МИНИСТЕРСТВО РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ ПО ДЕЛАМ ГРАЖДАНСКОЙ ОБОРОНЫ, ЧРЕЗВЫЧАЙНЫМ СИТУАЦИЯМ И ЛИКВИДАЦИИ ПОСЛЕДСТВИЙ СТИХИЙНЫХ БЕДСТВИЙ

Федеральное государственное учреждение
«Всероссийский ордена "Знак Почета"
научно-исследовательский институт
противопожарной обороны»

# МЕТОДИКА ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПОЖАРНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ПЕРЕВОЗКИ САМОВОЗГОРАЮЩИХСЯ ГРУЗОВ

МОСКВА 2006

gost.e-ecolog.ru

**УДК 614.841.41.002.71**

**Методика обеспечения пожарной безопасности перевозки самовозгорающихся грузов.** – М.: ФГУ ВНИИПО, 2006. – 39 с.

Методика позволяет определять условия самовозгорания грузов с учетом размеров и формы используемых на практике грузовых отсеков, а также климатических особенностей основных регионов транзита. В соответствии с ней можно рассчитать критическую температуру атмосферного воздуха, установить класс опасности самовозгорающихся грузов, определить безопасные размеры их компактной укладки при транспортировании.

Методика предназначена для региональных подразделений ГПС и специализированных организаций.

Разработана сотрудниками ФГУ ВНИИПО МЧС России: д-ром техн. наук, проф. И.А. Болодьяном; д-ром техн. наук, проф. Ю.Н. Шебеко; д-ром техн. наук, проф. В.И. Горшковым; канд. техн. наук И.А. Корольченко; А.В. Казаковым; Д.Н. Соколовым.

Утверждена ФГУ ВНИИПО МЧС России 29.06.2006 г.

Согласована УГПН МЧС России 21.07.2006 г.

© ФГУ ВНИИПО МЧС России, 2006

# ОГЛАВЛЕНИЕ

**I. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ** ..... 4

**II. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КИНЕТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА ТЕРМООКИСЛЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ ПО ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМ ДАННЫМ** ..... 5

2.1. Аппаратура ..... 5

2.2. Подготовка и проведение испытаний ..... 6

2.3. Расчет параметров кинетики термоокисления материалов ..... 8

**III. РАСЧЕТ УСЛОВИЙ САМОВОЗГОРАНИЯ ГРУЗОВ** ..... 12

3.1. Расчет параметра Франк-Каменецкого $\delta_0$ для грузового пространства транспортных средств ..... 12

3.2. Расчет критической температуры ..... 14

3.3. Расчет времени индукции ..... 15

**IV. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КЛАССА ОПАСНОСТИ САМОВОЗГОРАЮЩИХСЯ ГРУЗОВ И РАЗРАБОТКА ПРОФИЛАКТИЧЕСКИХ МЕРОПРИЯТИЙ** ..... 17

4.1. Определение класса опасности грузов ..... 17

4.2. Определение безопасных размеров компактной укладки материала ..... 18

**Список литературы** ..... 20

*ПРИЛОЖЕНИЯ*

1. Пример расчета кинетических параметров ..... 21

2. Параметры кинетики процесса термоокисления некоторых материалов ..... 25

3. Пример расчета $\delta_0$ грузового пространства ..... 26

4. Значения $\delta_0$ для основных типоразмеров грузовых пространств ..... 28

5. Пример расчета критической температуры ..... 29

6. Пример расчета времени индукции ..... 31

7. Пример определения класса опасности самовозгорающегося груза ..... 34

8. Пример определения безопасных размеров компактной укладки материала ..... 35

# I. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

1. Методика предназначена для определения возможности самовозгорания материалов в условиях транспортирования на основании экспериментально-аналитических исследований. Получаемые результаты позволяют отнести подобные грузы к соответствующим классам опасности (согласно классификации ГОСТ 19433 [1]) и разрабатывать мероприятия, предотвращающие самовозгорание материалов при перевозке.

2. Определение возможности теплового самовозгорания грузов выполняется по результатам расчетов критической температуры и периода индукции процесса для температуры окружающей среды, превышающей верхнюю границу климатического перепада среднесуточных значений для регионов транзита (40 °С).

3. Определение класса опасности грузов выполняется в следующей последовательности:

а) на основании экспериментальных результатов определения температур самовозгорания образцов материала в лабораторных условиях рассчитываются параметры кинетики процесса. В расчетах могут также использоваться опубликованные значения кинетических характеристик для материала аналогичной марки;

б) для грузового пространства рассматриваемых транспортных средств вычисляется параметр $\delta_0$;

в) рассчитывается критическая температура $T_{кр}$ окружающей среды;

г) при $T_{кр} < 40$ °С определяется период индукции процесса для температуры среды 40 °С (минимальное значение для всех условий транспортирования);

д) определяется класс опасности груза при перевозке рассматриваемым транспортным средством. Для других условий транспортирования повторяют расчеты по пп. 3б–3г;

е) при выявлении возможности самовозгорания груза в условиях транспортирования рассчитывают безопасный размер компактной укладки материала для температуры среды 40 °С (использование такой укладки предотвращает самовозгорание материала при перевозке).

4. Рекомендации по обеспечению пожарной безопасности сезонного транспортирования самовозгорающихся грузов (в холодный период года при среднесуточных температурах окружающей среды ниже $T_{кр}$) должны обосновываться в соответствии с настоящей методикой организациями, имеющими лицензию на проведение соответствующих работ.

## II. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КИНЕТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА ТЕРМООКИСЛЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ ПО ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМ ДАННЫМ

### 2.1. Аппаратура

Аппаратура для определения кинетических параметров процесса термоокисления материалов включает в себя следующие элементы:

2.1.1. Термостат вместимостью рабочей камеры не менее 40 $дм^3$ с терморегулятором, позволяющим поддерживать постоянную температуру от 60 до 500 °С с погрешностью не более ±1 °С.

2.1.2. Корзинки кубической или цилиндрической формы высотой 15, 30, 35, 50, 70, 100, 140 и 200 мм. Диаметр цилиндрической корзинки должен быть равен ее высоте.

Материалом для корзинок служит сетка из латуни или нержавеющей стали для сыпучих материалов (с размером ячеек не более 1 мм) или листовая нержавеющая сталь толщиной не более 1 мм – для плавящихся веществ.

2.1.3. Термоэлектрические преобразователи (термопары ТХА и ТХК) с максимальным диаметром рабочего спая не более 0,8 мм.

2.1.4. Измеритель термоэлектродвижущей силы, позволяющий осуществлять визуализацию изменения температуры образца материала во времени с записью на бумажном или электронном носителе.

2.1.5. Весы лабораторные с наибольшим пределом взвешивания 1000 г и точностью взвешивания 0,01 г.

### 2.2. Подготовка и проведение испытаний

2.2.1. К корзинкам крепят по три термоэлектрических преобразователя таким образом, чтобы один конец одной термопары находился внутри корзинки в ее центре, а второй – на расстоянии не более 5 мм от внешней ее стороны (на высоте центра корзинки). Эти термопары соединяют по дифференциальной схеме, с тем чтобы они измеряли разность температур между образцом материала и температурой рабочей камеры. Для фиксирования температуры в термостате (температуры испытаний) рабочий конец третьей термопары располагают на расстоянии $(30 \pm 1)$ мм от стенки корзинки на высоте ее центра.

