

УДК 614.841.41

И. Г. СТАРИКОВА, К. В. ГЛУШЕНКО

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

ОБОСНОВАНИЕ БЕЗОПАСНОЙ ТОЛЩИНЫ СКОПЛЕНИЯ ДРЕВЕСНЫХ ОПИЛОК

Аннотация. Неизотермическим методом с применением тепловой теории Я. С. Киселева исследована кинетика самовозгорания древесных опилок. Определен параметр охлаждения, характеризующий условия теплоотвода самовозгорающейся массы. Рассчитаны энергия активации, предэкспоненциальный множитель процесса окисления древесных опилок и критические параметры исследуемого сырья, позволяющие прогнозировать условия их пожаровзрывобезопасного хранения.

Ключевые слова: древесные опилки, самовозгорание, адиабатическая скорость самонагревания, темп охлаждения, энергия активации, предэкспоненциальный множитель, критические параметры.

ФОРМУЛИРОВКА ПРОБЛЕМЫ

Известно, что в процессе хранения растительного сырья (РС) возможно его самонагревание, следствием которого нередко является самовозгорание и пожар. Это, в свою очередь, приводит к большим материальным потерям, к гибели и травматизму людей [1] (табл. 1). Для разработки технических рекомендаций, направленных на снижение пожарной опасности при хранении скоплений растительных материалов, необходимо знать их критические параметры хранения, наибольшее значение из которых имеет минимальная высота скопления. Поэтому исследование пожаровзрывоопасных свойств насыпи РС представляет не только теоретический, но и практический интерес.

Таблица 1 – Статистика пожаров в РФ по причине самовозгорания веществ и материалов

Год	2007	2008	2009	2010	2011	2012
Количество пожаров, ед.	634	598	496	582	490	497
Прямой материальный ущерб, тыс. руб.	27 521	31 860	32 551	43 398	25 486	123 836
Погибло, чел.	11	6	3	6	3	15

АНАЛИЗ ИССЛЕДОВАНИЙ

Современные методы определения склонности веществ и материалов к самовозгоранию можно условно разделить на химические и физические. Химические методы сводятся к изучению окислительной способности материалов различными окислителями, сорбционной активности кислорода или к определению количества образовавшихся продуктов окисления (H_2O , CO_2 и CO) – методы ИГД им. А. А. Скочинского, «газовой характеристики» и др. [2]. При физических методах материалы подвергаются искусственному окислению в атмосфере воздуха с определением критической температуры самовозгорания [2]. Однако физические методы (термографический метод, калориметрия и др.) не позволяют осуществлять масштабирование лабораторного эксперимента, так как при этом игнорируется изменение режима теплообмена, связанное с ростом размеров насыпей и особенностями реакции окисления для отдельных продуктов.

В этой связи совершенствование термографического метода при определении критических параметров органического материала, в частности минимального критического размера, ниже которого материал будет спокойно храниться, а выше – непрерывно увеличивать свою температуру вплоть до самовозгорания, позволит существенно сократить количество пожаров на объектах хранения сельскохозяйственной продукции и уменьшить неоправданные затраты на обеспечение безопасности производства.

Цель работы – исследование кинетики тепловыделения при самовозгорании древесных опилок и определение критических параметров для дальнейшего прогнозирования условий их пожаровзрывобезопасного хранения.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Исследование критических условий самовозгорания древесных опилок термографическим методом проводили на установке, состоящей из термостата, реакционных сосудов (корзиночек), термоэлектрических преобразователей, присоединённых к термостату, регулирующего и регистрирующего приборов [3]. Суть термографического метода заключается в следующем: в термостат с заданной температурой вносили кубическую корзинку с испытываемым образцом, закрепляли термодатчик внутри корзинки, включали потенциометр КСП-2 и регистрировали скачкообразное изменение температуры во времени при возгорании вещества. За температуру самовозгорания T_c , К, образца принимали минимальную температуру термостата T_r , К, при которой наблюдалось повышение температуры внутри корзинки на $100\text{ }^\circ\text{C}$, а при температуре меньше на $10\text{ }^\circ\text{C}$ – скачка не наблюдалось. На потенциометре фиксировали характер кривых самонагрева и охлаждения материала до начальной температуры термостата.

