

УДК 667.661.92

ОБОСНОВАНИЕ ПРОФИЛАКТИКИ МИКРОБИОЛОГИЧЕСКОГО САМОВОЗГОРАНИЯ ПРОДУКЦИИ

И. КОРОЛЬЧЕНКО, д-р техн. наук, **С. БЕЛЕЦКИЙ**, канд. техн. наук, **Д. СОКОЛОВ**, канд. техн. наук,
А. ГАВРИЛОВ, **В. ЮХТОРОВ**, ФГБУ «Научно-исследовательский институт проблем хранения Росрезерва»
E-mail: pozhkor@mail.ru

Представлены зависимости, лежащие в основе расчетных методов определения условий теплового самовозгорания насыпей и отложений материалов, прогретых выше температуры контактирующей с ними среды. На основании подобных расчетов можно формулировать профилактические мероприятия для предотвращения самовозгорания при транспортировании, хранении и переработке твердых материалов на хозяйственных объектах.

Ключевые слова: твердые дисперсные материалы, насыпи, отложения, самовозгорание, очаги самонагревания, микробиологические факторы, хранение, расчетные методы.

The dependences offered are used by methods defining of material dumps and sediments thermal self-ignition conditions for dumps heating more than environment. The dependences using leads to fire safety requirements for keeping, transporting or reprocessing solid materials at various objects.

Keywords: solid dispersed materials, dumps, sediments, self-ignition, hot spot of self-heating, microbiological factors, keeping, calculating methods.

Статистика пожаров, возникших по причинам самовозгорания веществ и материалов, отмечает несколько тысяч подобных происшествий ежегодно. Пожары из-за самовозгорания возникают на объектах складского хозяйства, транспорта, сельского хозяйства, на предприятиях химической, нефтехимической, пищевой, кормовой, деревообрабатывающей и других отраслей промышленности, где возможно образование горючих отложений и временное компактное содержание продуктов и полупродуктов.

Современные методы позволяют с достаточной для практики точностью рассчитывать условия самовозгорания насыпей и отложений веществ при симметричном и несимметричном теплообмене с окружающей средой, а также условия очагового самовозгорания материалов. В первом случае исследуется процесс самовозгорания, который начинается после выравнивания температур материала и окружающей среды. Это характерно для стандартных условий определения температур самовозгорания образцов в лаборатории, многих инцидентов при хранении и транспортировании продукции. Учет несимметричного теплообмена необходим при наличии разности температур на противоположных поверхностях отложения (самовозгорание слоя на нагретой поверхности оборудования, на поверхностях воздухопроводов, в сушилах, самовозгорание природных отложений и т.п.). Условия очагового самовозгорания рассматриваются при предварительном прогреве материала выше температуры

окружающей среды (в результате сушки, технологических операций, жизнедеятельности микрофлоры, экзотермического взаимодействия с примесями и т.п.).

Соответствующие задачи решались приближенными и численными методами, получен значительный массив экспериментальных данных [1, 2]. Были разработаны экспериментально-аналитические методики, в которых для определения кинетических характеристик процесса термоокисления исследуемого материала используются значения температур самовозгорания образцов различного размера. В ранних версиях этих подходов для расчета критической температуры окружающей среды, критического размера компактной укладки продукции и периода индукции до самовозгорания применялись формулы теории теплового взрыва [3, 4]. Однако для определения условий теплового самовозгорания оказалось важным учитывать реальный тепловой эффект термоокислительных превращений, характеризующих изучаемое явление. В расчетах критических условий самовозгорания удобно использовать известные величины теплоты сгорания материала. Но самовозгорание происходит при относительно невысоких температурах, характеризующих начало процесса термоокисления. При изучении низкотемпературного окисления органических материалов растительного происхождения А.Г. Мержановым с сотрудниками [5] и Баусом [3] отмечалось, что величина теплового эффекта процесса термоокисления при относительно невысоких

