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 ОПРЕДЕЛЕНИЯ УСЛОВИЙ ТЕПЛОВОГО САМОВОЗГОРАНИЯ ВЕЩЕСТВ И МАТЕРИАЛОВ

МОСКВА 2004

gost.e-ecolog.ru

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 ОПРЕДЕЛЕНИЯ УСЛОВИЙ ТЕПЛОВОГО САМОВОЗГОРАНИЯ ВЕЩЕСТВ И МАТЕРИАЛОВ

МОСКВА 2004

УДК 614.841

Методика определения условий теплового самовозгорания веществ и материалов. – М.: ВНИИПО, 2004. – 67 с.

Методика позволяет определять условия теплового самовозгорания материалов на основании предварительных экспериментальных исследований. Приводятся способы расчета критических условий для скоплений вещества различной формы. Разработаны методы определения условий теплового самовозгорания отложений материала на поверхностях трубопроводов и другого технологического оборудования.

Методика предназначена для использования подразделениями ГПН и специализированными организациями. Она позволяет определять пожаробезопасные условия переработки, транспортирования и хранения самовозгорающихся веществ (на основании критического размера скопления материала, критической температуры окружающей среды, времени индукции процесса теплового самовозгорания).

Разработана сотрудниками ФГУ ВНИИПО МЧС России: д.т.н., профессором *Ю.Н. Шебеко*; д.т.н., профессором *В.И. Горшковым*; к.т.н. *И.А. Корольченко*; *А.С. Кухтиным*; *В.Л. Крыловым*.

Согласована с ГУГПС МЧС России письмом № 18/2/848 от 02.04.2004 г. и утверждена ФГУ ВНИИПО МЧС России 21.04.2004 г.

© ФГУ ВНИИПО МЧС России, 2004

1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

1.1. Аппаратура

Аппаратура для определения условий теплового самовозгорания включает в себя следующие элементы:

1.1.1. Термостат вместимостью рабочей камеры не менее 40 $дм^3$ с терморегулятором, позволяющим поддерживать постоянную температуру от 60 до 500 °С с погрешностью не более 2 °С.

1.1.2. Корзиночки кубической или цилиндрической формы высотой 15, 30, 35, 50, 70, 140 и 200 мм. Диаметр цилиндрической корзиночки должен быть равен ее высоте. Материалом для корзиночек 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.

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

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

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

1.2. Подготовка и проведение испытаний

1.2.1. 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 рабочий конец третьей термопары располагают на расстоянии (30±1) мм от стенки корзинки на высоте ее центра.

1.2.2. 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 (7±5) мм для термоэлектрического преобразователя.

1.2.3. Свободные концы термопреобразователей подсоединяют к измерителю термоэлектродвижующей силы для регистрации изменения разности температур в центре образца и температуры в рабочей камере термостата. За температуру испытания принимают показания термоэлектрического преобразователя, расположенного на расстоянии 30 мм от образца.

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

1.2.5. Самовозгорание образца проявляется при резком увеличении разности температур, фиксируемой дифференциальной термопарой, до величины более 100 °С или плавном росте температуры до величины, превышающей значение температуры самовоспламенения вещества.

1.2.6. 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 на 10 °С меньше.

Таблица 1

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

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

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

Таблица 2

Размер образца, мм	Температура самовозгорания	
	°С	К

2. РАСЧЕТ УСЛОВИЙ ТЕПЛОВОГО ВЗРЫВА

2.1. Определение параметров кинетического уравнения реакции окисления

Исходными данными для определения параметров кинетического уравнения реакции окисления являются:

- данные табл. 2 для критической температуры самовозгорания T_0 (К) образцов размером D, м;
- коэффициент теплопроводности материала λ, Вт/(м · К);
- теплоемкость исследуемого материала c, Дж/(кг · К);
- теплота реакции Q, Дж/кг.

Расчет предэкспоненциального множителя и энергии активации реакции окисления выполняется в следующем порядке.

2.1.1. 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/с^2; ν – кинематическая вязкость воздуха при температуре T_0, м^2/с; a – температуропроводность воздуха при температуре T_0, м^2/с; D – высота образца, м; R – универсальная газовая постоянная, Дж/(моль · К); T_0 – температура рабочего пространства термостата, К; E – энергия активации реакции окисления. В первом приближении допускается принимать равной 100 кДж/моль.

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

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

2.1.2. Для всех размеров образцов вычислить коэффициенты теплоотдачи α 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$^2 \cdot$ К^4).

Зависимость коэффициента теплопроводности воздуха от температуры может быть определена по формуле

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

2.1.3. По величине α, коэффициенту теплопроводности материала λ и половине высоты $r = D/2$ вычисляют критерии Био для каждого образца:

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

2.1.4. Функцию $\varphi(\mathrm{Bi})$, учитывающую интенсивность теплообмена образца с воздухом, определяют по уравнению

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

2.1.5. Рассчитывают параметры β и γ, характеризующие индивидуальные свойства реакции окисления:

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

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

где c – теплоемкость материала, Дж/(кг · К), а Q – теплота реакции окисления, Дж/кг.

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

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

где δ_0 – критическая величина параметра δ 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	α, Вт/(м²·К)	Bi	φ(Bi)	β	γ	$\delta_{кр}$

2.1.7. 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 $M = \dfrac{\delta_{кр} RT_0^2}{r^2 \rho}$; (13)

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

ρ – плотность упаковки материала, кг/м^3; k_0 – константа скорости реакции, 1/с.

2.1.8. 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.

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

Таблица 4

Размер r, м	T_0, К	M, $\frac{\text{Дж} \cdot \text{м} \cdot \text{К}}{\text{кг} \cdot \text{моль}}$	N, $\frac{\text{Дж} \cdot \text{м} \cdot \text{К}}{\text{кг} \cdot \text{моль}}$	E, Дж/моль	Qk_0/λ, м · К/кг

2.1.10. Если величина энергии активации, вычисленная в п. 2.1.8, отличается от ранее принятой и равной 100 кДж/моль более чем на 5 %, расчеты по пп. 2.1.1–2.1.10 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 %.

2.2. Расчет критической температуры

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

- форма и размеры упаковки материала;
- плотность упаковки материала, кг/м^3;
- коэффициент теплопроводности материала λ, Вт/(м · К);
- теплоемкость исследуемого материала c, Дж/(кг · К);
- теплота реакции Q, Дж/кг;
- энергия активации E реакции окисления, Дж/моль;
- предэкспоненциальный множитель Qk_0/λ, м · К/кг.

Расчет выполняется в следующем порядке.

2.2.1. Для заданной формы упаковки материала из табл. 5 выбрать или рассчитать в соответствии с прил. 1 величину критерия Франк-Каменецкого δ_0.

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

2.2.3. По формуле (1) п. 2.1.1 вычислить значение критерия Рэлея для заданного размера упаковки материала.

2.2.4. Рассчитать коэффициент теплоотдачи по уравнению (4) и величину критерия Био по формуле (6).

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

2.2.6. По формулам (8) и (9) найти величину параметров β и γ.

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

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

2.2.9. Используя это значение T_0, повторить расчет параметров по пп. 2.2.2–2.2.8.

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

Таблица 5

Форма тела	δ_0
Бесконечная пластина толщиной $2r$	0,88
Бесконечный цилиндр радиусом r	2,00
Бесконечный квадратный стержень, сторона $2r$	1,70
Сфера радиусом r	3,32
Цилиндр радиусом r высотой $2r$	2,76
Куб, высота $2r$	2,52
Тетраэдр, радиус вписанной сферы r, сторона $2a = 2\sqrt{6}r$	2,23
Полусфера	6,27

Примеры расчетов приведены в прил. 2.

2.3. Расчет критического размера

Исходными данными для расчета критического размера упаковки при хранении и транспортировании веществ и материалов являются:

- энергия активации реакции окисления E, Дж/моль;
- предэкспоненциальный множитель Qk_0 / λ, м · К/кг;
- температура хранения, К;
- форма упаковки материала;
- плотность упаковки материала, кг/м^3;
- теплоемкость исследуемого материала c, Дж/(кг · К);
- теплота реакции Q, Дж/кг.

Расчет выполняется в следующем порядке.

2.3.1. В соответствии с п. 2.2.1 определить величину параметра δ_0.

2.3.2. Для заданной температуры хранения по формулам (8) и (9) вычислить параметры β и γ.

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

$$\delta_{кр} = \delta_0\left(1 + \beta\right)\left(1 + 2{,}4\gamma^{2/3}\right). \qquad (15)$$

2.3.4. В первом приближении минимальный размер найти из выражения

$$r = \sqrt{\frac{\lambda R T_0^2 \delta_{кр} e^{\frac{E}{RT_0}}}{EQk_0\rho}}. \qquad (16)$$

2.3.5. По уравнению (4) вычислить коэффициент теплоотдачи α.

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

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

2.3.8. По формуле (16) вычислить новое значение размера упаковки материала.

2.3.9. Используя это значение r, повторить расчет параметров по пп. 2.3.5–2.3.9.

2.3.10. 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.

2.4. Расчет времени индукции

Расчет времени индукции производится в том случае, когда хранение или перевозка материалов осуществляется при температуре окружающей среды больше критической.

Исходными данными для расчета являются:

- температура хранения или перевозки материала T_0, К;
- критическая температура самовозгорания для заданного размера и формы упаковки материала $T_{кр}$;
- фактор формы упаковки материала j;
- размер упаковки r, м;
- плотность упаковки материала, кг/м^3;
- коэффициент теплопроводности материала λ, Вт/(м · К);
- теплоемкость исследуемого материала c, Дж/(кг · К);
- теплота реакции Q, Дж/кг;
- энергия активации реакции окисления E, Дж/моль;
- предэкспоненциальный множитель Qk_0 / λ, м · К/кг.

Расчет выполняется в следующем порядке.

2.4.1. По температуре T_0 вычислить параметры β и γ с помощью формул (8) и (9).

2.4.2. По уравнению (4) определить коэффициент теплоотдачи α и найти величину параметра Био по формуле (6).

2.4.3. По формуле (11) рассчитать параметр δ, соответствующий температуре хранения T_0, и параметр $\delta_{кр}$ для критической температуры $T_{кр}$.

2.4.4. Вычислить относительное удаление от предела воспламенения

$$\Delta = \frac{\delta}{\delta_{кр}} \tag{17}$$

и функции

$$f_1(\Delta, \gamma) = 1 + 0{,}62\frac{1 - 4 \cdot \Delta^{-2}\sqrt{\gamma}}{(\Delta - 0{,}95)^{0{,}9}}; \tag{18}$$

$$f_2(j, \mathrm{Bi}, \Delta) = 1 - \frac{\left[1 + 1{,}5\,(1 - 0{,}1 \cdot \Delta)\,j\right]\mathrm{Bi}}{16\,(1 + \mathrm{Bi})}. \tag{19}$$

2.4.5. Рассчитать безразмерное время индукции с помощь уравнений (17)–(19) по выражению

$$\tau = f_1(\Delta, \gamma) f_2(j, \mathrm{Bi}, \Delta)(1 + 2\beta). \tag{20}$$

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

$$t_и = \frac{\tau c R T_0^2}{Q k_0 E} e^{\frac{Ee}{RT_0}}. \tag{21}$$

3. РАСЧЕТ КРИТИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ ДЛЯ ОТЛОЖЕНИЙ ГОРЮЧИХ МАТЕРИАЛОВ

3.1. Критическая температура отложений на нагретой поверхности оборудования

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

- температура среды, в которой образуются отложения, T_0, К;
- толщина отложений h, м;
- коэффициент теплопроводности материала λ, Вт/(м · К);
- теплоемкость исследуемого материала c, Дж/(кг · К);
- теплота реакции Q, Дж/кг;
- энергия активации реакции окисления E, Дж/моль;
- предэкспоненциальный множитель Qk_0 / λ, м · К/кг.

