

**Государственная корпорация по атомной энергии «Росатом»
АО «ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ —
ФИЗИКО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
имени А.И. ЛЕЙПУНСКОГО»**

ФЭИ-3274

М.В. Кащеев, А.П. Сорокин

**РАСЧЕТ СОСТОЯНИЯ
ТЕРМОЧУВСТВИТЕЛЬНОГО ЭЛЕМЕНТА**

Обнинск-2017

УДК 621.039.586

М.В. Кашеев, А.П. Сорокин

Расчет состояния термочувствительного элемента.

Препринт ФЭИ – 3274, Обнинск, 2017. – 20 с.

Разработана методика расчета состояния термочувствительного элемента. Проведен тепловой и прочностной расчет цилиндрического термочувствительного элемента макетного образца. Определено время до разрушения термочувствительного элемента.

The technique is developed for calculation of a thermo-sensitive element condition. Thermal and strength calculation of the cylindrical thermo-sensitive element of the model sample is carried out. Time before destruction of the thermo-sensitive element is defined.

ОБОЗНАЧЕНИЯ

a – коэффициент температуропроводности, $\text{м}^2/\text{с}$;	T – температура, $^{\circ}\text{C}$;
Bi_i – критерий Био, $i=1,2$;	T^0 – начальная температура, $^{\circ}\text{C}$;
c – изобарная теплоемкость, $\text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{K})$;	t – время, с ;
E – модуль упругости материала, Па ;	w – скорость теплоносителя, $\text{м}/\text{с}$;
Fo – критерий Фурье;	x – безразмерная поперечная координата;
G – безразмерная координата фронта плавления;	z – продольная координата, м ;
g – координата фронта плавления, м ; ускорение свободного падения, $\text{м}/\text{с}^2$;	α – коэффициент теплоотдачи, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{K})$; коэффициент линейного расширения, K^{-1} ;
h – безразмерный шаг;	$\alpha_{\text{пр}}$ – коэффициент теплопередачи, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{K})$;
Ko – критерий Коссовича;	δ – толщина термочувствительного элемента, м ;
k – темп нагрева теплоносителя, $^{\circ}\text{C}/\text{с}$;	ϑ – безразмерная температура;
L – теплота плавления, $\text{Дж}/\text{кг}$;	λ – коэффициент теплопроводности, $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{K})$;
m – масса, кг ;	μ – коэффициент Пуассона;
Pd – критерий Предводителява;	ρ – плотность, $\text{кг}/\text{м}^3$;
r – поперечная координата и радиус, м ;	σ – напряжение, Па ;
S – площадь, м^2 ;	τ – безразмерное время;
	$\Delta\tau$ – безразмерный шаг по времени.

ИНДЕКСЫ

M – масштаб;
 Na – натрий;
 Pl – плавление.

ВВЕДЕНИЕ

Как известно, на повышение безопасности ЯЭУ направлено создание пассивных устройств аварийной защиты реакторов. На основе таких устройств возможна разработка ЯЭУ, внутренне устойчивых к отказам технических средств и ошибкам персонала. Кроме того, пассивные устройства аварийной защиты осуществляют управление запроектной аварией.

Устройства ПАЗ по принципу действия можно разделить на устройства, срабатывающие по снижению расхода теплоносителя или превышению температуры теплоносителя на выходе из активной зоны. Реализация может быть осуществлена с использованием различных эффектов и конструктивных решений [1–4]. В частности, используются рабочие элементы с плавкими вставками. Интерес к техническим решениям с плавкими вставками объясняется простотой конструкции и высокой надежностью срабатывания.

Для реакторов нового поколения с повышенной системой безопасности разрабатывается дополнительная пассивная аварийная защита, в которой средства защиты основаны на естественных процессах, протекающих в активной зоне, независимо от внешних управляющих систем и источников энергии. В рассматриваемой системе стержень защиты со сборкой ПЭЛ подвешен на срабатывающем устройстве, содержащем термочувствительный элемент, причем устройство расположено над тепловыделяющими сборками и омывается выходящим из них горячим натрием. При запроектной аварии, когда расход теплоносителя падает и температура выходящего из ТВС натрия быстро повышается, термочувствительный элемент теряет прочность и разрушается. Под собственным весом стержень защиты падает в активную зону и снижает реактивность реактора.

В АО «ГНЦ РФ-ФЭИ» на рабочем участке натриевого стенда проведены испытания макетов срабатывающих устройств. В рассматриваемом макетном образце термочувствительный элемент выполнен в виде тонкостенной втулки из специального сплава. В аварийной ситуации при повышении температуры натрия прочность материала термочувствительного элемента снижается, происходит разрыв стенки втулки, и нижняя часть стержня защиты с поглотителем падает в активную зону реактора.

В связи с испытаниями на натриевом стенде следует отметить необходимость проведения расчета с целью определения времени до разрушения термочувствительного элемента. Ниже дано описание постановки задачи, ее решения и результатов расчета.

Постановка задачи и ее решение

В данной задаче проводится расчет времени до разрушения термочувствительного элемента макета срабатывающего устройства и температуры потока натрия в момент разрушения. Центральная зона термочувствительного элемента макета представляет собой цилиндр. Задача решается для двух вариантов:

- одностороннее нагревание элемента только с внешней стороны, что предполагает отсутствие протекания натрия внутри макета;
- двустороннее нагревание элемента, предполагающее протекание натрия внутри макета.

Рассмотрим одностороннее нагревание и возможное плавление термочувствительного элемента.

а) Стадия нагревания (рис. 1)

Так как толщина термочувствительного элемента значительно меньше радиуса r_1 , задачу будем решать в плоской геометрии.

Уравнение теплопроводности

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \frac{\partial^2 T}{\partial r^2}, \quad r_1 < r < r_2, \quad t > 0. \quad (1)$$

Начальное условие

$$T(r, 0) = T^0, \quad r_1 < r < r_2. \quad (2)$$

Граничные условия

$$-\lambda \frac{\partial T(r_1, t)}{\partial r} = \alpha_1 (T_{\text{Na}} - T(r_1, t)), \quad t > 0, \quad (3)$$

$$\lambda \frac{\partial T(r_2, t)}{\partial r} = \alpha_2 (T^0 + kt - T(r_2, t)), \quad t > 0. \quad (4)$$

