

13. Бессонова В. П., Вміст важких металів у листі дерев і чагарників в умовах техногенного забруднення різного походження[Текст] / В. П. Бессонова, І. А. Зайцева // Питання біоіндикації та екології. – Запоріжжя: ЗНУ, 2008. – Вип. 13, № 2. – С. 62–77.

14. Якуба М. С. Вміст важких металів у компонентах поркових деревних угруповань м. Дніпропетровськ[Текст] / М. С. Якуба // Питанні степового лісознавства та рекультивациі земель. – Дн-ськ: ДНУ. – 2011. – Вип. 40. - С.76-81.

15. Якуба М. С., Топологічні особливості накопичення важких металів у підстильці та опаді штучних насаджень Присамарья Дніпровського[Текст] / М. С. Якуба // Екологія та ноосферологія. – 2008. – Т. 19. № 3-4. – С. 67-76.

*Рекомендовано до публікації д.т.н. Колесником В.Є.
Надійшла до редакції 01.10.2012*

УДК 519.6

© Н.Н. Беляев, А.В. Берлов, А.И. Губин

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОГРЕВА КОРПУСА ПЕРВОЙ СТУПЕНИ РАКЕТЫ РС-22 ПРИ ИНИЦИИРОВАННОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

Построена математическая модель прогрева корпуса первой ступени межконтинентальной стратегической ракеты РС-22. Расчет основан на применении структурного метода для решения задачи теплопроводности в составных конструкциях. Определено время прогрева корпуса ракеты до воспламенения твердого топлива.

Побудована математична модель прогріву корпусу першої ступені міжконтинентальної стратегічної ракети РС-22. Розрахунок ґрунтується на використанні структурного методу для розв'язання задачі теплопровідності в складених конструкціях. Визначений час прогріву корпусу ракети до запалювання твердого палива.

The mathematical model of warming up of corps the first stage of the intercontinental strategic rocket RS-22 is built. A calculation is based on application of structural method for the decision of task of heat conductivity in component constructions. Time of warming up of corps rocket to the self-ignition of hard fuel is found.

На Павлоградском химическом заводе (ПХЗ) хранится твердое топливо межконтинентальной баллистической ракеты РС-22 (рис.1).

Данная ракета являлась трехступенчатой и старт ее осуществлялся с железнодорожной платформы (рис.2). Наличие твердого ракетного топлива (ТРТ) на территории ПХЗ создает угрозу интенсивного загрязнения окружающей среды в случае аварийной ситуации на объекте [1,2]. Возгорание топлива, находящегося на хранении, возможно в случае внешнего воздействия (теракт, авария). Представляет большой практический интерес прогноз возможного загрязнения атмосферы и масштаба поражения при горении данного топлива [1-3].

Цель и задачи исследований. В настоящей работе рассматривается первый этап решения этой сложной задачи – расчет времени возгорания твердого ракетного топлива (ТРТ) при инициированном воздействии на корпус ракеты (рис.1).