3.1.1. Принимая в первом приближении величину критерия $\mathrm{Bi} = 4$ и температуру нагретой поверхности оборудования T_Γ на 200 К больше заданной температуры T_0, вычислить среднюю (между температурами холодной поверхности и газового пространства) температуру $T_{ср}$ по формуле

$$T_{ср} = \frac{T_\Gamma - T_0}{2(2\mathrm{Bi} + 1)} + T_0 . \qquad (22)$$

3.1.2. Рассчитать комплекс $g / a\nu$ и коэффициент теплопроводности воздуха по уравнениям:

$$\frac{g}{a\nu} = 1{,}2 \cdot 10^8 e^{\frac{1770}{T_{ср}}} ; \qquad (23)$$

$$\lambda_{\text{в}} = 6{,}98 \cdot 10^{-3} + 6{,}41 \cdot 10^{-5} T_{\text{ср}}. \qquad (24)$$

3.1.3. По найденным выше значениям определить другую величину критерия Био по выражению

$$\text{Bi} = \left(C \sqrt[4]{\frac{g}{\nu a} \frac{h^3}{T_0} \frac{(T_{\text{г}} - T_0)}{(2\text{Bi} + 1)}} \frac{\lambda_{\text{в}}}{h} + 4\sigma T_0^3 \right) \frac{h}{2\lambda}, \qquad (25)$$

где C – коэффициент, равный 0,27 для горизонтальной пластины, обращенной горячей стороной вниз, и 0,54 для горизонтальной пластины, обращенной горячей стороной вверх.

3.1.4. Найденное в п. 3.1.3 значение Bi подставить в формулу (22) и по выражениям (23)–(25) найти новое значение критерия Био. Процесс итераций продолжать до тех пор, пока последняя и предыдущая величины не будут отличаются друг от друга менее чем на 10 %.

3.1.5. Вычислить безразмерный температурный перепад

$$\theta_0 = \frac{E}{RT_{\text{г}}^2}(T_{\text{г}} - T_0), \qquad (26)$$

параметры

$$a = 1 + 2{,}28e^{-0{,}65\theta_0}; \qquad (27)$$

$$\delta = \frac{1}{2a}\left(\frac{\text{Bi}}{1 + 2\text{Bi}}\right)^2 \left\{\theta_0 + 2\ln\left[2\left(a + \sqrt{a(a-1)}\right)\right]\right\}^2 \qquad (28)$$

3.1.6. Для температуры $T_{\text{г}}$ определить параметры

$$\beta = \frac{RT_{\text{г}}}{E};$$

$$\gamma = \frac{cRT_{\text{г}}^2}{QE}$$

и вычислить критическую величину δ по формуле

$$\delta_{кр} = \delta\left(1 + \beta\right)\left(1 + 2{,}4\gamma^{2/3}\right). \qquad (29)$$

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

3.1.8. Используя это значение $T_г$, повторить расчет параметров по пп. 3.1.1–3.1.7.

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

3.2. Критическая температура для отложений материала на стенках трубопровода

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

- температура среды снаружи трубопровода T_0, К;
- толщина отложений h, м;
- скорость движения среды в трубопроводе V, м/с;
- коэффициент теплопроводности материала λ, Вт/(м · К);
- теплоемкость исследуемого материала c, Дж/(кг · К);
- энергия активации реакции окисления E, Дж/моль;
- удельное тепловыделение Q, Дж/кг;
- предэкспоненциальный множитель $Qk_0\rho / \lambda$, м · К/кг.

3.2.1. Принимая в первом приближении величину критерия Био на холодной стенке слоя $Bi_x = 4$ и температуру среды внутри трубопровода $T_г$ на 200 К более T_0,

вычислить среднюю (между температурами холодной и горячей поверхностей слоя отложений) температуру $T_{ср}$ по формуле

$$T_{ср} = \frac{T_г - T_0}{2(2\mathrm{Bi}_х + 1)} + T_0 . \qquad (30)$$

3.2.2. Рассчитать комплекс $g/a\nu$ и коэффициент теплопроводности воздуха по уравнениям (23) и (24).

3.2.3. По найденным выше значениям определить другую величину критерия Био на холодной стенке:

$$\mathrm{Bi}_х = \left(0{,}54 \sqrt[4]{\frac{g}{\nu a} \frac{h^3}{T_0} \frac{(T_г - T_0)}{(2\mathrm{Bi}_х + 1)}} \frac{\lambda_в}{h} + 4\sigma T_0^3 \right) \frac{h}{2\lambda} . \qquad (31)$$

3.2.4. Найденное в п. 3.2.3 значение Bi подставить в формулу (30) и по выражениям (23), (24), (31) найти новое значение критерия Био. Процесс итераций продолжать до тех пор, пока последняя и предыдущая величины не будут отличаются друг от друга менее чем на 10 %.

3.2.5. Определить значение кинематической вязкости воздуха по выражению

$$\nu = 7{,}87 \cdot 10^{-11} T_{ср}^2 + 5{,}01 \cdot 10^{-8} T_{ср} - 6{,}4 \cdot 10^{-6} . \qquad (32)$$

3.2.6. Вычислить величину критерия Био на горячей стенке слоя по выражению

$$\mathrm{Bi}_г = \left(0{,}018 \left(\frac{VD}{\nu} \right)^{0{,}8} \frac{\lambda_в}{D} + 4\sigma T_г^3 \right) \frac{h}{2\lambda} . \qquad (33)$$

3.2.7. Рассчитать безразмерный температурный перепад и параметр a по выражениям (26), (27).

3.2.8. Определить параметр δ по формуле

$$\delta = \frac{1}{2a}\left(\frac{Bi_Г Bi_Х}{2Bi_Г Bi_Х + Bi_Г + Bi_Х}\right)^2 \times \times \left\{\theta_0 + 2\ln\left[2\left(a + \sqrt{a(a-1)}\right)\right]\right\}^2. \quad (34)$$

3.2.9. Для температуры $T_Г$ определить параметры β и γ; рассчитать критическую величину δ по формуле (15).

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

3.2.11. Используя это значение $T_Г$, повторить расчет параметров по пп. 3.2.1–3.2.10.

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

3.3. Критический размер отложений на нагретой поверхности оборудования

Исходными данными для расчета критического размера отложений на нагретой поверхности оборудования являются:

- температура поверхности, на которой образуются отложения, $T_Г$, К;
- температура газовой среды около холодной поверхности слоя T_0, К;
- коэффициент теплопроводности материала λ, Вт/(м · К);
- теплоемкость исследуемого материала c, Дж/(кг · К);
- теплота реакции Q, Дж/кг;
- энергия активации реакции окисления E, Дж/моль;
- предэкспоненциальный множитель Qk_0 / λ, м · К/кг.

3.3.1. Принимая в первом приближении величину критерия Bi = 5, в соответствии с пп. 3.1.1–3.1.2 определить температуру $T_{ср}$, комплекс $g/a\nu$ и коэффициент теплопроводности воздуха.

3.3.2. Принимая значение h равным 0,01 м, по выражению (25) рассчитать другое значение критерия Био.

3.3.3. Найденное в п. 3.3.2 значение Bi подставить в формулу (22) и по выражениям (23)–(25) найти новое значение критерия Био. Процесс итераций продолжать до тех пор, пока последняя и предыдущая величины не будут отличаются друг от друга менее чем на 10 %.

3.3.4. В соответствии с пп. 3.1.5–3.1.6 вычислить безразмерный температурный перепад θ_0, параметры a, δ, β, γ, $\delta_{кр}$.

3.3.5. Подставить величину $\delta_{кр}$ в выражение

$$h = 2\sqrt{\frac{\lambda R T_0^2 \delta_{кр} e^{\frac{E}{RT_0}}}{EQk_0\rho}} \qquad (35)$$

и найти новое значение толщины отложений h.

3.3.6. Используя это значение h, вычислить значение Bi в соответствии с пп. 3.1.3–3.1.4.

3.3.7. С учетом полученной величины Bi определить в соответствии с пп. 3.1.5–3.1.6 параметры δ и $\delta_{кр}$, рассчитать по формуле (35) значение h.

3.3.8. Указанную процедуру расчета продолжать до тех пор, пока предыдущее и последующее значения толщины слоя не будут отличаться друг от друга менее чем на 5 %. За критический размер принимается результат последнего расчета.

3.4. Критическая температура для отложений материала в технологическом оборудовании

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

- температура среды в производственном помещении T_0, К;
- толщина отложений h, м;
- коэффициент теплопроводности материала λ, Вт/(м · К);
- теплоемкость исследуемого материала c, Дж/(кг · К);
- энергия активации реакции окисления E, Дж/моль;
- удельное тепловыделение Q, Дж/кг;
- предэкспоненциальный множитель $Qk_0\rho / \lambda$, м · К/кг.

3.4.1. Принять в первом приближении величину критерия Био на холодной стенке $\mathrm{Bi_x} = 2$, значение критерия Био на горячей стенке $\mathrm{Bi_г} = 4$, температуру среды в технологическом оборудовании $T_г$ на 200 К больше T_0. Вычислить среднюю (между температурами холодной поверхности и прилегающего газового пространства) температуру по формуле

$$T_{ср_x} = \frac{T_г - T_0}{2} b_x + T_0, \qquad (36)$$

где $b_x = \dfrac{\mathrm{Bi_г}}{2\mathrm{Bi_x Bi_г} + \mathrm{Bi_x} + \mathrm{Bi_г}}$.

3.4.2. Рассчитать комплекс $g / a\nu$ и коэффициент теплопроводности воздуха около холодной стенки по уравнениям (23) и (24).

3.4.3. По найденным выше значениям определить другую величину критерия Био на холодной стенке по уравнению

$$\mathrm{Bi}_{\mathrm{x}} = \left(C \sqrt[4]{\frac{g}{\nu a} \frac{h^3}{T_0} \frac{(T_{\mathrm{r}} - T_0)}{b_{\mathrm{x}}}} \frac{\lambda_{\mathrm{в}}}{h} + 4\sigma T_0^3 \right) \frac{h}{2\lambda}, \qquad (37)$$

где C – коэффициент, равный 0,27 для горизонтальной пластины, обращенной горячей стороной вниз, и 0,54 для горизонтальной пластины, обращенной горячей стороной вверх.

3.4.4. Найденное в п. 3.4.3 значение Bi_{x} подставить в формулу (36) и по выражениям (23), (24) и (37) найти новое значение критерия Био. Процесс итераций продолжать до тех пор, пока последняя и предыдущая величины не будут отличаться друг от друга менее чем на 10 %.