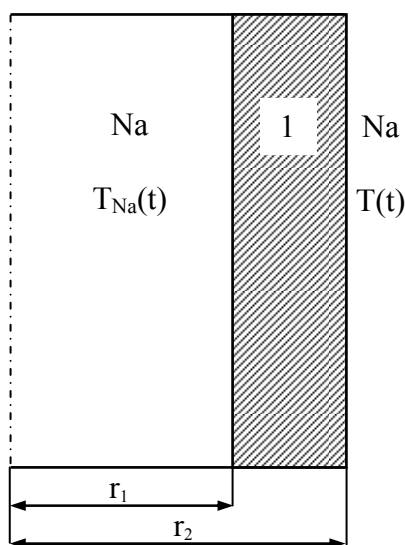


Рис. 1. Одностороннее нагревание: 1 – твердая зона

Натрий, находящийся на периферии, нагревает натрий в центральной части. Для определения его температуры составим уравнение баланса

$$\frac{dT_{\text{Na}}}{dt} = \tilde{b} (T^0 + kt - T_{\text{Na}}), \quad t > 0, \quad (5)$$

$$\tilde{b} = \frac{\alpha_{\text{пр}} S}{c_{\text{Na}} m_{\text{Na}}}, \quad \alpha_{\text{пр}} - \text{коэффициент теплопередачи}, \quad \frac{1}{\alpha_{\text{пр}}} = \frac{1}{\alpha_1} + \frac{r_2 - r_1}{\lambda_1} + \frac{1}{\alpha_2}, \quad S = 2\pi r_2 \Delta z,$$

$$m_{\text{Na}} = \rho_{\text{Na}} \pi r_1^2 \Delta z.$$

В безразмерных переменных

$$\vartheta = \frac{T - T^0}{T_{\text{пл}} - T^0}, \quad x = \frac{r - r_1}{\delta}, \quad \text{Fo} = \tau = \frac{a_M t}{\delta^2},$$

$$\delta = r_2 - r_1, \quad \vartheta_{\text{Na}} = \frac{T_{\text{Na}} - T^0}{T_{\text{пл}} - T^0}, \quad \text{Bi}_i = \frac{\alpha_i \delta}{\lambda_M} \quad (i = 1, 2),$$

$$a_M = \frac{\lambda_M}{c_M \rho_M}, \quad \text{Pd} = \frac{k \delta^2}{a_M (T_{\text{пл}} - T^0)}$$

математическое описание задачи (1)–(5) принимает вид

$$\frac{\partial \vartheta}{\partial \tau} = \bar{a} \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial x^2}, \quad 0 < x < 1, \quad \tau > 0, \quad (6)$$

$$\vartheta(x, 0) = 0, \quad (7)$$

$$\bar{\lambda} \vartheta'(0, \tau) + \text{Bi}_1 (\vartheta_{\text{Na}} - \vartheta(0, \tau)) = 0, \quad (8)$$

$$\bar{\lambda} \vartheta'(1, \tau) - \text{Bi}_2 (\text{Pd} \tau - \vartheta(1, \tau)) = 0, \quad (9)$$

$$\frac{d\vartheta_{\text{Na}}}{d\tau} = b (\text{Pd} \tau - \vartheta_{\text{Na}}), \quad (10)$$

где
$$b = \tilde{b} \frac{\delta^2}{a_M},$$

$$\vartheta_{\text{Na}}(0) = 0. \quad (11)$$

В (6), (8), (9) черта сверху означает, что величина безразмерная.

Сначала решим задачу (10), (11), используя метод вариации произвольной постоянной.

Решение однородного уравнения имеет вид

$$\vartheta_{\text{Na}} = C e^{-b\tau}. \quad (12)$$

Решение неоднородного уравнения ищем в виде (12), но с коэффициентом $C(\tau)$, зависящим от времени, т. е.

$$\vartheta_{\text{Na}} = C(\tau)e^{-b\tau}. \quad (13)$$

Подставляя решение (13) в уравнение (10), получим

$$C'(\tau) = b\text{Pd}\tau e^{b\tau}. \quad (14)$$

Интегрируя (14), найдем

$$C(\tau) = b\text{Pd} \int \tau e^{b\tau} d\tau = b\text{Pd} \left(e^{b\tau} \cdot \left(\frac{\tau}{b} - \frac{1}{b^2} \right) + \bar{C} \right)$$

и, следовательно,

$$\vartheta_{\text{Na}} = b\text{Pd} \left(\frac{\tau}{b} - \frac{1}{b^2} + \bar{C} e^{-b\tau} \right).$$

Так как

$$\vartheta_{\text{Na}}(0) = \left(-\frac{1}{b^2} + \bar{C} \right) b\text{Pd} = 0,$$

то

$$\bar{C} = \frac{1}{b^2},$$

и окончательно получим

$$\vartheta_{\text{Na}} = \text{Pd} \left(\tau - \frac{1}{b} (1 - e^{-b\tau}) \right).$$

Задачу (6)–(9) будем решать численно методом прогонки [5].

Конечно-разностная аппроксимация задачи

$$\begin{aligned} \frac{\vartheta_i^{n+1} - \vartheta_i^n}{\Delta\tau} &= \bar{a} \frac{\vartheta_{i+1}^{n+1} - 2\vartheta_i^{n+1} + \vartheta_{i-1}^{n+1}}{h^2}, \\ \frac{\bar{a}\Delta\tau}{h^2} \vartheta_{i-1}^{n+1} - \left(\frac{2\bar{a}\Delta\tau}{h^2} + 1 \right) \vartheta_i^{n+1} + \frac{\bar{a}\Delta\tau}{h^2} \vartheta_{i+1}^{n+1} &= -\vartheta_i^n, \\ A_i \vartheta_{i-1}^{n+1} - C_i \vartheta_i^{n+1} + B_i \vartheta_{i+1}^{n+1} &= -\vartheta_i^n, \\ A_i = \frac{\bar{a}\Delta\tau}{h^2}, \quad C_i = \frac{2\bar{a}\Delta\tau}{h^2} + 1, \quad B_i = \frac{\bar{a}\Delta\tau}{h^2}, \quad \vartheta_i^0 &= 0. \end{aligned}$$

Аппроксимация граничных условий

$$\begin{aligned} \bar{\lambda} \frac{\vartheta_1^{n+1} - \vartheta_0^{n+1}}{h} + \text{Bi}_1 (\vartheta_{\text{Na}}^{n+1} - \vartheta_0^{n+1}) &= 0, \\ \vartheta_0^{n+1} &= \frac{\text{Bi}_1 h}{\bar{\lambda} + \text{Bi}_1 h} \vartheta_{\text{Na}}^{n+1} + \frac{\bar{\lambda} \vartheta_1^{n+1}}{\bar{\lambda} + \text{Bi}_1 h}, \\ \vartheta_0^{n+1} &= \chi_1 \vartheta_1^{n+1} + \mu_1, \\ \chi_1 &= \frac{\bar{\lambda}}{\bar{\lambda} + \text{Bi}_1 h}, \quad \mu_1 = \frac{\text{Bi}_1 h \vartheta_{\text{Na}}^{n+1}}{\bar{\lambda} + \text{Bi}_1 h}, \end{aligned}$$

$$\bar{\lambda} \frac{\vartheta_N^{n+1} - \vartheta_{N-1}^{n+1}}{h} - \text{Bi}_2 (\text{Pd}\tau - \vartheta_N^{n+1}) = 0,$$

$$\left(1 + \frac{\text{Bi}_2 h}{\bar{\lambda}}\right) \vartheta_N^{n+1} = \vartheta_{N-1}^{n+1} + \frac{\text{Bi}_2 h}{\bar{\lambda}} \text{Pd}\tau,$$

$$\vartheta_N^{n+1} = \chi_2 \vartheta_{N-1}^{n+1} + \mu_2,$$

$$\chi_2 = \frac{1}{1 + \frac{\text{Bi}_2 h}{\bar{\lambda}}}, \quad \mu_2 = \frac{\frac{\text{Bi}_2 h}{\bar{\lambda}} \text{Pd}\tau}{1 + \frac{\text{Bi}_2 h}{\bar{\lambda}}}.$$