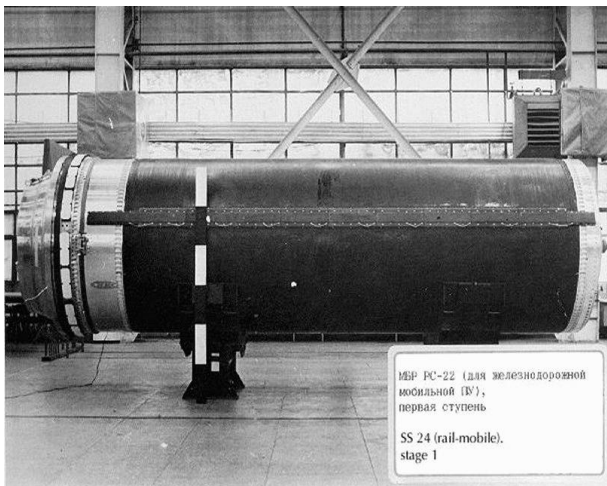


Рис. 1. I ступень ракеты РС-22

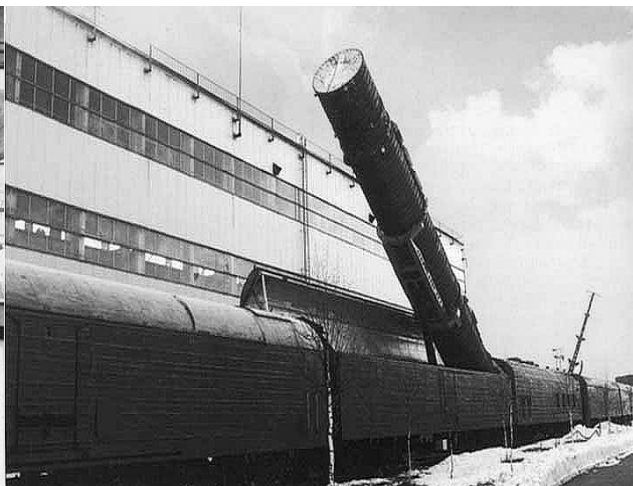


Рис. 2. Постановка РС-22 в боевое положение

Будем считать, что в результате внешнего воздействия вблизи корпуса первой ступени РС-22 (рис.1) появился источник возгорания. Ставится задача расчета теплового прогрева корпуса ракеты с целью определения времени, после которого начнется горение топлива.

Анализ научных публикаций показал отсутствие исследований по данному направлению.

Изложение основного материала исследований. Поскольку рассматривается ситуация инициированного теплового воздействия на корпус ракеты, то будем считать, что источник выделения тепла (например горящий материал) находится максимально близко к корпусу.

Корпус I ступени ракеты РС-22, внутри которого находится ТРТ представляет собой многослойную составную конструкцию (рис.3). Толщины слоев вдоль корпуса различны. При построении модели будем считать, что известны толщины слоев и их теплофизические характеристики. Диаметр корпуса ракеты составляет 2 метра, в связи с чем будем рассматривать стенки корпуса I ступени как систему плоских пластин: толщины слоев во много раз меньше диаметра корпуса ракеты.

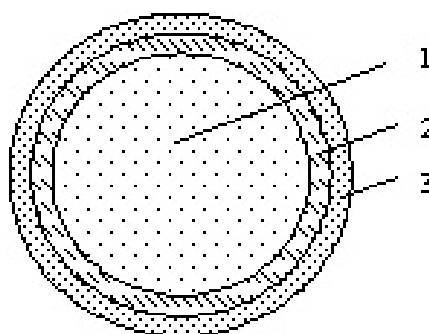


Рис. 3. Расчетная схема конструкции: 1 – ТРТ; 2 – резина; 3 – материал типа "KEVLAR"

Для моделирования процесса прогрева корпуса ракеты будем использовать уравнение теплопроводности и соответствующие начальные и граничные условия. Задача теплопроводности для кусочно-однородного тела, состоящего из m параллельных плоских слоев, учитывая, что для каждого слоя брались локальная система координат ($0_v \leq x_v \leq R_v$), формулируется следующим образом:

$$\beta_v \frac{\partial^2 T_v(x, Fo)}{\partial x^2} = \frac{\partial T_v(x, Fo)}{\partial Fo}, \quad 0 \leq x \leq 1, \quad Fo \geq 0, \quad (1)$$

$$T_v(x, Fo)|_{Fo=0} = \varphi_v(x), \quad v = 1..m-1, \quad (2)$$

$$\begin{cases} \frac{\partial T_1(x, Fo)}{\partial x} \Big|_{x=0} = 0 \\ k \frac{\partial T_m(x, Fo)}{\partial x} \Big|_{x=1} = hBi[f(Fo) - MT_m(x, Fo)] \Big|_{x=1} \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} T_{v+1}(0, Fo) = T_v(1, Fo) \\ \frac{\partial T_v(x, Fo)}{\partial x} \Big|_{x=1} = \mu_{v+1,v} \frac{\partial T_{v+1}(x, Fo)}{\partial x} \Big|_{x=0}, \end{cases} \quad (4)$$

