

Литература

1. Сыроедов Н.Е., Зарубин А.В., Бельский О.В. Анализ функционирования технических средств нефтепродуктообеспечения // В сб.: Труды 25 ГОСНИИ МО РФ. – М.: 2010, Вып. 55. с. 300-312.
2. Таран В.М., Дмитриев С.В. Исследование процесса коррозионного разрушения стенки горизонтального стального заглубленного резервуара для горючего // В сб.: Труды 25 ГОСНИИ МО РФ. М.: 2010, Вып. 55. с. 313-317.
3. Маньшев Д.А., Попов О.В., Швыков Р.В. Исследование сохраняемости углеводородных ракетных топлив в средствах хранения // В сб.: Труды 25 ГОСНИИ МО РФ. М.: 2010, Вып. 55. с. 79-85.
4. Маньшев Д.А., Абдуллин Ф.Н., Александров А.Ю. Способ локализации проливов гептила на грунт и воду с использованием твердого остатка пиролиза // В сб.: Труды 25 ГОСНИИ МО РФ. М.: 2010, Вып. 55. с. 86-90.
5. Касаткин А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии. М.: Химия. 1973. 750 с.
6. Идельчик И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. М.: Машиностроение. 1992. 672 с.
7. Константинов Н.М., Петров Н.А., Высоцкий Л.И. Гидравлика, гидрология, гидрометрия. М.: Высшая школа. 1987. 432 с.
8. Рабинович Е.З. Гидравлика. М.: Недра. 1980. 280 с.
9. Топлива, смазочные материалы, технические жидкости. Ассортимент и применение: Справочник под ред. В.А. Школьников. М.: ИЦ Техинформ. 1999. 596 с.
10. СНиП 23-01-99. Строительная климатология.

Способ оценки возможности микробиологического самовозгорания продукции на объектах хранения

Гаврилов А.В., д.т.н. Корольченко И.А.
Университет машиностроения

Аннотация. Показана возможность микробиологического самовозгорания продукции в условиях хранения. Представлена методология расчёта условий очагового самовозгорания хранимых материалов. Предложены алгоритмы определения безопасных условий хранения. Приведены основные направления деятельности по профилактике микробиологического самовозгорания на хозяйственных объектах.

Ключевые слова: универсальный алгоритм, подготовка проб, компоненты природной среды, опасные химические вещества, автоматизация, отбор проб, скрининг, экспресс-методы, фильтрование.

На объектах складского назначения России хранится огромный перечень материалов растительного и животного происхождения, некоторые из них хранятся длительное время. Различные зернопродукты хранятся на элеваторах, в крытых складских помещениях содержатся овёс, натуральный каучук, хлопок, шерстяные изделия, крупы, мука и т.п. Вся эта продукция характеризуется невысокой теплопроводностью, что способствует аккумуляции тепла, выделяющегося в результате процессов термоокисления. Если характеристический размер ёмкости с сыпучим материалом или зоны компактной укладки (штабеля) продукции превышает критическую для заданных температурных условий величину, то в результате непрерывного разогрева массы материала произойдёт самовозгорание. Ограничивая размер бункера или штабеля, можно самовозгорание хранящейся продукции предотвращать. В этом случае будет обеспечиваться эффективный теплоотвод.

В последнее время популяризируются такие мероприятия по снижению возможности самосогревания материалов (прежде всего – зерна), как предварительная сушка и обеспечение охлаждения продукции при хранении. Это, прежде всего, способствует замедлению процессов жизнедеятельности микроорганизмов, сопровождаемых выделением тепла. Но самовозгорание многих органических веществ может происходить без участия микрофлоры и при относительно невысоких температурах (близких к условиям хранения). Любая термообработка продукции приводит к дополнительным осложнениям – необходимо контролировать время пребывания частиц материала в зоне повышенных температур (возможно застревание зёрен и т. п.) и требуемую степень охлаждения перед засыпкой в бункер (формированием штабеля). Если тлеющая частица попадёт в ёмкость хранения, она может стать источником зажигания всей массы продукции. Если материал нагрет выше температуры окружающей среды, возможна реализация механизма «очагового» самовозгорания. В этом случае охлаждения засыпанной в силос или сложенной в штабель массы не произойдёт из-за плохого отвода тепла, температура продукции начнёт расти. Гарантированно избежать самовозгорания продукции можно только в результате расчётного обоснования (с помощью современных методов) и практической реализации безопасных условий хранения материалов. В настоящее время появилась возможность научного обоснования мероприятий по профилактике как теплового (без участия микроорганизмов), так и микробиологического самовозгорания хранимых материалов.

