

**ПОЖАРНАЯ ОПАСНОСТЬ ОТЛОЖЕНИЙ НА ОБОРУДОВАНИИ,
В ВЕНТИЛЯЦИОННЫХ СИСТЕМАХ И МЕСТНЫХ ОТСОСАХ ОБЪЕКТОВ
ПЕРЕРАБОТКИ И ХРАНЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ РАСТИТЕЛЬНОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ**

*Вогман Л. П., д. т. н., гл. науч. сотрудник,
Всероссийский научно-исследовательский институт
противопожарной обороны (ВНИИПО) МЧС России, г. Москва,
Хрюкин А. В., ст. инспектор ОВР,
Воронежский институт ГПС МЧС России, г. Воронеж*

Технологические процессы переработки, транспортирования и хранения материалов растительного происхождения (далее по тексту растительного сырья) на предприятиях по хранению и переработке растительного сырья: хлебоприемных пунктах, элеваторах, комбикормовых заводах, мельничных комбинатах (далее объекты защиты) связаны с транспортированием, измельчением, дроблением, смешиванием мелкодисперсных продуктов. Поэтому в производстве неизбежно присутствует большое количество горючей пыли, состоящей из горючих органических материалов растительного происхождения, которые со временем накапливаются на оборудовании и в системах вентиляции.

Пожаровзрывоопасность объектов защиты обуславливается количеством и физико-химическими свойствами горючих веществ и материалов, обращающихся в технологических процессах, особенностями технологических процессов, видами и исполнением оборудования.

При авариях в помещениях взрывоопасные среды возникают в первую очередь вблизи места утечки или выброса горючих веществ и материалов, а затем могут распространяться по всему помещению.

Для локализации утечек и выбросов горючих веществ и материалов и предотвращения пожаров и взрывов наряду с общеобменной вытяжной и аварийной вентиляцией применяют местные отсосы, которые устанавливают в местах генерации пожаровзрывоопасных сред. Требования пожарной безопасности к системам вентиляции и местных отсосов сформулированы в [1].

Если удаляемые горючие вещества способны взаимодействовать друг с другом или конденсироваться и накапливаться в воздуховодах, вентиляционном оборудовании, то для таких веществ системы местных отсосов должны быть изолированными для каждого помещения или каждой единицы оборудования.

Опасность самовозгорания растительного сырья характерна не только для процессов переработки и хранения, но и для отложений сырья в оборудовании, воздуховодах вентиляционных систем и местных отсосов.

Образующиеся отложения растительного сырья в оборудовании и воздуховодах имеют склонность к самовозгоранию. Для них определяются условия теплового самовозгорания с целью установления периодичности очистки технологического оборудования от отложений.

На основании данных по критическим значениям температуры самовозгорания заданного размера и формы образцов отложений ржаной муки, кинетических параметров (энергии активации, предэкспоненциального множителя) за-

имствованных из [2], для определения критических значений слоя отложений муки, выполнен расчет по определению критической температуры самовозгорания и периода индукции на примере отложений ржаной муки слоем 0,005; 0,01; 0,02; 0,05 и 0,08 м на технологическом оборудовании (например, на поверхности электродвигателей и в трубопроводах (например, в воздуховодах местных отсосов и вентиляции). В качестве примера показан алгоритм решения задачи в соответствии с [2] для слоя пыли 0,01 м по определению условий теплового самовозгорания на поверхности технологического оборудования (электродвигателя).

Исходными данными для расчета критической температуры отложений на нагретой поверхности оборудования являются:

- температура среды, в которой образуются отложения $T_0 = 300$ К;
- толщина отложений $h = 0,01$ м;
- коэффициент теплопроводности материала $\lambda = 0,152$ Вт/(м К);
- теплоемкость исследуемого материала $c = 1050$ Дж/кг К;
- энергия активации E реакции окисления = 88054 Дж/моль;
- удельное тепловыделение $Q = 1,67 \cdot 10^7$ Дж/кг;
- предэкспоненциальный множитель $Qk_0 / \lambda = 6,55 \cdot 10^{11}$ мК/кг;
- плотность ржаной муки $\rho = 655$ кг/м³.