Алгоритм прямой прогонки

$$\bar{\alpha}_{i+1} = \frac{B_i}{C_i - \alpha_i A_i}, \quad i = 1, 2, \dots, N-1, \quad \alpha_1 = \chi_1,$$

$$\bar{\beta}_{i+1} = \frac{A_i \beta_i + F_i}{C_i - \alpha_i A_i}, \quad i = 1, 2, \dots, N-1, \quad \beta_1 = \mu_1.$$

Алгоритм обратной прогонки

$$\bar{\vartheta}_i = \alpha_{i+1} \vartheta_{i+1} + \beta_{i+1}, \quad i = N-1, N-2, \dots, 1, 0,$$

$$\vartheta_N = \frac{\mu_2 + \chi_2 \beta_N}{1 - \alpha_N \chi_2}.$$

Стрелки сверху указывают направление счета: ($\rightarrow$) – от i к $i+1$, ($\leftarrow$) – от $i+1$ к i .

б) Стадия плавления

При одностороннем нагреве плавление происходит с внешней стороны, как показано на рис. 2.

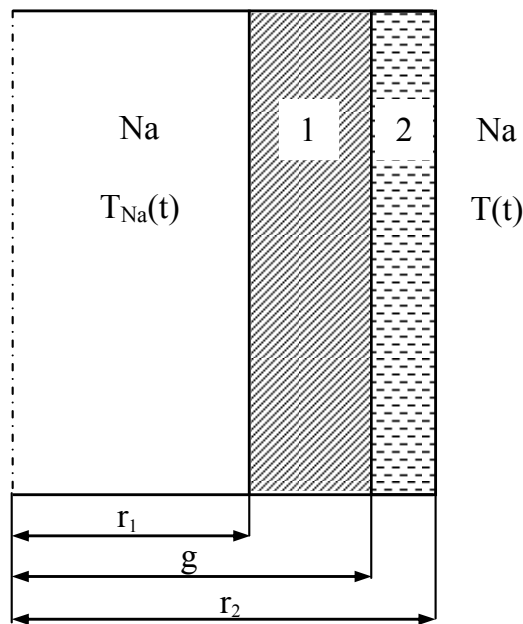


Рис. 2. Одностороннее плавление: 1 – твердая зона; 2 – расплавленная зона

Учтем возможное плавление материала термочувствительного элемента. На фронте плавления задается температура плавления материала и записывается условие для определения положения фронта плавления в любой момент времени (условие Стефана):

$$\begin{aligned}\vartheta(G, \tau) &= \vartheta_1(G, \tau), \\ \vartheta'(G, \tau) - K_\lambda \vartheta_1'(G, \tau) &= K_0 \frac{\bar{\rho}}{\bar{\lambda}} \frac{dG}{d\tau}, \\ K_\lambda &= \frac{\bar{\lambda}_1}{\bar{\lambda}}, \quad K_0 = \frac{L}{c_{pM}(T_{пл} - T^0)}, \quad G = \frac{g - r_1}{\delta}, \\ G(\tau^*) &= 1,\end{aligned}$$

где τ^* – момент времени достижения температуры плавления материала термочувствительного элемента.

В конечно-разностном виде имеем

$$\begin{aligned}\vartheta_{MF} &= 1, \\ \frac{\vartheta_{MF} - \vartheta_{MF-1}}{h} - K_\lambda \frac{\vartheta_{MF+1} - \vartheta_{MF}}{h} &= \frac{\bar{\rho}}{\bar{\lambda}} K_0 \frac{G^{n+1} - G^n}{\Delta\tau}, \\ G^{n+1} &= \frac{\Delta\tau}{K_0 h} \frac{\bar{\lambda}}{\bar{\rho}} ((1 + K_\lambda) \vartheta_{MF} - \vartheta_{MF-1} - K_\lambda \vartheta_{MF+1}) + G^n.\end{aligned}$$

Температуры в нерасплавленной и расплавленной зонах рассчитываются методом прогонки.

В нерасплавленной зоне температура определяется правой прогонкой

$$\begin{aligned}\bar{\alpha}_{i+1} &= \frac{B_i}{C_i - \alpha_i A_i}, \quad i = 1, 2, 3, \dots, MF - 1, \quad \alpha_1 = \chi_1, \\ \bar{\beta}_{i+1} &= \frac{A_i \beta_i + F_i}{C_i - \alpha_i A_i}, \quad i = 1, 2, 3, \dots, MF - 1, \quad \beta_1 = \mu_1, \\ \bar{\vartheta}_i &= \alpha_{i+1} \vartheta_{i+1} + \beta_{i+1}, \quad i = MF - 1, MF - 2, \dots, 1, 0, \\ \vartheta_{MF} &= 1.\end{aligned}$$

В расплавленной зоне расчет осуществляется по левой прогонке

$$\begin{aligned}\bar{\xi}_i &= \frac{A_i}{C_i - \xi_{i+1} B_i}, \quad i = N-1, N-2, \dots, MF+1, \quad \xi_N = \chi_2, \\ \bar{\eta}_i &= \frac{B_i \eta_{i+1} + F_i}{C_i - \xi_{i+1} B_i}, \quad i = N-1, N-2, \dots, MF+1, \quad \eta_N = \mu_2, \\ \bar{\vartheta}_{i+1} &= \xi_{i+1} \vartheta_i + \eta_{i+1}, \quad i = MF, MF+1, \dots, N-1, \\ \vartheta_{MF} &= 1.\end{aligned}$$

в) Анализ прочности

Согласно [6] в случае цилиндра с концентрическим круглым отверстием напряжения σ_r , σ_θ , σ_z определяются следующими формулами:

$$\sigma_r = \frac{\alpha E}{1-\mu} \frac{1}{r^2} \left(\frac{r^2 - r_1^2}{g^2 - r_1^2} \int_{r_1}^g T r dr - \int_{r_1}^r T r dr \right), \quad (15)$$

$$\sigma_\theta = \frac{\alpha E}{1-\mu} \frac{1}{r^2} \left(\frac{r^2 + r_1^2}{g^2 - r_1^2} \int_{r_1}^g T r dr + \int_{r_1}^r T r dr - T r^2 \right), \quad (16)$$

$$\sigma_z = \frac{\alpha E}{1-\mu} \left(\frac{2}{g^2 - r_1^2} \int_{r_1}^g T r dr - T \right), \quad (17)$$

где T – температура, отсчитываемая от «ложного» нуля, g – координата, определяющая положение точек фронта плавления.

