нестационарной теплопроводности, которая сформулирована следующим образом. В дисперсной среде с начальной температурой T_0 в начальный момент времени $\tau = 0$ начинает действовать сферический источник

тепловыделения, возникший в результате микробиологической активности или химического реагирования вещества с кислородом в межкусковом пространстве с интенсивностью тепловыделения q_0 . При этом граничная сферическая поверхность представляет собой не границу насыпи (таких форм насыпи в природе нет, а есть лишь симметричное распространение теплоты), а некоторую условную поверхность, окаймляющую очаг самонагрева. На этой условно выделенной внутри насыпи поверхности при условии теплообмена с окружающим пространством прирост температуры принимаем равным нулю. На начальном этапе самонагрева избыточная температура в очаге T почти не зависит от радиуса окаймляющей сферы R при условии, что он значительно больше радиуса очага, как показано на рис. 1. Поскольку скопление представляет собой двухфазную среду, состоящую из твёрдого вещества и воздуха, то происходит самонагревание не только вещества, но и воздушной массы. Вследствие возникающей при этом разницы плотностей и подъёмной силы в поле тяжести нагревающийся воздух преимущественно движется вверх. Это движение сопровождается переносом теплоты и перемешиванием объёмов воздуха с различной температурой и называется конвекцией. В результате самонагревание дисперсной среды будет несимметричным относительно источника, процесс самонагрева будет направлен вверх. Таким образом, представляет интерес изучение динамики температуры в верхней части насыпи. В настоящей работе рассмотрен перенос теплоты в скоплении только теплопроводностью.

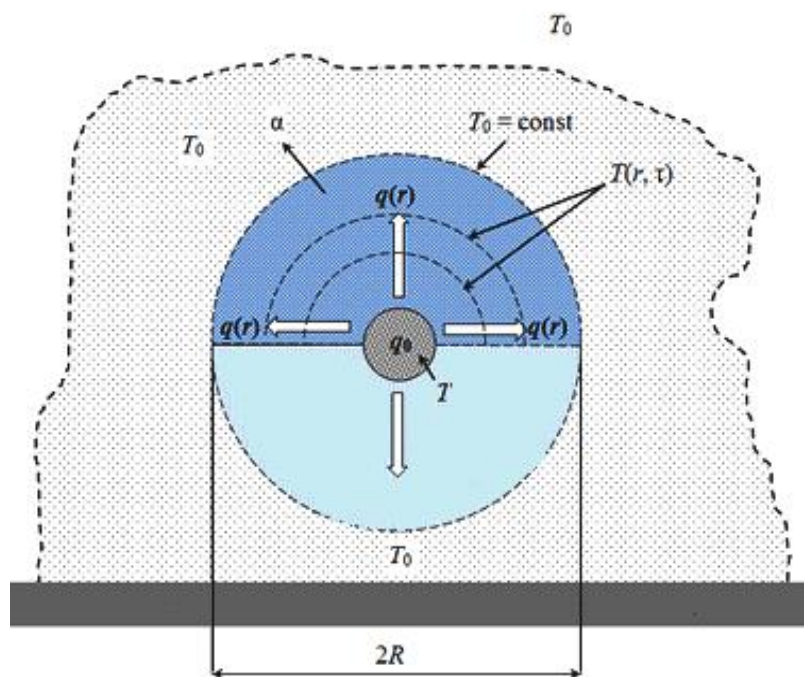


Рис. 1. Модель очагового самонагрева насыпи дисперсного вещества с внутренним источником теплоты

Для описания процесса теплообмена с учётом испарения влаги из частиц твёрдого дисперсного вещества используем уравнение теплопроводности в сферических координатах [8]

$$\begin{aligned} \frac{\partial T(r, \tau)}{\partial \tau} = a \left(\frac{2}{r} \frac{\partial T(r, \tau)}{\partial r} + \frac{\partial^2 T(r, \tau)}{\partial r^2} \right) + \frac{\xi q_1 k_1 C_{O_2}}{\rho c_v} \exp \left(\frac{E_1}{RT_0} - \frac{E_1}{RT} \right) - \\ - \frac{q_2 k_2 W}{\rho c_v} \left[\exp \left(\frac{E_2}{RT_0} - \frac{E_2}{RT} \right) - 1 \right] \\ (\tau > 0; \quad 0 < r < R), \end{aligned} \quad (6)$$