1. Принимая в первом приближении величину критерия $Bi = 4$ и температуру нагретой поверхности оборудования T_r равной 500 К, вычисляем среднюю (между температурами нагретой поверхности и газового пространства) температуру T_{cp} по формуле:

$$T_{cp} = \frac{T_r - T_0}{2(2Bi + 1)} + T_0 = \frac{500 - 300}{2 \cdot (2 \cdot 4 + 1)} + 300 = 311 \text{ К}.$$

2. Рассчитаем комплекс g/av и коэффициент теплопроводности воздуха по уравнениям, где g — ускорение силы тяжести, м/с²; ν — кинематическая вязкость воздуха при температуре T_0 , м²/с; a — температуропроводность воздуха при температуре T_0 , м²/с.

Для облегчения расчетов зависимость комплекса g/av от температуры в диапазоне $T_0 = 350 \div 800$ К может быть рассчитана по уравнению:

$$\frac{g}{av} = 1,2 \cdot 10^8 \cdot e^{\frac{1770}{T_{cp}}}$$

$$\frac{g}{av} = 1,2 \cdot 10^8 \cdot e^{\frac{1770}{311}} = 1,2 \cdot 10^8 \cdot e^{\frac{1770}{311}} = 3,55541 \cdot 10^{10}$$

Зависимость коэффициента теплопроводности воздуха от температуры может быть определена по формуле:

$$\lambda_g = 6,98 \cdot 10^{-3} + 6,41 \cdot 10^{-5} T_{cp}$$

$$\lambda_g = 6,98 \cdot 10^{-3} + 6,41 \cdot 10^{-5} T_{cp} = 6,98 \cdot 10^{-3} + 6,41 \cdot 10^{-5} \cdot 311 = 2,69151 \cdot 10^{-2}$$

3. По найденным выше значениям определяем другую величину критерия Био по выражению:

$$Bi = \left(C \cdot \sqrt[4]{\frac{g}{\nu \cdot a} \frac{h^3 (T_r - T_0)}{T_0} \frac{\lambda_e}{(2Bi + 1) h} + 4\sigma T_0^3} \right) \frac{h}{2\lambda} = \left(0,27 \cdot \sqrt[4]{\frac{3,55541 \cdot 10^{10} \cdot 0,01^3 \cdot (500 - 300)}{300 \cdot (2 \cdot 4 + 1)}} \cdot \frac{2,69151 \cdot 10^{-2}}{0,01} + 4 \cdot 5,67 \cdot 10^{-8} \cdot 300^3 \right) \cdot \frac{0,01}{2 \cdot 0,152} = 0,373 \quad ,$$

где C – коэффициент, равный 0,27 для горизонтальной пластины, обращенной горячей стороной вниз (принимается в нашем случае, как наиболее жесткий вариант); $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$ – постоянная Стефана-Больцмана, Вт/(м² К⁴).

4. Найденное в п. 3 значение Bi отличается от принятого в п. 1 более, чем на 10 %. Подставляем последнее значение Bi в вышеизложенные формулы, считаем заново:

$$T_{cp} = \frac{T_r - T_0}{2(2Bi + 1)} + T_0 = \frac{500 - 300}{2 \cdot (2 \cdot 0,373 + 1)} + 300 = 357,3K$$

$$\frac{g}{a\nu} = 1,2 \cdot 10^8 \cdot e^{\frac{1770}{T_{cp}}} = 1,2 \cdot 10^8 \cdot e^{\frac{1770}{357,3}} = 1,70058 \cdot 10^{10}$$

$$\lambda_e = 6,98 \cdot 10^{-3} + 6,41 \cdot 10^{-5} T_{cp} = 6,98 \cdot 10^{-3} + 6,41 \cdot 10^{-5} \cdot 357,3 = 2,98829 \cdot 10^{-2}$$

$$Bi = \left(C \cdot \sqrt[4]{\frac{g}{\nu \cdot a} \frac{h^3 (T_r - T_0)}{T_0} \frac{\lambda_e}{(2Bi + 1) h} + 4\sigma T_0^3} \right) \frac{h}{2\lambda} = \left(0,27 \cdot \sqrt[4]{\frac{1,70058 \cdot 10^{10} \cdot 0,01^3 \cdot (500 - 300)}{300 \cdot (2 \cdot 0,373 + 1)}} \cdot \frac{2,98829 \cdot 10^{-2}}{0,01} + 4 \cdot 5,67 \cdot 10^{-8} \cdot 300^3 \right) \cdot \frac{0,01}{2 \cdot 0,152} = 0,44,$$