Напряжение σ_z рассчитывается как алгебраическая сумма термического напряжения σ_z (формула (17)) и напряжения $\sigma = \frac{mg}{S}$, где m – масса отрывной части с учетом набегающего потока, g – ускорение свободного падения.

По энергетической (четвертой) теории прочности эквивалентное напряжение определяется по формуле [7]

$$\sigma_{\text{эКВ}} = \sqrt{\frac{1}{2} \left[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 \right]}.$$

В приведенной расчетной формуле напряженное состояние материала выражается через значения главных напряжений σ_1 , σ_2 , σ_3 (σ_r , σ_θ , σ_z). При этом растягивающие напряжения считаются положительными, а сжимающие – отрицательными.

Условие разрушения имеет вид

$$\min_r \sigma_{\text{эКВ}} > \sigma_B, \quad (18)$$

где σ_B – предел прочности.

Далее рассмотрим двухстороннее нагревание и возможное плавление термочувствительного элемента.

а) Стадия нагревания

При двухстороннем нагревании $\vartheta_{\text{На}} = \frac{kT}{T_{\text{пл}} - T^0}$. В остальном постановка задачи и ее решение остаются без изменений.

б) Стадия плавления

В данном случае необходимо записать два условия Стефана на границах расплав – материал термочувствительного элемента

$$-\lambda_1 T_1'(g_1, t) + \lambda_2 T_2'(g_1, t) = \rho_2 L \frac{dg_1}{dt}, \quad (19)$$

$$-\lambda_2 T_2'(g_2, t) + \lambda_3 T_3'(g_2, t) = -\rho_2 L \frac{dg_2}{dt}, \quad (20)$$

с граничными условиями

$$T_1(g_1, t) = T_2(g_1, t) = T_{пл}, \quad t > 0, \quad (21)$$

$$T_2(g_2, t) = T_3(g_2, t) = T_{пл}, \quad t > 0, \quad (22)$$

где g_1 и g_2 являются координатами фронтов плавления, индексы 1 и 3 относятся к расплаву, 2 – к материалу термочувствительного элемента.

Для уравнений (19) и (20) начальные условия

$$g_1(0) = r_1, \quad g_2(0) = r_2, \quad (23)$$

в безразмерных переменных (19)–(23) принимают вид

$$\vartheta_1(G_1, \tau) = \vartheta_2(G_1, \tau) = 1, \quad \vartheta_2(G_2, \tau) = \vartheta_3(G_2, \tau) = 1,$$

$$-\vartheta_1'(G_1, \tau) + K_{\lambda_1} \vartheta_2'(G_1, \tau) = \frac{\bar{\rho}_2}{\bar{\lambda}_1} K_0 \frac{dG_1}{d\tau},$$

$$-\vartheta_2'(G_2, \tau) + K_{\lambda_2} \vartheta_3'(G_2, \tau) = \frac{\bar{\rho}_2}{\bar{\lambda}_2} K_0 \frac{dG_2}{d\tau},$$

$$G_1(0) = 0, \quad G_2(0) = 1,$$

$$K_{\lambda_1} = \frac{\bar{\lambda}_2}{\bar{\lambda}_1}, \quad K_{\lambda_2} = \frac{\bar{\lambda}_3}{\bar{\lambda}_2}, \quad G_i = \frac{g_i - r_1}{r_2 - r_1}, \quad i=1,2.$$

в) Анализ прочности

При двухстороннем нагревании расчет на прочность проводится с использованием формул (15)–(17) и критерия (18).

При возможном двухстороннем плавлении σ_r , σ_θ , σ_z определяются следующими формулами:

$$\sigma_r = \frac{\alpha E}{1-\mu} \frac{1}{r^2} \left(\frac{r^2 - g_1^2}{g_2^2 - g_1^2} \int_{g_1}^{g_2} T r dr - \int_{g_1}^r T r dr \right),$$

$$\sigma_\theta = \frac{\alpha E}{1-\mu} \frac{1}{r^2} \left(\frac{r^2 + g_1^2}{g_2^2 - g_1^2} \int_{g_1}^{g_2} T r dr + \int_{g_1}^r T r dr - T r^2 \right),$$

$$\sigma_z = \frac{\alpha E}{1-\mu} \left(\frac{2}{g_2^2 - g_1^2} \int_{g_1}^{g_2} T r dr - T \right).$$

Результаты расчета и их анализ

По специально разработанной программе ТВ выполнен расчет теплового и прочностного состояния термочувствительного элемента макета срабатывающего устройства.

На рис. 3 показано изменение во времени температуры на внешней и внутренней поверхностях термочувствительного элемента при его двухстороннем нагревании. Темп нагрева теплоносителя k составил $20\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{с}$, скорость обтекания потоком теплоносителя w равна 1 м/с . На рис. 4 представлена зависимость температуры материала термочувствительного элемента от координаты r перед разрушением при тех же параметрах теплоносителя.

На рис. 5 приведено изменение во времени температуры на внешней и внутренней поверхностях термочувствительного элемента при его двухстороннем нагревании и следующих параметрах теплоносителя: темп нагрева $k = 10\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{с}$, скорость обтекания $w = 0,5\text{ м/с}$. На рис. 6 дана зависимость температуры материала термочувствительного элемента от координаты r перед разрушением при тех же значениях темпа нагрева и скорости теплоносителя.

Из сравнения рисунков 3–6 следует, что при двухстороннем нагревании температуры на внешней и внутренней поверхностях термочувствительного элемента отличаются не более чем на $2,4\text{ }^{\circ}\text{C}$.

На рис. 7 показано изменение во времени температуры на внешней и внутренней поверхностях термочувствительного элемента при его одностороннем нагревании. Темп нагрева теплоносителя составил $20\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{с}$, скорость обтекания потоком теплоносителя – 1 м/с . На рис. 8 представлена зависимость температуры материала термочувствительного элемента от координаты r перед разрушением при тех же параметрах теплоносителя.

На рис. 9 приведено изменение во времени температуры на внешней и внутренней поверхностях термочувствительного элемента при его одностороннем нагревании и следующих параметрах теплоносителя: темп нагрева $k = 10\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{с}$, скорость обтекания $w = 0,5\text{ м/с}$. На рис. 10 дана зависимость температуры материала термочувствительного элемента от координаты r перед разрушением при тех же значениях темпа нагрева и скорости теплоносителя.