с начальными

$$\left| \begin{aligned} T(0, \tau) &= T_0 - \text{в отсутствии точечного источника теплоты,} \\ T(0, \tau) &= T_{\text{ист.}} - \text{в присутствии и точечного источника теплоты,} \end{aligned} \right. \quad (7)$$

и граничными условиями

$$\begin{aligned} \left. \frac{\partial T(0, \tau)}{\partial r} \right|_{R=0} &= 0; \\ \lambda \left. \frac{\partial T(r, \tau)}{\partial r} \right|_{r=R} &= \alpha [T_0 - T(r, \tau)]; \end{aligned} \quad (8)$$

где T – переменная температура при самонагревании, К;

r, R – переменный и постоянный радиус, м;

τ – время, с;

a – коэффициент температуропроводности горючего вещества, м²/с;

ξ – отношение площади реакционной поверхности пор к площади поверхности (или реакционная активность дисперсной среды);

q_1 – теплота реакции окисления дисперсного вещества, Дж/моль;

k_1 – константа скорости химической реакции первого порядка при начальной температуре, 1/с;

C_{O_2} – объёмная концентрация кислорода в порах вещества, моль/м³;

ρ – плотность вещества дисперсной среды, кг/м³;

c_v – удельная теплоёмкость вещества, Дж/(кг·К);

E_1 – энергия активации при химической реакции, Дж/моль;

T_0 – начальная температура внутри насыпи и окружающей среды, К;

$T_{\text{ист.}}$ – температура точечного источника теплоты в центре насыпи, К;

q_2 – теплота испарения влаги, Дж/моль;

k_2 – константа скорости испарения влаги при T_0 , с^{-1} ;
 W – объёмная концентрация влаги в веществе, $\text{моль}/\text{м}^3$;
 E_2 – энергия активации при испарении влаги, $\text{Дж}/\text{моль}$;
 λ – коэффициент теплопроводности вещества, $\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$;
 α – коэффициент теплоотдачи вещества на границе «дисперсная среда – окружающее пространство», $\text{Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$.

Предлагается решать уравнение (6) с условиями (7) и (8) численным методом с помощью ЭВМ.

Введём обозначения

$$A = \frac{\xi q_1 k_1 C_{O_2}}{\rho c_v}; \quad B = \frac{q_2 k_2 W}{\rho c_v};$$

и перепишем дифференциальное уравнение (6) через приращения аргументов

$$\frac{\Delta T}{\Delta \tau} = a \frac{2}{r} \frac{\Delta T}{\Delta r} + a \frac{\Delta^2 T}{\Delta r^2} + A \exp\left(\frac{E_1}{RT_0} - \frac{E_1}{RT}\right) - B \left[\exp\left(\frac{E_1}{RT_0} - \frac{E_1}{RT}\right) - 1 \right], \quad (9)$$

где A – параметр, характеризующий процесс окисления вещества, $\text{К}/\text{с}$;

B – параметр, характеризующий процесс испарения влаги при самонагревании вещества, $\text{К}/\text{с}$.

Рассмотрим разностную схему для численного решения моделирующего уравнения (9). Для численного решения будем использовать равномерную прямоугольную сетку (рис. 2).

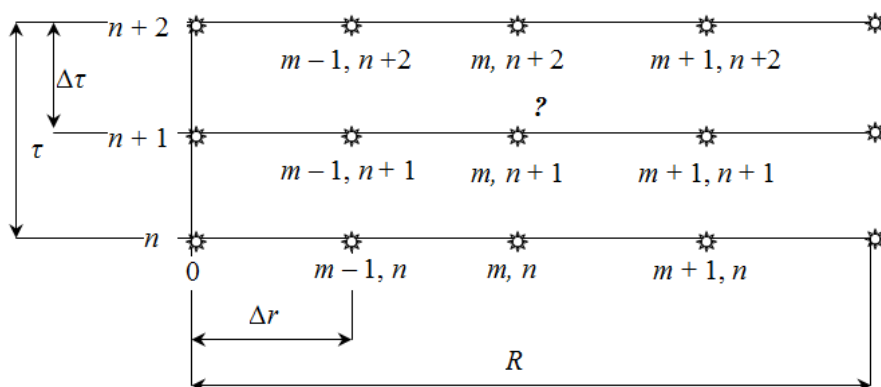


Рис. 2. Сетка численного интегрирования температуры T_m^{n+1} в полубесконечной среде на разном расстоянии от центра в разные моменты времени:

m – количество шагов по радиусу; Δr – длина шага изменения радиуса, м;