5. Найденное в п. 4 значение Bi отличается от принятого в п. 3 более, чем на 10 %. Подставляем последнее значение Bi в вышеизложенные формулы, считаем заново:

$$T_{cp} = \frac{T_r - T_0}{2(2Bi + 1)} + T_0 = \frac{500 - 300}{2 \cdot (2 \cdot 0,44 + 1)} + 300 = 353,2K$$

$$\frac{g}{a\nu} = 1,2 \cdot 10^8 \cdot e^{\frac{1770}{T_{cp}}} = 1,2 \cdot 10^8 \cdot e^{\frac{1770}{353,2}} = 1,80124 \cdot 10^{10}$$

$$\lambda_e = 6,98 \cdot 10^{-3} + 6,41 \cdot 10^{-5} T_{cp} = 6,98 \cdot 10^{-3} + 6,41 \cdot 10^{-5} \cdot 353,2 = 2,96201 \cdot 10^{-2}$$

$$Bi = \left(C \cdot \sqrt[4]{\frac{g}{\nu \cdot a} \frac{h^3 (T_r - T_0)}{T_0} \frac{\lambda_e}{(2Bi + 1) h} + 4\sigma T_0^3} \right) \frac{h}{2\lambda} = \left(0,27 \cdot \sqrt[4]{\frac{1,80124 \cdot 10^{10} \cdot 0,01^3 \cdot (500 - 300)}{300 \cdot (2 \cdot 0,44 + 1)}} \cdot \frac{2,96201 \cdot 10^{-2}}{0,01} + 4 \cdot 5,67 \cdot 10^{-8} \cdot 300^3 \right) \cdot \frac{0,01}{2 \cdot 0,152} = 0,437$$

и получаем величину $Bi = 0,437$. Так как последняя и предыдущая величины отличаются друг от друга менее чем на 10 %, в дальнейших расчетах используется величина $Bi = 0,437$.

6. Вычисляем безразмерный температурный перепад:

$$\theta_0 = \frac{E}{RT_r^2} (T_r - T_0)$$

$$\theta_0 = \frac{E}{RT_r^2} (T_r - T_0) = \frac{88054}{8,31 \cdot 500^2} \cdot (500 - 300) = 8,4769193742$$

где R — универсальная газовая постоянная равная 8,31 Дж/моль К;
Рассчитываем параметры:

$$a = 1 + 2,28 \cdot e^{-0,65\theta_0}$$

$$a = 1 + 2,28 \cdot e^{-0,65\theta_0} = 1 + 2,28 \cdot e^{-0,65 \cdot 8,4769193742} = 1,009225147$$

и

$$\delta = \frac{1}{2 \cdot a} \left(\frac{Bi}{1 + 2Bi} \right)^2 \left\{ \theta_0 + 2 \ln \left[2 \left(a + \sqrt{a(a-1)} \right) \right] \right\}^2$$

$$\delta = \frac{1}{2 \cdot a} \left(\frac{Bi}{1 + 2Bi} \right)^2 \left\{ \theta_0 + 2 \ln \left[2 \left(a + \sqrt{a(a-1)} \right) \right] \right\}^2 = \frac{1}{2 \cdot 1,009225147} \cdot \left(\frac{0,437}{1 + 2 \cdot 0,437} \right)^2 \cdot$$

$$\cdot \left\{ 8,4769193742 + 2 \ln \left[2 \left(1,009225147 + \sqrt{1,009225147 \cdot (1,009225147 - 1)} \right) \right] \right\}^2 = 2,7287513405$$