Профилактика самовозгорания продукции очень важна, так как пренебрежение соответствующими мероприятиями может приводить к внезапному возгоранию зоны хранения на большой площади (в большом объёме). Бороться с масштабным возгоранием всегда трудно, избежать серьёзного материального ущерба скорее всего не удастся. Самовозгорание может приводить к наиболее масштабным и быстрым потерям хранимой продукции.

В данной статье рассматриваются вопросы профилактики микробиологического самовозгорания, неконтролируемого роста температуры материала в результате жизнедеятельности микроорганизмов. Такие процессы характерны, прежде всего, для продукции растительного и животного происхождения (зерно, натуральный каучук, шерсть и т. д.). Пожарная опасность объектов хранения растительного сырья исследовалась давно, особенно ценные с практической точки зрения результаты получены в 80-х – 90-х гг. [1]. При этом изучались хранилища, в которых развивались процессы, связанные с жизнедеятельностью микрофлоры. Причины взрывов внутри корпусов оборудования хранилищ растительного сырья впервые объяснены выделением горючих газов в результате протекания микробиологических процессов. Дегтяревым А.Г. приближенно и численно решена задача о распространении тепла в самонагревающейся насыпи при пластовом и сферическом очагах внутри нее. Экспериментально показано, что температура в центре влажной массы растительного сырья достигает величины 55-65 °С за 3-5 суток. Предложенные профилактические мероприятия связаны прежде всего с ранним обнаружением развития микробиологических процессов (контроль самонагревания растительной массы, начала выделения газообразных продуктов и т. п.).

В работах, выполненных под руководством Г.Б. Манелиса и А.В. Крестинина [2], представлена математическая модель процесса жизнедеятельности микроорганизмов с учетом окисления питательного субстрата кислородом воздуха в неизотермических условиях. Характер изменения некоторых параметров, учитываемых моделью, подтвержден надежными экспериментальными данными. Этот метод позволяет с достаточной точностью описать процессы самонагревания различной увлажненной органической массы растительного происхождения. Процессы самонагревания, связанные с жизнедеятельностью микрофлоры, с учетом испарения содержащейся в питательной среде влаги и оценкой влияния повышения температуры на снижение численности популяции микроорганизмов смоделированы в работах Ю.И. Рубцова с сотрудниками [3]. Представленные этими исследователями экспериментальные результаты позволяют выделить диапазоны изменения температуры среды, при которых по-

следовательно преобладают процессы питания микрофлоры, гидролиза и деструкции зерновой массы. С 70-80 °С тепловыделение в увлажненной массе связано в основном с гидролизом. После достижения температур 160 °С влиянием гидролиза можно пренебрегать. Существенную роль при 143 °С играет термическая деструкция зерна, эти процессы при возможности дальнейшего разогрева массы и приводят к возгоранию. Отмечено также, что начинающееся с 50-60 °С влияние интенсификации поглощения тепла (за счет испарения влаги) во многих случаях будет препятствовать достижению режима теплового взрыва. Главным результатом этих работ является теоретическое описание процессов микробиологического самонагрева.

Расчетные методы могут применяться также при оценке возможности перехода микробиологического самонагрева к режиму неконтролируемого роста температуры с последующим возгоранием хранимого продукта. Критические условия такого перехода целесообразно оценивать по алгоритмам методов расчета для «очагового» самовозгорания (для продукции, нагретой выше температуры окружающей среды). Подобная методика была принята на вооружение специалистами МЧС России [4] для обоснования профилактических мероприятий по пожарной безопасности объектов складского назначения.

Для подготовки положений упомянутой методики в диссертации одного из авторов [5] решена задача для условий теплообмена очага с нереакционноспособной средой по закону Ньютона и граничным условиям третьего рода. Тепловое состояние реагирующей системы в безразмерном виде описывается уравнением:

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} = \delta \cdot e^{\theta} + \nabla^2 \theta \quad (1)$$

Задача решалась при следующих условиях однозначности:

$$\tau = 0; \theta = \begin{cases} 0, \xi \leq R_0 \\ -\theta_0, \xi > R_0 \end{cases}, \quad (2)$$

$$\tau > 0; \xi = 0, \frac{\partial \theta}{\partial \xi} = 0; \xi = R_0, \theta = -\theta_0, \quad (3)$$

где: $\xi = \frac{x}{r}$ – безразмерная координата;

R_0 – радиус реакционной зоны;

$\delta = \frac{Q\rho}{\lambda} \frac{E}{RT_0^2} r^2 k_0 e^{-\frac{E}{RT_0}}$ – значение параметра Франк-Каменецкого;

T_0 – температура окружающей среды; Q – теплота реакции; k_0 – предэкспоненциальный множитель; c – теплоёмкость вещества; ρ – плотность вещества; λ – коэффициент теплопроводности; r – характерный размер очага; x – координата; t – безразмерное время; E – энергия активации; R – универсальная газовая постоянная;

$\theta = \frac{E}{RT_0^2} (T - T_0)$ – безразмерная температура;

$\theta_0 = \frac{E}{RT_G^2} (T_G - T_0)$;

T_G – температура предварительного прогрева материала;

T – текущая температура.