$R = \Delta r \cdot m$ – радиус, м; n – количество шагов по времени; $\Delta \tau$ – длина шага изменения времени, с; $\tau = \Delta \tau \cdot n$ – время, с

Первые производные по времени и по радиусу уравнения (9) аппроксимируем так:

$$\frac{\partial T(r, \tau)}{\partial \tau} = \frac{\Delta T}{\Delta \tau} = \frac{T_m^{n+1} - T_m^n}{\Delta \tau}, \quad (10)$$

$$\frac{\partial T(r, \tau)}{\partial r} = \frac{\Delta T}{\Delta r} = \frac{T_{m+1}^n - T_m^n}{\Delta r}. \quad (11)$$

Вторую производную представим следующим образом:

$$\frac{\partial^2 T(r, \tau)}{\partial r^2} = \frac{\Delta^2 T(r, \tau)}{\Delta r^2} = \frac{T_{m-1}^n - 2T_m^n + T_{m+1}^n}{\Delta r^2}, \quad (12)$$

где разностный оператор температуры T_m^n предложено расписывать в виде

$$2T_m^n = T_m^{n-1} + T_m^{n+1}. \quad (13)$$

С учётом (10) – (13) перепишем уравнение (9) в безразмерном виде:

$$\begin{aligned} \frac{\bar{T}_m^{n+1} - \bar{T}_m^n}{\Delta \tau} = & \frac{2a}{r\Delta r} \bar{T}_{m+1}^n - \frac{2a}{r\Delta r} \bar{T}_m^n + \frac{a}{\Delta r^2} \bar{T}_{m-1}^n - \frac{a}{\Delta r^2} \bar{T}_m^{n-1} - \frac{a}{\Delta r^2} \bar{T}_m^{n+1} + \frac{a}{\Delta r^2} \bar{T}_{m+1}^n + \\ & + A \exp(\bar{E}_1 - \frac{\bar{E}_1}{\bar{T}}) - B \left[\exp(\bar{E}_2 - \frac{\bar{E}_2}{\bar{T}}) - 1 \right], \end{aligned}$$

$$\text{где } \bar{T} = \frac{T(r, \tau)}{T_0}; \bar{E}_1 = \frac{E_1}{RT_0}; \bar{E}_2 = \frac{E_2}{RT_0}.$$

Поскольку $r = \Delta r \cdot m$, $\tau = \Delta \tau \cdot n$ и $Fo = \frac{a\Delta \tau}{\Delta r^2}$ то получим

$$\begin{aligned} \bar{T}_m^{n+1} = & \bar{T}_m^n + \frac{2Fo}{m} \bar{T}_{m+1}^n - \frac{2Fo}{m} \bar{T}_m^n + Fo \bar{T}_{m-1}^n - Fo \bar{T}_m^{n-1} - Fo \bar{T}_m^{n+1} + Fo \bar{T}_{m+1}^n + \\ & + \bar{A} \exp(\bar{E}_1 - \frac{\bar{E}_1}{\bar{T}}) - \bar{B} \left[\exp(\bar{E}_2 - \frac{\bar{E}_2}{\bar{T}}) - 1 \right], \end{aligned} \quad (14)$$

$$\text{где } \bar{A} = A \cdot \Delta \tau; \bar{B} = B \cdot \Delta \tau.$$

Путем математических преобразований зависимости (14) получена явная расчётная схема (15) безразмерной температуры по радиусу полушария на искомом временном слое \bar{T}_m^{n+1} при условии, что на предыдущем временном слое в центре насыпи $\bar{T}_m^n = T_{\text{ист.}}/T_0 \geq 1$ и на