где $\beta_v = \frac{a_v}{a_0} \cdot \frac{R_0^2}{R_v^2}$, $x = \frac{x_v}{R_v}$, $\mu_{v+1,v} = \frac{\lambda_{v+1}}{\lambda_v} \frac{R_v}{R_{v+1}}$, $Fo = \frac{a_0}{R_0^2} \cdot \tau$, $Bi = \frac{\alpha}{\lambda_m} \cdot R_m$,

a_0, R_0 – коэффициент температуропроводности и линейный размер, служащие для обезразмеривания величин, $f(Fo)$ – граничная функция, которая в зависимости от граничных условий является либо температурой (граничное условия первого рода), либо тепловым потоком (граничное условия второго рода). Задавая соответствующие значения параметрам k, h, M , можно получить граничное условие первого, второго или третьего рода.

Температурное поле для ТРТ не рассчитывалось. Тепловой поток на поверхности контакта ТРТ и стенки корпуса полагался равным нулю.

На первом этапе моделирования будем считать, что на стыках слоев реализуются условия идеального теплового контакта.

Метод решения. Решение задач нестационарной теплопроводности в настоящее время возможно численными и аналитическими методами. Преимущества и недостатки этих методов изложены в [4,5]. Применение численных методов может оказаться плодотворным, например, после предварительного аналитического решения соответствующей задачи. Когда решение уже получено в виде рядов, определенных интегралов и т. д., то численное суммирование рядов, вычисление интегралов является для современной ЭВМ достаточно простой задачей.

Методы интегральных преобразований обладают рядом преимуществ по сравнению с другими аналитическими методами (Фурье, функций источников, тепловых потенциалов и др.). Они позволяют получать решение в удобном для численных расчетов виде. Процесс получения аналитического решения при применении простых приемов интегральных преобразований значительно сокращается и упрощается [5].

Для решения поставленной задачи был применен структурный метод, основанный на интегральном преобразовании Лапласа, который получил развитие в работах [6-8], применительно к решению задач теплопроводности для многослойных тел.

Суть структурного метода состоит в следующем. Применяя к (1) интегральное преобразование Лапласа по переменной Fo , получим

$$\frac{d^2 \bar{T}_v(x, p)}{dx^2} = \frac{p}{\beta_v} \bar{T}_v(x, p) + \bar{z}_v(x, p), \quad (5)$$

$\bar{z}_v(x, p) = -\varphi_v(x)$, где p – переменная преобразования Лапласа.

Интеграл (5) можно записать в виде:

$$\bar{T}_v(x, p) = C_v ch \sqrt{\frac{p}{\beta_v}} x + D_v sh \sqrt{\frac{p}{\beta_v}} x + \bar{z}_v^*(x, p), \quad (6)$$

где $\bar{z}_v^*(x, p)$ – частное решение неоднородного уравнения (5); C_v, D_v – константы интегрирования, определяемые из условий (3), (4), записанных в поле изображений.

Согласно теории линейных дифференциальных уравнений, решение задачи (1)–(4) представимо в виде суммы частных решений (принцип суперпозиции), которые формируются под влиянием следующих компонент воздействия: внешних граничных условий, условий на стыках слоев, начального распределения температуры и взаимного теплового влияния слоев. Решение линейных задач теории теплопроводности в соответствии с теоремой разложения о решении задач нестационарной теплопроводности операционным методом для многослойных плоских тел позволяет избежать недостатков других аналитических методов [4,5].

Последовательно исключая константы интегрирования C_{v-1}, D_{v-1} , записанных в поле изображений, получим:

$$\begin{aligned} \bar{T}_v(x, p) = & C_1 \left[l_v ch \sqrt{\frac{p}{\beta_v}} x + \chi_{v-1, v} l_v^* sh \sqrt{\frac{p}{\beta_v}} x \right] + D_1 \left[\rho_v ch \sqrt{\frac{p}{\beta_v}} x + \chi_{v-1, v} \rho_v^* sh \sqrt{\frac{p}{\beta_v}} x \right] + \\ & + \bar{F}_{v-1, v}(p) ch \sqrt{\frac{p}{\beta_v}} x + \bar{F}_{v-1, v}^*(p) sh \sqrt{\frac{p}{\beta_v}} x, \end{aligned} \quad (7)$$