температурах оказывается намного ниже теплоты сгорания этих же веществ. В работе [6] определялось удельное тепловыделение при окислении материалов растительного происхождения вблизи температуры самовозгорания исследуемых образцов. Например, удельное тепловыделение сосновых опилок при температурах среды, близких к критическим, в проведенных экспериментах составляло 1678–1769 кДж/кг. Это в 7,5–12 раз ниже известных значений теплоты сгорания древесных материалов (13,4–13,8 МДж/кг). Похожий результат получен также на основании дифференциального термического анализа с использованием временного термостатирования образца при критических температурах. Экспериментальное определение удельного тепловыделения в докритической области для других органических материалов приводит к величинам, не превышающим 11–13 % от известных значений теплоты сгорания этих веществ. Учитывая это, а также величины энергии активации процесса термоокисления некоторых самовозгорающихся материалов, можно говорить о превышении верхних границ, рекомендованных в работе [4], диапазонов изменения параметров β и γ при исследовании самовозгорания.

В работе [7] выполнен численный расчет условий теплового взрыва при больших величинах β и γ были изучены критические условия теплового самовозгорания бесконечной пластины, бесконечного цилиндра и сферы. Показано, что при удалении от границ рекомендованного авторами [4] диапазона изменения величин параметров β и γ критические значения параметра Франк-Каменецкого могут отличаться от результатов расчета по выражениям работы [4] на 20–30 % и более. Это может оказывать заметное влияние на определение условий самовозгорания, особенно при расчете критического размера скопления материала. Для описания полученных численных решений с достаточной для практики точностью найдены поправки, корректирующие известную формулу следующим образом:

$$\delta_{кр} = \frac{\delta_o \cdot \varphi(Bi)(1 + 2,4\gamma^{2/3})(1 + \beta)}{(1 - 6,7\gamma^{1,4})(1 - 11\beta^3)} \quad (1)$$

Расчет по формуле (1) удовлетворительно согласуется с полученными численными решениями в диапазоне величин β от 0 до 0,3 и в диапазоне величин γ от 0 до 0,1. Анализ численного решения [7, 8] при произвольных значениях параметра Bi показывает, что в диапазоне $1 \leq Bi \leq \infty$ влияние интенсивности теплообмена на критические условия самовозгорания с ошибкой расчета не более 2% может быть учтено более простым, чем уравнение работы [4], выражением:

$$\varphi(Bi) = \frac{Bi}{2,2 - Bi} \quad (2)$$

Использование выражений (1) и (2) позволяет рассчитывать критические значения параметра Франк-Каменецкого

при самовозгорании материалов для скоплений в форме пластины, цилиндра и шара с погрешностью, не превышающей 10.

Задача об очаговом тепловом взрыве решалась многими исследователями [9–15] и в основном предполагала существование очага, равномерно прогретого выше температуры окружающей среды и находящегося в бесконечном пространстве, которое заполнено реакционноспособной смесью с теплофизическими (не зависящими от температуры) и кинетическими параметрами, одинаковыми для смеси и очага. В работах [9, 15] рассматривалась нестационарная задача воспламенения плоскопараллельного очага разогрева. В основе ее решения лежит метод приближенного анализа критических условий очагового воспламенения, учитывающий следующие характерные особенности процесса: период индукции очагового теплового взрыва много меньше времени тепловой релаксации очага. Отсюда следует, что за время развития процесса в очаге успевает остыть лишь слой вещества у поверхности ($\xi = R_0$) очага, а вещество в его центральной части охлаждается слабо; для очагового воспламенения необходимы большие начальные перепады температуры очага T_H и окружающей его среды T_0 ($\theta_H > 4$). Поэтому внутри очага можно выделить аналогично волне горения зоны реакции в узком температурном интервале вблизи максимальной температуры и инертного охлаждения, где имеется большой градиент температуры. Для одиночного П-образного очага и реакции нулевого порядка задача решена численно в работе Мержанова А.Г. [9]. Предложен ряд приближенных решений задачи, в частности, Томасом [11, 12], Буркиной Р.С. [14], Сеплярским Б.С. [15].