3.4.5. С учетом последних значений критерия Био вычислить среднюю (между температурами горячей поверхности и прилегающего газового пространства) температуру по формуле

$$T_{\mathrm{ср_г}} = \frac{1}{2}(T_{\mathrm{г}}(2 - b_{\mathrm{г}}) + T_0 b_{\mathrm{г}}), \qquad (38)$$

где $b_{\mathrm{г}} = \dfrac{\mathrm{Bi}_{\mathrm{x}}}{2\mathrm{Bi}_{\mathrm{x}}\mathrm{Bi}_{\mathrm{г}} + \mathrm{Bi}_{\mathrm{x}} + \mathrm{Bi}_{\mathrm{г}}}$.

3.4.6. Рассчитать комплекс $g/a\nu$ и коэффициент теплопроводности воздуха около горячей стенки по уравнениям (23) и (24).

3.4.7. По найденным выше значениям определить другую величину критерия Био на горячей стенке по выражению

$$\mathrm{Bi}_{\Gamma} = \left(C \sqrt[4]{\frac{g}{\nu a} \frac{h^3}{T_{\Gamma}} \frac{(T_{\Gamma} - T_0)}{b_{\Gamma}}} \frac{\lambda_{\mathrm{B}}}{h} + 4\sigma T_{\Gamma}^3 \right) \frac{h}{2\lambda}. \qquad (39)$$

3.4.8. Найденное в п. 3.4.7 значение Bi_{χ} подставить в формулу (38) и по уравнениям (23), (24) и (39) найти новое значение критерия Био. Процесс итераций продолжать до тех пор, пока последняя и предыдущая величины не будут отличаться друг от друга менее чем на 10 %.

3.4.9. Подставить последнее значение Bi_{Γ} в формулу (36) и по уравнениям (23), (24) и (37) найти новое значение критерия Bi_{χ}. Процесс итераций продолжать до тех пор, пока последняя и предыдущая величины не будут отличаться друг от друга менее чем на 10 %.

3.4.10. Рассчитать безразмерный температурный перепад, параметры a и δ по выражениям (26), (27) и (34).

3.4.11. Для температуры T_{Γ} определить параметры β и γ, вычислить критическую величину δ по формуле (15).

3.4.12. Подставить величину $\delta_{\mathrm{кр}}$ в уравнение (11) и найти новое значение температуры T_{Γ}.

3.4.13. Используя это значение T_{Γ}, повторить расчет параметров по пп. 3.4.1–3.4.12.

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

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

1. Расчет критерия Франк-Каменецкого δ_0 для некоторых форм упаковок материалов

1. Вычисляют отношение квадрата характерного размера тела r^2 (например, минимального размера тела по одной из осей координат) к квадрату эквивалентной сферы Франк-Каменецкого R_0^2 по одному из приведенных ниже соотношений.

Бесконечный прямоугольный стержень поперечным сечением $2a \times 2b$, $p = b/a$:

$$\frac{r^2}{R_0^2} = \frac{a^2}{R_0^2} = \frac{2}{3\pi}\left[\operatorname{arctg} p + \frac{1}{p^2}\operatorname{arctg}\frac{1}{p} + \frac{1}{p}\right]. \qquad (П1)$$

Характерный размер r – половина наименьшей из трех сторон стержня a.

Бесконечный квадратный стержень ($p = 1$):

$$\frac{a^2}{R_0^2} = \frac{2}{3\pi}[2\operatorname{arctg} 1 + 1] = 0{,}5455. \qquad (П2)$$

Прямоугольный цилиндр радиусом r, высотой $2d$, $p = r/d$:

$$\frac{r^2}{R_0^2} = \frac{1}{3}\left[p^2 + \frac{2}{\sqrt{1+p^2}}\right]. \qquad (П3)$$

Круговой цилиндр с полусферическими днищами, радиус цилиндра r равен радиусу днищ, длина цилиндрической части $2d$, $p = r/d$:

$$\frac{r^2}{R_0^2} = \frac{1}{3}\frac{2(1+p)^2\sqrt{1+p^2} - p^2(1+2p)}{(1+p)^2}. \qquad (П4)$$

Эллипсоид с полуосями a, b и c (a — наименьшая из полуосей):

$$\frac{a^2}{R_0^2} = \frac{1}{3}\left[1 + a^2\left(\frac{1}{b^2} + \frac{1}{c^2}\right)\right]. \qquad (П5)$$

Усеченный эллипсоид вращения высотой $2d$, радиусом r, радиус сечения эллипсоида плоскостью a:

$$\frac{r^2}{R_0^2} = \frac{1}{3}\left[\frac{r^2}{d^2} + \frac{2}{\sqrt{1+a^2/d^2}}\right]. \qquad (П6)$$

Если $r/d \to 1$ и $a \to 0$, поверхность усеченного эллипсоида преобразуется в сферу.

Многоугольный цилиндр высотой $2d$, радиус вписанной окружности r, число сторон n, $p = r/d$:

$$\frac{r^2}{R_0^2} = \frac{n}{3\pi}\left[\frac{\pi}{n}p^2 + Z\left(p^2 + \cos^2\frac{\pi}{n}\right) + \right.$$

$$\left. + \left(1 - p^2\right)\operatorname{arctg} Z\right], \qquad (П7)$$

где $Z = \dfrac{\operatorname{tg}\left(\dfrac{\pi}{n}\right)}{\sqrt{1 + p^2\sec^2\left(\dfrac{\pi}{n}\right)}}$.

Бесконечный многоугольный цилиндр, $d/r \to \infty$:

$$\frac{r^2}{R_0^2} = \frac{1}{3}\left[1 + \frac{n}{2\pi}\sin\frac{2\pi}{n}\right]. \qquad (П8)$$

Тонкий многоугольный цилиндр, $d/r \to \infty$:

$$\frac{d^2}{R_0^2} = \frac{1}{3} \text{ (плоская плита с полутолщиной } d\text{)}. \qquad (П9)$$

Прямоугольный брус со сторонами $2a$, $2b$, $2c$, $p = b/a$, $q = c/a$:

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

$$\left. + \frac{1}{p^2}\operatorname{arctg}\left(\frac{q}{p\sqrt{1+p^2+q^2}}\right) + \Psi\right], \qquad (П10)$$

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

Квадратный брус, $a = c$, $q = 1$, $b = pa$:

из уравнения (П10):

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

$$\left. + \frac{1}{p^2}\operatorname{arctg}\left(\frac{1}{p\sqrt{2+p^2}}\right) + \frac{\sqrt{2+p^2}}{p}\right]. \qquad (П11)$$

2. Находят радиус эквивалентной сферы Семенова по формуле

$$R_S = 3\frac{V}{S}, \qquad (П12)$$

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

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

$$\sigma = R_0^2 / R_S^2 . \qquad (П13)$$

4. Вычисляют фактор формы для заданной геометрии упаковки материала:

$$j = 3\sigma - 1 . \qquad (П14)$$

5. Находят функцию $F(j)$ по формуле

$$F(j) = \frac{2j + 6}{j + 7}. \qquad (П15)$$

6. Рассчитывают величину параметра Франк-Каменецкого с помощью формулы

$$\delta_0 = 3F(j)\frac{r^2}{R_0^2} . \qquad (П16)$$

2. Пример расчета параметра δ_0 для бесконечного квадратного стержня

1. Для квадратного стержня со стороной a в соответствии с формулой (П2)

$$\frac{a^2}{R_0^2} = 0{,}5455 . \qquad (П17)$$

2. Радиус эквивалентной сферы Семенова определим по формуле (П12):

$$R_S = \frac{3(2a)^2}{4 \cdot 2a} = 1{,}5a, \text{ или } R_S^2 = 2{,}25a^2. \qquad (П18)$$

3. Из выражения (П13) с учетом формул (П17) и (П18) найдем отношение квадратов радиусов эквивалентных сфер Франк-Каменецкого и Семенова:

$$\sigma = \frac{R_0^2}{R_S^2} = \frac{a^2}{0{,}5455 \cdot 2{,}25a^2} = 0{,}815. \qquad (П19)$$

4. Численную величину фактора формы для бесконечного квадратного стержня получим с помощью формул (П14) и (П19):

$$j = 3\sigma - 1 = 3 \cdot 0{,}815 - 1 = 1{,}443. \qquad (П20)$$

5. Вычислим функцию $F(j)$ по уравнениям (П15) и (П20):

$$F(j) = \frac{2j + 6}{i + 7} = 1{,}051. \qquad (П21)$$

6. Величину параметра Франк-Каменецкого δ_0 для квадратного бесконечного стержня найдем с помощью формулы (П16) и значений функций (П17) и (П21):

$$\delta_0 = 3F(j)\frac{a^2}{R_0^2} = 3 \cdot 1{,}051 \cdot 0{,}5455 = 1{,}72.$$

Точное значение этого параметра, полученное численным методом, равно 1,70.

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

1. Пример расчета кинетических параметров реакции окисления

Рассчитать энергию активации и предэкспоненциальный множитель для реакции окисления хлопка по экспериментальным данным, приведенным в первых двух графах табл. П 2.1.

Коэффициент теплопроводности хлопка $\lambda = 0{,}042$ Вт/(м · К); теплоемкость $c = 1505$ Дж/(кг · К); тепловой эффект реакции $Q = 1{,}75 \cdot 10^7$ Дж/кг; плотность упаковки материала $\rho = 80$ кг/м^3.

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

1. По уравнениям (1) и (2) для каждого размера образца вычислим числа Рэлея. Принимая в первом приближении энергию активации $E = 100\,000$ Дж/моль, для образца размером $D = 35$ мм получим:

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

$$= 1{,}2 \cdot 10^8 e^{\frac{1770}{485}} (3{,}5 \cdot 10^{-2})^3 \frac{8{,}314 \cdot 485}{100\,000} = 7978.$$

2. Коэффициент теплоотдачи α найдем по уравнению (3):

$$\alpha = 0{,}54 Ra^{0{,}25} \frac{\lambda_в}{D} + 4\sigma T_0^3 = 0{,}54 \cdot 7978^{0{,}25} \frac{0{,}038}{0{,}035} +$$

$$+ 4 \cdot 5{,}67 \cdot 10^{-8} \cdot 485^3 = 31{,}4 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)},$$

где теплопроводность воздуха определена по формуле (5):

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

$$= 6{,}98 \cdot 10^{-3} + 6{,}41 \cdot 10^{-5} \cdot 485 = 0{,}038 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}.$$

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

$$\mathrm{Bi} = \frac{\alpha r}{\lambda} = \frac{31{,}4 \cdot 0{,}035}{2 \cdot 0{,}042} = 13{,}1.$$

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

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

$$= \frac{13{,}1}{2}\left(\sqrt{13{,}1^2 + 4} - 13{,}1\right)\exp\left(\frac{\sqrt{13{,}1^2 + 4} - 13{,}1 - 2}{13{,}1}\right) = 0{,}863.$$

5. Рассчитаем параметры β и γ:

$$\beta = \frac{RT_0}{E} = \frac{8{,}314 \cdot 485}{100\,000} = 4 \cdot 10^{-2};$$

$$\gamma = \frac{cRT_0^2}{QE} = \frac{1505 \cdot 8{,}314 \cdot 485^2}{1{,}75 \cdot 10^7 \cdot 100\,000} = 1{,}68 \cdot 10^{-3}.$$

6. Критическое значение параметра Франк-Каменецкого будет равно:

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

$$= 2{,}52 \cdot 0{,}863(1 + 0{,}04)\left(1 + 2{,}4 \cdot 0{,}00186^{2/3}\right) = 2{,}34,$$

где δ_0 – критическая величина параметра δ, соответствующая интенсивному теплообмену, для образцов кубической формы равная 2,52. Результаты вычислений для всех образцов представлены в табл. П 2.1.