поверхности вследствие теплоотдачи $\bar{T}_m^n = 1$:

$$\begin{aligned} \bar{T}_m^{n+1} = & \frac{\bar{T}_m^n \left(1 - \frac{2Fo}{m}\right) + Fo \bar{T}_{m+1}^n \left(\frac{2}{m} + 1\right) + Fo \left(\bar{T}_{m-1}^n - \bar{T}_m^{n-1}\right)}{(1 + Fo)} + \\ & + \frac{\bar{A} \exp\left(\bar{E}_1 - \frac{\bar{E}_1}{T}\right) - \bar{B} \left[\exp\left(\bar{E}_2 - \frac{\bar{E}_2}{T}\right) - 1\right]}{(1 + Fo)}. \end{aligned} \quad (15)$$

Из условия устойчивости системы множитель в первом слагаемом числителя (15) должен быть больше нуля, т.е. $2Fo/m < 1$, откуда следует, что схемное число Фурье равно $Fo < m/2$, и при $m = 1$ $Fo \leq 0,5$.

Произведём апробацию математической модели (15) на экспериментах по очаговому нагреванию породной отвальной массы шахты «Колосниковская» фракцией $a = 0,01$ м ($R_q = 0,005$ м).

Экспериментальные исследования теплового поля в скоплении вещества органического происхождения проведены на лабораторной установке, представленной на рис. 3.

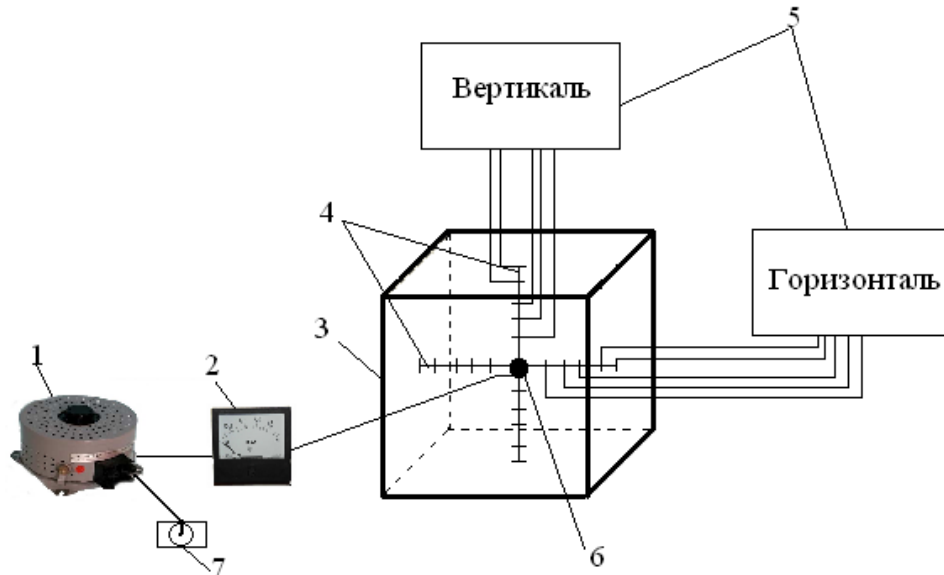


Рис. 3. Лабораторная установка для исследования температурного поля при нагревании органических веществ точечным источником теплоты:

1 – автотрансформатор; 2 – вольтметр; 3 – корзинка из металлической сетки; 4 – термопары; 5 – датчики температуры; 6 – точечный источник теплоты

Образец породы насыпали в корзинку кубической формы с размером ребра 200 мм из коррозионностойкой металлической сетки. В центре

корзинки установлен точечный источник теплоты мощностью 40 Вт. От источника теплоты по горизонтали и вертикали на определённом расстоянии размещены датчики температуры, позволяющие в двух координатах следить за изменением температуры скопления вещества от центра к его границе. Датчики подсоединены к автотрансформатору, позволяющему плавно регулировать напряжение в сети, действительное значение которого определяем по вольтметру. При установлении регулярного режима нагревания и достижении температуры в центре скопления ≈ 343 К фиксировали изменение температуры в процессе нагревания вещества.