где $l_v, l_v^*, \rho_v, \rho_v^*$ – функции $(p, \beta_{v-1}, A_{v-1, v})$; $\bar{F}_{v-1, v}(p), \bar{F}_{v-1, v}^*(p)$ – функции $(p, \beta_{v-1, v}, z_v^*, A_{v-1, v}, \omega_{v-1, v}^*)$; $\bar{F}_{1,2}(p) = \bar{z}_1^*(1, p) - \bar{z}_2^*(0, p) + \bar{z}_1^*(1, p)$;

$$\bar{F}_{1,2}^*(p) = \mu_{1,2} \left\{ \begin{aligned} & \bar{z}_1^*(1, p) - \mu_{1,2} \bar{z}_1^*(0, p) - W_{1,2}^*(1, p) - \\ & - A_{1,2} \left[p \bar{z}_1^*(1, p) - \varphi_v(0) \right] \end{aligned} \right\};$$

$$\bar{F}_{v-1,v}(p) = \bar{F}_{v-2,v-1}(p) \left[ch \sqrt{\frac{p}{\beta_{v-1}}} + \sqrt{\frac{p}{\beta_{v-1}}} sh \sqrt{\frac{p}{\beta_{v-1}}} \right] + \bar{F}_{v-2,v-1}^*(p) \left[sh \sqrt{\frac{p}{\beta_{v-1}}} + \sqrt{\frac{p}{\beta_{v-1}}} ch \sqrt{\frac{p}{\beta_{v-1}}} \right].$$

Используя условия (3), записанное в поле изображений, получим решение:

$$\bar{T}_v(x, p) = \sum_{l=0}^1 w_{v,r}(x, p) \bar{g}_r(p), \quad (8)$$

$$w_{v,r}(x, p) = \frac{Q_{v,r}(x, p)}{\Psi_m(p)} = \sum_{n=0}^{\infty} \Omega_{n,v}^l(\mu, \varphi) p^n, \quad (9)$$

$$l_v = l_{v-1} \left[ch \sqrt{\frac{p}{\beta_{v-1}}} + \sqrt{\frac{p}{\beta_{v-1}}} sh \sqrt{\frac{p}{\beta_{v-1}}} \right] + \chi_{v-2,v-1} l_{v-1}^* \left[sh \sqrt{\frac{p}{\beta_{v-1}}} + \sqrt{\frac{p}{\beta_{v-1}}} ch \sqrt{\frac{p}{\beta_{v-1}}} \right];$$

$$\rho_v = \rho_{v-1} \left[ch \sqrt{\frac{p}{\beta_{v-1}}} + \sqrt{\frac{p}{\beta_{v-1}}} sh \sqrt{\frac{p}{\beta_{v-1}}} \right] + \chi_{v-2,v-1} \rho_{v-1}^* \left[sh \sqrt{\frac{p}{\beta_{v-1}}} + \sqrt{\frac{p}{\beta_{v-1}}} ch \sqrt{\frac{p}{\beta_{v-1}}} \right];$$

$$\chi_{v-1,v} = \sqrt{\frac{\beta_v}{\beta_{v-1}}} \mu_{v,v-1}; \quad Q_{v,r}(x, p) = \sum_{n=0}^{\infty} \mu_{n,v}^l(x) \cdot p^n; \quad \Psi_m(p) = \sum_{n=0}^{\infty} \varphi_{n,v} \cdot p^n;$$

$$\bar{g}_0(p) = -g_0 Bi_0 \bar{f}_0(p); \quad \bar{g}_1(p) = g_1 Bi \bar{f}_1(p) - \alpha_1 \sqrt{\frac{p}{\beta_m}} \bar{F}_{m,m+1}^*(p) + k Bi M \bar{F}_{m,m+1}(p);$$

$$\Omega_{n,v}^l(\mu, \varphi) = \frac{W_{v,l}(x, 0)}{n!}; \quad \Omega_{0,v}^l(\mu, \varphi) = \frac{\mu_{0,v}^l(x)}{\varphi_{0,v}}, \quad \varphi_{0,v} \neq 0;$$

$$\Omega_{n,v}^l(\mu, \varphi) = \frac{\mu_{n,v}^l(x)}{\varphi_{0,v}} - \sum_{i=1}^n \Omega_{n-i,v}^l(\mu, \varphi) \cdot \frac{\varphi_{i,v}}{\varphi_{0,v}}.$$