7. Для температуры T_r определяем параметры β , γ и вычисляем критическую величину δ :

$$\beta = \frac{RT_r}{E} \quad \text{и} \quad \gamma = \frac{cRT_r^2}{QE}$$

где c — теплоемкость материала, Дж/кг К, а Q — теплота реакции окисления, Дж/кг, R — универсальная газовая постоянная равная 8,31 Дж/моль К;

$$\beta = \frac{RT_r}{E} = \frac{8,31 \cdot 500}{88054} = 0,0471869535$$

$$\gamma = \frac{cRT_r^2}{QE} = \frac{1050 \cdot 8,31 \cdot 500^2}{1,67 \cdot 10^7 \cdot 88054} = 0,0014834222$$

и вычисляем критическую величину Франк-Каменецкого δ :

$$\delta_{кр} = \delta(1 + \beta) \cdot (1 + 2,4\gamma^{2/3})$$

$$\delta_{кр} = \delta(1 + \beta) \cdot \left(1 + 2,4\gamma^{2/3} \right) = 2,7287513405 (1 + 0,0471869535) \cdot \left(1 + 2,4 \cdot 0,0014834222^{2/3} \right) =$$

$$= 2,9467150806.$$

8. Подставляем величину $\delta_{кр}$ в уравнение и находим новое значение температуры T_r :

$$\delta_{кр} = \frac{Q\rho k_0}{\lambda} \frac{E}{RT_r^2} r^2 e^{-\frac{E}{RT_r}},$$

ρ — плотность вещества кг/м³; k_0 - константа скорости реакции, 1/с.

$$6,55 \cdot 10^{11} \cdot 655 \cdot \frac{88054}{8,31 \cdot T_r^2} \cdot 0,005^2 e^{-\frac{88054}{8,31 \cdot T_r}} = 2,9467150806$$

Получаем $T_r = 569,9$ К.

9. Используя это значение T_r повторяем расчет параметров по пп. 1–8.

$$9.1. T_{cp} = \frac{T_r - T_0}{2(2Bi + 1)} + T_0 = \frac{569,9 - 300}{2 \cdot (2 \cdot 0,437 + 1)} + 300 = 372K$$

$$9.2. \frac{g}{av} = 1,2 \cdot 10^8 \cdot e^{\frac{1770}{T_{cp}}} = 1,2 \cdot 10^8 \cdot e^{\frac{1770}{372}} = 1,39824 \cdot 10^{10}$$

$$9.3. \lambda_g = 6,98 \cdot 10^{-3} + 6,41 \cdot 10^{-5} T_{cp} = 6,98 \cdot 10^{-3} + 6,41 \cdot 10^{-5} \cdot 372 = 3,08252 \cdot 10^{-2}$$

$$9.4. Bi = \left(C \cdot \sqrt[4]{\frac{g}{v \cdot a} \frac{h^3 (T_r - T_0)}{T_0} \frac{\lambda_g}{(2Bi+1)} \frac{\lambda_g}{h} + 4\sigma T_0^3} \right) \frac{h}{2\lambda} = \left(0,27 \cdot \sqrt[4]{\frac{1,39824 \cdot 10^{10} \cdot 0,01^3 \cdot (569,9 - 300)}{300 \cdot (2 \cdot 0,437 + 1)}} \right) \cdot \frac{3,08252 \cdot 10^{-2}}{0,01} + 4 \cdot 5,67 \cdot 10^{-8} \cdot 300^3 \cdot \frac{0,01}{2 \cdot 0,152} = 0,449$$

$$9.5. \theta_0 = \frac{E}{RT_r^2} (T_r - T_0) = \frac{88054}{8,31 \cdot 569,9^2} \cdot (569,9 - 300) = 8,8054921882$$

$$9.6. a = 1 + 2,28 \cdot e^{-0,65\theta_0} = 1 + 2,28 \cdot e^{-0,65 \cdot 8,8054921882} = 1,0074510935$$

$$9.7. \delta = \frac{1}{2 \cdot a} \left(\frac{Bi}{1 + 2Bi} \right)^2 \left\{ \theta_0 + 2 \ln \left[2 \left(a + \sqrt{a(a-1)} \right) \right] \right\}^2 = \frac{1}{2 \cdot 1,0074510935} \cdot \left(\frac{0,449}{1 + 2 \cdot 0,449} \right)^2 \cdot \left\{ 8,8054921882 + 2 \ln \left[2 \left(1,0074510935 + \sqrt{1,0074510935(1,0074510935-1)} \right) \right] \right\}^2 = 2,9877263128$$