Для решения использовались допущения работы Б.С. Сеплярского с сотрудниками [6]. В результате решения задачи получены соотношения, связывающие критический размер зоны реакции с начальным перепадом температур:

- для плоскопараллельного очага:

$$1 - \frac{1}{\theta_0} = \operatorname{erf}\left(\frac{R_{0KP} - 1}{2}\right), \quad (4)$$

- для сферического очага:

$$1 - \operatorname{erf}\left(\frac{R_{0KP} - 1,732}{2}\right) = \frac{1,732}{\theta_0 \cdot R_{0KP}}, \quad (5)$$

- для цилиндрического очага:

$$1 - \operatorname{erf}\left(\frac{R_{0KP} - 1,414}{2}\right) = \frac{1}{\theta_0 \cdot \sqrt{R_{0KP}}}, \quad (6)$$

где: $R_{0KP} = \sqrt{\delta_{KP}}$ – радиус зоны реакции; δ_{KP} – критическое значение параметра Франк-Каменецкого (при критической температуре $T_{кр}$ окружающей среды).

На основании обработки данных расчётов по формулам (4)-(6) критические условия самовозгорания представлены более простыми выражениями:

$$\text{для пластины } (j=0) \quad \delta_{KP} = 5,05 (\ln \theta_0)^{0,93}, \quad (7)$$

$$\text{для цилиндра } (j=1) \quad \delta_{KP} = 9,87 (\ln \theta_0)^{0,7}, \quad (8)$$

$$\text{для сферы } (j=2) \quad \delta_{KP} = 12,75 (\ln \theta_0)^{0,65}, \quad (9)$$

где: j – фактор формы.

Расчет критических условий для куба и прямоугольных брусов проводился по предложенному Томасом соотношению:

$$\text{для куба } (j=3,28) \quad \delta_{KP} = 10,25 (\ln \theta_0)^{0,61}, \quad (10)$$

Приближенные выражения для прямоугольного бруса представлены в виде $\delta_{KP} = v \cdot \ln(m \cdot \theta_0)$:

$$\text{при } p > 2 \quad \delta_{KP} = 4,98 \cdot \ln(1,2 \cdot \theta_0), \quad (11)$$

$$\begin{aligned} 1 \leq p \leq 2 \quad & v = 50,1 - 118p + 111p^2 - 45p^3 - 6,76p^4 \\ & m = -26,7 + 87,6p - 93,7p^2 + 42,2p^3 - 6,86p^4 \end{aligned} \quad (12)$$

где: p – отношение среднего и наименьшего размера бруса.

Экспериментальное изучение этого явления в лабораторных условиях [5,7] выполнялось в следующей последовательности. Предварительно в термошкафу прогревались тонкие слои материалов. Затем исследуемый продукт помещался в кубические контейнеры, выполненные из металлической сетки, различного размера с высотой от 0,1 до 0,5 м. В большинстве экспериментов прогретый материал остывал при комнатной температуре. Контейнеры с ребром 0,1 м подвешивались в объеме рабочей камеры термостата с температурой среды несколько ниже температуры предварительного прогрева. Показано, что расчет критической температуры очагового самовозгорания материала с помощью формулы (10) приводит к погрешности, не превышающей 8 °С, по сравнению с экспериментом.

Пользуясь приведёнными выше выражениями, можно определить безопасный размер штабеля продукции или бункера (силоса) для сыпучих материалов, в которых нагретый до определённой температуры продукт не самовозгорится, а постепенно остынет. По этим же формулам определяется безопасная температура прогрева материала, складываемого в штабель или ёмкость заданных размеров.