В ряде последующих исследований [2, 16, 17] разрабатывалась методика определения критических условий самовозгорания материалов, прогретых выше температуры контактирующего с ними атмосферного воздуха. Задача решалась для условий теплообмена очага при граничных условиях третьего рода. Тепловое состояние подобной системы описывается уравнением

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} = \delta \cdot e^{\theta} + \nabla^2 \theta \quad (3)$$

при условиях однозначности:

$$\tau = 0; \quad \theta = \begin{cases} 0, \xi \leq R_0 \\ -\theta_0, \xi > R_0 \end{cases}; \quad (4)$$

$$\tau > 0; \quad \xi = 0; \quad \frac{\partial \theta}{\partial \xi} = 0; \quad \xi = R_0, \quad \theta = -\theta_0 \quad (5)$$

В решении использовались допущения, аналогичные принятым в работе [15]. Получены соотношения, связывающие критический размер зоны реакции с начальным перепадом температур:

- для плоскопараллельного очага

$$1 - \frac{1}{\theta_0} = \operatorname{erf}\left(\frac{R_{0KP} - 1}{2}\right); \quad (6)$$

- для сферического очага

$$1 - \operatorname{erf}\left(\frac{R_{0KP} - 1,732}{2}\right) = \frac{1,732}{\theta_0 \cdot R_{0KP}}; \quad (7)$$

- для цилиндрического очага

$$1 - \operatorname{erf}\left(\frac{R_{0KP} - 1,414}{2}\right) = \frac{1}{\theta_0 \cdot \sqrt{R_{0KP}}}, \quad (8)$$

где $R_{0KP} = \sqrt{\delta_{KP}}$ — критический радиус зоны реакции.

На основании обработки результатов расчета предложены интерполяционные формулы для определения критических значений параметра Франк-Каменецкого. Например, для наиболее часто встречающихся конфигураций

- цилиндра: $\delta_{KP} = 9,87(\ln \theta_0)^{0,7}; \quad (9)$

- бруса: $\delta_{KP} = 6 \cdot \ln(M \cdot \theta_0);$

при $p > 2$ $\delta_{KP} = 4,98 \cdot \ln(1,2 \cdot \theta_0); \quad (10)$

$$\begin{aligned} 1 \leq p \leq 2 \quad & \omega = 50,1 - 118p + 111p^2 - 45p^3 - 6,76p^4 \\ & m = -26,7 + 87,6p - 93,7p^2 + 42,2p^3 - 6,86p^4, \end{aligned} \quad (11)$$

где p — соотношение среднего и наименьшего размеров бруса.

Экспериментальное изучение этого явления в лабораторных условиях [2, 16, 17] показало, что расчет критической температуры очагового самовозгорания материала с помощью найденных формул приводит к погрешности, не превышающей 8°C, по сравнению с экспериментом.

Приемлемое для практического использования решение задачи в нестационарной постановке получено авторами [18, 19]. Расчет периода индукции самовозгорания очагов большого размера рекомендуется выполнять с применением следующих интерполяционных зависимостей:

$$\tau = \frac{A \cdot B \cdot \Psi \cdot \sqrt{\theta^0 + \theta_*}}{\theta_0^{1,5} \cdot e^{\theta_*} - (\theta_0 + \theta_*)^{1,5}}, \quad (12)$$

где $A = \varphi^{-0,71} \cdot \theta_*^{1,4} \cdot \Delta^{2,9};$

$$\varphi = \frac{\theta_*}{\delta_{KP}}; \quad (13)$$

при $\delta_{KP} \leq 6,5$ $B = 1,03 \cdot 0,79^{\frac{1}{\theta_*}} \cdot \theta_*^{-1,62}; \quad (14)$

при $\delta_{KP} > 6,5$ $B = 0,16 \cdot 5,69^{\theta_*} \cdot \theta_*^{-0,35}. \quad (15)$

Максимальная ошибка оценки периода индукции отмечена лишь в одном случае, прочие экспериментальные

результаты описываются зависимостью (11) с погрешностью не более 15%. Величина усредненной относительной погрешности составляет 8,3%. Выражение (11) не должно иметь ограничений к применению в наиболее широком диапазоне изменения учитываемых им параметров. Вполне удовлетворительное описание результатов лабораторных экспериментов с его помощью позволяет рекомендовать формулы (11–15) для оценки периода индукции очагового самовозгорания скоплений материала практически важных масштабов (в штабелях, бункерах и т.п.), прогретого выше температуры окружающей среды.