2.2.2. Корзинки заполняют исследуемым веществом и взвешивают на весах. При испытаниях листового материала его набирают в стопку, соответствующую внутренним размерам корзинки. В образцах монолитных материалов предварительно высверливают до центра отверстие диаметром не более 7 мм для термоэлектрического преобразователя.

2.2.3. Свободные концы термопреобразователей подсоединяют к измерителю термоэлектродвижущей силы для регистрации изменения разности температур в центре образца и температуры в рабочей камере термостата.

2.2.4. Корзинку помещают в центр термостата, нагретого до заданной температуры (например, 200 °С) и наблюдают за изменением температуры в центре образца.

2.2.5. Самовозгорание образца проявляется при увеличении разности температур, фиксируемой дифференциальной термопарой, до величины более 100 °С или визуальном определении возгорания.

2.2.6. Если при первом испытании самовозгорание не происходит в течение времени, указанного в табл. 1, то испытание с новым образцом материала того же размера проводят при температуре на 20 °С больше заданной. Если самовозгорание произошло, то испытание проводят при температуре меньшей на 10 °С.

2.2.7. Испытания продолжают с образцами данного размера при различных температурах рабочего пространства термостата до достижения минимальной температуры, при которой образец самовозгорается, а при температуре ниже минимальной на 1 °С самовозгорания не происходит. При этих температурах выполняют по два эксперимента. Минимальную температуру, при которой исследуемый материал самовозгорается, принимают за температуру самовозгорания образца данного размера.

2.2.8. Аналогичные испытания проводят с образцами исследуемого вещества в корзинках других размеров. Результаты испытаний оформляются в виде табл. 2.

*Таблица 1*

| Размер образца, мм | Продолжительность испытаний, ч |
|---|---|
| 35 | 6 |
| 50 | 12 |
| 70 | 24 |
| 100 | 48 |
| 140 | 96 |
| 200 | 192 |

*Таблица 2*

| Размер образца, мм | Температура самовозгорания $T_{кр}$ | |
|---|---|---|
| | °С | К |
| | | |

## 2.3. Расчет параметров кинетики термоокисления материалов

Исходными данными для определения параметров кинетики термоокисления являются:

- данные табл. 2 для критической температуры самовозгорания $T_{кр} \equiv T_0$ (К) образцов размером $D$ (м);
- коэффициент теплопроводности материала $\lambda$, $Вт \cdot м^{-1} \cdot К^{-1}$;
- теплоемкость исследуемого материала $c$, $Дж \cdot кг^{-1} \cdot К^{-1}$;
- теплота реакции $Q$, $Дж \cdot кг^{-1}$.

Расчет выполняется в следующем порядке.

2.3.1. Для каждого размера образца рассчитать число Рэлея по уравнению:

$$Ra = \frac{g}{\nu a} D^3 \frac{RT_0}{E}, \qquad (1)$$

где $g$ – ускорение силы тяжести, $м \cdot с^{-2}$; $\nu$ – кинематическая вязкость воздуха при температуре $T_0$, $м^2 \cdot с^{-1}$; $a$ – температуропроводность воздуха при температуре $T_0$, $м^2 \cdot с^{-1}$; $D$ –

высота образца, м; $R$ – универсальная газовая постоянная, Дж · моль$^{-1}$ · К$^{-1}$); $T_0$ – температура рабочего пространства термостата, К; $E$ – энергия активации реакции окисления. Допускается принимать равной 100 кДж · моль$^{-1}$.

Для облегчения расчетов зависимость комплекса $g/va$ от температуры в диапазоне $T_0 = (350 \div 800)$ К может быть рассчитана по формуле

$$\frac{g}{a\nu} = 1{,}2 \cdot 10^8 e^{\frac{1770}{T_0}} . \qquad (2)$$

2.3.2. Для всех размеров образцов вычислить коэффициенты теплоотдачи $\alpha$ по уравнениям:

при $5 \cdot 10^2 < Ra \le 2 \cdot 10^7$

$$\alpha = 0{,}54 Ra^{0{,}25} \frac{\lambda_в}{D} + 4\sigma T_0^3; \qquad (3)$$

при $Ra > 2 \cdot 10^7$

$$\alpha = 0{,}135 Ra^{0{,}333} \frac{\lambda_в}{D} + 4\sigma T_0^3, \qquad (4)$$

где $\sigma = 5{,}67 \cdot 10^{-8}$ – постоянная Стефана-Больцмана, Вт · м$^{-2}$ · К$^{-1}$.

Коэффициент теплопроводности воздуха при температуре $T_0$ может быть определен по формуле

$$\lambda_в = 6{,}98 \cdot 10^{-3} + 6{,}41 \cdot 10^{-5} T_0 . \qquad (5)$$

2.3.3. По величине $\alpha$, коэффициенту теплопроводности материала $\lambda$ и половине высоты $r = D/2$ вычисляют критерии Био для каждого образца:

$$Bi = \frac{\alpha r}{\lambda} . \qquad (6)$$

2.3.4. Функцию $\varphi(Bi)$, учитывающую интенсивность теплообмена образца с воздухом, определяют по уравнению

$$\varphi(Bi)=\frac{Bi}{2}\left(\sqrt{Bi^2+4}-Bi\right)\exp\left(\frac{\sqrt{Bi^2+4}-Bi-2}{Bi}\right). \qquad (7)$$

2.3.5. Рассчитывают параметры $\beta$ и $\gamma$, характеризующие индивидуальные свойства реакции окисления:

$$\beta=\frac{RT_0}{E}; \qquad (8)$$

$$\gamma=\frac{cRT_0^2}{QE}. \qquad (9)$$

2.3.6. С учетом интенсивности теплообмена и характеристик реакции для каждого размера образца материала рассчитывают критическое значение параметра Франк-Каменецкого:

$$\delta_{кр}=\delta_0\varphi(Bi)(1+\beta)(1+2{,}4\gamma^{2/3}), \qquad (10)$$

где $\delta_0$ – критическая величина параметра $\delta$ при интенсивном теплообмене, равная 2,52 для образцов кубической формы и 2,76 – для цилиндра с высотой, равной диаметру.

Результаты вычислений по формулам (1)–(10) сводят в табл. 3.

*Таблица 3*

| Размер $r$, м | $T_0$, К | $Ra$ | $\alpha$, Вт · м$^{-2}$ · К$^{-1}$ | $Bi$ | $\varphi(Bi)$ | $\beta$ | $\gamma$ | $\delta_{кр}$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | | | |

2.3.7. Зависимость критического значения параметра Франк-Каменецкого $\delta_{кр}$ от кинетических параметров реакции окисления

$$\delta_{кр} = \frac{Q\rho k_0}{\lambda}\frac{E}{RT_0^2} r^2 e^{-\frac{E}{RT_0}} \qquad (11)$$

записывают в виде

$$M = Ne^{-\frac{E}{RT_0}}, \qquad (12)$$

где $M = \frac{\delta_{кр} RT_0^2}{r^2 \rho}$; (13)

$$N = \frac{EQk_0}{\lambda}; \qquad (14)$$

$\rho$ – плотность упаковки материала, кг · м$^{-3}$; $k_0$ – константа скорости реакции, 1 · с$^{-1}$.

2.3.8. По уравнению (13) для каждого размера образца рассчитывают величину $M$. С учетом значений $M$ и $N$ по уравнению (12) методом наименьших квадратов или программ обработки экспериментальных данных для персональных компьютеров Eureka, Curve Expert 1.3, Mathematica 3.0, Mathematica 4.0 и других определяют численные значения $N$ и энергию активации $E$.