Переходя к оригиналам функций, следуя [6-8], получим решение

$$T_v(x, Fo) = \sum_{r=1}^{2m} \left\{ \begin{aligned} & \sum_{n=0}^{\infty} \Omega_n \left[\mu_{n,r}^v(x), \varphi_n \right] \mathfrak{g}_r^{(n)}(Fo) + \\ & + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{g_r(p_k)}{\Psi'(\varphi_n, p_k)} Q[p_k, \mu_{n,r}^v(x)] \times \\ & \times \exp(-\gamma^2 Fo) \end{aligned} \right\} + z_v^*(x, Fo), \quad (10)$$

$$z_v^*(x, Fo) = \sum_{n=0}^{\infty} \beta_v^n \frac{Fo^n}{n!} \varphi_v^{(2n)}(x). \quad (11)$$

В решении (5) каждой компоненте воздействия $g_r(Fo)$ соответствует функция

$$T_{v,r}(x, Fo) = \sum_{n=0}^{\infty} \Omega_n \left[\mu_{n,r}^v(x), \varphi_n \right] \mathfrak{g}_r^{(n)}(Fo) + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\bar{g}_r(p_k)}{\Psi'(\varphi_n, p_k)} Q[\mu_{n,r}^v(x), p_k] \times \exp(-\gamma_k^2 Fo). \quad (12)$$

Функции $T_{v,r}(x, Fo)$ являются простыми структурами решения, соответствующими каждой компоненте воздействия. Функция $T_v(x, Fo)$, удовлетворяющая условиям задачи (1)-(4), является общей структурой решения. Последовательности $\{\mu_{n,r}^v(x)\}$, $\{\varphi_n\}$, $p_k = -\gamma_k^2$, входящие в простые структуры решения – функциональные комплексы, а $\Omega_n[\mu_{n,r}^v(x), \varphi_n]$, $Q[\mu_{n,r}^v(x), p_k]$, $\Psi[\varphi_n, p_k]$ – составные комплексы.

Для построения алгоритма расчета температурного поля m – слойного тела с условиями (1)-(4) необходимо: используя рекуррентные соотношения, вычислить функциональные комплексы $\mu_{n,r}^v(x)$, φ_n , p_k ; вычислить составные комплексы $\Omega_n[\mu_{n,r}^v(x)]$, $Q[\mu_{n,r}^v(x), p_k]$, $\Psi[\varphi_n, p_k]$, $\Psi'[\varphi_n, p_k]$; определить компоненты воздействия и вычислить соответствующие им простые структуры; совокупность простых структур и функций $z_v^*(x, Fo)$ позволяет построить общую структуру решения задачи (5) и тем самым определить температурное поле системы.

Функциональные комплексы $\{\varphi_n\}_0^\infty$, $\{\mu_{n,r}^v(x)\}_0^\infty$, $p_k = -\gamma_k^2$ найдены в результате аналитических преобразований над бесконечными рядами, в которые входят простые комплексы $c_{n,v}$, $c_{n,v}^*$, $b_{n,v}$, $b_{n,v}^*$, $L_{n,v,v-i}$, $L_{n,v,v-i}^*$, $S_{n,v,v-i}$, $S_{n,v,v-i}^*$, $a_{n,v}(x)$, зависящие от геометрических и теплофизических характеристик конструкции.

Рассмотренный метод расчета реализован в виде программы HEATTRANSFER-1 на языке программирования DELPHI.

Результаты параметрических исследований. Разработанная программа была использована для проведения параметрических исследований. Значения толщин стенки корпуса, а также теплофизические характеристики материалов слоев приведены в табл. 1.