На рис. 4 приведены экспериментальные данные распределения температуры по радиусу корзинки в направлении вверх с породной отвальной массой при $T_{\text{ист.}} = 343$ К в виде маркеров и температурные кривые, полученные численным методом при $R = 0,05$ м, когда очаг «не чувствует границ», т.е. теплоотдача от точечного источника теплоты передаётся только близлежащим слоям, а не границе скопления. Показана хорошая корреляция численной модели с опытными данными.

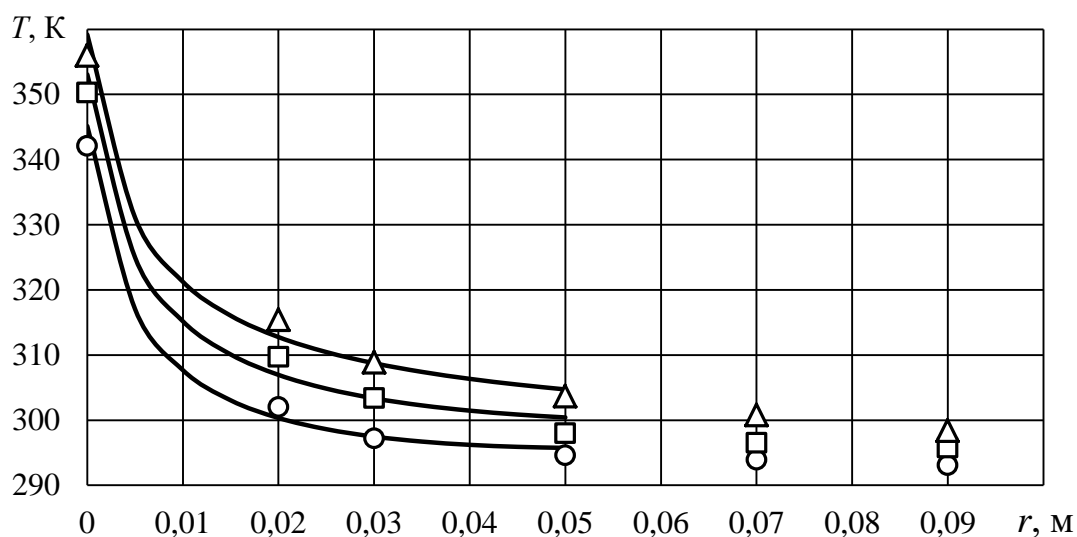


Рис. 4. Динамика температуры по радиусу корзинки $R = 0,1$ м при нагревании породной массы точечным источником теплоты в разные моменты времени:

- — $\tau = 9$ мин; $Fo = 0,5$; $n = 42$; $m = 10$; $\bar{\alpha} = 0,0595$;
- — $\tau = 129$ мин; $Fo = 0,5$; $n = 55$; $m = 10$; $\bar{\alpha} = 0,0605$;
- Δ — $\tau = 433$ мин; $Fo = 0,5$; $n = 112$; $m = 10$; $\bar{\alpha} = 0,0635$

На рис. 4 видно, что температура очага со временем увеличивается не смотря на то, что $T_{\text{ист.}} = 343$ К. По-видимому, в корзинке с породой, обладающей низкой теплопроводностью, под воздействием теплового потока аккумулируется тепло и начинается процесс самонагрева.

Исходные экспериментальные и расчётные данные:

$$q_1 = 9,81 \cdot 10^6 \text{ Дж/моль}; k_1 = 2,19 \cdot 10^{-6} \text{ с}^{-1}; \tau_1 = 9 \text{ мин} = 540 \text{ с}; \tau_2 = 129 \text{ мин} = 7740 \text{ с}; \tau_3 = 433 \text{ мин} = 25980 \text{ с}; C_{O_2} = 21 \% = 9,36 \text{ моль/м}^3; \rho = 1251 \text{ кг/м}^3; q_2 = 31,63 \text{ Дж/моль}; c_v = 750 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}; k_2 = 9,66 \cdot 10^{-10} \text{ с}^{-1}; W = 0,07 \% = 48,65 \text{ моль/м}^3; T_0 = 293 \text{ К}; R = 0,05 \text{ м}; E_1 = 62218 \text{ Дж/моль}; E_2 = 45000 \text{ Дж/моль}; Fo = 0,5; m = 10; n|_{\tau=9 \text{ мин}} = 42; n|_{\tau=129 \text{ мин}} = 55; n|_{\tau=433 \text{ мин}} = 112; \bar{\alpha}|_{\tau=9 \text{ мин}} = 0,0595; \bar{\alpha}|_{\tau=129 \text{ мин}} = 0,0605; \bar{\alpha}|_{\tau=433 \text{ мин}} = 0,0635.$$