2.3.9. Вычисляют предэкспоненциальный множитель реакции окисления $Qk_0/\lambda$ путем деления $N$ на $E$. Данные расчетов по уравнениям (12)–(14) сводят в табл. 4.

*Таблица 4*

| Размер $r$, м | $T_0$, К | $M$, Дж · м · К · кг$^{-1}$ · моль$^{-1}$ | $N$, Дж · м · К · кг$^{-1}$ · моль$^{-1}$ | $E$, Дж · моль$^{-1}$ | $Qk_0/\lambda$, м · К · кг$^{-1}$ |
|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | |

2.3.10. Если величина энергии активации, вычисленная в п. 2.3.8, отличается от ранее принятой и равной 100 кДж · моль$^{-1}$ более чем на 5 %, расчеты по пп. 2.3.1–2.3.10 необходимо повторить с новым значением энергии активации. Процесс итераций необходимо выполнять до тех пор, пока энергии активации в начале и конце расчета не будут отличаться менее чем на 5 %.

## III. РАСЧЕТ УСЛОВИЙ САМОВОЗГОРАНИЯ ГРУЗОВ

### 3.1. Расчет параметра Франк-Каменецкого $\delta_0$ для грузового пространства транспортных средств

Исходными данными для расчета параметра $\delta_0$ являются форма и размеры грузового пространства.

Расчет выполняется в следующем порядке.

3.1.1. Вычисляют отношение квадрата характерного размера грузового пространства $r^2$ (минимального размера по одной из осей координат) к квадрату эквивалентной сферы Франк-Каменецкого $R_0^2$ по одному из соотношений.

**Прямоугольный цилиндр** (*цилиндрические канистры, бочки и т. п.*) радиусом $r$, высотой $2d$, $p = r/d$:

$$\frac{r^2}{R_0^2} = \frac{1}{3}\left[p^2 + \frac{2}{\sqrt{1+p^2}}\right] \equiv \Omega. \qquad (15)$$

**Прямоугольный брус** (*мешок, контейнер, вагон, штабель упаковок материала, заполняемое насыпью грузовое пространство*) со сторонами $2a$, $2b$, $2c$, $p = b/a$, $q = c/a$:

$$\frac{a^2}{R_0^{\,2}} = \frac{2}{3\pi}\left[ arctg\left( \frac{pq}{\sqrt{1+p^2+q^2}} \right) + \right.$$

$$\left. + \frac{1}{p^2} arctg\left( \frac{q}{p\sqrt{1+p^2+q^2}} \right) + \Psi \right] \equiv \Omega, \qquad (16)$$

где $\Psi = \frac{1}{q^2} arctg\left( \frac{p}{q\sqrt{1+p^2+q^2}} \right) + \frac{\sqrt{1+p^2+q^2}}{pq}$.

3.1.2. Находят радиус эквивалентной сферы Семенова по формуле

$$R_s = \frac{3V}{S}, \qquad (17)$$

где $V$ – объем упаковки материала, м$^3$; $S$ – ее внешняя поверхность, м$^2$.

3.1.3. Определяют отношение квадратов радиуса эквивалентных сфер Франк-Каменецкого и Семенова:

$$\sigma = R_0^{\,2} \Big/ R_s^{\,2} = \frac{a^2}{\Omega \cdot R_s^2}. \qquad (18)$$

3.1.4. Вычисляют фактор формы для заданной геометрии упаковки материала:

$$j = 3\sigma - 1. \qquad (19)$$

3.1.5. Находят функцию $F(j)$ по формуле

$$F(j) = \frac{2j+6}{j+7}. \qquad (20)$$

3.1.6. Рассчитывают величину параметра Франк-Каменецкого с помощью формулы

$$\delta_0 = 3F(j)\frac{r^2}{R_0^2} = 3F(j)\frac{a^2}{R_0^2}. \qquad (21)$$

Результаты расчета значений $\delta_0$ для основных типоразмеров грузового пространства различных транспортных средств приводятся в прил. 4.

### 3.2. Расчет критической температуры

Исходными данными для расчета критической температуры при транспортировании веществ и материалов являются:

- плотность упаковки материала, $кг \cdot м^{-3}$;
- коэффициент теплопроводности материала $\lambda$, $Вт \cdot м^{-1} \cdot К^{-1}$;
- теплоемкость исследуемого материала $c$, $Дж \cdot кг^{-1} \cdot К^{-1}$;
- теплота реакции $Q$, $Дж \cdot кг^{-1}$;
- энергия активации реакции окисления $E$, $Дж \cdot моль^{-1}$;
- предэкспоненциальный множитель $Qk_0/\lambda$, $м \cdot К \cdot кг^{-1}$.

Расчет выполняется в следующем порядке.

3.2.1. Для заданной формы упаковки материала из прил. 4 выбрать или рассчитать в соответствии с разд. 3.1 величину критерия Франк-Каменецкого $\delta_0$.

3.2.2. Подставив полученную величину в уравнение (11) вместо $\delta_{кр}$ и решив его относительно $T_0$, найти нулевое приближение для температуры самовозгорания.

3.2.3. По формуле (1) п. 2.3.1 вычислить значение критерия Рэлея для заданного размера упаковки материала.

3.2.4. Рассчитать коэффициент теплоотдачи по уравнению (4) п. 2.3.2 и величину критерия Био по формуле (6).

3.2.5. Определить численное значение функции $\varphi(Bi)$ по уравнению (7).

3.2.6. По формулам (8) и (9) найти величину параметров $\beta$ и $\gamma$.

3.2.7. Рассчитать критическое значение параметра Франк-Каменецкого по уравнению (10).

3.2.8. Подставить величину $\delta_{кр}$ в уравнение (11) и найти новое значение температуры $T_0$.

3.2.9. Используя это значение $T_0$, повторить расчет параметров по пп. 3.2.2 – 3.2.8.

3.2.10. Указанную процедуру расчета продолжать до тех пор, пока предыдущее и последующее значения температуры будут отличаться друг от друга менее чем на 1 °С. За критическую температуру принимается результат последнего расчета.

### 3.3. Расчет времени индукции

Расчет времени индукции производится в том случае, когда критическая температура для самовозгорания грузового пространства, заполненного материалом, ниже 40 °С (согласно п. 3г разд. I).

Исходными данными для расчета являются:

- температура окружающей среды $T_0$, К (согласно п. 3 г разд. I равна 313 К);
- критическая температура самовозгорания для заданного грузового пространства транспортного средства $T_{кр}$, К;
- фактор формы упаковки материала $j$;
- размер упаковки $r$, м;
- плотность упаковки материала, $кг \cdot м^{-3}$;
- коэффициент теплопроводности материала $\lambda$, $Вт \cdot м^{-1} \cdot К^{-1}$;
- теплоемкость исследуемого материала $c$, $Дж \cdot кг^{-1} \cdot К^{-1}$;
- теплота реакции $Q$, $Дж \cdot кг^{-1}$;
- энергия активации реакции окисления $E$, $Дж \cdot моль^{-1}$;
- предэкспоненциальный множитель $Qk_0/\lambda$, $м \cdot К \cdot кг^{-1}$.

Расчет выполняется в следующем порядке.

3.3.1. По температуре $T_0$ вычислить параметры $\beta$ и $\gamma$ с помощью формул (8) и (9).