Таблица П 2.1

Размер r, м	T_0, К	Ra	α, Вт/(м^2·К)	Bi	φ(Bi)	$\beta\cdot10^{-2}$	$\gamma\cdot10^{-3}$	$\delta_{кр}$
0,0175	485	7978	31,4	13,1	0,863	4,00	1,68	2,34
0,025	475	24599	29,4	17,5	0,895	3,95	1,61	2,42
0,035	466	71161	27,6	23,0	0,918	3,87	1,55	2,48
0,05	456	260650	25,9	30,8	0,938	3,79	1,49	2,53
0,07	445	646034	24,0	40,0	0,952	3,70	1,42	2,56
0,10	436	2016710	22,4	53,3	0,964	3,62	1,36	2,59

7. По уравнению (13) для каждого размера образца рассчитаем величину M:

$$M = \frac{\delta_{кр} R T_0^2}{r^2 \rho} = \frac{2{,}34 \cdot 8{,}314 \cdot 485^2}{(1{,}75 \cdot 10^{-2})^2 \cdot 80} = 1{,}87 \cdot 10^8.$$

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/λ путем деления N на E. Данные расчетов по пп. 7–9 сведем в табл. П 2.2.

Таблица П 2.2

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	Qk_0/λ, м · К/кг
0,0175	485	$1{,}87 \cdot 10^8$	$1{,}38 \cdot 10^{22}$	128 980	$1{,}07 \cdot 10^{17}$
0,025	475	$9{,}08 \cdot 10^7$			
0,035	466	$4{,}57 \cdot 10^7$			
0,05	456	$2{,}19 \cdot 10^7$			
0,07	446	$1{,}08 \cdot 10^7$			
0,10	436	$5{,}12 \cdot 10^6$			

10. Повторяя расчет по пп. 1—9 с величиной энергии активации $E = 128\,980$, найдем новые значения энергии активации $E = 128\,950$ Дж/моль и предэкспоненциального множителя $Qk_0/\lambda = 1{,}05 \cdot 10^{17}$ м · К/кг. Так как последние величины практически не отличаются от предыдущих, процесс итераций следует прекратить и за кинетические параметры реакции окисления хлопка принять $E = 128\,950$ Дж/моль и $Qk_0/\lambda = 1{,}05 \cdot 10^{17}$ м · К/кг.

2. Пример расчета критической температуры

Рассчитать критическую температуру окружающей среды при транспортировании костной муки в железнодорожных вагонах. Вагон представляет собой параллелепипед шириной 2,75 м, длиной 15,7 м и высотой 2,7 м.

Исходными данными для расчета являются:

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

1. Для заданной формы и размеров вагона определим в соответствии с прил. 1 величину критерия Франк-Каменецкого δ_0.

2. Отношение квадратов полувысоты вагона к эквивалентной сфере Франк-Каменецкого рассчитаем как для прямоугольного бруса по выражению (П10):

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

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

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

a, b, c – половины сторон бруса, a – наименьшая сторона; $p = b/a$, $q = c/a$.

Подставляя p, q в эти равенства, получим:

$$\frac{a^2}{R_0^2} = 0{,}539.$$

3. Средний радиус эквивалентной сферы Семенова равен:

$$R_c = \frac{3V}{S} = \frac{3\cdot 2{,}75\cdot 15{,}7\cdot 2{,}7}{2\cdot(2{,}75\cdot 15{,}7+15{,}7\cdot 2{,}7+2{,}7\cdot 2{,}75)} = 1{,}88,$$

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

4. На основании (П19) и двух последних выражений отношение квадратов радиусов эквивалентных сфер Франк-Каменецкого и Семенова составит

$$\sigma = \frac{R_0^2}{R_c^2} = \frac{a^2}{0{,}539\cdot 1{,}88^2} = \frac{1{,}35^2}{0{,}539\cdot 1{,}88^2} = 0{,}962.$$

5. Фактор формы прямоугольного бруса по (П14) равен:

$$j = 3\sigma - 1 = 3 \cdot 0{,}962 - 1 = 1{,}89 .$$

6. Согласно (П15) функция $F(j)$ будет равна:

$$F(j) = \frac{(2j + 6)}{(j + 7)} = \frac{2 \cdot 1{,}89 + 6}{1{,}89 + 7} = 1{,}1 .$$

7. В соответствии с (П16) параметр δ_0 составит:

$$\delta_0 = \frac{3F(j)a^2}{R_0^2} = 3 \cdot 1{,}1 \cdot 0{,}539 = 1{,}78 .$$

8. Подставим полученную величину δ_0 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 ее относительно T_0, получим нулевое приближение для этой температуры, равное 260 К.

9. С помощью полученной величины рассчитаем:

$$\gamma = \frac{cRT_0^2}{QE} = \frac{780 \cdot 8{,}314 \cdot 260^2}{3{,}5 \cdot 10^5 \cdot 50\,740} = 0{,}025$$ – параметр, определяющий выгорание вещества;

$$\beta = \frac{RT_0}{E} = \frac{8{,}314 \cdot 260}{50\,740} = 0{,}043$$ – параметр, характеризующий реакцию окисления.

10. 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 (15):

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

$$= 1{,}78(1 + 2{,}4 \cdot 0{,}025^{2/3})(1 + 0{,}043) = 2{,}23.$$

11. Решив уравнение (11) относительно температуры, получим $T_0 = 263$ К (или -10 °С). Следовательно, при перевозке костной муки в железнодорожных вагонах при температуре воздуха, превышающей -10 °С, возможно самовозгорание транспортируемого продукта.

3. Пример расчета критического размера

Рассчитать минимальный безопасный размер насыпи при транспортировании костной муки в 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/м^3;
- коэффициент теплопроводности материала $\lambda = 0{,}14$ Вт/(м · К);
- теплоемкость исследуемого материала $c = 780$ Дж/(кг · К);
- теплота реакции $Q = 350\,000$ Дж/кг;
- энергия активации реакции окисления $E = 50\,740$ Дж/моль;
- предэкспоненциальный множитель $Qk_0/\lambda = 2{,}46 \cdot 10^8$ м · К/кг.

1. Выполнив расчет в соответствии с пп. 1–7 предыдущего примера, найдем, что $\delta_0 = 1{,}78$.

2. Для температуры $T_0 = 313$ К вычислим параметры β и γ 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 $\varphi(\mathrm{Bi}) = 1$, определим параметр $\delta_{кр}$ по формуле

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

$$= 1{,}78(1 + 0{,}0513)\left(1 + 2{,}4 \cdot 0{,}0358^{2/3}\right) = 2{,}36.$$

4. В первом приближении минимальный размер найдем из выражения (16):

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

$$= \sqrt{\frac{8{,}314 \cdot 313^2 \cdot 2{,}36 e^{\frac{50740}{8{,}314 \cdot 313}}}{50\,740 \cdot 2{,}46 \cdot 10^8 \cdot 660}} = 0{,}26 \text{ м}.$$

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

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

$$= 1{,}2 \cdot 10^8 e^{\frac{1770}{313}} \cdot 0{,}52^3 \frac{8{,}314 \cdot 313}{50\,740} = 2{,}47 \cdot 10^8.$$

6. Коэффициент теплоотдачи α найдем по уравнению (4):

$$\alpha = 0{,}135 Ra^{0{,}333} \frac{\lambda_в}{D} + 4\sigma T_0^3 = 0{,}135(2{,}47 \cdot 10^8)^{0{,}333} \frac{0{,}027}{0{,}52} +$$

$$+ 4 \cdot 5{,}67 \cdot 10^{-8} \cdot 313^3 = 11{,}3 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)},$$

где теплопроводность воздуха определена по формуле (5):

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

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

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

$$\text{Bi} = \frac{\alpha r}{\lambda} = \frac{11{,}3 \cdot 0{,}52}{2 \cdot 0{,}14} = 21.$$

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

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

$$= \frac{11{,}3}{2}\left(\sqrt{11{,}3^2 + 4} - 11{,}3\right) \exp\left(\frac{\sqrt{11{,}3^2 + 4} - 11{,}3 - 2}{11{,}3}\right) = 0{,}911.$$

9. Критическое значение параметра Франк-Каменецкого будет равно:

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

$$= 1{,}78 \cdot 0{,}911(1 + 0{,}0513)\left(1 + 2{,}4 \cdot 0{,}0358^{2/3}\right) = 2{,}15.$$

10. По формуле (16) вычислим новое значение размера насыпи материала:

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

$$= \sqrt{\frac{8{,}314 \cdot 313^2 \cdot 2{,}15 e^{\frac{50740}{8{,}314 \cdot 313}}}{50\,740 \cdot 2{,}46 \cdot 10^8 \cdot 660}} = 0{,}25 \text{ м}.$$

11. Сравнивая это значение r с его величиной, полученной в п. 5, видим, что учет интенсивности теплообмена практически не изменил значения критического размера. Перевозка костной муки в железнодорожных вагонах насыпью представляет опасность самовозгорания этого продукта.

4. Пример расчета времени индукции

Рассчитать время индукции при перевозке костной муки в вагоне при температуре 20 °С (293 К).

Исходными данными для расчета являются:

- температура перевозки материала $T_0 = 293$ К;
- критическая температура самовозгорания для заданного размера и формы упаковки материала $T_{кр} = 263$ К;
- фактор формы упаковки материала $j = 1{,}11$;
- размер упаковки $r = 1{,}35$ м;
- плотность упаковки материала $\rho = 660$ кг/м^3;
- коэффициент теплопроводности материала $\lambda = 0{,}14$ Вт/(м · К);

• теплоемкость исследуемого материала c = = 780 Дж/(кг · К);

• теплота реакции Q = 350 000 Дж/кг;

• энергия активации реакции окисления E = = 50 740 Дж/моль;

• предэкспоненциальный множитель Qk_0/λ = = $2{,}46 \cdot 10^8$ м · К/кг.