Профилактика микробиологического самовозгорания может обеспечиваться при использовании безопасных размеров штабелей и емкостей для температур прогрева материала до 100 °С (согласно авторам [8-10]). Если же критическая для данного размера скопления

продукции температура оказывается ниже, необходимо оценивать время индукции процесса очагового самовозгорания. Известно, что в процессе жизнедеятельности микроорганизмы разогревают среду своего обитания до температур 70-100 °С [8-10]. Эти температуры являются предельными для существования микрофлоры, при таком прогреве она погибает. Разогретый материал после гибели микроорганизмов начинает остывать. Процесс самонагрева зерновой массы [11] характеризуется инкубационным периодом (с малой скоростью повышения температуры), продолжающимся обычно от 2 до 25 суток. За ним следует резкое повышение скорости разогрева массы растительного материала (в 2-22 раза), приводящее к достижению максимальной температуры материала. Температура, близкая к максимальной, сохраняется в материале от 3 до 8 суток. Затем происходит постепенное охлаждение продукции.

Если расчётное значение периода индукции процесса очагового самовозгорания превышает 10 суток (или другое установленное экспериментом время сохранения материалом околопредельных для самонагрева температур) при заданной степени разогрева продукции, микробиологического самовозгорания в зоне хранения не произойдёт. Если же расчётная величина периода индукции оказывается меньше, необходимо предусматривать мероприятия по профилактике самовозгорания (уменьшать размер применяемых для хранения бункеров, штабелей и т. п.).

Приемлемое для практического использования решение задачи в нестационарной постановке (для возможности расчёта периода индукции) получено авторами [12]. В первой части этой статьи выведена формула, расчет по которой с удовлетворительной погрешностью (не более 10 %) соответствует результатам лабораторных экспериментов [5,7]. Эти опыты выполнялись при начальном разогреве материала выше температуры окружающей среды (начальном температурном напоре θ_0), близком к критическим значениям для кубических образцов со стороной не более 0,5 м. Величина θ_0 при этом менялась от 6,9 до 9,2. При увеличении размера зоны компактной укладки или засыпки продукции (например – нагретый материал засыпается в бункер или формируется в штабель) значения критической температуры нагрева $T_{\Gamma} = T_{\text{кр}}$ и величины θ_0 будут снижаться. Как показывают расчеты, критическое значение θ_0 для штабеля продукции шириной 1,8 м может приближаться к 3. Область применения полученного в первой части статьи [12] выражения оказывается существенно уже.

В первой части упомянутой статьи также было показано, что функция под знаком интеграла в полученном решении имеет разрыв. Этот разрыв связан с условиями баланса функций, характеризующих тепловыделение и теплоотвод из реакционной зоны, и смещается при изменении условий задачи. Для получения выражения, определяющего решение поставленной задачи в надкритической области, требуется ввести следующие обозначения:

$$\theta = \frac{E}{RT_{\text{кр}}^2} (T - T_{\text{кр}}) \text{ – безразмерная температура,} \quad (13)$$

$$\theta_{\text{н}} = \frac{E}{RT_{\text{кр}}^2} (T_{\text{н}} - T_{\text{кр}}) \text{ – начальный температурный напор,} \quad (14)$$

$$\theta_0 = \frac{E}{RT_{\text{кр}}^2} (T_{\text{кр}} - T_0), \quad (15)$$

где: $T_{\text{н}}$ – начальная температура очага; $T_{\text{кр}}$ – критическая температура прогрева очага (при превышении которой происходит самовозгорание).

Решаемая задача для ньютоновского охлаждения химически реагирующих тел в предположении Аррениусовской кинетики и реакции нулевого порядка может быть представлена в виде следующей системы уравнений:

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} = \frac{1}{\delta_{\text{кр}}} \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial \xi^2} + \frac{j}{\xi} \frac{\partial \theta}{\partial \xi} \right) + e^{\theta}, \quad (16)$$

$$\tau = 0; \theta = \theta_n, \quad (17)$$

$$\xi = 0; \quad \frac{\partial \theta}{\partial \xi} = 0, \theta = \theta_*, \quad (18)$$

$$\xi = 1; \quad -\frac{\partial \theta}{\partial \xi} = B \cdot i \cdot (\theta_0 + \theta), \quad (19)$$

где: $\tau = \frac{QEk_0 e^{-\frac{E}{RT_{\text{кр}}}}}{cRT_{\text{кр}}^2} t$ – безразмерное время; (20)

$$\delta_{\text{кр}} = \frac{QEk_0 \rho r^2 e^{-\frac{E}{RT_{\text{кр}}}}}{\lambda RT_{\text{кр}}^2} \text{ – критическое значение параметра Франк-Каменецкого; } \quad (21)$$

$$Bi = \frac{\alpha r}{\lambda} \text{ – параметр Био; } \quad (22)$$

θ_* – температура в центре образца; α – коэффициент теплоотдачи.