3.3.2. По уравнению (4) определить коэффициент теплоотдачи $\alpha$ и найти величину параметра Био по формуле (6).

3.3.3. По формуле (11) рассчитать параметр $\delta$, соответствующий температуре окружающей среды $T_0$, и параметр $\delta_{кр}$ для критической температуры $T_{кр}$.

3.3.4. Вычислить относительное удаление от предела воспламенения

$$\Delta = \frac{\delta}{\delta_{кр}} \tag{22}$$

и функции

$$f_1(\Delta,\gamma) = 1 + 0{,}62\frac{1 - 4\cdot\Delta^{-2}\sqrt{\gamma}}{(\Delta - 0{,}95)^{0{,}9}}; \tag{23}$$

$$f_2(j,Bi,\Delta) = 1 - \frac{\left[1 + 1{,}5(1 - 0{,}1\cdot\Delta)j\right]Bi}{16(1+Bi)}. \tag{24}$$

3.3.5. Рассчитать безразмерное время индукции с помощью уравнений (22)–(24) по выражению

$$\tau = f_1(\Delta,\gamma) f_2(j,Bi,\Delta)(1 + 2\beta). \tag{25}$$

3.3.6. Определить размерное время индукции $t_и$ (с) по формуле

$$t_и = \frac{\tau c R T_0^2}{Q k_0 E} e^{\frac{E}{RT_0}}. \tag{26}$$

# IV. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КЛАССА ОПАСНОСТИ САМОВОЗГОРАЮЩИХСЯ ГРУЗОВ И РАЗРАБОТКА ПРОФИЛАКТИЧЕСКИХ МЕРОПРИЯТИЙ

## 4.1. Определение класса опасности грузов

В разделе формулируются принципы отнесения транспортируемых самовозгорающихся материалов к подклассам опасных грузов, соответствующим классификации ГОСТ 19433. Согласно этому стандарту материалы, способные самовозгораться при транспортировании, относятся к низкой и средней степени опасности грузов подкласса 4.2. Не самовозгорающиеся в рассматриваемых условиях твердые горючие вещества должны относиться к категории опасности 921.

Исходными данными для классификации опасности грузов являются:

- факт самовозгорания испытываемых согласно разд. 2.2 образцов материала;

- критическая температура самовозгорания материала в грузовом пространстве транспортного средства $T_{кр}$, °С;

- значения периода индукции процесса для температуры среды $T_0 = 40$ °С.

Определение класса опасности грузов осуществляется в следующем порядке.

4.1.1. Не самовозгорающиеся в условиях испытаний согласно разд. 2.2 и негорючие в соответствии с ГОСТ 12.1.044 [2] материалы следует относить к непожароопасным подклассам и категориям (в соответствии с ГОСТ 19433).

4.1.2. Если значения $T_{кр} \geq 40$ °С, перевозимый груз следует отнести к категории опасности 921.

4.1.3. Если значения критической температуры $T_{кр} < 40$ °С, сравнивают период индукции теплового самовозгорания

груза $\tau_{40}$ (согласно разд. 3.3) для $T_0$ = 40 °С со временем осуществления грузоперевозок $\tau_{пер}$:

а) при $\tau_{40} > \tau_{пер}$ груз следует отнести к низкой степени опасности подкласса 4.2;

б) при $\tau_{40} \le \tau_{пер}$ груз следует отнести к средней степени опасности подкласса 4.2.

В случае (б) необходимо обеспечение пожарной безопасности грузоперевозок за счет использования безопасных размеров компактной укладки материала, определенных согласно разд. 4.2 для $T_0$ = 40 °С. Если реализация этих мер невозможна (малая величина безопасного размера и т. п.), отсутствие самовозгорания материала можно обеспечить при транспортировании груза в течение времени не более $0{,}8\,\tau_{40}$.

### 4.2. Определение безопасных размеров компактной укладки материала

Расчеты выполняются для случая, оговоренного в п. 4.1.3б. Исходными данными для расчета критического размера укладки материала являются:

- энергия активации реакции окисления $E$, Дж · моль$^{-1}$;
- предэкспоненциальный множитель $Qk_0/\lambda$, м · К · кг$^{-1}$;
- температура среды $T_0$, К;
- $\delta_0$ грузового пространства;
- плотность упаковки материала, кг · м$^{-3}$;
- теплоемкость исследуемого материала $c$, Дж · кг$^{-1}$ · К$^{-1}$;
- теплота реакции $Q$, Дж · кг$^{-1}$.

Расчет выполняется в следующем порядке.

4.2.1. Для заданной температуры $T_0$ (см. пп. 4.1.3б и 4.1.5б) по формулам (8) и (9) вычислить параметры $\beta$ и $\gamma$.

4.2.2. Рассчитать параметр $\delta_{кр}$ по формуле

$$\delta_{кр} = \delta_0(1+\beta)\left(1+2{,}4\gamma^{2/3}\right). \qquad (27)$$

4.2.3. В первом приближении критический размер найти из выражения

$$r = \sqrt{\frac{\lambda R T_0^2 \delta_{кр} e^{\frac{E}{RT_0}}}{EQk_0\rho}}. \qquad (28)$$

4.2.4. По уравнению (4) вычислить коэффициент теплоотдачи $\alpha$.

4.2.5. Найти величину параметра Био по формуле (6) и рассчитать значение функции $\varphi(Bi)$ по уравнению (7).

4.2.6. Определить величину параметра $\delta_{кр}$ по уравнению (10).

4.2.7. По формуле (28) вычислить новое значение размера упаковки материала.

4.2.8. Используя это значение $r$, повторить расчет параметров по пп. 4.2.4 – 4.2.7.

4.2.9. Процедуру расчета продолжать до тех пор, пока предыдущее и последующее значения размеров будут отличаться друг от друга менее чем на 5 %. За критический размер принимается результат последнего расчета.

4.2.10. В качестве безопасного значения критического размера в соответствии с требованиями ГОСТ 12.1.004 [3] принимаем 0,8$r$. Так как определенный критический размер является половиной минимального размера скопления, за безопасный размер укладки материала (требуемый минимальный размер компактной укладки груза) принимается величина 1,6$r$.

## Список литературы

1. ГОСТ 19433-88. Грузы опасные. Классификация и маркировка.

2. ГОСТ 12.1.044-89. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов. Номенклатура показателей и методы их определения.

3. ГОСТ 12.1.004-91*. ССБТ. Пожарная безопасность. Общие требования.

### *Пример расчета кинетических параметров*

Рассчитать энергию активации и предэкспоненциальный множитель для реакции окисления муки ржаной по экспериментальным данным, приведенным в первых двух графах табл. П 1.1.

Коэффициент теплопроводности ржаной муки $\lambda = 0{,}152$ Вт $\cdot$ м$^{-1} \cdot$ К$^{-1}$; теплоемкость $c = 1050$ Дж $\cdot$ кг$^{-1} \cdot$ К$^{-1}$; тепловой эффект реакции $Q = 1{,}67 \cdot 10^7$ Дж $\cdot$ кг$^{-1}$; плотность упаковки материала $\rho = 655$ кг $\cdot$ м$^{-3}$.

Расчет проведем для образца размером $D = 35$ мм. Данные для других размеров получим, повторяя приведенную ниже последовательность расчета.