Ниже приведён расчёт коэффициентов теплоотдачи и критерия Био в скоплении отвальной породной массы.

1. Определим коэффициенты температуропроводности в разные моменты нагревания:

При нагревании $\tau = 9$ мин

Путем моделирования по зависимости (15) с начальным и граничным условиями (7) и (8) соответственно и вышеуказанными исходными данными определим схемные величины:

$$n = 42; m = 10; \Delta\tau_1 = \tau/n = 540/42 = 12,86 \text{ с}; \\ \Delta r = r/m = 0,05/10 = 0,005 \text{ м}; \bar{\alpha}|_{\tau=9 \text{ мин}} = 0,0595.$$

Поскольку $Fo = \frac{a\Delta\tau}{\Delta r^2}$, то найдём значение a_1 :

$$a_1 = \frac{Fo\Delta r^2}{\Delta\tau_1} = \frac{0,5 \cdot 0,005^2}{12,86} = 9,72 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}.$$

При нагревании $\tau = 129$ мин

$$n = 55; m = 10; \Delta\tau_2 = \tau/n = 7740/55 = 140,73 \text{ с}; \\ \Delta r = r/m = 0,05/10 = 0,005 \text{ м}; \bar{\alpha}|_{\tau=129 \text{ мин}} = 0,0605.$$

$$a_2 = \frac{Fo\Delta r^2}{\Delta\tau_2} = \frac{0,5 \cdot 0,005^2}{140,73} = 8,88 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2/\text{с}.$$

При нагревании $\tau = 433$ мин

$$n = 112; m = 10; \Delta\tau_3 = \tau/n = 25980/112 = 231,96 \text{ с}; \\ \Delta r = r/m = 0,05/10 = 0,005 \text{ м}; \bar{\alpha}|_{\tau=433 \text{ мин}} = 0,0635.$$

$$a_3 = \frac{Fo\Delta r^2}{\Delta\tau_3} = \frac{0,5 \cdot 0,005^2}{231,96} = 5,39 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2/\text{с}.$$

2. Рассчитаем $a_{\text{ср.}}$ для исследуемого образца породы:

$$a_{\text{ср.}} = \frac{9,72 \cdot 10^{-7} + 8,88 \cdot 10^{-8} + 5,39 \cdot 10^{-8}}{3} = 3,72 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}.$$

3. Поскольку $a_{\text{ср.}} = \frac{\lambda_{\text{ср.}}}{\rho c_v}$, то коэффициент теплопроводности в условиях опыта равен:

$$\lambda_{\text{ср.}} = a_{\text{ср.}} \cdot \rho c_v = 3,72 \cdot 10^{-7} \cdot 1251 \cdot 750 = 0,349 \text{ Вт/(м·К)}.$$

4. По зависимостям (16) рассчитаем коэффициент теплоотдачи и критерий Био, характеризующие теплообмен внутри скопления:

$$\alpha = \frac{\bar{\alpha} \lambda_{\text{ср.}}}{\Delta r}; \quad \text{Bi} = \frac{\alpha R_{\text{ч}}}{\lambda_{\text{ср.}}} \quad (16)$$

При нагревании $\tau = 9$ мин

$$\alpha_1 = \frac{0,0595 \cdot 0,349}{0,005} = 4,1531 \text{ Вт/(м}^2\text{·К)}; \quad \text{Bi} = \frac{4,1531 \cdot 0,005}{0,349} = 0,0595.$$