1. По температуре T_0 вычислим параметры β и γ с помощью формул (8) и (9):

$$\beta = \frac{RT_0}{E} = \frac{8{,}314 \cdot 293}{50\,740} = 0{,}048;$$

$$\gamma = \frac{cRT_0^2}{QE} = \frac{780 \cdot 8{,}314 \cdot 293^2}{3{,}5 \cdot 10^5 \cdot 50\,740} = 0{,}031.$$

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

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

$$= 1{,}2 \cdot 10^8 e^{\frac{1770}{393}} \cdot 2{,}7^3 \frac{8{,}314 \cdot 293}{50740} = 4{,}77 \cdot 10^{10}.$$

3. Коэффициент теплоотдачи α определим по уравнению (4):

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

$$= 0{,}135 \left(4{,}77 \cdot 10^{10}\right)^{0{,}333} \frac{0{,}026}{2{,}7} +$$

$$+ 4 \cdot 5{,}67 \cdot 10^{-8} \cdot 293^3 = 10{,}3 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)},$$

где теплопроводность воздуха рассчитана по формуле (5):

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

$$= 6{,}98 \cdot 10^{-3} + 6{,}41 \cdot 10^{-5} \cdot 293 = 0{,}026 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}.$$

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

$$\mathrm{Bi} = \frac{\alpha r}{\lambda} = \frac{10{,}3 \cdot 1{,}35}{0{,}14} = 99.$$

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

$$\delta = \frac{Qpk_0}{\lambda} \frac{E}{RT_{кр}^2} r^2 e^{-\frac{E}{RT_{кр}}} =$$

$$= 2{,}46 \cdot 10^8 \cdot 60 \frac{50\,740}{8{,}314 \cdot 293^2} 1{,}35^2 e^{-\frac{50\,740}{8{,}314 \cdot 293}} = 18{,}9;$$

$$\delta_{кр} = \frac{Qpk_0}{\lambda} \frac{E}{RT_{кр}^2} r^2 e^{-\frac{E}{RT_{кр}}} =$$

$$= 2{,}46 \cdot 10^8 \cdot 60 \frac{50\,740}{8{,}314 \cdot 263^2} 1{,}35^2 e^{-\frac{50\,740}{8{,}314 \cdot 263}} = 2{,}18.$$

6. Вычислим относительное удаление от предела воспламенения:

$$\Delta = \frac{\delta}{\delta_{кр}} = \frac{18{,}9}{2{,}18} = 8{,}67$$

и функции

$$f1(\Delta, \gamma) = 1 + 0{,}62 \frac{1 - 4 \cdot \Delta^{-2} \sqrt{\gamma}}{(\Delta - 0{,}95)^{0{,}9}} =$$

$$= 1 + 0{,}62 \frac{1 - 4 \cdot 8{,}67^{-2} \sqrt{0{,}031}}{(\Delta - 0{,}95)^{0{,}9}} = 1{,}1;$$

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

$$= 1 - \frac{[1 + 1{,}5(1 - 0{,}1 \cdot 8{,}67)1{,}11]99}{16(1 + 99)} = 0{,}924.$$

7. Рассчитаем безразмерное время индукции:

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

$$= 1{,}1 \cdot 0{,}924(1 + 2 \cdot 0{,}048) = 1{,}11.$$

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

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

$$= \frac{1{,}11 \cdot 780 \cdot 8{,}314 \cdot 293^2}{2{,}46 \cdot 10^8 \cdot 0{,}14 \cdot 50\,740} e^{\frac{50\,740}{8{,}314 \cdot 293}} =$$

$$= 393152 \text{ с} = 109{,}2 \text{ ч} = 4{,}55 \text{ суток}.$$

5. Пример расчета критической температуры нагретой поверхности оборудования для отложений веществ

Рассчитать критическую температуру наружной поверхности электрооборудования для отложений шламовой муки толщиной 1 см.

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 λ = = 0,055 Вт/(м · К);

• теплоемкость исследуемого материала c = = 1550 Дж/(кг · К);

• энергия активации реакции окисления E = = 66 597 Дж/моль;

• удельное тепловыделение Q = 349 637 Дж/кг;

• предэкспоненциальный множитель Qk_0/λ = = $2{,}55 \cdot 10^{13}$ м · К/кг.

1. Принимая в первом приближении величину критерия Bi = 4 и температуру нагретой поверхности оборудования $T_г$ равной 500 К, вычислим среднюю (между температурами нагретой поверхности и газового пространства) температуру $T_{ср}$ по формуле (22):

$$T_{ср} = \frac{T_г - T_0}{2(2\mathrm{Bi} + 1)} + T_0 = \frac{500 - 300}{2(2 \cdot 4 + 1)} + 300 = 311\,\mathrm{K}.$$

2. Рассчитаем комплекс g / av и коэффициент теплопроводности воздуха по уравнениям (23) и (24):

$$\frac{g}{av} = 1{,}2 \cdot 10^8 e^{\frac{1770}{T_{ср}}} = 1{,}2 \cdot 10^8 e^{\frac{1770}{311}} = 3{,}5554 \cdot 10^{10};$$

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

$$= 6{,}98 \cdot 10^{-3} + 6{,}41 \cdot 10^{-5} \cdot 311 = 2{,}6915 \cdot 10^{-2}.$$

3. По найденным выше значениям определим другую величину критерия Био по выражению (25):

$$\mathrm{Bi} = \left(C \sqrt[4]{\frac{g}{va} \frac{h^3}{T_0} \frac{(T_г - T_0)}{(2\mathrm{Bi} + 1)}} \frac{\lambda_в}{h} + 4\sigma T_0^3 \right) \frac{h}{2\lambda} =$$

$$= \left(0{,}27 \sqrt[4]{\frac{3{,}5554 \cdot 10^{10} \cdot 0{,}01^3 (500 - 300)}{300(2 \cdot 4 + 1)}} \times \right.$$

$$\left. \times \frac{2{,}6915 \cdot 10^{-2}}{0{,}01} + 4 \cdot 5{,}67 \cdot 10^{-8} \cdot 300^3 \right) \frac{0{,}01}{2 \cdot 0{,}055} = 1{,}03,$$

где C – коэффициент, равный 0,27 для горизонтальной пластины, обращенной горячей стороной вниз (принимаем в нашем случае как наиболее жесткий вариант).

4. Найденное в п. 3 значение Bi отличается от принятого в п. 1 более чем на 10 %. Подставим последнее значение Bi в формулы (22)–(25) и получим величину Bi = 1,15. Так как это значение отличается от предыдущего более чем на 10 %, подставим последнее значение Bi в формулы (22)–(25) и получим величину Bi = 1,14.

Так как последняя и предыдущая величины отличаются друг от друга менее чем на 10 %, в дальнейших расчетах используется величина Bi =1,14.

5. Произведем вычисления по формулам (26)–(28):

$$\theta_0 = \frac{E}{RT_г^2}(T_г - T_0) = \frac{66\,597}{8{,}31 \cdot 500^2}(500 - 300) = 6{,}4113;$$

$$a = 1 + 2{,}28 e^{-0{,}65\theta_0} = 1 + 2{,}28 e^{-0{,}65 \cdot 6{,}4113} = 1{,}0353;$$

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

$$= \frac{1}{2 \cdot 1{,}0353}\left(\frac{1{,}142}{1 + 2 \cdot 1{,}142}\right)^2 \left\{6{,}4113 + 2\ln\left[2\left(1{,}0353 + \right.\right.\right.$$

$$\left.\left.\left. + \sqrt{1{,}0353\,(1{,}0353 - 1)}\right)\right]\right\}^2 = 3{,}93.$$

6. Для температуры $T_г$ определим параметры β, γ и вычислим критическую величину δ:

$$\beta = \frac{RT_г}{E} = \frac{8{,}31 \cdot 500}{66\,597} = 0{,}0624;$$

$$\gamma = \frac{cRT_г^2}{QE} = \frac{1550 \cdot 8{,}31 \cdot 500^2}{349\,637 \cdot 66\,597} = 0{,}138;$$

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

$$= 3{,}9326\,(1 + 0{,}0624)\left(1 + 2{,}4 \cdot 0{,}1383^{2/3}\right) = 6{,}86.$$

7. Подставим величину $\delta_{кр}$ в уравнение (11) и найдем новое значение температуры: $T_г$ = 544 K.

8. Используя это значение $T_г$, повторим расчет параметров по пп. 1–7. Найдем новое значение температуры: $T_г$ = 549 K.

Используя это значение $T_г$, повторим расчет параметров по пп. 1–7. Найдем новое значение температуры: $T_г$ = 549,5 K.

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

6. Пример расчета критической температуры среды в воздуховоде для отложений материалов

Рассчитать критическую температуру газовой среды внутри воздуховода для отложений шламовой муки толщиной 1 см.

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

- температура внутренней поверхности воздуховода $T_0 = 300$ К;
- толщина отложений $h = 0{,}01$ м;
- внутренний диаметр воздуховода $D = 0{,}3$ м;
- скорость движения среды в воздуховоде $V = 1$ м/с;
- коэффициент теплопроводности материала $\lambda = 0{,}055$ Вт/(м · К);
- теплоемкость исследуемого материала $c = 1550$ Дж/(кг · К);
- энергия активации реакции окисления $E = 66\,597$ Дж/моль;
- удельное тепловыделение $Q = 349\,637$ Дж/кг;
- предэкспоненциальный множитель $Qk_0\rho/\lambda = 2{,}55 \cdot 10^{13}$ К/м^2.

1. Принимая в первом приближении величину критерия Био на холодной стенке слоя $\mathrm{Bi}_x = 4$ и температуру газовой среды внутри воздуховода $T_г$ равной 530 К, вычислим среднюю (между температурами холодной поверхности и газового пространства) температуру $T_{ср}$ по формуле (30):

$$T_{ср} = \frac{T_г - T_0}{2(2\mathrm{Bi}_x + 1)} + T_0 = \frac{530 - 300}{2(2 \cdot 4 + 1)} + 300 = 313 \text{ К}.$$

2. Рассчитаем комплекс $g/a\nu$ и коэффициент теплопроводности воздуха по уравнениям (23) и (24):

$$\frac{g}{a\nu} = 1{,}2 \cdot 10^8 e^{\frac{1770}{T_{ср}}} = 1{,}2 \cdot 10^8 e^{\frac{1770}{313}} = 3{,}4284 \cdot 10^{10};$$

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

$$= 6{,}98 \cdot 10^{-3} + 6{,}41 \cdot 10^{-5} \cdot 313 = 2{,}7043 \cdot 10^{-2}.$$

3. По найденным выше значениям определим другую величину критерия Био на холодной стенке по выражению (31):

$$\mathrm{Bi}_x = \left(C \sqrt[4]{\frac{g}{\nu a} \frac{h^3}{T_0} \frac{(T_г - T_0)}{(2\mathrm{Bi}_x + 1)}} \frac{\lambda_в}{h} + 4\sigma T_0^3 \right) \frac{h}{2\lambda} =$$

$$= \left(0{,}54 \sqrt[4]{\frac{3{,}4284 \cdot 10^{10} \cdot 0{,}01^3 (530 - 300)}{300(2 \cdot 4 + 1)}} \times \right.$$

$$\left. \times \frac{2{,}7043 \cdot 10^{-2}}{0{,}01} + 4 \cdot 5{,}67 \cdot 10^{-8} \cdot 300^3 \right) \frac{0{,}01}{2 \cdot 0{,}055} = 1{,}53.$$

Найденное значение Bi_x отличается от принятого ранее более чем на 10 %. Подставим последнее значение Bi_x в формулы (30), (23), (24), (31) и получим новую величину $\mathrm{Bi}_x = 1{,}71$. Найденное значение Bi_x отличается от принятого ранее более чем на 10 %. Подставим последнее значение Bi_x в формулы (29), (23), (24), (30) и получим новую величину $\mathrm{Bi}_x = 1{,}69$.