Выполнены расчеты условий очагового самовозгорания зернопродуктов в условиях хранения. В качестве примера приведем результаты расчета для зерна ржи, хранящегося в силосах цилиндрической формы (рис. 1, 2). На рис. 1 представлена зависимость критического размера силоса (половина диаметра) от температуры прогрева загруженного в него материала. Очаговое самовозгорание ржи возможно в силосах с днищем диаметром 4 м и более (соответствует критическим температурам менее 100°C). В силосе диаметром 11 м зерно может самовозгореться при прогреве всего до 50°C. Весь вопрос: за какое время?

На рис. 2 представлены результаты расчета температурной зависимости периода индукции процесса очагового самовозгорания ржи в силосе «классического»

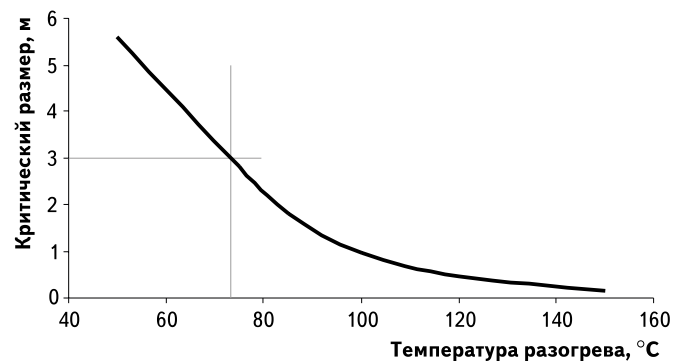


Рис. 1. Зависимость критического размера силоса цилиндрической формы от температуры разогрева зерна ржи

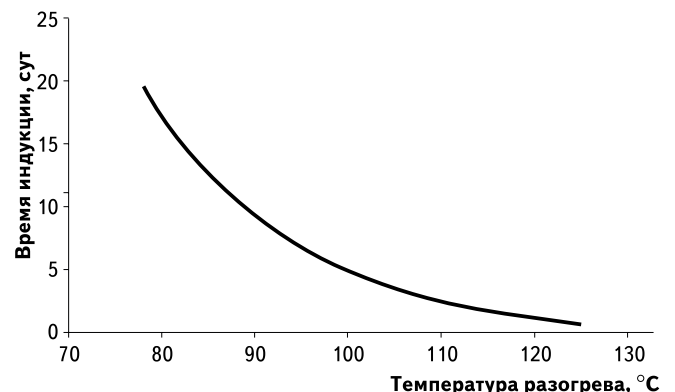


Рис. 2. Температурная зависимость периода индукции

размера (с диаметром горизонтального сечения 6 м). Как показывает перекрестие на рис. 1, в таком силосе рассматриваемый продукт самовозгорится уже при разогреве до 74°C. Но период индукции очагового самовозгорания становится меньше десяти суток при самонагревании массы материала до температур от 90°C и выше. При таких разогревах микробиологическое самовозгорание ржаного зерна в силосах диаметром 6 м возможно. Если содержание микрофлоры в зерне допускает разогрев до температур менее 90°C, зерновая масса благополучно остынет и самовозгорание продукта не произойдет.

Представленный комплекс методов предложен для выявления проблем при хранении, транспортировании и переработке самовозгорающейся продукции, в том числе зерна, и обоснования пожарно-профилактических мероприятий.