Таблица 1

Теплофизические и геометрические параметры материалов слоев конструкции

Материал	δ , мм	λ , Вт/(м·К)	ρ , кг/м ³	c , Дж/(кг·К)
резина	5÷10	0,157	1200	1382
материал типа "KEVLAR"	5÷15	0,04	1440	1420

Был проведен ряд расчетов, в которых варьировались толщины и материалы в соответствии с исследуемым поперечным сечением корпуса I ступени.

В результате решения тепловой задачи рассчитывалось температурное поле в сечении корпуса и оценивалось время достижения температуры воспла-

менения ТРТ (наступление аварийной ситуации). Начальная температура конструкции для расчетов была принята равной $T_0 = 27 \text{ }^\circ\text{C}$.

В расчетах была принята следующая схема: когда температура поверхности со стороны подводимого теплового потока для очередного слоя стенки корпуса достигала температуры начала его разрушения, этот слой исключался и дальнейшие вычисления проводились для количества слоев на единицу меньше.

На рис.4 представлены расчетные данные времени до возгорания ТРТ при различных толщинах стенки корпуса I ступени ракеты РС-22.

Полученные кривые наглядно отражают характер инициированного воздействия на конструкцию. С увеличением подводимого теплового потока ($q = 20 \text{ кВт/м}^2$; $q = 25 \text{ кВт/м}^2$; $q = 30 \text{ кВт/м}^2$) время до полного разрушения стенки корпуса, как для случая с поврежденными слоями, так и для цельной конструкции, очень мало и практически одинаково для различных сечений. При меньших тепловых потоках ($q = 10 \div 20 \text{ кВт/м}^2$) наблюдается значительное изменение в увеличении времени до возникновения аварийной ситуации, в зависимости от варианта сечения корпуса и степени его повреждения.