1. По формуле (1) вычислим числа Рэлея. Принимая в первом приближении энергию активации $E$ = = 100 000 Дж $\cdot$ моль$^{-1}$, для образца размером $D = 35$ мм получим:

$$Ra = 1{,}2 \cdot 10^8 e^{\frac{1770}{T_0}} D^3 \frac{RT_0}{E} =$$

$$= 1{,}2 \cdot 10^8 e^{\frac{1770}{492}} (3{,}5 \cdot 10^{-2})^3 \frac{8{,}314 \cdot 492}{100\,000} = 7683.$$

2. Коэффициент теплоотдачи $\alpha$ найдем по уравнению (3).

$$\alpha = 0{,}54 Ra^{0{,}25} \frac{\lambda_в}{D} + 4\sigma T_0^3 =$$

$$= 0{,}54 \cdot 7683^{0{,}25} \frac{0{,}038}{0{,}035} + 4 \cdot 5{,}67 \cdot 10^{-8} \cdot 492^3 =$$

$$= 32{,}5 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{К}^{-1},$$

где теплопроводность воздуха определена по формуле (5)

$$\lambda_в = 6{,}98 \cdot 10^{-3} + 6{,}41 \cdot 10^{-5} T_0 =$$

$$= 6{,}98 \cdot 10^{-3} + 6{,}41 \cdot 10^{-5} \cdot 492 = 0{,}038 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}.$$

3. Вычислим критерий Био, соответствующий размеру и коэффициенту теплоотдачи для каждого образца:

$$Bi = \frac{\alpha r}{\lambda} = \frac{32{,}5 \cdot 0{,}035}{2 \cdot 0{,}152} = 3{,}7.$$

4. Величина функции $\varphi(Bi)$, учитывающей интенсивность теплообмена образца с воздухом, для полученного значения $Bi$ составит:

$$\varphi(Bi) = \frac{Bi}{2}\left(\sqrt{Bi^2+4} - Bi\right)\exp\left(\frac{\sqrt{Bi^2+4} - Bi - 2}{Bi}\right) =$$

$$= \frac{3{,}7}{2}\left(\sqrt{3{,}7^2+4} - 3{,}7\right)\exp\left(\frac{\sqrt{3{,}7^2+4} - 3{,}7 - 2}{3{,}7}\right) = 0{,}625.$$

5. Рассчитаем параметры $\beta$ и $\gamma$:

$$\beta = \frac{RT_0}{E} = \frac{8{,}314 \cdot 492}{100\,000} = 4 \cdot 10^{-2};$$

$$\gamma = \frac{cRT_0^2}{QE} = \frac{1050 \cdot 8{,}314 \cdot 492^2}{1{,}67 \cdot 10^7 \cdot 100\,000} = 1{,}26 \cdot 10^{-3}.$$

6. Критическое значение параметра Франк-Каменецкого будет равно:

$$\delta_{кр} = \delta_0 \varphi(Bi)(1+\beta)\left(1 + 2{,}4\gamma^{2/3}\right) =$$

$$= 2{,}52 \cdot 0{,}625(1 + 0{,}04)\left(1 + 2{,}4 \cdot 0{,}00126^{2/3}\right) = 1{,}68,$$

где $\delta_0$ – критическая величина параметра $\delta$, соответствующая интенсивному теплообмену, для образцов кубической

формы равная 2,52. Результаты вычислений для всех образцов представлены в табл. П 1.1.

*Таблица П 1.1*

| Размер $r$, м | $T_0$, К | $Ra$ | $\alpha$, Вт·м$^{-2}$·К$^{-1}$ | $Bi$ | $\varphi(Bi)$ | $\beta \cdot 10^{-2}$ | $\gamma \cdot 10^{-3}$ | $\delta_{кр}$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0,0175 | 492 | 7683 | 32,5 | 3,7 | 0,625 | 4,00 | 1,26 | 1,68 |
| 0,025 | 474 | 24 740 | 29,2 | 4,8 | 0,687 | 3,94 | 1,17 | 1,84 |
| 0,035 | 459 | 74 272 | 26,5 | 6,1 | 0,736 | 3,82 | 1,05 | 1,97 |
| 0,05 | 444 | 238 607 | 24,4 | 8,0 | 0,790 | 3,69 | 0,98 | 2,10 |
| 0,07 | 431 | 716 774 | 21,9 | 10,1 | 0,828 | 3,58 | 0,93 | 2,21 |
| 0,10 | 418 | 2 302 797 | 19,9 | 13,1 | 0,863 | 3,47 | 0,87 | 2,47 |

7. По формуле (13) рассчитаем величину $M$:

$$M = \frac{\delta_{кр} R T_0^2}{r^2 \rho} = \frac{1{,}68 \cdot 8{,}314 \cdot 492^2}{(1{,}75 \cdot 10^{-2})^2 655} = 1{,}68 \cdot 10^7.$$

8. С помощью этих значений и уравнения (12) методом наименьших квадратов определим численные значения $N$ и энергию активации $E$.

9. Вычислим предэкспоненциальный множитель реакции окисления $Qk_0/\lambda$ путем деления $N$ на $E$. Данные расчетов по пп. 7–9 сведем в табл. П 1.2.

*Таблица П 1.2*

| Размер $r$, м | $T_0$, К | $M$, $\frac{Дж \cdot м \cdot К}{кг \cdot моль}$ | $N$, $\frac{Дж \cdot м \cdot К}{кг \cdot моль}$ | $E$, Дж·моль$^{-1}$ | $Qk_0/\lambda$, м·К·кг$^{-1}$ |
|---|---|---|---|---|---|
| 0,0175 | 492 | $1{,}68 \cdot 10^7$ | $5{,}76 \cdot 10^{16}$ | 88 054 | $6{,}55 \cdot 10^{-11}$ |
| 0,025 | 474 | $8{,}39 \cdot 10^6$ | | | |
| 0,035 | 459 | $4{,}06 \cdot 10^6$ | | | |
| 0,05 | 444 | $1{,}98 \cdot 10^6$ | | | |
| 0,07 | 431 | $1{,}01 \cdot 10^6$ | | | |
| 0,10 | 418 | $5{,}17 \cdot 10^5$ | | | |

10. Повторяя расчет по пп. 1–9 с величиной энергии активации $E = 88\,054$, найдем новые значения энергии активации $E = 88\,068$ Дж · моль$^{-1}$ и предэкспоненциального множителя $Qk_0/\lambda = 6{,}53 \cdot 10^{11}$ м · К · кг$^{-1}$. Так как последние величины практически не отличаются от предыдущих, процесс итераций следует прекратить и за кинетические параметры реакции окисления ржаной муки принять $E = 88\,054$ Дж · моль$^{-1}$ и $Qk_0/\lambda = 6{,}53 \cdot 10^{11}$ м · К · кг$^{-1}$.