Задача в сформулированном виде не имеет аналитического решения, в связи с чем снова необходимо использовать приближенные методы. Считаем, что распределение температуры в очаге может быть описано полиномом второй степени:

$$\theta = A + B \cdot \xi + C \cdot \xi^2, \quad (23)$$

где коэффициенты полинома являются функциями только времени и должны быть определены из граничных условий.

Далее приведём основные этапы решения. Распределение температуры в тепловом очаге записывается следующим образом

$$\theta = \theta_* - \frac{B \cdot i}{2 + B \cdot i} \cdot (\theta_0 + \theta_*) \cdot \xi^2 = \theta_* - m \cdot (\theta_0 + \theta_*) \cdot \xi^2, \quad (24)$$

где: $m = \frac{Bi}{2 + Bi}$ (25)

Интегрирование уравнения (16) по координате:

$$\int_0^1 \frac{\partial \theta}{\partial \tau} d\xi = \int_0^1 \frac{1}{\delta_{\text{кр}}} \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial \xi^2} + \frac{j}{\xi} \frac{\partial \theta}{\partial \xi} \right) d\xi + \int_0^1 e^{\theta} d\xi, \quad (26)$$

приводит с учетом (24) к следующим результатам:

$$\int_0^1 \frac{\partial \theta}{\partial \tau} d\xi = \left(1 - \frac{m}{3}\right) \frac{d\theta_*}{d\tau}, \quad (27)$$

$$\int_0^1 \frac{1}{\delta_{\text{кр}}} \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial \xi^2} + \frac{j}{\xi} \frac{\partial \theta}{\partial \xi} \right) d\xi = -\frac{2m}{\delta_{\text{кр}}} (j+1) (\theta_0 + \theta_*). \quad (28)$$

Для экспоненциального члена уравнения (26) получаем

$$\int_0^1 e^{\theta} d\xi = e^{\theta_*} \int_0^1 e^{-m(\theta_0 + \theta_*) \xi^2} d\xi = e^{\theta_*} \frac{\sqrt{\pi} \operatorname{erf}(\sqrt{m(\theta_0 + \theta_*)} \cdot \xi)}{2 \sqrt{m(\theta_0 + \theta_*)}} \Big|_0^1, \quad (29)$$

где: $\operatorname{erf} \sqrt{m(\theta_0 + \theta_*)} = \frac{2}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{\sqrt{m(\theta_0 + \theta_*)}} e^{-x^2} dx$ – интеграл вероятности Гаусса [13].

Для величин $m(\theta_0 + \theta_*) \gg 1$, характеризующих изучаемый процесс, интеграл вероятности практически равен единице и, с учетом $\text{erf}(0) = 0$, выражение (29) можно записать в виде:

$$\int_0^1 e^{-\theta} d\xi = e^{\theta_*} \sqrt{\frac{\pi}{4 \cdot m(\theta_0 + \theta_*)}}, \quad (30)$$

После интегрирования выражения (26) и умножения всех его членов на δ (параметр Франк-Каменецкого для текущей температуры процесса T в надкритической области) получаем следующее дифференциальное уравнение для изменения температуры очага:

$$\chi \cdot \frac{d\theta_*}{d\tau} = v \frac{e^{\theta_*}}{\sqrt{(\theta_0 + \theta_*)}} - \Delta \cdot \mu \cdot (\theta_0 + \theta_*), \quad (31)$$

$$\text{где: } \chi = \delta \left(1 - \frac{m}{3}\right) \quad (32); \quad v = \delta \sqrt{\frac{\pi}{4m}} \quad (33);$$

$$\mu = 2m(j+1) \quad (34); \quad \Delta = \frac{\delta}{\delta_{\text{кр}}} \quad (35).$$

Уравнение (31) является дифференциальным уравнением с разделенными переменными и может быть преобразовано к интегралу:

$$\tau = \int \frac{\chi \cdot \sqrt{(\theta_0 + \theta_*)} d\theta_*}{v e^{\theta_*} - \Delta \cdot \mu (\theta_0 + \theta_*)^{1,5}}, \quad (36)$$