Анализируя данные, представленные на рис. 8, 10, можно отметить, что при одностороннем нагревании максимальная разность температуры на внешней и внутренней поверхностях термочувствительного элемента составляет $14,4\text{ }^{\circ}\text{C}$.

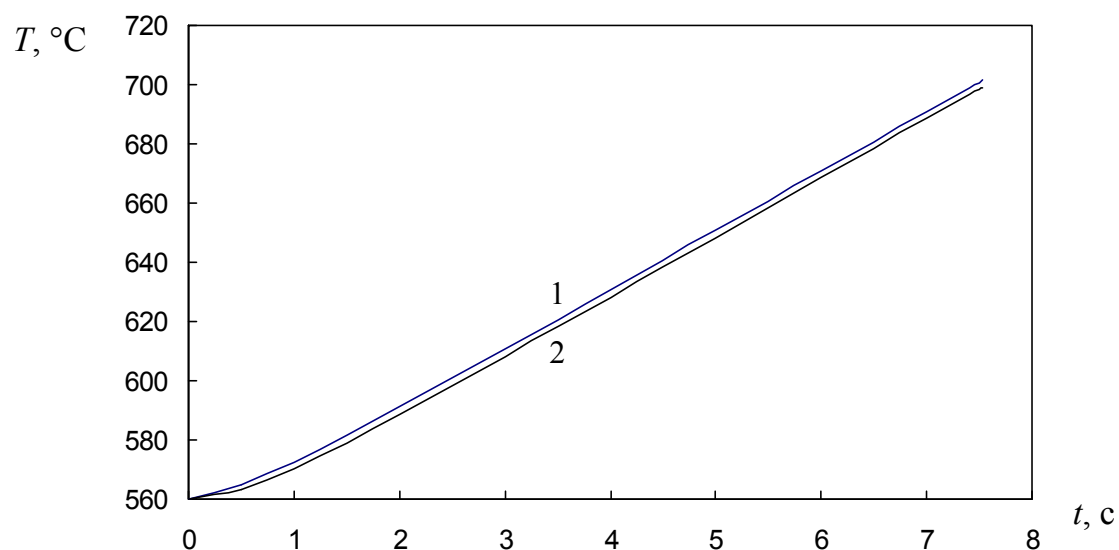


Рис. 3. Изменение во времени температуры на внешней (1) и внутренней (2) поверхностях термочувствительного элемента при двухстороннем нагревании и $k = 20 \text{ }^\circ\text{C/с}$, $w = 1 \text{ м/с}$

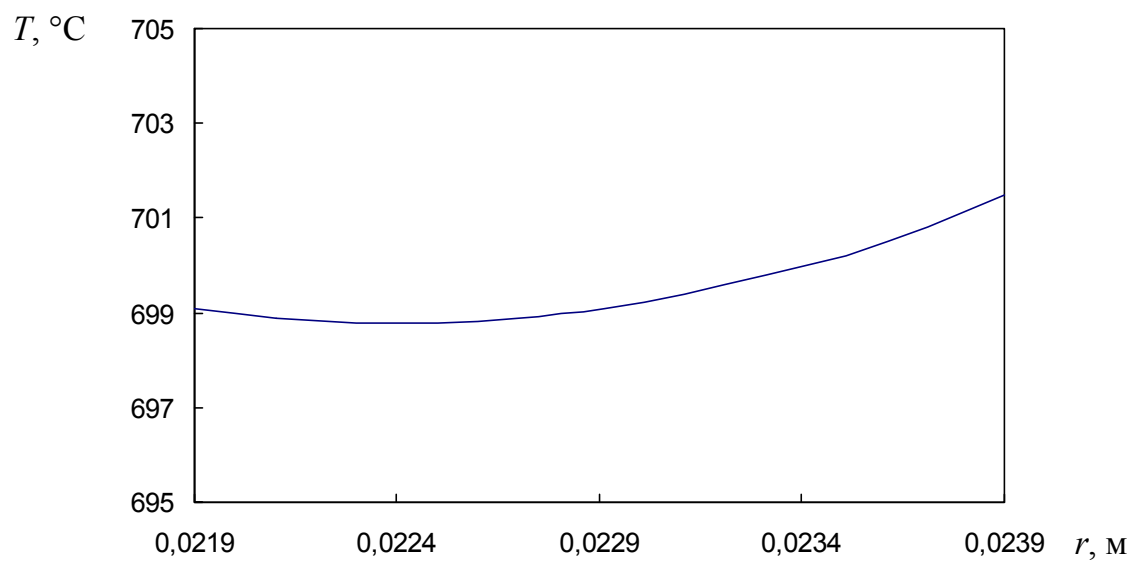


Рис. 4. Зависимость температуры материала термочувствительного элемента от координаты r в момент времени $t = 7,53 \text{ с}$ при двухстороннем нагревании и $k = 20 \text{ }^\circ\text{C/с}$, $w = 1 \text{ м/с}$

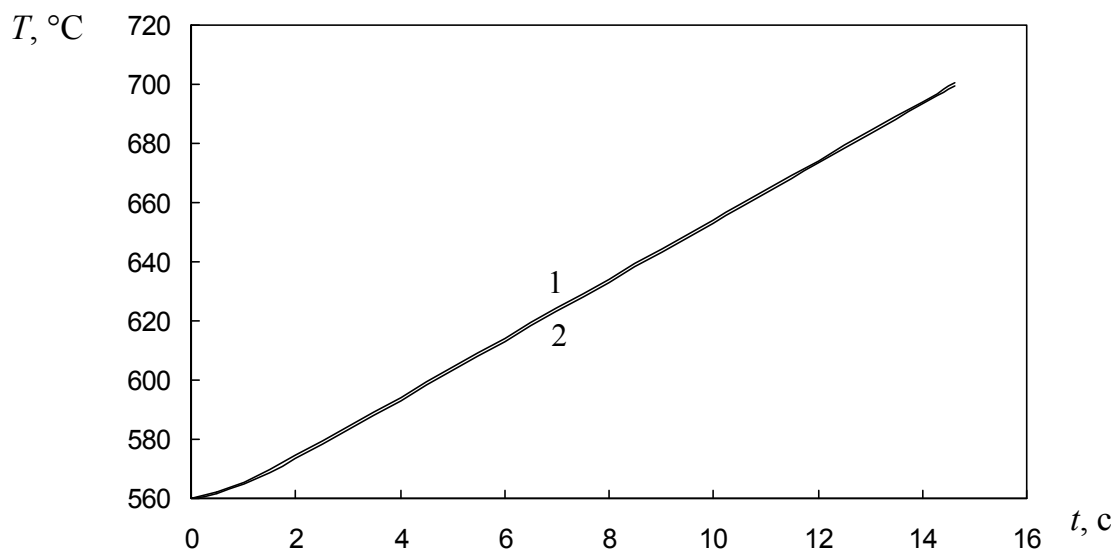


Рис. 5. Изменение во времени температуры на внешней (1) и внутренней (2) поверхностях термочувствительного элемента при двухстороннем нагревании и $k = 10\text{ }^{\circ}\text{C/с}$, $w = 0,5\text{ м/с}$