## *Параметры кинетики процесса термоокисления некоторых материалов*

| Материал | $E$<br>Дж · моль$^{-1}$ | $Qk_0/\lambda$,<br>м · К · кг$^{-1}$ |
|---|---|---|
| Дрожжи кормовые | 256 212 | $5{,}11 \cdot 10^{30}$ |
| Дрожжи товарные (влажн. 8 %) | 106 144 | $5{,}94 \cdot 10^{14}$ |
| Дрожжи товарные (влажн. 15 %) | 92 285 | $1{,}67 \cdot 10^{13}$ |
| Мука ржаная | 88 054 | $6{,}55 \cdot 10^{11}$ |
| Мука костная крупнозернистая | 50 740 | $2{,}46 \cdot 10^{8}$ |
| Пыль костной муки | 71 623 | $8{,}67 \cdot 10^{10}$ |
| Сено | 179 050 | $8{,}67 \cdot 10^{22}$ |
| Хлопок | 121 825 | $1{,}37 \cdot 10^{16}$ |
| Льно-джут | 63 134 | $4{,}826 \cdot 10^{9}$ |
| Метионин кормовой | 88 278 | $2{,}35 \cdot 10^{10}$ |
| Уголь-сырец марки А | 71 280 | $4{,}31 \cdot 10^{11}$ |
| Уголь ОУ-А | 101 458 | $2{,}82 \cdot 10^{15}$ |
| Уголь ОУ-Б | 97 650 | $2{,}01 \cdot 10^{13}$ |
| Уголь-сырец после сортировки | 101 450 | $2{,}82 \cdot 10^{15}$ |
| Технический углерод К 354 | 56 943 | $4{,}343 \cdot 10^{12}$ |
| Технический углерод Н 990 | 90 732 | $5{,}665 \cdot 10^{14}$ |

### *Пример расчета $\delta_0$ грузового пространства*

Рассчитать $\delta_0$ грузового пространства в железнодорожном вагоне. Вагон представляет собой параллелепипед шириной 2,75 м, длиной 15,7 м и высотой 4,692 м.

1. Отношение квадратов полувысоты вагона к эквивалентной сфере Франк-Каменецкого рассчитаем как для прямоугольного бруса по выражению (16)

$$\frac{a^2}{R_0^2} = \frac{2}{3\pi}\left[ arctg\left(\frac{pq}{\sqrt{1+p^2+q^2}}\right) + \right.$$

$$\left. + \frac{1}{p^2} arctg\left(\frac{q}{p\sqrt{1+p^2+q^2}}\right) + \Psi \right],$$

где $\Psi = \frac{1}{q^2} arctg\left(\frac{p}{q\sqrt{1+p^2+q^2}}\right) + \frac{\sqrt{1+p^2+q^2}}{pq}$; $a,b,c$ – половины сторон бруса, $a$ – наименьшая сторона; $p = b/a$, $q = c/a$.

Подставляя $p$, $q$ в эти равенства, получим

$$\frac{a^2}{R_0^2} = 0{,}378.$$

2. Средний радиус эквивалентной сферы Семенова равен

$$R_s = \frac{3V}{S} = \frac{3 \cdot 2{,}75 \cdot 15{,}7 \cdot 4{,}692}{2(4{,}692 \cdot 15{,}7 + 15{,}7 \cdot 2{,}75 + 4{,}692 \cdot 2{,}75)} = 2{,}3,$$

где $V$, $S$ – объем и поверхность грузового пространства вагона.

3. На основании формул (16)–(18) отношение квадратов радиусов эквивалентных сфер Франк-Каменецкого и Семенова будет равно

$$\sigma = \frac{R_0^{\,2}}{R_s^{\,2}} = \frac{a^2}{0{,}378 \cdot 2{,}3^2} = \frac{1{,}375^2}{0{,}378 \cdot 2{,}3^2} = 0{,}945 .$$

4. Фактор формы прямоугольного бруса согласно уравнению (19) составит:

$$j = 3\sigma - 1 = 3 \cdot 0{,}945 - 1 = 1{,}83 .$$

5. В соответствии с формулой (20) функция $F(j)$ будет равна

$$F(j) = \frac{(2j+6)}{(j+7)} = \frac{2 \cdot 1{,}83 + 6}{1{,}83 + 7} = 1{,}09 .$$

6. Из уравнения (21) значение параметра $\delta_0$ равно

$$\delta_0 = \frac{3F(j)a^2}{R_0^{\,2}} = 3 \cdot 1{,}09 \cdot 0{,}378 = 1{,}23 .$$

*ПРИЛОЖЕНИЕ 4*

***Значения $\delta_0$ для основных типоразмеров грузовых пространств***

| Тип грузового пространства (размеры) | $\delta_0$ |
|---|---|
| Мягкий контейнер (0,95×0,95×1,3 м) | 2,19 |
| Крытый вагон (2,70×2,75×13,80 м) | 1,779 |
| Крытый вагон (2,70×2,76×13,80 м) | 1,773 |
| Крытый вагон (2,70×2,765×15,724 м) | 1,759 |
| Крытый вагон (2,75×4,692×15,70 м) | 1,23 |
| Вагон-хоппер (2,64×3,112×13,37 м) | 2,178 |
| Вагон-хоппер (3,112×4,722×17,50 м) | 1,319 |
| Универсальный контейнер (2,27×2,438×12,12 м) | 1,69 |
| Универсальный контейнер (1,95×2,10×2,543 м) | 2,11 |
| Универсальный контейнер (2,352×2,70×12,035 м) | 1,60 |
| Автофургон – 25 мягких контейнеров в 1 ярус | 1,051 |
| Трюм сухогруза (6,0×17,2×21,4 м) | 1,112 |
| Трюм сухогруза (6,0×17,2×26,6 м) | 1,088 |
| Трюм сухогруза (6,0×17,2×28,5 м) | 1,081 |

***Пример расчета критической температуры***

Рассчитать критическую температуру окружающей среды при транспортировании льно-джута в железнодорожных вагонах. Вагон представляет собой параллелепипед шириной 2,75 м, длиной 15,7 м и высотой 4,692 м.

Исходными данными для расчета являются:

- плотность материала $\rho = 134$ кг $\cdot$ м$^{-3}$;
- коэффициент теплопроводности материала $\lambda = 0{,}049$ Вт $\cdot$ м$^{-1} \cdot$ К$^{-1}$;
- теплоемкость исследуемого материала $c = 1505 \cdot$ Дж $\cdot$ кг$^{-1} \cdot$ К$^{-1}$;
- теплота реакции $Q = 17\,501\,000$ Дж $\cdot$ кг$^{-1}$;
- энергия активации реакции окисления $E = 63\,134$ Дж $\cdot$ моль$^{-1}$;
- предэкспоненциальный множитель $Qk_0/\lambda = 4{,}826 \times 10^9$ м $\cdot$ К $\cdot$ кг$^{-1}$.

1. Подставим полученную в прил. 3 величину $\delta_0$ для грузового пространства вагона в формулу

$$\delta_{кр} = \frac{Q\rho k_0}{\lambda} \frac{E}{RT_0^2} r^2 e^{-\frac{E}{RT_0}}$$

вместо $\delta_{кр}$ и, решив его относительно $T_0$, получим нулевое приближение для этой температуры равное 302 К.

2. С помощью полученной величины рассчитаем:

$$\gamma = \frac{cRT_0^2}{QE} = \frac{1505 \cdot 8{,}314 \cdot 302^2}{1{,}75 \cdot 10^7 \cdot 63134} = 0{,}001$$ – параметр, определяющий выгорание вещества, и

$\beta = \frac{RT_0}{E} = \frac{8{,}314 \cdot 302}{63134} = 0{,}039$ – параметр, характеризующий реакцию окисления.