Я. С. Киселевым [4] получено условие теплового самовозгорания, учитывающее кинетические параметры реагирующих веществ и адиабатические скорости самонагрева и охлаждения в рассматриваемом объёме материала

$$\frac{E}{RT_0^2} C \exp\left(-\frac{E}{RT_0}\right) = \Pi_0, \quad (1)$$

где E – энергия активации, Дж/моль;
 R – универсальная газовая постоянная, Дж/(моль·К);
 T_0 – температура окружающей среды, К;
 C – предэкспоненциальный множитель, К/с;
 Π_0 – темп охлаждения образца, 1/с.

Темп охлаждения определяют по формуле

$$\Pi_0 = \frac{\alpha S}{\rho c_p V}, \quad (2)$$

где α – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·К);
 c_p – удельная теплоёмкость материала, Дж/(кг·К);
 ρ – плотность материала, кг/м³;
 S – внешняя поверхность скопления, м²;
 V – объём скопления, м³.

Для определения значения Π_0 строили термограмму (рис. 1) охлаждения образца древесных опилок с размером ребра куба $l = 50$ мм в логарифмических координатах

$$\ln \Delta T = \ln \Delta T_{нач} - \Pi_0 \tau, \quad (3)$$

где ΔT – разность температур материала в центре корзинки и термостатируемого воздуха в момент времени τ , К;
 $\Delta T_{нач}$ – разность температур в начальный момент, К.

Величина Π_0 , найденная в MS Excel методом наименьших квадратов, равна $0,007\text{ мин}^{-1}$ или $0,0001167\text{ с}^{-1}$ (рис. 1). Используя $\Pi_0 = 0,0001167\text{ с}^{-1}$ и $\rho = 162,5\text{ кг/м}^3$, рассчитываем по формуле (2) коэффициент теплоотдачи: $\alpha = 1,14\text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)}$.

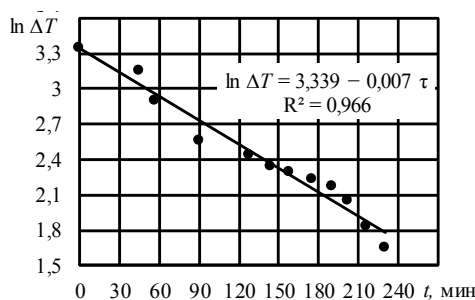


Рисунок 1 – Термограмма охлаждения образца древесных опилок в логарифмических координатах: $l = 50$ мм; $T_r = 488$ К; $\Pi_0 = 0,007$ мин⁻¹.

Энергию активации E , Дж/моль, и предэкспонент адиабатической скорости самонагрева C , К/с, определяли по температурным зависимостям максимальных адиабатических скоростей самонагрева.

Согласно Я. С. Киселеву [4], приравнивали адиабатические скорости самонагрева и охлаждения

$$C \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) = \Pi_0 \Delta T. \quad (4)$$

Затем логарифмировали выражение (4)

$$\ln C - \frac{E}{RT} = \ln(\Pi_0 \Delta T). \quad (5)$$

Функция $\Pi_0 \Delta T = f(T)$ линеаризуется в координатах $\ln(\Pi_0 \Delta T) = f(1/T)$. Угловым коэффициентом прямой равен $a_1 = E/R$, а свободный член $a_0 = \ln C$. Значения коэффициентов определяли методом наименьших квадратов в MS Excel. По величине коэффициентов рассчитывали значения кинетических параметров $E = a_1 R$ и $C = \exp(a_0)$.

На рис. 2 и 3 представлены температурные зависимости адиабатических скоростей самонагрева для образцов опилок с размером ребра куба $l = 50$ мм при разной T_r .