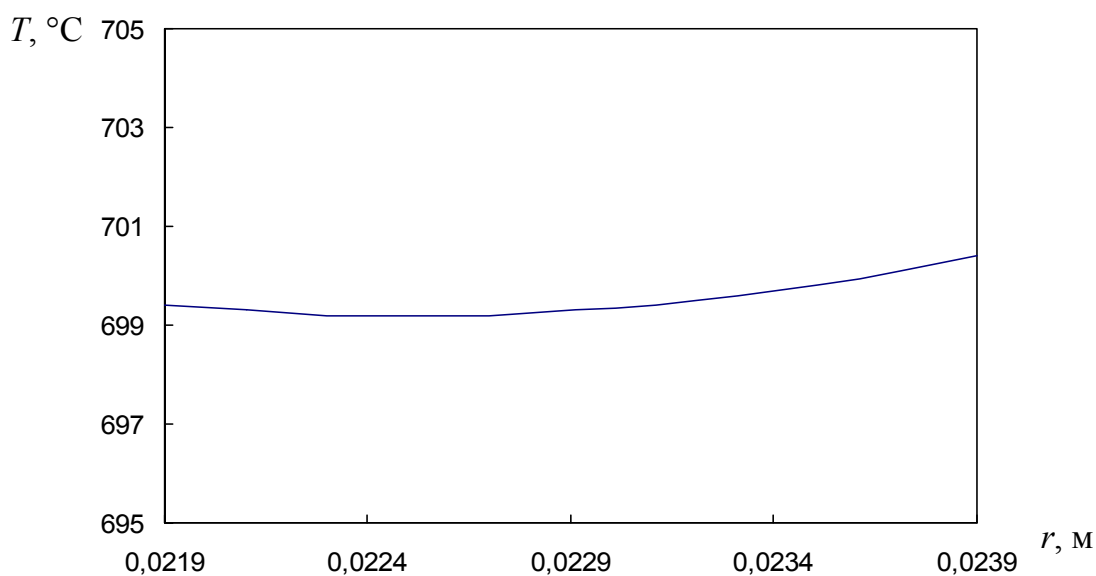


Рис. 6. Зависимость температуры материала термочувствительного элемента от координаты r в момент времени $t = 14,62\text{ с}$ при двухстороннем нагревании и $k = 10\text{ }^{\circ}\text{C/с}$, $w = 0,5\text{ м/с}$

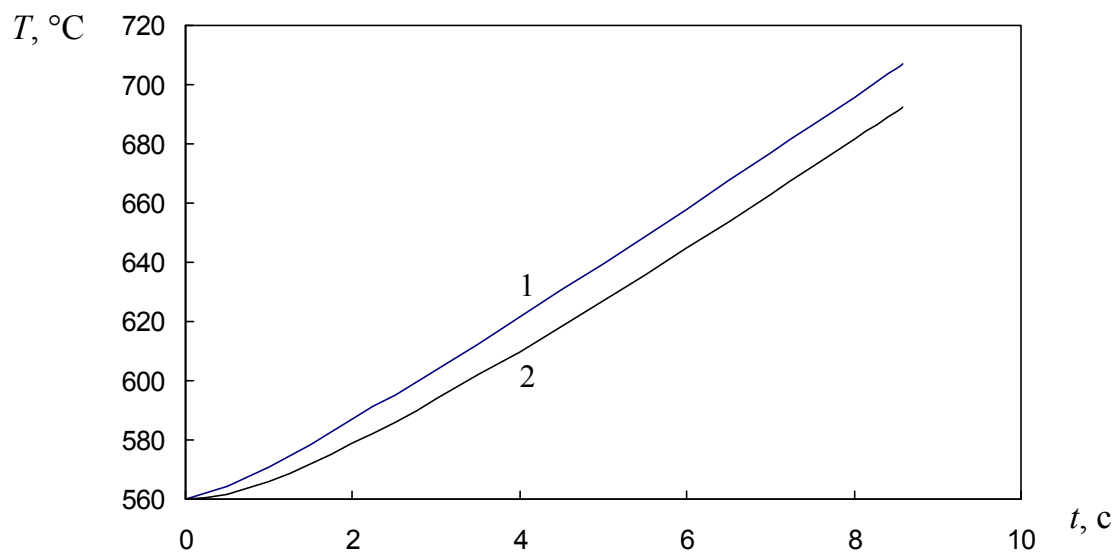


Рис. 7. Изменение во времени температуры на внешней (1) и внутренней (2) поверхностях термочувствительного элемента при одностороннем нагревании и $k = 20 \text{ °C/с}$, $w = 1 \text{ м/с}$

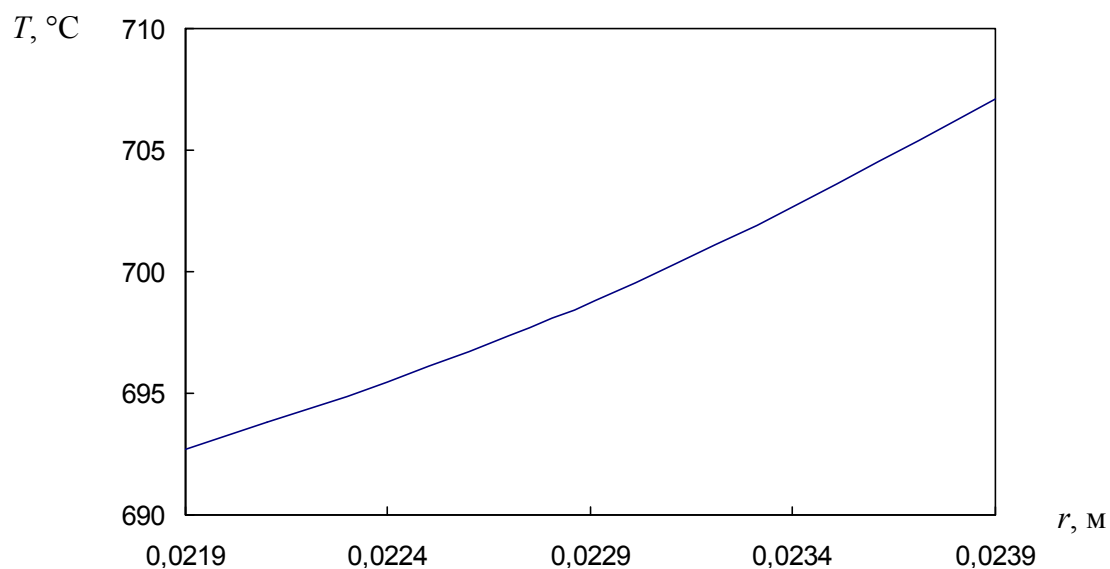


Рис. 8. Зависимость температуры материала термочувствительного элемента от координаты r в момент времени $t = 8,59 \text{ с}$ при одностороннем нагревании и $k = 20 \text{ °C/с}$, $w = 1 \text{ м/с}$