Так как последняя и предыдущая величины отличаются друг от друга менее чем на 10 %, в дальнейших расчетах используется величина $Bi_x = 1{,}69$.

4. Определим значение кинематической вязкости воздуха по выражению (32):

$$\nu = 7{,}87 \cdot 10^{-11} T_{ср}^2 + 5{,}01 \cdot 10^{-8} T_{ср} - 6{,}4 \cdot 10^{-6} =$$

$$= 7{,}87 \cdot 10^{-11} \cdot 326^2 + 5{,}01 \cdot 10^{-8} \times$$

$$\times 326 - 6{,}4 \cdot 10^{-6} = 1{,}8296 \cdot 10^{-5}.$$

5. Вычислим величину критерия Био на горячей стенке слоя по формуле (33):

$$Bi_г = \left(0{,}018 \left(\frac{VD}{\nu} \right)^{0{,}8} \frac{\lambda_в}{D} + 4\sigma T_г^3 \right) \frac{h}{2\lambda} =$$

$$= \left(0{,}018 \left(\frac{1 \cdot 0{,}3}{1{,}8296 \cdot 10^{-5}} \right)^{0{,}8} \frac{2{,}7877 \cdot 10^{-2}}{0{,}3} + \right.$$

$$\left. + 4 \cdot 5{,}67 \cdot 10^{-8} \cdot 530^3 \right) \frac{0{,}01}{2 \cdot 0{,}055} = 3{,}43.$$

6. Произведем вычисления по формулам (26), (27) и (34):

$$\theta_0 = \frac{E}{RT_г^2} (T_г - T_0) = \frac{66\,597}{8{,}31 \cdot 530^2} (530 - 300) = 6{,}5619;$$

$$a = 1 + 2{,}28\, e^{-0{,}65\theta_0} = 1 + 2{,}28\, e^{-0{,}65 \cdot 6{,}5619} = 1{,}032;$$

$$\delta = \frac{1}{2a} \left(\frac{Bi_г Bi_x}{2Bi_г Bi_x + Bi_г + Bi_x} \right)^2 \times$$

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

$$= \frac{1}{2 \cdot 1{,}032}\left(\frac{1{,}69 \cdot 3{,}43}{2 \cdot 1{,}69 \cdot 3{,}43 + 1{,}69 + 3{,}43}\right)^2 \times$$

$$\times \left\{6{,}5619 + 2\ln\left[2\left(1{,}032 + \sqrt{1{,}032 \cdot (1{,}032 - 1)}\right)\right]\right\}^2 = 3{,}17.$$

7. Для температуры $T_г$ определим параметры β, γ и вычислим критическую величину δ:

$$\beta = \frac{RT_г}{E} = \frac{8{,}31 \cdot 530}{66\,597} = 0{,}06613;$$

$$\gamma = \frac{cRT_г^2}{QE} = \frac{1550 \cdot 8{,}31 \cdot 530^2}{349\,637 \cdot 66\,597} = 0{,}1554;$$

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

$$= 3{,}17(1 + 0{,}06613)\left(1 + 2{,}4 \cdot 0{,}1554^{2/3}\right) = 5{,}72.$$

8. Подставим величину $\delta_{кр}$ в уравнение (11) и найдем новое значение температуры: $T_г$ = 537 K.

9. Используя это значение $T_г$, повторим расчет по пп. 1–8 и найдем новое значение температуры: $T_г$ = 539 K.

Используя это значение $T_г$, повторим расчет по пп. 1–8 и найдем новое значение температуры: $T_г$ = 539,9 K.

Так как предыдущее и последнее значения температуры отличаются друг от друга менее чем на 1 K, примем последнее значение за критическую температуру.

7. Пример расчета критической температуры нагрева тепловой изоляции технологического трубопровода

Рассчитать критическую температуру наружной поверхности технологического трубопровода для теплоизоляции толщиной 1,5 см.

Исходными данными для расчета критической температуры являются:

- температура окружающей среды $T_0 = 300$ К;
- скорость движения воздуха внутри трубопровода $V = 1$ м/с;
- толщина теплоизоляции $h = 0{,}015$ м;
- коэффициент теплопроводности материала $\lambda = 0{,}055$ Вт/(м · К);
- теплоемкость исследуемого материала $c = 1550$ Дж/(кг · К);
- энергия активации реакции окисления $E = 66\,597$ Дж/моль;
- удельное тепловыделение $Q = 349\,637$ Дж/кг;
- предэкспоненциальный множитель $Qk_0\rho/\lambda = 2{,}55 \cdot 10^{13}$ К/м^2.

1. Принимая в первом приближении величину критерия Био на холодной стенке слоя $\mathrm{Bi}_\chi = 4$ и температуру нагретой технологической трубы $T_\Gamma = 500$ К (равной температуре среды внутри трубопровода), вычислим среднюю (между температурами холодной и горячей поверхности слоя) температуру $T_{ср}$ по формуле (30):

$$T_{ср} = \frac{T_\Gamma - T_0}{2(2\mathrm{Bi}_\chi + 1)} + T_0 = \frac{500 - 300}{2(2 \cdot 4 + 1)} + 300 = 311\ \text{К}.$$

2. Рассчитаем комплекс $g/a\nu$ и коэффициент теплопроводности воздуха по уравнениям (23) и (24):

$$\frac{g}{a\nu} = 1{,}2 \cdot 10^8 e^{\frac{1770}{T_{ср}}} = 1{,}2 \cdot 10^8 e^{\frac{1770}{311}} = 3{,}5554 \cdot 10^{10};$$

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

$$= 6{,}98 \cdot 10^{-3} + 6{,}41 \cdot 10^{-5} \cdot 311 = 2{,}6915 \cdot 10^{-2}.$$

3. По найденным выше значениям определим другую величину критерия Био на холодной стенке слоя по выражению (31):

$$\mathrm{Bi}_x = \left(C \sqrt[4]{\frac{g}{\nu a} \frac{h^3}{T_0} \frac{(T_г - T_0)}{(2\mathrm{Bi}_x + 1)}} \frac{\lambda_в}{h} + 4\sigma T_0^3 \right) \frac{h}{2\lambda} =$$

$$= \left(0{,}54 \sqrt[4]{\frac{3{,}5554 \cdot 10^{10} \cdot 0{,}015^3 (500 - 300)}{300(2 \cdot 4 + 1)}} \times \right.$$

$$\left. \times \frac{2{,}6915 \cdot 10^{-2}}{0{,}015} + 4 \cdot 5{,}67 \cdot 10^{-8} \cdot 300^3 \right) \frac{0{,}015}{2 \cdot 0{,}055} = 2{,}12.$$

Найденное значение Bi_x отличается от принятого ранее более чем на 10 %. Подставим последнее значение Bi_x в формулы (30), (23), (24), (31) и получим новую величину $\mathrm{Bi}_x = 2{,}28$.

Так как последняя и предыдущая величины отличаются друг от друга менее чем на 10 %, в дальнейших расчетах используется величина $\mathrm{Bi}_x = 2{,}28$.

4. Определим значение кинематической вязкости воздуха по выражению (32):

$$\nu = 7{,}87 \cdot 10^{-11} T_{ср}^2 + 5{,}01 \cdot 10^{-8} T_{ср} - 6{,}4 \cdot 10^{-6} =$$

$$= 7{,}87 \cdot 10^{-11} \cdot 319^2 + 5{,}01 \cdot 10^{-8} \times$$

$$\times 319 - 6{,}4 \cdot 10^{-6} = 1{,}759 \cdot 10^{-5}.$$

5. Вычислим величину критерия Био на горячей стенке слоя по формуле (33):

$$\mathrm{Bi}_г = \left(0{,}018 \left(\frac{Vh}{\nu} \right)^{0{,}8} \frac{\lambda_в}{h} + 4\sigma T_г^3 \right) \frac{h}{2\lambda} =$$

$$= \left(0{,}018 \left(\frac{1 \cdot 0{,}015}{1{,}759 \cdot 10^{-5}} \right)^{0{,}8} \frac{2{,}7428 \cdot 10^{-2}}{0{,}015} + \right.$$

$$\left. + 4 \cdot 5{,}67 \cdot 10^{-8} \cdot 500^3 \right) \frac{0{,}015}{2 \cdot 0{,}055} = 4{,}86.$$

6. Произведем вычисления по формулам (26), (27) и (34):

$$\theta_0 = \frac{E}{RT_г^2} (T_г - T_0) = \frac{66\,597}{8{,}31 \cdot 500^2} (500 - 300) = 6{,}4113;$$

$$a = 1 + 2{,}28 e^{-0{,}65\theta_0} = 1 + 2{,}28 e^{-0{,}65 \cdot 6{,}4113} = 1{,}0353;$$

$$\delta = \frac{1}{2a} \left(\frac{\mathrm{Bi}_г \mathrm{Bi}_х}{2\mathrm{Bi}_г \mathrm{Bi}_х + \mathrm{Bi}_г + \mathrm{Bi}_х} \right)^2 \times$$

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

$$= \frac{1}{2 \cdot 1{,}0353} \left(\frac{2{,}28 \cdot 4{,}86}{2 \cdot 2{,}28 \cdot 4{,}86 + 2{,}28 + 4{,}86} \right)^2 \times$$

$$\times \left\{ 6{,}4113 + 2 \ln \left[2 \left(1{,}0353 + \sqrt{1{,}0353 (1{,}0353 - 1)} \right) \right] \right\}^2 = 4{,}65.$$

7. Для температуры $T_г$ определим параметры β, γ и вычислим критическую величину δ:

$$\beta = \frac{RT_г}{E} = \frac{8{,}31 \cdot 500}{66\,597} = 0{,}06239;$$

$$\gamma = \frac{cRT_г^2}{QE} = \frac{1550 \cdot 8{,}31 \cdot 500^2}{349\,637 \cdot 66\,597} = 0{,}1383;$$

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

$$= 4{,}65(1 + 0{,}06239)\left(1 + 2{,}4 \cdot 0{,}1383^{2/3}\right) = 8{,}11.$$

8. Подставим величину $\delta_{кр}$ в уравнение (11) и найдем новое значение температуры: $T_г$ = 518 K.

9. Используя это значение $T_г$, повторим расчет по пп. 1–8 и найдем новое значение температуры: $T_г$ = 521 K.

Используя это значение $T_г$, повторим расчет по пп. 1–8 и найдем новое значение температуры: $T_г$ = 521 K.

Так как предыдущее и последнее значения температуры не отличаются друг от друга, принимаем последнее значение за критическую температуру.

8. Пример расчета критического размера отложений вещества на нагретой поверхности оборудования

Исходными данными для расчета критического размера отложений на нагретой поверхности оборудования являются:

- температура поверхности, на которой образуются отложения, $T_г$ = 530 K;

• температура газовой среды около холодной поверхности слоя $T_0 = 300$ К;

• коэффициент теплопроводности материала $\lambda = 0{,}055$ Вт/(м · К);

• теплоемкость исследуемого материала $c = 1550$ Дж/(кг · К);

• теплота реакции $Q = 349\,637$ Дж/кг;

• энергия активации реакции окисления $E = 66\,597$ Дж/моль;

• предэкспоненциальный множитель $Qk_0\rho/\lambda = 2{,}55 \cdot 10^{13}$ К/м^2.