При нагревании $\tau = 129$ мин

$$\alpha_2 = \frac{0,0605 \cdot 0,349}{0,005} = 4,2229 \text{ Вт/(м}^2\text{·К)}; \quad \text{Bi} = \frac{4,2229 \cdot 0,005}{0,349} = 0,0605.$$

При нагревании $\tau = 433$ мин

$$\alpha_3 = \frac{0,0635 \cdot 0,349}{0,005} = 4,4323 \text{ Вт/(м}^2\text{·К)}; \quad \text{Bi} = \frac{4,4323 \cdot 0,005}{0,349} = 0,0635.$$

5. Рассчитаем $\alpha_{\text{ср.}}$ и $\text{Bi}_{\text{ср.}}$ для исследуемого образца породы:

$$\alpha_{\text{ср.}} = \frac{4,1531 + 4,2229 + 4,4323}{3} = 4,2694 \text{ Вт/(м}^2\text{·К)};$$

$$\text{Bi}_{\text{ср.}} = \frac{0,0595 + 0,0605 + 0,0635}{3} = 0,0612.$$

Расчётами показано, что при нагревании шахтной породы постоянным внутренним источником теплоты коэффициент внутренней теплоотдачи и критерий Био увеличиваются.

Сравнение параметров теплообмена, полученных путём численного моделирования, с результатами расчётов по аналитическим зависимостям (4), (5) (табл. 1) показало хорошую сходимость.

Вывод. Преимущество численного метода, разработанного для исследования температурного поля при очаговом нагревании (самонагревании) дисперсного органического вещества, заключается в возможности определить коэффициенты теплопроводности, теплоотдачи и параметры теплообмена в условиях реально развивающегося очага нагревания (самонагревания) на основе экспериментальных данных.

Полученные результаты позволяют прогнозировать динамику температуры в слое растительного сырья при хранении, используя лишь

показания термодатчиков.

Список литературы

1. Башкирцев, М.П. Определение коэффициента теплообмена в условиях стандартного пожара / М.П. Башкирцев, Н.А. Шелудько // Сб. науч. работ / ВНИИПО. – М., 1971. – С. 38 – 47.
2. Саранчук, В.И. Теоретические основы самовозгорания угля / В.И. Саранчук, Х.А. Баев. – М.: Недра, 1976. – 164 с.
3. Греков, С.П. Расчет пожаробезопасных скоростей фильтрации воздуха через угольное скопление / С.П. Греков, И.Н. Зинченко, Г.Б. Тында // Горноспасательное дело: Сб. науч. тр. / НИИГД. – Донецк, 2006. – Вып. 43. – С. 24 – 30.
4. Греков, С.П. Неизотермическая кинетика гетерогенного окисления ископаемых углей кислородом воздуха и их самонагревание / С.П. Греков, А.А. Березовский, Я. Цыганкевич // Химия твердого топлива. – 2001. – № 1. С. 27 – 37.
5. Скочинский, А.А. Исследования о применении антипирогенов при борьбе с рудничными пожарами / А.А. Скочинский, С.З. Макаров. – М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1979. – 238 с.
6. Определение склонности углей к самовозгоранию / П.С. Пашковский, С.П. Греков, Я. Цыганкевич, И.А. Шайтан // Горноспасательное дело: Сб. науч. тр. / НИИГД. – Донецк, 2000. – С. 10 – 18.
7. Пашковский, П.С. Влияние химической активности и влажности угля на процесс самонагревания / П.С. Пашковский, С.П. Греков, И.Н. Зинченко // Горноспасательное дело: Сб. науч. тр. / НИИГД. – Донецк, 2007. – Вып. 44. – С. 17 – 25.
8. Лыков, А.В. Теория теплопроводности / А.В. Лыков. – М.: Изд-во «Высшая школа», 1967. – 600 с.
9. Канторович, Б.В. Основы теории горения и газификации твёрдого топлива / Б.В. Канторович. – М.: Изд-во АН СССР, 1958. – 598 с.
10. Чудновский, А.Ф. Теплообмен в дисперсных средах / А.Ф. Чудновский. – М.: ГИТЛ, 1954. – 444 с.
11. Шервуд, Т. Массопередача / Т. Шервуд, Р. Пигфорд, Ч. Уилки. – М.: Химия, 1982. – 696 с.