Функция под интегралом (36) также имеет разрыв, так как уравнение (31) может характеризовать и докритические режимы процесса (с превалированием теплоотвода над тепловыделением). Разрыв рассматриваемой функции соответствует обнулению знаменателя формулы (36). Так как разность в знаменателе выражения (36) характеризует баланс функций тепловыделения и теплоотвода, нулевой баланс определяет критическое условие задачи. Кроме того, прогрев материала до критической температуры ($T=T_{\text{кр}}$) соответствует $\theta = \theta_* = 0$. Учитывая вышеизложенное, остывание очага становится невозможным при условии:

$$v \geq \Delta \cdot \mu \cdot \theta_0^{1,5}. \quad (37)$$

В этом случае функция под интегралом (36) асимптотически приближается к оси ординат при $\theta_* \rightarrow 0$ и к оси абсцисс при $\theta_* \rightarrow \infty$, графически характеризуя весь диапазон сверхкритических для процесса условий (см. рисунок 1). Максимальная величина периода индукции процесса самовозгорания может определяться по выражению

$$\tau = \int \frac{\Psi \cdot \sqrt{(\theta_0 + \theta_*)} d\theta_*}{\theta_0^{1,5} \cdot e^{\theta_*} - (\theta_0 + \theta_*)^{1,5}}, \quad (38)$$

$$\text{где: } \Psi = \frac{\chi}{\Delta \cdot \mu}. \quad (39)$$

Интеграл (38) не берется в конечном виде, но может быть определен численно в пределах изменения переменной θ_* от θ_n до ∞ . Для более широкого практического использования полученного решения целесообразно найти приближенную зависимость, экстраполирующую имеющиеся экспериментальные результаты изучения процесса очагового самовозгорания [5]. Если при определении параметров θ_* и δ принять $T=T_n$, экспериментальные данные работы [5] характеризуются изменением величин θ_0 от 7 до 9,1; значений θ_* в диапазоне 0,076-0,85; параметра $\delta_{\text{кр}}$ от 5 до 18,1; величин δ от 5,3 до 24,9; значений Δ от 1,07 до 1,94.

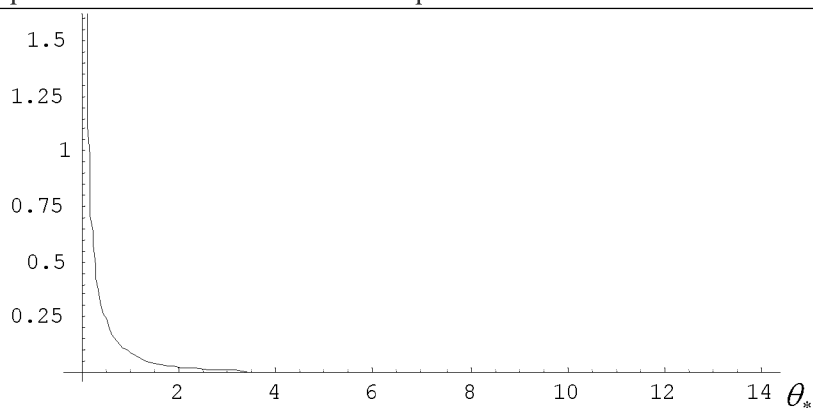


Рисунок 1 – Вид функции $f(\theta_*) = \frac{\Psi \cdot \sqrt{(\theta_0 + \theta_*)}}{\theta_0^{1,5} \cdot e^{\theta_*} - (\theta_0 + \theta_*)^{1,5}}$ (при $\theta_0 = 8,19$ и $\Psi = 1,06$)

Результаты эксперимента описываются с погрешностью не более 30 % (см. таблицу 1) следующей зависимостью:

$$\tau = \frac{A \cdot B \cdot \Psi \cdot \sqrt{\theta_0 + \theta_*}}{\theta_0^{1,5} \cdot e^{\theta_*} - (\theta_0 + \theta_*)^{1,5}}, \quad (40)$$

где: $A = \varphi^{-0,71} \cdot \theta_*^{1,4} \cdot \Delta^{2,9}$; (41) $\varphi = \frac{\theta_*}{\delta_{кр}}$; (42)

при $\delta_{кр} \leq 6,5$ $B = 1,03 \cdot 0,79^{\frac{1}{\theta_*}} \cdot \theta_*^{-1,62}$; (43)

при $\delta_{кр} > 6,5$ $B = 0,16 \cdot 5,69^{\theta_*} \cdot \theta_*^{-0,35}$. (44)