1. Принимая в первом приближении величину критерия $\mathrm{Bi} = 4$, в соответствии с формулами (22)–(24) определим температуру $T_{ср}$, комплекс $g/a\nu$ и коэффициент теплопроводности воздуха:

$$T_{ср} = \frac{T_г - T_0}{2(2\mathrm{Bi}+1)} + T_0 = \frac{530-300}{2(2\cdot 4+1)} + 300 = 313\ \mathrm{K};$$

$$\frac{g}{a\nu} = 1{,}2\cdot 10^8 e^{\frac{1770}{T_{ср}}} 1{,}2\cdot 10^8 e^{\frac{1770}{313}} = 3{,}4284\cdot 10^{10};$$

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

$$= 6{,}98\cdot 10^{-3} + 6{,}41\cdot 10^{-5}\cdot 313 = 2{,}7043\cdot 10^{-2}.$$

2. Принимая значение h равным 0,01 м, по выражению (25) рассчитаем другое значение критерия Био:

$$\mathrm{Bi} = \left(C \sqrt[4]{\frac{g}{\nu a}\frac{h^3}{T_0}\frac{(T_г - T_0)}{(2\mathrm{Bi}+1)}}\frac{\lambda_в}{h} + 4\sigma T_0^3 \right)\frac{h}{2\lambda} =$$

$$= \left(0{,}27 \sqrt[4]{\frac{3{,}4284 \cdot 10^{10} \cdot 0{,}01^3 (530 - 300)}{300(2 \cdot 4 + 1)}} \times \right.$$

$$\left. \times \left(\frac{2{,}7043 \cdot 10^{-2}}{0{,}01} + 4 \cdot 5{,}67 \cdot 10^{-8} \cdot 300^3 \right) \frac{0{,}01}{2 \cdot 0{,}055} = 0{,}967, \right.$$

где C – коэффициент, равный 0,27 для горизонтальной пластины, обращенной горячей стороной вниз (принимаем в нашем случае как наиболее жесткий вариант в пространстве сушилки).

3. Найденное в п. 2 значение Bi отличается от принятого в п. 1 более чем на 10 %. Подставим последнее значение Bi в формулу (22) и по выражениям (23)–(25) найдем другую величину Bi = 1,17.

Найденное значение Bi отличается от предыдущего более чем на 10 %. Подставим последнее значение Bi в формулу (22) и по выражениям (23)–(25) найдем другую величину Bi = 1,157.

Так как последняя и предыдущая величины отличаются друг от друга менее чем на 10 %, в дальнейших расчетах используется величина Bi = 1,157.

4. В соответствии с выражениями (26)–(28) вычислим безразмерный температурный перепад θ_0, а также параметры a, δ, β, γ, $\delta_{кр}$:

$$\theta_0 = \frac{E}{RT_г^2}(T_г - T_0) = \frac{66\,597}{8{,}31 \cdot 530^2}(530 - 300) = 6{,}5619;$$

$$a = 1 + 2{,}28 e^{-0{,}65\theta_0} = 1 + 2{,}28 e^{-0{,}65 \cdot 6{,}5619} = 1{,}032;$$

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

$$= \frac{1}{2\cdot 1{,}032}\left(\frac{1{,}157}{1+2\cdot 1{,}157}\right)^2\left\{6{,}5619 + 2\ln\left[2\left(1{,}032 + \right.\right.\right.$$

$$\left.\left.\left. + \sqrt{1{,}032(1{,}032-1)}\right)\right]\right\}^2 = 4{,}103.$$

5. Для температуры T_Γ определим параметры β, γ и вычислим критическую величину δ:

$$\beta = \frac{RT_\Gamma}{E} = \frac{8{,}31\cdot 530}{66\,597} = 0{,}06613;$$

$$\gamma = \frac{cRT_\Gamma^2}{QE} = \frac{1550\cdot 8{,}31\cdot 530^2}{349\,637\cdot 66\,597} = 0{,}1554;$$

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

$$= 4{,}103\,(1 + 0{,}06613)\left(1 + 2{,}4\cdot 0{,}1554^{2/3}\right) = 7{,}41.$$

6. Подставим величину $\delta_{\text{кр}}$ в выражение (34):

$$h = 2\sqrt{\frac{8{,}31\cdot 530^2\cdot 7{,}41\, e^{\frac{66\,597}{8{,}31\cdot 530}}}{66\,597\cdot 2{,}55\cdot 10^{13}}} = 0{,}0123 \text{ м}.$$

7. Полученное значение толщины слоя более чем на 5 % отличается от предыдущего. Используя последнее значение h, производим вычисления по пп. 1–6 и определяем следующее значение: $h = 0{,}0129$ м.

Так как предыдущее и последнее значения толщины слоя отличаются друг от друга менее чем на 5 %, за критический размер принимается результат последнего расчета.

9. Пример расчета критической температуры для отложений веществ в технологическом оборудовании

Рассчитать критическую температуру газовой среды внутри технологического аппарата для отложений шламовой муки толщиной 1 см.

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

- температура среды в производственном помещении $T_0 = 300$ К;
- толщина отложений $h = 0{,}01$ м;
- коэффициент теплопроводности материала $\lambda = 0{,}055$ Вт/(м · К);
- теплоемкость исследуемого материала $c = 1550$ Дж/(кг · К);
- энергия активации реакции окисления $E = 66\,597$ Дж/моль;
- удельное тепловыделение $Q = 349\,637$ Дж/кг;
- предэкспоненциальный множитель $Qk_0\rho/\lambda = 2{,}55 \cdot 10^{13}$ К/м^2.

1. Принимая в первом приближении величину критерия Био на холодной стенке $\mathrm{Bi}_\text{х} = 2$, значение критерия Био на горячей стенке $\mathrm{Bi}_\text{г} = 4$, температуру среды в технологическом оборудовании $T_\text{г}$ равной 500 К, вычислим среднюю (между температурами холодной по-

верхности и прилегающего газового пространства) температуру по формуле (36):

$$T_{\text{ср}_x} = \frac{T_\text{г} - T_0}{2} b_x + T_0 =$$

$$= \frac{500 - 300}{2} \frac{4}{4 + 2 \cdot 4 \cdot 2 + 2} + 300 = 318 \text{ K}.$$

2. Рассчитаем комплекс $g / a\nu$ и коэффициент теплопроводности воздуха около холодной стенки по уравнениям (23) и (24):

$$\frac{g}{a\nu} = 1{,}2 \cdot 10^8 e^{\frac{1770}{T_\text{ср}}} = 1{,}2 \cdot 10^8 e^{\frac{1770}{318}} = 3{,}1368 \cdot 10^{10};$$

$$\lambda_\text{в} = 6{,}98 \cdot 10^{-3} + 6{,}41 \cdot 10^{-5} T_\text{ср} =$$

$$= 6{,}98 \cdot 10^{-3} + 6{,}41 \cdot 10^{-5} \cdot 318 = 2{,}7364 \cdot 10^{-2}.$$

3. По найденным выше значениям определим другую величину критерия Био на холодной стенке по выражению (37):

$$\text{Bi}_x = \left(C \sqrt[4]{\frac{g}{\nu a} \frac{h^3}{T_0} (T_\text{г} - T_0) b_x} \frac{\lambda_\text{в}}{h} + 4\sigma T_0^3 \right) \frac{h}{2\lambda} =$$

$$= \left(0{,}27 \sqrt[4]{\frac{3{,}1368 \cdot 10^{10} \cdot 0{,}01^3 (500 - 300)}{300}} \times \right.$$

$$\times \left(\sqrt[4]{\frac{4}{4 + 2 \cdot 4 \cdot 2 + 2}} \frac{2{,}7364 \cdot 10^{-2}}{0{,}01} + 4 \cdot 5{,}67 \cdot 10^{-8} \cdot 300^3 \right) \times$$

$$\left. \times \frac{0{,}01}{2 \cdot 0{,}055} = 1{,}084, \right.$$

где C – коэффициент, равный 0,27 для горизонтальной пластины, обращенной горячей стороной вниз (принимаем в нашем случае как наиболее жесткий вариант в пространстве аппарата).

4. Найденное в п. 3 значение Bi_x отличается от принятого в п. 1 более чем на 10 %. Подставим последнее значение Bi_x в формулу (36):

$$T_{\mathrm{ср}_x} = \frac{T_\Gamma - T_0}{2} b_x + T_0 =$$

$$= \frac{500-300}{2} \frac{4}{4 + 2 \cdot 4 \cdot 1{,}084 + 1{,}084} + 300 = 329 \text{ K};$$

$$\frac{g}{a\nu} = 1{,}2 \cdot 10^8 e^{\frac{1770}{T_{\mathrm{ср}}}} = 1{,}2 \cdot 10^8 e^{\frac{1770}{329}} = 2{,}6041 \cdot 10^{10};$$

$$\lambda_{\mathrm{в}} = 6{,}98 \cdot 10^{-3} + 6{,}41 \cdot 10^{-5} T_{\mathrm{ср}} =$$

$$= 6{,}98 \cdot 10^{-3} + 6{,}41 \cdot 10^{-5} \cdot 329 = 2{,}8069 \cdot 10^{-2};$$

$$\mathrm{Bi}_x = \left(C \sqrt[4]{\frac{g}{\nu a} \frac{h^3}{T_0} \frac{(T_\Gamma - T_0)}{b_x}} \frac{\lambda_{\mathrm{в}}}{h} + 4\sigma T_0^3 \right) \frac{h}{2\lambda} =$$

$$= \left(0{,}27 \sqrt[4]{\frac{2{,}6041 \cdot 10^{10} \cdot 0{,}01^3 (500-300)}{300}} \times \right.$$

$$\times \sqrt[4]{\frac{4}{4 + 2 \cdot 4 \cdot 1{,}084 + 1{,}084}} \frac{2{,}8069 \cdot 10^{-2}}{0{,}01} +$$

$$\left. + 4 \cdot 5{,}67 \cdot 10^{-8} \cdot 300^3 \right) \frac{0{,}01}{2 \cdot 0{,}055} = 1{,}137.$$

Так как последняя и предыдущая величины отличаются друг от друга менее чем на 10 %, в дальнейших расчетах используется величина $Bi_x = 1{,}137$.