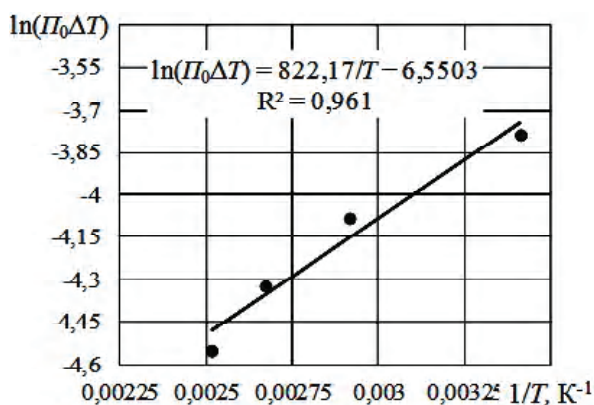


Рисунок 2 – Зависимость $\ln(\Pi_0 \Delta T)$ от $1/T$ для образца древесных опилок: $l = 50$ мм; $T_r = 488$ К; $\Pi_0 = 0,0001167$ с⁻¹.

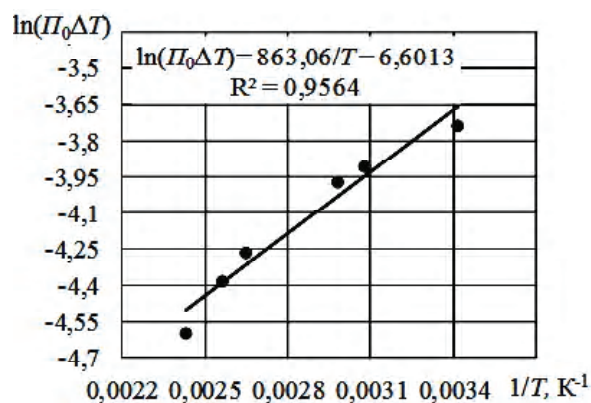


Рисунок 3 – Зависимость $\ln(\Pi_0 \Delta T)$ от $1/T$ для образца древесных опилок: $l = 50$ мм; $T_r = T_c = 498$ К; $\Pi_0 = 0,0001167$ с⁻¹.

Полученные в ходе лабораторных исследований данные кинетических параметров сведены в таблице 2.

Полученное низкое значение энергии активации (табл. 2) свидетельствует о высокой реакционной активности материала, однако низкое значение предэкспоненциального множителя может указывать на то, что при инициировании процесса самовозгорания первостепенная роль отводится нагретому состоянию материала. Показано, что энергия активации практически не зависит от температуры, что не противоречит законам химической кинетики.

Таблица 2 – Кинетические параметры для древесных опилок

Размер ребра куба l , м	Масса вещества m , кг	T_r , К	T_c , К	E , Дж/моль	$E_{ср.}$, Дж/моль	C , К/с	$C_{ср.}$, К/с
0,035	0,0076	503	513	6 711	6 944	613	703
		513		6 902		609	
0,05	0,0189	488	498	6 836		700	
		498		7 175		736	
0,075	0,0615	473	483	7 113		833	
		483		6 928		727	

Критическую толщину скопления $x_{кр}$, м, можно определить по формуле [2]

$$x_{кр} = \sqrt{\frac{n^2 \lambda^2}{\alpha^2} + \frac{4n\lambda k}{\Pi_0 c_p \rho}} - \frac{n\lambda}{\alpha}, \quad (6)$$

где n – относительный градиент на теплообменной поверхности, равный: 2,38 – плоскость; 2,71 – неограниченный цилиндр; 3,01 – сфера; 2,29 – куб; 2,50 – конечный цилиндр;
 λ – коэффициент теплопроводности материала, Вт/(м·К);
 k – коэффициент формы исследуемого материала, равный отношению длины стружки (зерна) к её толщине $k \approx 45 \text{ мм} / 0,5 \text{ м} = 90$.

В работе [5] для определения при хранении каменного угля, полукокса и других углеродных материалов предлагается формула

$$T_{кр} = \frac{1+2M - \sqrt{(1+2M)^2 - 4(RT_0/E+M)(1+M)}}{2(RT_0/E+M)} T_0, \quad (7)$$

где M – соотношение интенсивностей массо- и теплообмена при реакции окисления.