Таблица 1

Расчетные и экспериментальные значения периода индукции очагового самовозгорания

Материал	$T_{кр}$, К	$T_{н}$, К	T_0 , К	r , м	θ_0	θ_*	$\delta_{кр}$	Δ	τ_p	τ_*	Относительная погрешность, %
Сосновые опилки	424	429	293	0,25	8,19	0,281	13,60	1,293	1,099	1,556	29,35
	424	432	294	0,25	8,13	0,500	13,60	1,574	1,733	1,523	9,57
	436	443	295	0,20	8,46	0,118	17,07	1,115	1,480	1,513	2,14
	448	451	294	0,15	8,62	0,168	18,15	1,166	1,538	1,506	2,14
	448	453	292	0,15	8,74	0,280	18,15	1,290	1,656	1,524	8,61
	477	484	293	0,07	9,09	0,846	16,02	1,366	1,408	1,489	5,45
Торф	390	391	298	0,25	7,02	0,076	4,99	1,074	1,747	1,720	1,56
	397	402	298	0,20	7,29	0,368	5,21	1,403	1,835	1,696	8,19
	397	403	298	0,20	7,29	0,472	5,21	1,500	1,496	1,660	9,88
	408	419	298	0,15	7,67	0,732	6,10	1,941	1,713	1,670	7,94
Технический уголь	515	517	295	0,20	8,81	0,080	17,07	1,075	1,567	1,513	3,58
	504	506	293	0,25	8,82	0,084	17,75	1,078	1,648	1,484	11,1
	504	510	293	0,25	8,82	0,251	17,75	1,191	1,500	1,455	3,08
	515	521	294	0,20	8,85	0,240	17,07	1,239	1,379	1,528	9,76
	529	532	293	0,15	8,88	0,114	15,70	1,107	1,211	1,422	14,86
	529	538	293	0,15	8,95	0,342	15,70	1,353	1,359	1,511	10,08
	580	583	294	0,07	9,03	0,095	16,62	1,088	1,369	1,417	3,32

Максимальная ошибка оценки периода индукции отмечена лишь в одном случае, прочие экспериментальные результаты описываются зависимостью (40) с погрешностью не более 15 %. Величина усредненной относительной погрешности составляет 8,3 %. Выражение

(40) 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 (40)-(44) для оценки периода индукции очагового самовозгорания скоплений материала практически важных масштабов (в штабелях, бункерах и т. п.), прогретого выше температуры окружающей среды.

С учетом значений теплофизических характеристик семян различных зерновых культур [6] выполнены расчеты условий очагового самовозгорания зернопродуктов в условиях хранения. В качестве примера можно привести результаты расчёта для зерна ржи, хранящегося в силосах цилиндрической формы (см. рисунки 2 и 3). На рисунке 2 представлена зависимость критического размера силоса (половина диаметра) от температуры прогрева загруженного в него материала. Очаговое самовозгорание ржаного зерна возможно в силосах с диаметром 4 м и более (соответствует критическим температурам менее 100 °С). В силосе диаметром 11 м зерно может самовозгореться при прогреве всего до 50 °С. Весь вопрос: за какое время?

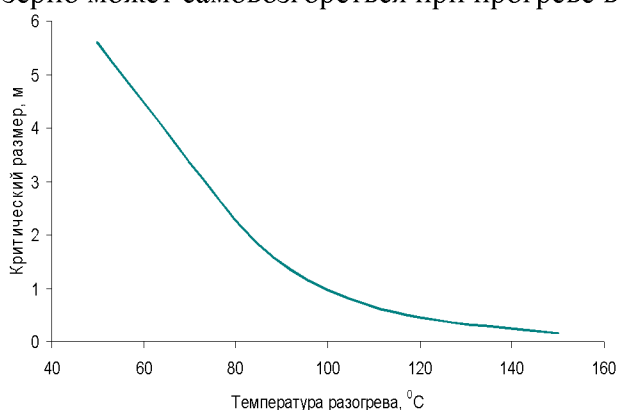


Рисунок 2 – Зависимость критического размера цилиндрической ёмкости от температуры разогрева ржаного зерна

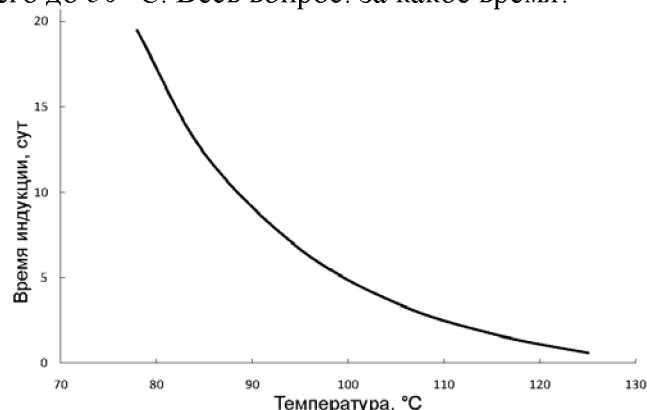


Рисунок 3 – Температурная зависимость периода индукции

На рисунке 3 представлены результаты расчёта температурной зависимости периода индукции процесса очагового самовозгорания ржаного зерна в силосе «классического» размера (с диаметром горизонтального сечения 6 м). Как показывает пересечение на рисунке 2, в таком силосе рассматриваемый продукт самовозгорится уже при разогреве до 74 °С. Но период индукции очагового самовозгорания становится меньше 10 суток при самонагревании массы материала до температур около 90 °С 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 °С, зерновая масса благополучно остынет и самовозгорание продукта не произойдёт.