5. С учетом последних значений критерия Био вычислим среднюю (между температурами горячей поверхности и прилегающего газового пространства) температуру по формуле (38):

$$T_{ср_г} = \frac{1}{2}(T_г(2 - b_г) + T_0 b_г) =$$

$$= 0{,}5\left(500\left(2 - \frac{1{,}137}{4 + 2 \cdot 1{,}137 \cdot 4 + 1{,}137}\right) \times \right.$$

$$\left. \times 300\frac{1{,}137}{4 + 2 \cdot 1{,}137 \cdot 4 + 1{,}137}\right) = 492 \text{ K}.$$

6. Рассчитаем комплекс $g/a\nu$ и коэффициент теплопроводности воздуха около горячей стенки по уравнениям (23) и (24):

$$\frac{g}{a\nu} = 1{,}2 \cdot 10^8 e^{\frac{1770}{T_{ср}}} = 1{,}2 \cdot 10^8 e^{\frac{1770}{492}} = 4{,}3811 \cdot 10^9;$$

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

$$= 6{,}98 \cdot 10^{-3} + 6{,}41 \cdot 10^{-5} \cdot 492 = 3{,}8517 \cdot 10^{-2}.$$

7. По найденным выше значениям определим другую величину критерия Био на горячей стенке по выражению (39):

$$Bi_г = \left(C\sqrt[4]{\frac{g}{\nu a}\frac{h^3}{T_г}\frac{(T_г - T_0)}{b_г}}\frac{\lambda_в}{h} + 4\sigma T_г^3\right)\frac{h}{2\lambda} =$$

$$= \left(0{,}27 \sqrt[4]{\frac{4{,}3811 \cdot 10^9 \cdot 0{,}01^3 (500 - 300)}{300}} \times \right.$$

$$\times \sqrt[4]{\frac{1{,}137}{4 + 2 \cdot 4 \cdot 1{,}137 + 1{,}137}} \frac{3{,}8517 \cdot 10^{-2}}{0{,}01} +$$

$$\left. + 4 \cdot 5{,}67 \cdot 10^{-8} \cdot 500^3 \right) \frac{0{,}01}{2 \cdot 0{,}055} = 2{,}947,$$

где C – коэффициент, равный 0,27 для горизонтальной пластины, обращенной горячей стороной вниз (принимаем в нашем случае как наиболее жесткий вариант в пространстве аппарата).

8. Найденное в п. 7 значение Bi_Γ отличается от принятого в п. 1 более чем на 10 %. Подставим последнее значение Bi_Γ в формулу (38):

$$T_{\mathrm{ср}_\Gamma} = \frac{1}{2}(T_\Gamma (2 - b_\Gamma) + T_0 b_\Gamma) =$$

$$= 0{,}5 \left(500 \left(2 - \frac{1{,}137}{2{,}947 + 2 \cdot 1{,}137 \cdot 2{,}947 + 1{,}137} \right) + \right.$$

$$\left. + 300 \frac{1{,}137}{2{,}947 + 2 \cdot 1{,}137 \cdot 2{,}947 + 1{,}137} \right) = 489{,}5 \text{ K}.$$

Рассчитаем комплекс $g/a\nu$ и коэффициент теплопроводности воздуха около горячей стенки по уравнениям (23) и (24):

$$\frac{g}{a\nu} = 1{,}2 \cdot 10^8 e^{\frac{1770}{T_{\mathrm{ср}}}} = 1{,}2 \cdot 10^8 e^{\frac{1770}{489{,}5}} = 4{,}4623 \cdot 10^9;$$

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

$$= 6{,}98 \cdot 10^{-3} + 6{,}41 \cdot 10^{-5} \cdot 489{,}5 = 3{,}8357 \cdot 10^{-2}.$$

По найденным выше значениям определим другую величину критерия Био на горячей стенке по выражению (39):

$$\mathrm{Bi}_г = \left(C \sqrt[4]{\frac{g}{\nu a} \frac{h^3}{T_г} \frac{(T_г - T_0)}{b_г} \frac{\lambda_в}{h}} + 4\sigma T_г^3 \right) \frac{h}{2\lambda} =$$

$$= \left(0{,}27 \sqrt[4]{\frac{4{,}4623 \cdot 10^9 \cdot 0{,}01^3 (500 - 300)}{300}} \times \right.$$

$$\times \sqrt[4]{\frac{1{,}13 /}{2{,}947 + 2 \cdot 2{,}947 \cdot 1{,}137 + 1{,}137}} \frac{3{,}8357 \cdot 10^{-2}}{0{,}01} +$$

$$\left. + 4 \cdot 5{,}67 \cdot 10^{-8} \cdot 500^3 \right) \frac{0{,}01}{2 \cdot 0{,}055} = 2{,}973.$$

Так как последняя и предыдущая величины отличаются друг от друга менее чем на 10 %, в дальнейших расчетах используется величина $\mathrm{Bi}_г = 2{,}973$.

9. Подставляем последнее значение $\mathrm{Bi}_г$ в формулу (36):

$$T_{ср_х} = \frac{T_г - T_0}{2} b_х + T_0 = \frac{500 - 300}{2} \times$$

$$\times \frac{2{,}973}{2{,}973 + 2 \cdot 2{,}973 \cdot 1{,}137 + 1{,}137} + 300 = 327 \text{ K};$$

$$\frac{g}{a\nu} = 1{,}2 \cdot 10^8 e^{\frac{1770}{T_{ср}}} = 1{,}2 \cdot 10^8 e^{\frac{1770}{327}} = 2{,}6912 \cdot 10^{10};$$

$$\lambda_{\text{в}} = 6{,}98 \cdot 10^{-3} + 6{,}41 \cdot 10^{-5} T_{\text{ср}} =$$

$$= 6{,}98 \cdot 10^{-3} + 6{,}41 \cdot 10^{-5} \cdot 327 = 2{,}7941 \cdot 10^{-2};$$

$$\text{Bi}_{\text{x}} = \left(C \sqrt[4]{\frac{g}{\nu a} \frac{h^3}{T_0} (T_{\text{г}} - T_0) b_{\text{x}}} \frac{\lambda_{\text{в}}}{h} + 4\sigma T_0^3 \right) \frac{h}{2\lambda} =$$

$$= \left(0{,}27 \sqrt[4]{\frac{2{,}6912 \cdot 10^{10} \cdot 0{,}01^3 (500 - 300)}{300}} \times \right.$$

$$\times \sqrt[4]{\frac{2{,}973}{2{,}973 + 2 \cdot 2{,}973 \cdot 1{,}137 + 1{,}137}} \frac{2{,}7941 \cdot 10^{-2}}{0{,}01} +$$

$$\left. + 4 \cdot 5{,}67 \cdot 10^{-8} \cdot 300^3 \right) \frac{0{,}01}{2 \cdot 0{,}055} = 1{,}131.$$

Так как последняя и предыдущая величины отличаются друг от друга менее чем на 10 %, в дальнейших расчетах используется величина $\text{Bi}_{\text{x}} = 1{,}131$.

10. Произведем вычисления по формулам (26), (27), (34):

$$\theta_0 = \frac{E}{RT_{\text{г}}^2} (T_{\text{г}} - T_0) = \frac{66\,597}{8{,}31 \cdot 500^2} (500 - 300) = 6{,}411;$$

$$a = 1 + 2{,}28 e^{-0{,}65\theta_0} = 1 + 2{,}28 e^{-0{,}65 \cdot 6{,}411} = 1{,}035;$$

$$\delta = \frac{1}{2a} \left(\frac{\text{Bi}_{\text{г}} \text{Bi}_{\text{x}}}{2\text{Bi}_{\text{г}} \text{Bi}_{\text{x}} + \text{Bi}_{\text{г}} + \text{Bi}_{\text{x}}} \right)^2 \times$$

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

$$= \frac{1}{2 \cdot 1{,}035}\left(\frac{1{,}131 \cdot 2{,}973}{2 \cdot 1{,}131 \cdot 2{,}973 + 1{,}131 + 2{,}973}\right)^2 \times$$

$$\times \left\{6{,}411 + 2\ln\left[2\left(1{,}035 + \sqrt{1{,}035\,(1{,}035 - 1)}\right)\right]\right\}^2 = 3{,}135.$$

11. Для температуры $T_г$ определим параметры

$$\beta = \frac{RT_г}{E} = \frac{8{,}31 \cdot 500}{66\,597} = 0{,}06239;$$

$$\gamma = \frac{cRT_г^2}{QE} = \frac{1550 \cdot 8{,}31 \cdot 500^2}{349\,637 \cdot 66\,597} = 0{,}1383$$

и вычислим критическую величину δ:

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

$$= 3{,}135\,(1 + 0{,}06239)\left(1 + 2{,}4 \cdot 0{,}1383^{2/3}\right) = 5{,}468.$$

12. Подставим величину $\delta_{кр}$ в уравнение (11) и найдем новое значение температуры $T_г$:

$$5{,}468 = 2{,}55 \cdot 10^{13}\,\frac{66\,597}{8{,}31 \cdot T_г^2}\,0{,}005^2\,e^{-\frac{66\,597}{8{,}31 \cdot T_г}}, \qquad (11)$$

откуда $T_г$ = 535 K.

13. Используя это значение $T_г$, повторяем расчет параметров по пп. 1–12 и получаем новую величину: $T_г$ = 540 K.

Используя это значение $T_г$, повторяем расчет параметров по пп. 1–12 и получаем новую величину: $T_г$ = 540,6 K.

Так как предыдущее и последнее значения температуры отличаются друг от друга менее чем на 1 °C, принимаем последнюю величину за критическую температуру.

ОГЛАВЛЕНИЕ

1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ 3
1.1. Аппаратура 3
1.2. Подготовка и проведение испытаний 4

2. РАСЧЕТ УСЛОВИЙ ТЕПЛОВОГО ВЗРЫВА 6
2.1. Определение параметров кинетического уравнения реакции окисления 6
2.2. Расчет критической температуры 10
2.3. Расчет критического размера 12
2.4. Расчет времени индукции 13

3. РАСЧЕТ КРИТИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ ДЛЯ ОТЛОЖЕНИЙ ГОРЮЧИХ МАТЕРИАЛОВ 15
3.1. Критическая температура отложений на нагретой поверхности оборудования 15
3.2. Критическая температура для отложений материала на стенках трубопровода 17
3.3. Критический размер отложений на нагретой поверхности оборудования 19
3.4. Критическая температура для отложений материала в технологическом оборудовании 21

ПРИЛОЖЕНИЕ 1 24
1. Расчет критерия Франк-Каменецкого δ_0 для некоторых форм упаковок материалов 24
2. Пример расчета параметра δ_0 для бесконечного квадратного стержня 27

ПРИЛОЖЕНИЕ 2 29
1. Пример расчета кинетических параметров реакции окисления 29
2. Пример расчета критической температуры 32
3. Пример расчета критического размера 35
4. Пример расчета времени индукции 38

5. Пример расчета критичеекой температуры нагретой поверхности оборудования для отложений веществ 41
6. Пример расчета критической температуры среды в воздуховоде для отложений материалов 45
7. Пример расчета критической температуры нагрева тепловой изоляции технологического трубопровода 49
8. Пример расчета критического размера отложений вещества на нагретой поверхности оборудования 52
9. Пример расчета критической температуры для отложений веществ в технологическом оборудовании 56

Редактор ***Г.В. Прокопенко***
Технический редактор ***Е.С. Матюшкина***
Ответственный за выпуск ***И.А. Корольченко***

Подписано в печать 06.07.2004 г. Формат 60×84/16. Печать офсетная.
Усл. печ. л. 4,18. Уч.-изд. л. 3,98. Т. – 500 экз. Заказ № 67.

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

gost.e-ecolog.ru