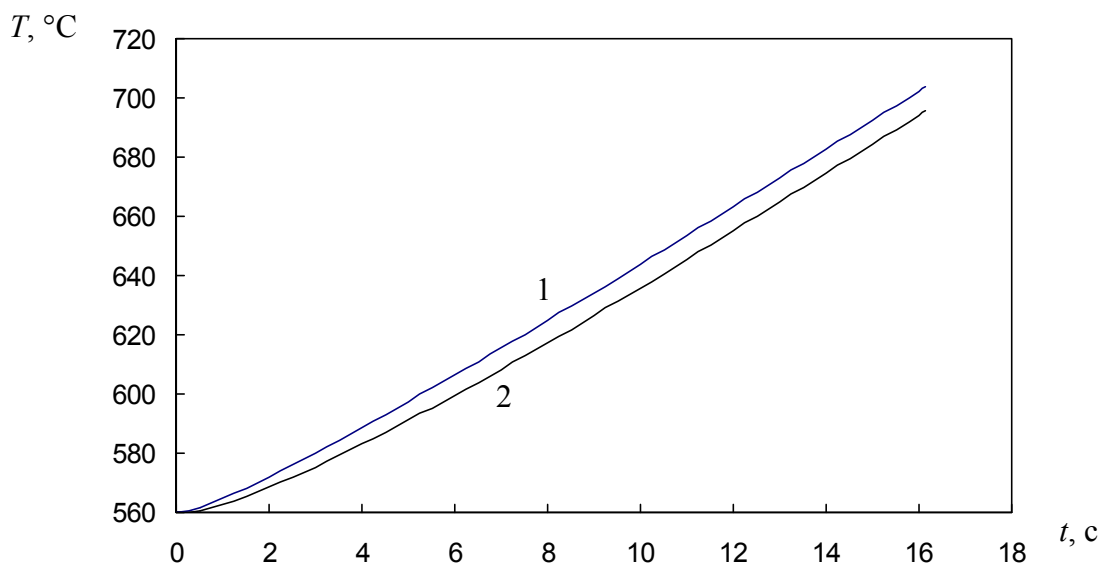


Рис. 9. Изменение во времени температуры на внешней (1) и внутренней (2) поверхностях термочувствительного элемента при одностороннем нагревании и $k = 10 \text{ °C/с}$, $w = 0,5 \text{ м/с}$

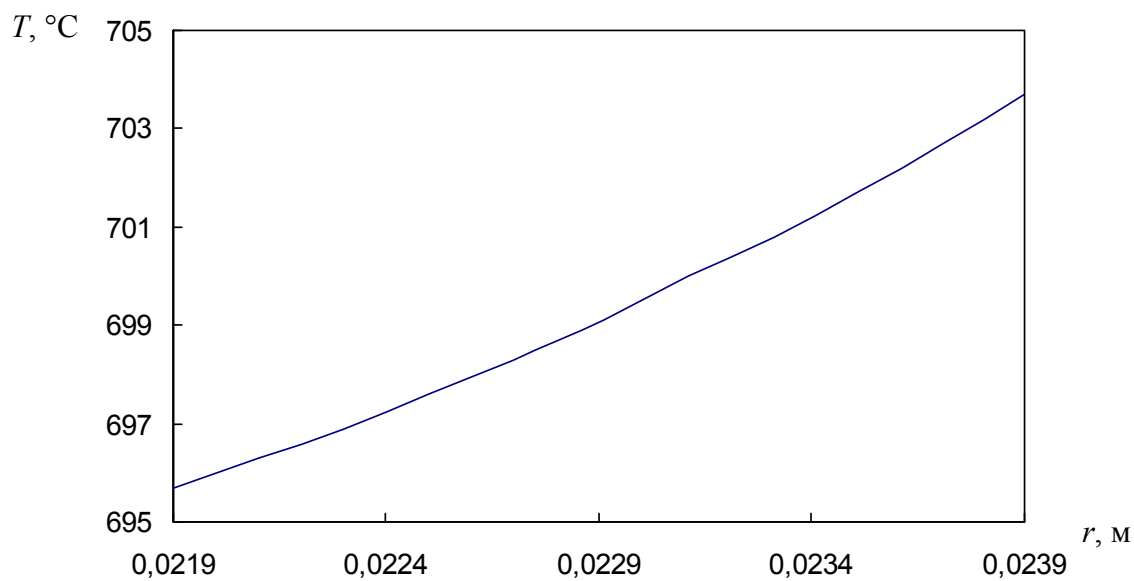


Рис. 10. Зависимость температуры материала термочувствительного элемента от координаты r в момент времени $t = 16,14 \text{ с}$ при одностороннем нагревании и $k = 10 \text{ °C/с}$, $w = 0,5 \text{ м/с}$

В таблицах 1 и 3 представлены значения времени до разрушения термочувствительного элемента при двухстороннем и одностороннем нагревании соответственно. Из таблиц 1 и 3 видно, что время до разрушения термочувствительного элемента уменьшается с увеличением темпа нагрева теплоносителя и скорости обтекания его потоком. Время до разрушения термочувствительного элемента при двухстороннем нагревании меньше, чем при одностороннем нагревании, при одних и тех же параметрах теплоносителя.

В таблицах 2 и 4 приведена температура натрия в момент разрушения термочувствительного элемента при двухстороннем и одностороннем нагревании соответственно. Из таблиц 2, 4 видно, что температура потока в момент разрушения не превышает 713 °С при двустороннем нагревании стенки и 740 °С при одностороннем нагревании.