В случае установления опасности самовозгорания продукции при хранении требуется выполнение комплекса профилактических мероприятий. Например, профилактика развития пожаров и взрывов в емкостях зернохранилищ должна предусматривать следующее:

- непрерывный мониторинг температурного режима хранения;
- мониторинг состава горючих компонентов газовой среды в случае аварийного режима самосогревания (при необходимости – с возможностью управления системами вентиляции и флегматизации);
- ограничение размеров, секционирование емкостей для конкретных видов продукции (на основании расчета безопасных характеристик процесса);
- расчётное обоснование режима выгрузки аварийного резервуара и определение способов защиты смежных с ним емкостей;
- расчётное обоснование характеристик систем стабилизации температуры (флегматизация и охлаждение) выгружаемого из аварийных емкостей продукта.

Вывод

Представлена методология расчёта условий очагового самовозгорания хранимых материалов. Показана возможность микробиологического самовозгорания продукции в условиях хранения. Предложенные алгоритмы позволяют определить безопасные для самовозгорания условия хранения. Приведены основные направления деятельности по профилактике микробиологического самовозгорания на хозяйственных объектах.

Литература

1. Вогман Л.П., Горшков В.И., Дегтярев А.Г. Пожарная безопасность элеваторов. – М.: Стройиздат. 1993. 288 с.
2. Крестинин А.В., Перегудов Н.И., Самойленко Н.Г., Манелис Г.Б. Возникновение очага самосогревания при хранении зерна // Химическая физика. 2002, том 21, № 12, с. 54-65.
3. Рубцов Ю.И., Казаков А.И., Рубцова Е.Ю. Кинетические закономерности тепловыделения при развитии микроорганизмов на зерне пшеницы и оценка возможности теплового самовоспламенения, инициированного этим процессом // Химическая физика. 2003, том 22, № 6, с. 79-86.
4. Методика обеспечения пожарной безопасности складирования самовозгорающихся материалов. – М.: ФГУ ВНИИПО МЧС РФ, 2008. 33 с.
5. Корольченко И.А. Тепловое самовозгорание насыпей и отложений твердых дисперсных материалов: Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. М.: ВНИИПО, 2007. 472 с.
6. Сеплярский Б.С., Афанасьев С.Ю., Амосов А.П. Расчет критических условий воспламенения системы очагов разогрева // Физика горения и взрыва, 1990, т. 26, № 6. с. 16-20.
7. Корольченко И.А., Горшков В.И., Казаков А.В. Экспериментальное изучение очагового самовозгорания // Материалы XIX Научно-практической конференции по вопросам борьбы с пожарами: «Пожарная безопасность многофункциональных и высотных зданий и сооружений», г. Балашиха, ВНИИПО 1-2 ноября 2005г. Часть 1. М.: ВНИИПО. 2005. с. 128-129.
8. Кривачев И.Т. Противопожарные мероприятия при сушке и очистке хлопка-сырца. - М.: Минкоммунхоз. 1960. 136 с.
9. Кельберт Д.Л. Предупреждение пожаров в хлопкоочистительной промышленности. М.: Легкая индустрия. 1973. 158 с.
10. Таубкин С.И., Таубкин И.С. Пожаро- и взрывоопасность пылевидных материалов и технологических процессов их переработки. М.: Химия. 1976. 264 с.
11. Трисвятский Л.А. Хранение зерна. М.: Агропромиздат. 1986. 352 с.
12. Горшков В.И., Корольченко И.А. Способ расчета времени индукции при очаговом самовозгорании материалов. Части 1 и 2 // Пожарная безопасность, 2009, № 3-4.
13. Справочник по специальным функциям. Под ред. М. Абрамовица и И. Стиган. М., Наука, 1979, 832 с.
14. Зверев С.В., Зверева Н.С. Физические свойства зерна и продуктов его переработки. М.: ДеЛи принт. 2007. 176 с.

Способ расчёта времени до самовозгорания отложения веществ при несимметричном теплообмене с окружающей средой

Оськина Т.А., д.т.н. Корольченко И.А.
Университет машиностроения

Аннотация. Разработана методика, позволяющая рассчитывать период индукции теплового самовозгорания отложений при несимметричном теплообмене. С помощью неё можно определить пожароопасные и пожаробезопасные толщины отложений на поверхности различного технологического оборудования, время