Определим критические параметры хранения опилок, используя $E = 6\,944$ Дж/моль; $C = 703$ К/с; $T_0 = 293$ К; $\alpha = 1,14$ Вт/(м²·К); $M = 0,7$; $n = 2,38$; $k = 90$; $\Pi_0 = 0,0001167 \text{ с}^{-1}$ и теплофизические свойства материала: $c_p = 1\,200$ Дж/(кг·К); $\rho = 162,5$ кг/м³; $\lambda = 0,054$ Вт/(м·К).

По формуле (7) рассчитываем критическую температуру для опилок: $T_{кр} = 431$ К.

По формуле (6) находим безопасную толщину скопления для древесных опилок: $x_{кр} = 0,91$ м.

В работе [6] время достижения критической температуры или инкубационный период $\tau_{кр}$, с, предлагается определять по формуле (8)

$$\tau_{кр} = \frac{R_{кр}^2}{4a} \left[\left(1 - \frac{2\lambda T_{кр}}{q_0 R_{кр}^2} \right)^{-2} - 1 \right], \quad (8)$$

где q_0 – тепловой поток, Вт/м²;

$R_{кр} = x_{кр} / 2$ – критический радиус насыпи, м;

$a = \lambda / \rho c_p$ – коэффициент температуропроводности сырья, м²/с;

$T_{кр}$ – критическая температура, °С.

Недостаток уравнения (8) – непонятно, почему автор [6] предлагает использовать величину теплового потока, равную 100 Вт/м², при самовозгорании различных углеродных веществ.

Для приблизительного расчёта инкубационного периода примем $q_0 = 100$ Вт/м² [6], $T_{кр} = 431$ К = 158 °С, $R_{кр} = 0,91 / 2 = 0,455$ м и получим $\tau_{кр} = 5\,929\,203,3 \text{ с} = 68,63$ сут.

Согласно рассчитанным критическим параметрам самовозгорание древесных опилок может произойти при минимальной высоте штабеля 0,91 м и времени хранения 69 сут.

ВЫВОДЫ

Предложен алгоритм расчёта безопасной толщины скопления древесных опилок в штабеле, который рекомендуется применять при разработке технических рекомендаций, направленных на снижение пожарной опасности при хранении скоплений углеродных материалов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пожары и пожарная безопасность в 2011 году [Текст] : Статистический сборник / Под общей редакцией В. И. Климкина. – М. : ВНИИПО, 2012. – 137 с.
2. Беляк, А. Л. Снижение эндогенной пожароопасности малометаморфизированного каменного угля и полукокса при хранении [Текст] : дис. ... канд. техн. наук : 05.26.03 «Пожарная и промышленная безопасность» / А. Л. Беляк. – Иркутск-Кемерово, 2004. – 109 с.
3. Орликова, В. П. Реакционная активность органических веществ [Текст] / В. П. Орликова, К. В. Глушенко, В. В. Вольнец // Научный вестник НИИГД «Респиратор» : науч.-техн. журн. – Донецк, 2016. – № 4 (53). – С. 58–68.
4. Киселев, Я. С. Изучение эффективной кинетики тепловыделения по критическим температурам самовоспламенения [Текст] / Я. С. Киселев // Научные труды Омского сельскохозяйственного института / Омский сельскохозяйственный институт, СССР. Министерство сельского хозяйства. – Омск : [б. и.], 1966. – Т. 69. – С. 45–50.
5. Греков, С. П. Тепломассообменные процессы в самовоспламеняющихся газоотдающих двухфазных средах [Текст] / С. П. Греков, И. Н. Зинченко, Г. Б. Тында // Вестн. Херсонского ун-та. – Херсон : ХНТУ, 2005. – Вып. 2 (22). – С. 124–133.
6. Ольшанский, В. П. Температурное поле гнездового самонагрева насыпи в силосе [Текст] / В. П. Ольшанский // Физика горения и взрыва. – 2002. – Т. 38 (6). – С. 134–139.