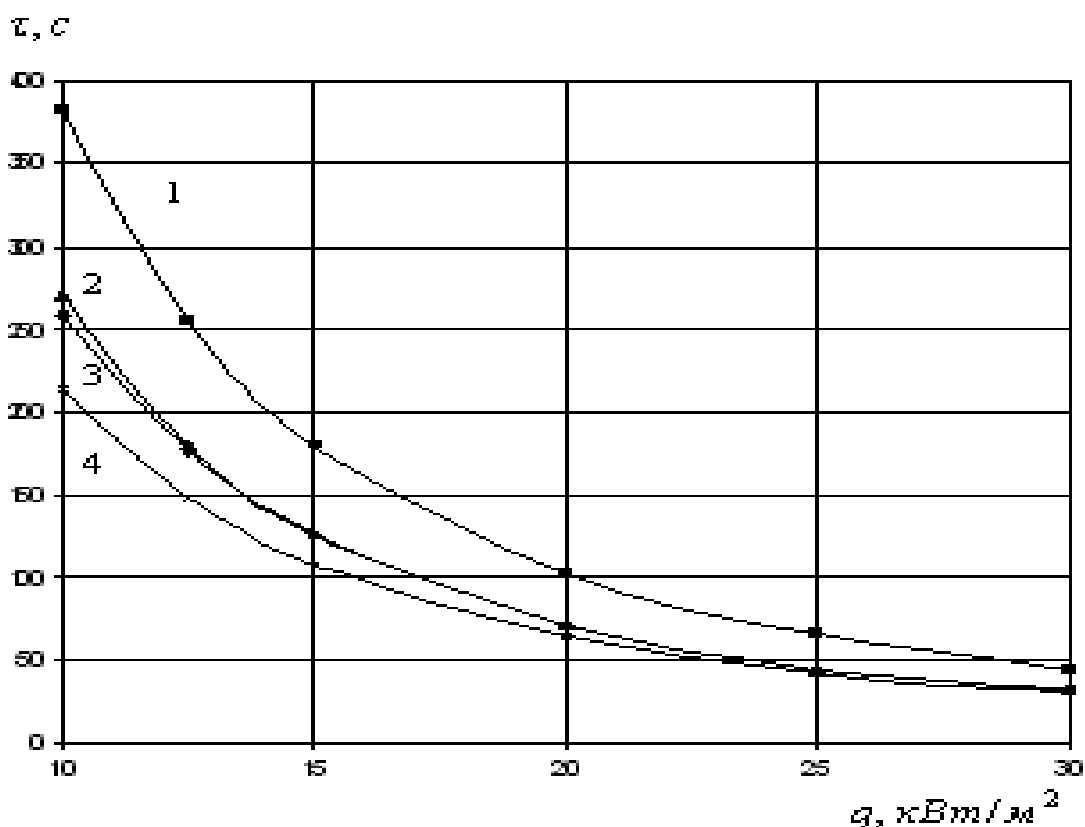


Рис. 4. Время до возгорания ТРТ при различных толщинах стенки корпуса I ступени: 1 – твердая резина (5 мм) + материал типа "KEVLAR" (5 мм) + мягкая резина (5 мм) (неповрежденный корпус); 2 – материал типа "KEVLAR" (5 мм) + мягкая резина (5 мм) (неповрежденный корпус); 3 – материал типа "KEVLAR" (3 мм) + мягкая резина (5 мм) (поврежденный корпус); 4 – материал типа "KEVLAR" (1 мм) + мягкая резина (5 мм) (поврежденный корпус)

На рис.5 приведено изменение температуры во времени на стыке слоев корпуса для случая неповрежденного корпуса. Толщина слоев резины и материала типа "KEVLAR" бралась равной 5 мм.

Вид кривых на рис. 5 отображает принятую расчетную схему. Все изображенные кривые выходят из одной точки, которая соответствует начальной температуре системы. Температура на стыке остается практически неизменной до разрушения внешнего слоя. Затем происходит нагрев и характер кривых меняется. Видна зависимость времени нагрева для различных значений теплового потока, вызванного инициированным воздействием.

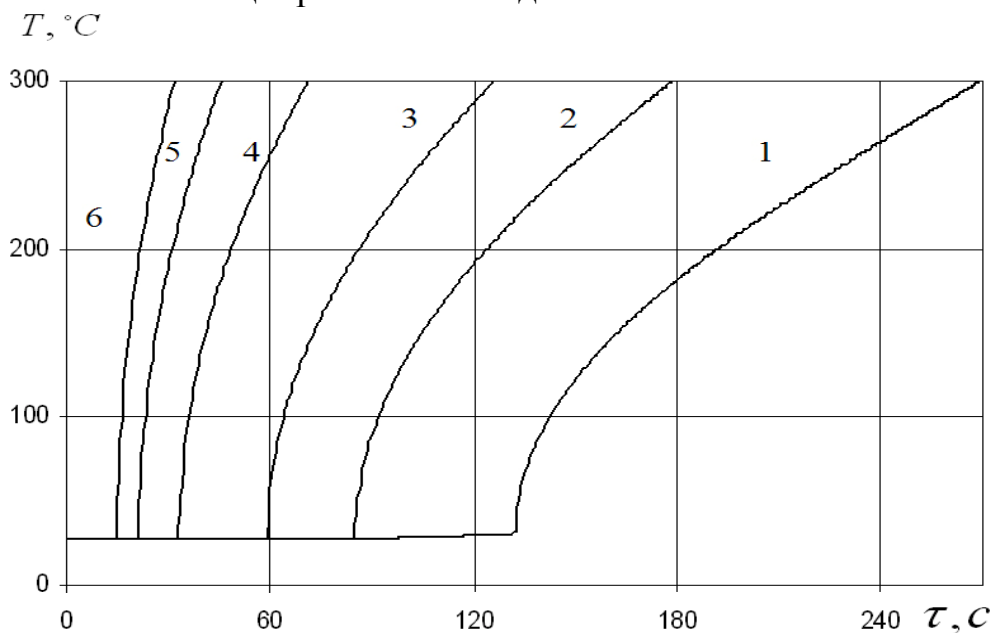


Рис. 5. Распределение температуры на стыке слоев изоляции I ступени ракеты РС-22 (неповрежденный корпус): 1 – $q = 10 \text{ кВт/м}^2$; 2 – $q = 12,5 \text{ кВт/м}^2$; 3 – $q = 15 \text{ кВт/м}^2$; 4 – $q = 20 \text{ кВт/м}^2$; 5 – $q = 25 \text{ кВт/м}^2$; 6 – $q = 30 \text{ кВт/м}^2$

На рис.6 приведено изменение температуры во времени на стыке слоев для случая поврежденного корпуса. Толщины резины и материала типа "KEVLAR" брались равными 5 мм и 3 мм соответственно.