3. Так как для размеров упаковок, превышающих 1 м $\varphi(Bi) \approx 1$, безразмерное значение критического параметра Франк-Каменецкого, учитывающего выгорание вещества и свойства реакции горения, определим по формуле

$$\delta_{кр} = \delta_0\left(1 + 2{,}4\gamma^{2/3}\right)\left(1 + \beta\right) =$$

$$= 1{,}23\,(1 + 2{,}4 \cdot 0{,}001^{2/3})\,(1 + 0{,}039) = 1{,}332.$$

4. Решая уравнение (11) относительно температуры получим $T_0 = 304$ К или 31 °С. Следовательно, при перевозке льно-джута в железнодорожных вагонах при температурах воздуха больших 31 °С возможно возникновение самовозгорания транспортируемого продукта.

### *Пример расчета времени индукции*

Рассчитать время индукции при перевозке льно-джута в вагоне при температуре 40 °С (313 К). Фактор формы вагона $j = 1{,}83$.

Исходными данными для расчета являются:

- температура перевозки материала $T_0 = 313$ К;
- критическая температура самовозгорания для заданного размера и формы упаковки материала $T_{кр} = 304$ К;
- фактор формы упаковки материала $j = 1{,}83$;
- размер упаковки $r = 1{,}375$ м;
- плотность упаковки материала $\rho = 134$ кг $\cdot$ м$^{-3}$;
- коэффициент теплопроводности материала $\lambda = 0{,}042$ Вт $\cdot$ м$^{-1} \cdot$ К$^{-1}$;
- теплоемкость исследуемого материала $c = 1505$ Дж $\cdot$ кг$^{-1} \cdot$ К$^{-1}$;
- теплота реакции $Q = 17\,501\,000$ Дж $\cdot$ кг$^{-1}$;
- энергия активации реакции окисления $E = 63\,134$ Дж $\cdot$ моль$^{-1}$;
- предэкспоненциальный множитель $Qk_0/\lambda = 4{,}826 \times 10^9$ м $\cdot$ К $\cdot$ кг$^{-1}$.

1. По температуре $T_0$ вычислим параметры $\beta$ и $\gamma$ с помощью формул (8) и (9):

$$\beta = \frac{RT_0}{E} = \frac{8{,}314 \cdot 313}{63\,134} = 0{,}041;$$

$$\gamma = \frac{cRT_0^2}{QE} = \frac{1505 \cdot 8{,}314 \cdot 313^2}{1{,}75 \cdot 10^7 \cdot 63\,134} = 0{,}0011.$$

2. По уравнениям (1) и (2) найдем число Рэлея:

$$Ra = 1{,}2 \cdot 10^8 e^{\frac{1770}{T_0}} D^3 \frac{RT_0}{E} =$$

$$= 1{,}2 \cdot 10^8 e^{\frac{1770}{313}} 2{,}75^3 \frac{8{,}314 \cdot 313}{63134} = 2{,}938 \cdot 10^{10}.$$

3. Коэффициент теплоотдачи $\alpha$ определим по уравнению (4):

$$\alpha = 0{,}135 Ra^{0{,}333} \frac{\lambda_в}{D} + 4\sigma T_0^3 =$$

$$= 0{,}135\left(2{,}938 \cdot 10^{10}\right)^{0{,}333} \frac{0{,}0269}{2{,}75} + 4 \cdot 5{,}67 \cdot 10^{-8} \cdot 313^3 =$$

$$= 10{,}93 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{К}^{-1},$$

где теплопроводность воздуха рассчитана по формуле (5):

$$\lambda_в = 6{,}98 \cdot 10^{-3} + 6{,}41 \cdot 10^{-5} T_0 =$$

$$= 6{,}98 \cdot 10^{-3} + 6{,}41 \cdot 10^{-5} \cdot 313 = 0{,}0269 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}.$$

4. Вычислим критерий Био, соответствующий размеру и коэффициенту теплоотдачи для каждого образца:

$$Bi = \frac{\alpha r}{\lambda} = \frac{10{,}93 \cdot 1{,}375}{0{,}042} = 357{,}8.$$

5. По формуле (11) рассчитаем параметр $\delta$, соответствующий температуре $T_0$, и параметр $\delta_{кр}$ для критической температуры $T_{кр}$:

$$\delta = \frac{Q\rho k_0}{\lambda} \frac{E}{RT_0^2} r^2 e^{-\frac{E}{RT_0}} =$$

$$= 4{,}826 \cdot 10^9 \cdot 134 \frac{63134}{8{,}314 \cdot 313^2} 1{,}375^2 e^{-\frac{63134}{8{,}314 \cdot 313}} = 2{,}75;$$

$$\delta_{кр} = \frac{Q\rho k_0}{\lambda} \frac{E}{RT_0^2} r^2 e^{-\frac{E}{RT_0}} =$$

$$= 4{,}826 \cdot 10^9 \cdot 134 \frac{63134}{8{,}314 \cdot 304^2} 1{,}375^2 e^{-\frac{63134}{8{,}314 \cdot 304}} = 1{,}42.$$

6. Вычислим относительное удаление от предела воспламенения:

$$\Delta = \frac{\delta}{\delta_{кр}} = \frac{2{,}75}{1{,}42} = 1{,}93$$

и функции

$$f_1(\Delta, \gamma) = 1 + 0{,}62 \frac{1 - 4 \cdot \Delta^{-2} \sqrt{\gamma}}{(\Delta - 0{,}95)^{0{,}9}} =$$

$$= 1 + 0{,}62 \frac{1 - 4 \cdot 1{,}93^{-2} \sqrt{0{,}0011}}{(1{,}93 - 0{,}95)^{0{,}9}} = 1{,}609;$$

$$f_2(j, Bi, \Delta) = 1 - \frac{[1 + 1{,}5(1 - 0{,}1 \cdot \Delta) j] Bi}{16(1 + Bi)} =$$

$$= 1 - \frac{[1 + 1{,}5(1 - 0{,}1 \cdot 1{,}93) 1{,}83] 357{,}8}{16(1 + 357{,}8)} = 0{,}8.$$

7. Рассчитаем безразмерное время индукции:

$$\tau = f_1(\Delta, \gamma) f_2(j, Bi, \Delta)(1 + 2\beta) =$$

$$= 1{,}609 \cdot 0{,}8(1 + 2 \cdot 0{,}041) = 1{,}392.$$

8. Определим размерное время индукции $t_и$ (с). по формуле

$$t_и = \frac{\tau c R T_0^2}{Q k_0 E} e^{\frac{E}{RT_0}} = \frac{1{,}392 \cdot 1505 \cdot 8{,}314 \cdot 313^2}{4{,}826 \cdot 10^9 \cdot 0{,}042 \cdot 63134} e^{\frac{63134}{8{,}314 \cdot 313}} =$$

$$= 4\,585\,630 \text{ с} = 53 \text{ суток } 1 \text{ ч } 47 \text{ мин.}$$

### *Пример определения класса опасности самовозгорающегося груза*

Определить класс опасности льно-джута при перевозке железной дорогой в крытых вагонах в течение 15 суток.

1. Рассматриваемый материал самовозгорается в условиях лабораторных испытаний, соответствующих требованиям разд. 2.2. Параметры кинетики процесса термоокисления определены согласно разд. 2.3 (см. прил. 2).

2. Наименьшее значение критической температуры процесса самовозгорания льно-джута в крытых вагонах определяем в соответствии с разд. 3.1 и 3.2 для модификации вагонов с наибольшими размерами. Согласно прил. 3 расчет ведем для вагона с размерами 2,75×4,692×15,70 м. Значение $T_{кр}$ составляет 304 К или 31 °С.