Получено 31.05.2017

І. Г. СТАРИКОВА, К. В. ГЛУШЕНКО ОБҐРУНТУВАННЯ БЕЗПЕЧНОЇ ТОВЩИНИ СКУПЧЕННЯ ДЕРЕВНОЇ ТИРСИ

Державний науково-дослідний інститут гірничорятувальної справи, пожежної безпеки
і цивільного захисту «Респиратор» МНС ДНР

Анотація. Неізотермічним методом із застосуванням теплової теорії Я. С. Кисельова досліджена кінетика самозаймання деревної тирси. Визначено параметр охолодження, що характеризує умови тепловідведення самозаймистої маси. Розраховані енергія активації, передекспоненціальний множник окислення деревної тирси і критичні параметри досліджуваної сировини, що дозволяють прогнозувати умови їх пожежовибухобезпечного зберігання.

Ключові слова: деревна тирса, самозаймання, адіабатична швидкість самонагрівання, темп охолодження, енергія активації, передекспоненціальний множник, критичні параметри.

IRINA STARIKOVA, KRISTINA HLUSHENKO SUBSTANTIATION OF THE SAFE THICKNESS OF THE ACCUMULATION OF SAWDUST

State Scientific-Research Institute of Mine Rescue Work, Fire Safety and Civil Protection
«Respirator» MChS DPR

Abstract. The kinetics of the spontaneous combustion of sawdust was investigated with the use of the Ya. S. Kiselyov thermal theory by means of the temperature-variation method. The cooling parameter characterizing the heat dissipation conditions of the spontaneously igniting mass has been determined. Activation energy, preexponential factor of the process of oxidation of sawdust and critical parameters of the raw materials being investigated that allow forecasting the conditions of their fire-explosion safe storage have been calculated.

Key words: sawdust, spontaneous combustion, adiabatic self-heating velocity, rate of cooling, activation energy, preexponential factor, critical parameters.

Старикова Ирина Геннадиевна – кандидат технических наук, учёный секретарь Государственного научно-исследовательского института горноспасательного дела, пожарной безопасности и гражданской защиты «Респиратор» МЧС ДНР. Научные интересы: исследование тепломассообменных процессов при самовозгорании различных углеродных материалов.

Глушенко Кристина Валериевна – инженер 1-ой кат. отдела борьбы с эндогенными пожарами в шахтах и на породных отвалах Государственного научно-исследовательского института горноспасательного дела, пожарной

безопасности и гражданской защиты «Респиратор» МЧС ДНР. Научные интересы: исследование тепломассообменных процессов при самовозгорании различных углеродных материалов.

Старикова Ирина Геннадіївна – кандидат технічних наук, вчений секретар Державного науково-дослідного інституту гірничорятувальної справи, пожежної безпеки та цивільного захисту «Респіратор» МНС ДНР. Наукові інтереси: дослідження тепломасообмінних процесів при самозаймання різних вуглецевих матеріалів.

Глушенко Христина Валеріївна – інженер 1-ої кат. відділу боротьби з ендогенними пожежами в шахтах і на породних відвалах Державного науково-дослідного інституту гірничорятувальної справи, пожежної безпеки та цивільного захисту «Респіратор» МНС ДНР. Наукові інтереси: дослідження тепломасообмінних процесів при самозаймання різних вуглецевих матеріалів.

Starikova Irina –scientific secretary, Ph. D., State Scientific-Research Institute of Mine Rescue Work, Fire Safety and Civil Protection «Respirator» MChS DPR. Scientific interests: research of heat and mass exchange processes during self-ignition of various carbon materials.

Glushenko Kristina – engineer of the 1st category, Department of Combating Endogenous Fires in Mines and Rock Dumps, State Scientific-Research Institute of Mine Rescue Work, Fire Safety and Civil Protection «Respirator» MChS DPR. Scientific interests: research of heat and mass exchange processes during self-ignition of various carbon materials.