Таблица 1

Время до разрушения термочувствительного элемента при двухстороннем нагревании в зависимости от темпа нагрева и скорости теплоносителя, с

$k, \text{ }^{\circ}\text{C/c}$ $w, \text{ м/с}$	20	10	5
1	7,53	14,51	28,46
0,5	7,64	14,62	28,57

Таблица 2

Температура потока натрия в момент разрушения термочувствительного элемента при двухстороннем нагревании в зависимости от темпа нагрева и скорости теплоносителя, °С

$k, \text{ }^{\circ}\text{C/c}$ $w, \text{ м/с}$	20	10	5
1	710,6	705,1	702,3
0,5	712,8	706,2	702,9

Таблица 3

Время до разрушения термочувствительного элемента при одностороннем нагревании в зависимости от темпа нагрева и скорости теплоносителя, с

$k, \text{ }^{\circ}\text{C/c}$ $w, \text{ м/с}$	20	10	5
1	8,59	15,75	29,75
0,5	8,93	16,14	30,16

Таблица 4

Температура потока натрия в момент разрушения термочувствительного элемента при одностороннем нагревании в зависимости от темпа нагрева и скорости теплоносителя, °С

$w, \text{ м/с}$ \ $k, \text{ }^\circ\text{С/с}$	20	10	5
1	731,8	717,5	708,8
0,5	738,6	721,4	710,8

Выполнен тепловой и прочностной расчет состояния термочувствительного элемента в виде втулки макетного образца, испытанного на рабочем участке натриевого стенда, при переменном темпе роста температуры теплоносителя.

На рис. 11 представлена зависимость температуры материала термочувствительного элемента от координаты r перед разрушением при двухстороннем нагревании и переменном темпе нагрева теплоносителя. Температуры на внешней и внутренней поверхностях термочувствительного элемента отличаются не более чем на 1,4 °С.

Время до разрушения термочувствительного элемента, рассчитанное по программе ТВ, в данном варианте составило 21,63 с, что на 9 % меньше экспериментального значения.

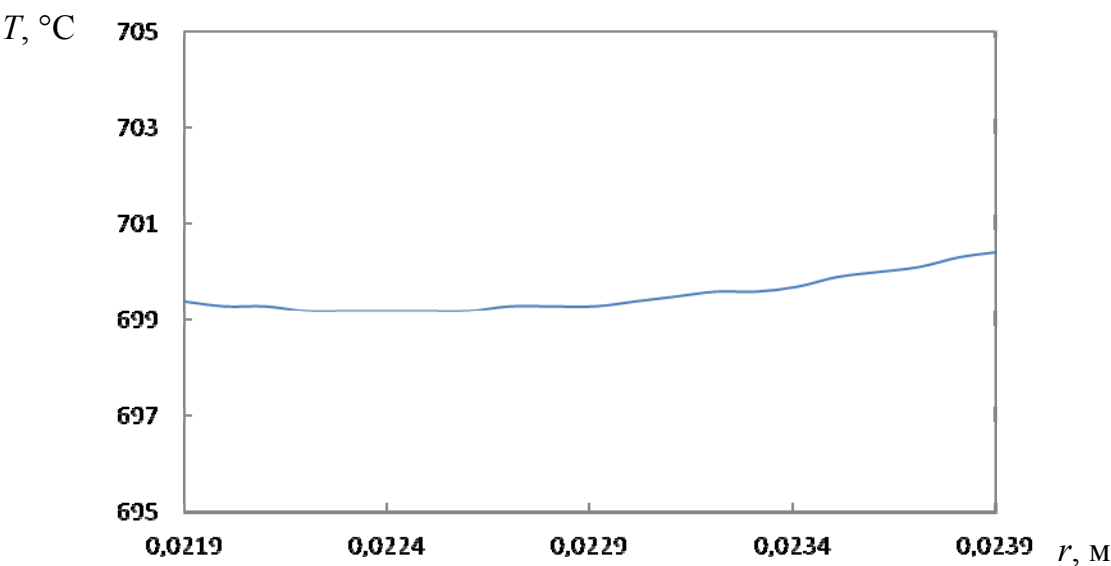


Рис. 11. Зависимость температуры материала термочувствительного элемента от координаты r в момент времени $t = 21,63$ с при двухстороннем нагревании и переменном темпе нагрева теплоносителя

Заключение

По специально разработанной программе ТВ проведен тепловой и прочностной расчет состояния цилиндрического термочувствительного элемента макета срабатывающего устройства температурного принципа действия. Показано, что в диапазоне скорости потока 0,5–1 м/с и темпе роста температуры потока натрия 5–20 °С/с время до разрушения термочувствительного элемента при двустороннем нагреве стенки меньше 29 с, а температура потока в момент разрушения не превышает 713 °С. При одностороннем нагреве время до разрушения термочувствительного элемента не превышает 30,2 с, а температура потока – 740 °С.

Выполнен тепловой и прочностной расчет состояния термочувствительного элемента в виде втулки макетного образца, испытанного на рабочем участке натриевого стенда, при переменном темпе роста температуры теплоносителя. Время до разрушения термочувствительного элемента, рассчитанное по программе ТВ, составило 21,63 с, что на 9 % меньше экспериментального значения.

Список литературы

1. Ионайтис Р.Р., Шведов Н.Л. Прямодействующая аварийная защита // Атомная техника за рубежом, 1988. – №1. – С. 10-16.
2. Bagdasarov Yu.E., Buksha Yu.K., Vosnesensky R.M., e.g. Development of passive safety devices for sodium-cooled fast reactors // Sodium Cooled Fast Reactor Safety: Proc. of an International Topical Meeting. – Obninsk, Russia, October 3–7, 1994. – Obninsk, 1994. – Vol. 4. – pp. 6/51–6/63.
3. Вознесенский Р.М., Егоров В.С., Лисица В.Г. и др. Разработка и изучение характеристик пассивного устройства аварийной защиты для быстрого реактора, срабатывающего на нескольких физических эффектах по превышению температуры выходящего из активной зоны натрия: Препринт ФЭИ-2549, Обнинск, 1996. – 27 с.
4. Вьюнников Н.В., Вознесенский Р.М., Габрианович Б.Н. Разработка и экспериментальное исследование сборок ПАЗ с гидравлически взвешенным стержнем для быстрых реакторов // Сборник трудов «Гидродинамика и безопасность ЯЭУ». Обнинск: ГНЦ РФ – ФЭИ? 1999. – Т. 2. – Раздел 2.11. – С. 319-372.
5. Самарский А.А. Теория разностных схем. – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1983. – 616 с.
6. Тимошенко С.П., Гудьер Дж. Теория упругости: Пер. с англ. / Под ред. Г.С. Шапиро. 2-е изд. – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1979. – 560 с.
7. Дарков А.В. Шпиро Г.С. Сопротивление материалов. Изд. 3-е. – М.: Высшая школа, 1969. – 734 с.

Подписано к печати 21.11.2017 г.
Формат 60×84 ¹/₁₆. Усл. п. л. 0,6. Уч.-изд. л. 0,8.
Тираж 32 экз. Заказ № 317

Отпечатано в ОНТИ методом прямого репродуцирования с оригинала авторов.
249033, Обнинск Калужской обл., пл. Бондаренко, 1.
ГНЦ РФ – Физико-энергетический институт имени А.И. Лейпунского.