$$9.8. \beta = \frac{RT_r}{E} = \frac{8,31 \cdot 569,9}{88054} = 0,0537836896$$

$$9.9. \gamma = \frac{cRT_r^2}{QE} = \frac{1050 \cdot 8,31 \cdot 569,9^2}{1,67 \cdot 10^7 \cdot 88054} = 0,0019271791$$

$$9.10. \delta_{kp} = \delta(1 + \beta) \cdot \left(1 + 2,4\gamma^{\frac{2}{3}} \right) = 2,9877263128(1 + 0,0537836896) \cdot \left(1 + 2,4 \cdot 0,0019271791^{\frac{2}{3}} \right) = 3,2654349627$$

$$9.11. \delta_{kp} = \frac{Q\rho k_0}{\lambda} \frac{E}{RT_r^2} r^2 e^{-\frac{E}{RT_r}}$$

$$6,55 \cdot 10^{11} \cdot 655 \cdot \frac{88054}{8,31 \cdot T_r^2} \cdot 0,005^2 e^{-\frac{88054}{8,31 \cdot T_r}} = 3,2654349627$$

Находим новое значение температуры $T_r = 573,5$ К.

10. Используя это значение T_r повторяем расчет параметров по пп. 1 –8.

$$10.1. T_{cp} = \frac{T_r - T_0}{2(2Bi+1)} + T_0 = \frac{573,5 - 300}{2 \cdot (2 \cdot 0,449 + 1)} + 300 = 372K$$

$$10.2. \frac{g}{av} = 1,2 \cdot 10^8 \cdot e^{\frac{1770}{T_{cp}}} = 1,2 \cdot 10^8 \cdot e^{\frac{1770}{372}} = 1,39824 \cdot 10^{10}$$

$$10.3. \lambda_g = 6,98 \cdot 10^{-3} + 6,41 \cdot 10^{-5} T_{cp} = 6,98 \cdot 10^{-3} + 6,41 \cdot 10^{-5} \cdot 372 = 3,08252 \cdot 10^{-2}$$

$$10.4. Bi = \left(C \cdot \sqrt[4]{\frac{g}{v \cdot a} \frac{h^3 (T_r - T_0)}{T_0} \frac{\lambda_g}{(2Bi+1)} \frac{\lambda_g}{h} + 4\sigma T_0^3} \right) \frac{h}{2\lambda} = \left(0,27 \cdot \sqrt[4]{\frac{1,39824 \cdot 10^{10} \cdot 0,01^3 \cdot (573,5 - 300)}{300 \cdot (2 \cdot 0,449 + 1)}} \right) \cdot \frac{3,08252 \cdot 10^{-2}}{0,01} + 4 \cdot 5,67 \cdot 10^{-8} \cdot 300^3 \cdot \frac{0,01}{2 \cdot 0,152} = 0,449$$

$$10.5. \theta_0 = \frac{E}{RT_r^2} (T_r - T_0) = \frac{88054}{8,31 \cdot 573,5^2} \cdot (573,5 - 300) = 8,8112708596$$

$$10.6. a = 1 + 2,28 \cdot e^{-0,65\theta_0} = 1 + 2,28 \cdot e^{-0,65 \cdot 8,8112708596} = 1,0074231587$$

$$10.7. \delta = \frac{1}{2 \cdot a} \left(\frac{Bi}{1 + 2Bi} \right)^2 \left\{ \theta_0 + 2 \ln \left[2 \left(a + \sqrt{a(a-1)} \right) \right] \right\}^2 = \frac{1}{2 \cdot 1,0074231587} \cdot \left(\frac{0,449}{1 + 2 \cdot 0,449} \right)^2 \cdot$$

$$\cdot \left\{ 8,8112708596 + 2 \ln \left[2 \left(1,0074231587 + \sqrt{1,0074231587 \cdot (1,0074231587 - 1)} \right) \right] \right\}^2 = 2,990937445$$

$$10.8. \beta = \frac{RT_{\Gamma}}{E} = \frac{8,31 \cdot 573,5}{88054} = 0,0541234356$$

10.9.