3. В соответствии с п. 4.1.3 определяем время индукции до самовозгорания льно-джута в вагоне при температуре среды $T_0$ = 40 °С (согласно разд. 3.3). Это значение равно 53,07 суток.

4. Так как время транспортирования материала не превышает 15 суток (< 51,7 суток), то согласно п. 4.1.3а льно-джут при перевозках в крытых железнодорожных вагонах относится к низкой степени опасности подкласса 4.2 (согласно классификации ГОСТ 19433).

### *Пример определения безопасных размеров компактной укладки материала*

Рассчитать безопасный для теплового самовозгорания размер компактной укладки при транспортировании костной муки в крытых железнодорожных вагонах.

Расчет проведем для верхней границы диапазона климатического перепада температур воздуха в средней полосе России равной 40 °С или 313 К.

Исходными данными для расчета критического размера являются:

- плотность упаковки материала $\rho = 660$ кг $\cdot$ м$^{-3}$;
- коэффициент теплопроводности материала $\lambda = 0{,}14$ Вт $\cdot$ м$^{-1} \cdot$ К$^{-1}$;
- теплоемкость исследуемого материала $c = 780$ Дж $\cdot$ кг$^{-1} \cdot$ К$^{-1}$;
- теплота реакции $Q = 350\,000$ Дж $\cdot$ кг$^{-1}$;
- энергия активации реакции окисления $E = 50\,740$ Дж $\cdot$ моль$^{-1}$;
- предэкспоненциальный множитель $Qk_0/\lambda = 2{,}46 \cdot 10^8$ м $\cdot$ К $\cdot$ кг$^{-1}$.

1. Выбираем вагон с наибольшим размером грузового пространства, для которого согласно прил. 4 известно, что $\delta_0 = 1{,}23$.

2. Для температуры $T_0 = 313$ К вычислим параметры $\beta$ и $\gamma$ по уравнениям (8) и (9):

$$\beta = \frac{RT_0}{E} = \frac{8{,}314 \cdot 313}{50\,740} = 0{,}0513;$$

$$\gamma = \frac{cRT_0^2}{QE} = \frac{780 \cdot 8{,}314 \cdot 313^2}{3{,}5 \cdot 10^5 \cdot 50\,740} = 0{,}0358.$$

3. Считая $\varphi(Bi) \approx 1$, определим параметр $\delta_{кр}$ по формуле (10):

$$\delta_{кр} = \delta_0(1+\beta)\left(1+2{,}4\gamma^{2/3}\right) =$$

$$= 1{,}23(1+0{,}0513)\left(1+2{,}4 \cdot 0{,}0358^{2/3}\right) = 1{,}63.$$

4. В первом приближении минимальный размер найдем из выражения (28):

$$r = \sqrt{\frac{\lambda R T_0^2 \delta_{кр} e^{\frac{E}{RT_0}}}{EQk_0\rho}} =$$

$$= \frac{8{,}314 \cdot 313^2 \cdot 1{,}63 e^{\frac{50\,740}{8{,}314 \cdot 313}}}{50\,740 \cdot 2{,}46 \cdot 10^8 \cdot 660} = 0{,}216 \text{ м}.$$

5. По уравнениям (1) и (2) для полученного размера вычислим число Рэлея:

$$Ra = 1{,}2 \cdot 10^8 e^{\frac{1770}{T_0}} D^3 \frac{RT_0}{E} =$$

$$= 1{,}2 \cdot 10^8 e^{\frac{1770}{313}} 0{,}432^3 \frac{8{,}314 \cdot 313}{50\,740} = 1{,}416 \cdot 10^8.$$

6. Коэффициент теплоотдачи $\alpha$ найдем по уравнению (4):

$$\alpha = 0{,}135 Ra^{0{,}333} \frac{\lambda_в}{D} + 4\sigma T_0^3 =$$

$$= 0{,}135\left(1{,}416 \cdot 10^8\right)^{0{,}333} \frac{0{,}027}{0{,}432} + 4 \cdot 5{,}67 \cdot 10^{-8} \cdot 313^3 =$$

$$= 11{,}33 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{К}^{-1},$$

где теплопроводность воздуха определена по формуле (5):

$$\lambda_в = 6{,}98 \cdot 10^{-3} + 6{,}41 \cdot 10^{-5} T_0 =$$

$$= 6{,}98 \cdot 10^{-3} + 6{,}41 \cdot 10^{-5} \cdot 313 = 0{,}027 \ \text{Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}.$$

7. Вычислим критерий Био, соответствующий предварительному размеру компактной укладки материала в вагоне:

$$Bi = \frac{\alpha r}{\lambda} = \frac{11{,}33 \cdot 0{,}216}{0{,}14} = 17{,}5.$$

8. Величина функции $\varphi(Bi)$, учитывающая интенсивность теплообмена образца с воздухом, для полученного значения $Bi$ составит:

$$\varphi(Bi) = \frac{Bi}{2}\left(\sqrt{Bi^2 + 4} - Bi\right)\exp\left(\frac{\sqrt{Bi^2 + 4} - Bi - 2}{Bi}\right) =$$

$$= \frac{17{,}5}{2}\left(\sqrt{17{,}5^2 + 4} - 17{,}5\right)\exp\left(\frac{\sqrt{17{,}5^2 + 4} - 17{,}5 - 2}{17{,}5}\right) =$$

$$= 0{,}895.$$

9. Критическое значение параметра Франк-Каменецкого будет равно:

$$\delta_{кр} = \delta_0 \varphi(Bi)(1 + \beta)\left(1 + 2{,}4\gamma^{2/3}\right) =$$

$$= 1{,}23 \cdot 0{,}895\left(1 + 0{,}0513\right)\left(1 + 2{,}4 \cdot 0{,}0358^{2/3}\right) = 1{,}46.$$

10. По формуле (28) вычислим новое значение размера насыпи материала:

$$r = \sqrt{\frac{\lambda R T_0^2 \delta_{кр} e^{\frac{E}{RT_0}}}{EQk_0\rho}} = \sqrt{\frac{8{,}314 \cdot 313^2 \cdot 1{,}46 e^{\frac{50740}{8{,}314 \cdot 313}}}{50740 \cdot 2{,}46 \cdot 10^8 \cdot 660}} = 0{,}206 \text{ м}.$$

11. Так как последнее значение отличается от предшествующего менее чем на 5 %, считаем его критическим размером компактной укладки согласно п. 4.2.9.

12. В соответствии с п. 4.2.10 безопасный характеристический размер компактной укладки составит $0{,}8r = 0{,}165$ м. Полный безопасный размер составит 0,33 м.

13. Безопасная для теплового самовозгорания укладка костной муки при перевозке в крытых вагонах будет соответствовать штабелированию на поддонах в несколько ярусов с высотой укладки материала в каждом ярусе не более 0,33 м. Безопасные условия транспортирования костной муки железной дорогой в холодное время года могут определяться дополнительно согласно п. 4 разд. I методики.

*Редактор* ***Т.А. Кремлева***
*Технический редактор* ***Л.А. Буланова***

***Ответственный за выпуск И.А. Корольченко***

Подписано в печать 04.12.2006 г. Формат 60×84/16. Печать офсетная.
Уч.-изд. л. 2,12. Т. – 700 экз. Заказ № 117.

gost.e-ecolog.ru

Типография ФГУ ВНИИПО МЧС России.
*Мкр. ВНИИПО, д. 12, г. Балашиха,*
*Московская обл., 143903*