Литература

1. Горшков, В.И. Самовозгорание веществ и материалов / В.И. Горшков. — М.: ВНИИПО. — 2003. — 445 с.
2. Корольченко, И.А. Тепловое самовозгорание насыпей и отложений твердых дисперсных материалов / И.А. Корольченко: Диссертация на соиск. ученой степени доктора техн. наук. — М.: ВНИИПО, 2007. — 472 с.
3. Bowes P.C. Self-heating: evaluating and controlling the hazards. — London: 1984. — 500 p.
4. Барзыкин, В.В. К нестационарной теории теплового взрыва / В.В. Барзыкин [и др.] // ПМТФ. — 1964 — №3. — С. 118–125.
5. Абрамова, Л.Т. Кинетика термического разложения и тепловой взрыв муки / Л.Т. Абрамова, В.Г. Абрамов, А.Г. Мержанов // ЖФХ. — 1969. — Т. 18. — №5. — С. 1163–1167.
6. Корольченко, И.А. Удельное тепловыделение образцов при определении условий теплового самовозгорания / И.А. Корольченко // Пожарная безопасность. — 2004. — №5. — С. 55–59.
7. Корольченко, И.А. Расчет критических параметров для теплового самовозгорания слоя материалов с учетом выгорания / И.А. Корольченко, В.И. Горшков, Д.Н. Соколов // Пожарная безопасность. — 2006. — №1. — С. 24–33.
8. Корольченко, И.А. Методы определения критических условий самовозгорания твердых дисперсных материалов / И.А. Корольченко [и др.] // Материалы XIV Симпозиума по горению и взрыву, г. Черногловка, 13–17 октября 2008 г. — Черногловка, 2008. — С. 96.
9. Мержанов, А.Г. Задача об очаговом тепловом взрыве / А.Г. Мержанов, В.В. Барзыкин, В.Т. Гонтковская // ДАН СССР. — 1963. — Т. 148. — №2. — С. 380–383.
10. Merzhanov A.G. On critical conditions of thermal explosion of a hot spot // Combust. and Flame, 1966, V. 10, №4. — P. 341–348.
11. Thomas P.H. A comparison of some hot spot theories // Combust. and flame, 1965, Vol. 9, № 4. — P. 369–372.
12. Thomas P.H. An approximate theory of «hot spot» criticality // Combust. and flame, 1973, Vol. 21, № 1. — P. 99–109.
13. Friedman M.H. A generalized thermal explosion criterion — exposition and illustrative applications // Combust. and flame, 1967, Vol. 11, № 3. — P. 239–246.
14. Буркина, Р.С. О возбуждении химической реакции в «горячей точке» / Р.С. Буркина, В.Н. Вилунов // Физика горения и взрыва. — 1980. — Т. 16. — №4. — С. 75–79.
15. Сеплярский, Б.С. Анализ нестационарной картины воспламенения очага разогрева / Б.С. Сеплярский, С.Ю. Афанасьев // Физика горения и взрыва. — 1989. — Т. 25. — №6. — С. 9–13.
16. Корольченко, И.А. Экспериментальное изучение очагового самовозгорания / И.А. Корольченко, В.И. Горшков, А.В. Казаков // Материалы XIX научно-практ. конф. по вопросам борьбы с пожарами: «Пожарная безопасность многофункциональных и высотных зданий и сооружений», г. Балашиха, 1–2 ноября 2005 г. — М.: ВНИИПО. — 2005. — Ч. 1. — С. 128–129.
17. Казаков, А.В. Определение критических условий для очагового самовозгорания материалов: Диссертация на соискание ученой степени кандидата техн. наук. — М.: ВНИИПО, 2006. — 122 с.
18. Горшков, В.И. Способ расчета времени индукции при очаговом самовозгорании материалов. Ч. 1 / В.И. Горшков, И.А. Корольченко // Пожарная безопасность. — 2010. — №3. — С. 72–77.
19. Горшков, В.И. Способ расчета времени индукции при очаговом самовозгорании материалов. Ч. 2 / В.И. Горшков, И.А. Корольченко // Пожарная безопасность. — 2010 — №4. — С. 59–63. ■



ИНФОРМАЦИЯ

В Хабаровском районе Хабаровского края сельхозпредприятия собрали в этом году рекордный урожай сои — 12,58 тыс. т против 5,77 тыс. т в 2016 г. В прошлом году с одного гектара в среднем получено 11 ц сои, в 2017 г. — 16 ц. Рекордсменом среди

районных предприятий и на уровне Хабаровского края стало ООО «Сергеевское» — здесь осенью собирали 27 ц с гектара. «Такие цифры у нас звучат впервые с 2013 г. Высокие показатели стали возможными благодаря, во-первых, четкой и своевременной

подготовке предприятий, во-вторых, хорошим погодным условиям этой осени: все работы были выполнены в срок», — сказал первый заместитель главы администрации Хабаровского муниципального района А. Яц.

nadv.ru