$$\gamma = \frac{cRT_{\Gamma}^2}{QE} = \frac{1050 \cdot 8,31 \cdot 573,5^2}{1,67 \cdot 10^7 \cdot 88054} = 0,001951603\epsilon$$

10.10.

$$\delta_{кр} = \delta(1 + \beta) \cdot \left(1 + 2,4\gamma^{\frac{2}{3}} \right) = 2,990937445 (1 + 0,0541234356) \cdot \left(1 + 2,4 \cdot 0,001951603\epsilon^{\frac{2}{3}} \right)$$

$$= 3,2709864966$$

$$10.11. \delta_{кр} = \frac{Q\rho k_0}{\lambda} \frac{E}{RT_{\Gamma}^2} r^2 e^{-\frac{E}{RT_{\Gamma}}}$$

$$6,55 \cdot 10^{11} \cdot 655 \cdot \frac{88054}{8,31 \cdot T_{\Gamma}^2} 0,005^2 e^{-\frac{88054}{8,31 \cdot T_{\Gamma}}} = 3,270986496\epsilon$$

Находим новое значение температуры $T_{\Gamma} = 573,526$ К.

10. Так как предыдущее и последнее значения температуры отличаются друг от друга менее чем на 1°C , за критическую температуру принимается результат последнего расчета.

На рис. 1 представлены результаты расчетов. Кривая 1 показывает зависимость температуры самовозгорания отложений ржаной муки от толщины слоя отложений ржаной муки на поверхности оборудования (например, электромотора), а на кривой 2 представлена та же зависимость, но для воздухопроводов систем приточно-вытяжной вентиляции. Незначительное снижение температуры самовозгорания отложений в воздухопроводах, скорее всего объясняется изменением теплообмена в условиях потока аэрозоля.

Как следует из данных, представленных на рис.1, по мере повышения температуры и увеличения толщины слоя пыли ржаной муки снижается значение температуры самовозгорания и при слое 0,08 м она близка к 200°C .

Полученные расчетные характеристики сопоставлены с результатами наблюдений в течение полугода по скорости роста отложений растительного сырья в воздухопроводах и на оборудовании на Воронежском мукомольном комбинате ОАО МК «Воронежский» в наиболее неблагоприятных условиях эксплуатации (высокая запыленность, повышенная температура, малодоступные места криволинейных участков).

Как показало обследование предприятия, уборка легко доступных мест (пол, стены, поверхности оборудования) осуществляется один раз в смену (один раз за 8 часов) и при нормальном режиме технологического процесса толщина слоя отложений не превышает 0,0005 м. Такая толщина отложений

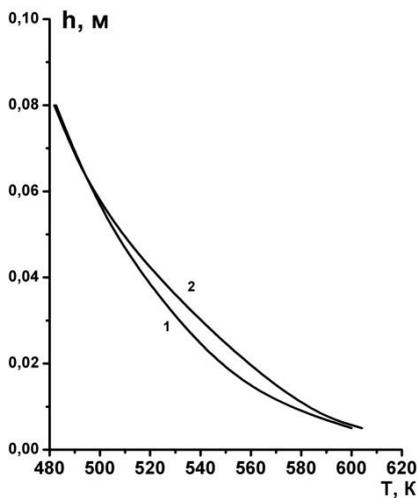


Рис. 1. Зависимость температуры самовозгорания отложений ржаной муки от толщины слоя отложений

не вызывает опасений в отношении возникновения условий для их самовозгорания.

Наблюдения за ростом отложений в воздуховодах, а также в труднодоступных местах (поверхности воздуховодов, обращенных к потолку, площадки под оборудованием и др.) в течение полугода свидетельствуют о том, что их максимальная толщина достигает не более 0,001 м и, судя по результатам расчетов, также за такой период не представляет опасности.

Результаты представленных исследований могут быть использованы в качестве номограмм для прогнозирования условий самовозгорания отложений и установления кратности очистки оборудования, воздуховодов и местных отсосов высокодисперсных материалов органического происхождения.

Библиографический список

1. СП 7.13130.2009. «Отопление, вентиляция, кондиционирование».
2. Методика определения условий теплового самовозгорания веществ и материалов. М., ФГБУ ВНИИПО МЧС России, 2004. 65 с.