Различие для двух вариантов расчета – неповрежденного и поврежденного корпусов (см. рис.5 и рис. 6) заключается в том, что при поврежденной конструкции прогрев внутреннего слоя корпуса осуществляется интенсивней. Увеличение температуры на стыке слоев к началу разрушения внешнего слоя может достигать порядка 30% от общего повышения температуры до возгорания и разрушения внутреннего слоя.

Таким образом, результаты вычислительного эксперимента показывают, что возгорание топлива может начаться крайне быстро и в случае выхода из строя противопожарной системы создается угроза развития пожара и поражения персонала.

Следует отметить, что при инициированном воздействии (теракт) на корпус ракеты могут использоваться современные портативные лазеры, мощность

которых на данный момент уже достигает 1 Вт, а создаваемая ими плотность теплового потока может превысить расчетные на порядки [9]. Нужно обратить внимание на то, что лазерные устройства четвертого класса, которым является Arctic Spider III, вообще не относятся к разряду потребительских и должны эксплуатироваться только сертифицированными специалистами, в то время как они разрешены для свободной продажи любому желающему.

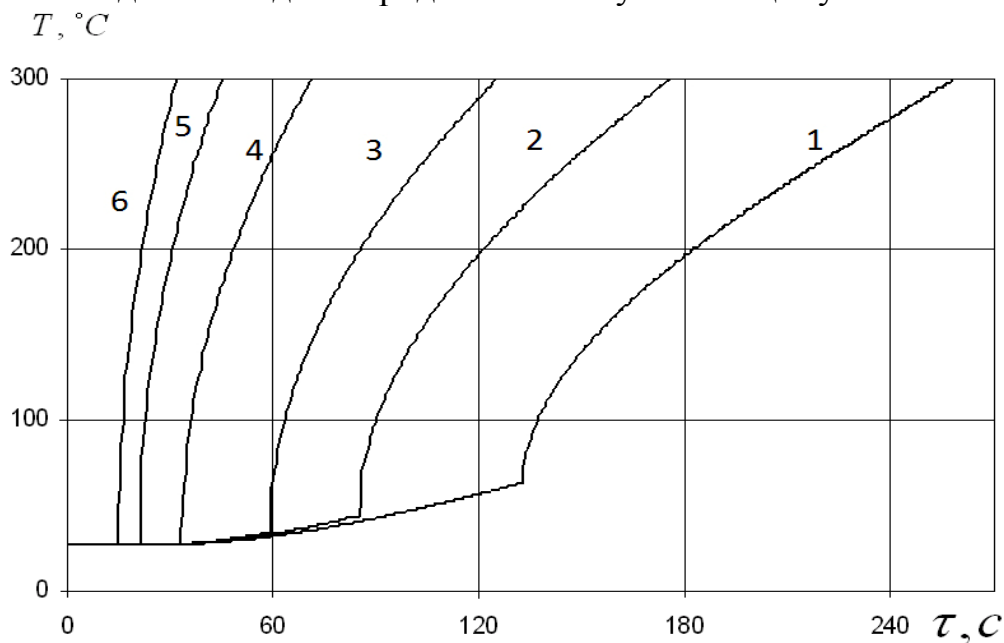


Рис. 6. Распределение температуры на стыке слоев изоляции I ступени ракеты РС-22 (поврежденный корпус): 1 – $q = 10 \text{ кВт/м}^2$; 2 – $q = 12,5 \text{ кВт/м}^2$; 3 – $q = 15 \text{ кВт/м}^2$; 4 – $q = 20 \text{ кВт/м}^2$; 5 – $q = 25 \text{ кВт/м}^2$; 6 – $q = 30 \text{ кВт/м}^2$.

Выводы. Разработана методика расчета прогрева корпуса I ступени ракеты РС-22 при инициированном тепловом воздействии. Методика расчета основывается на аналитическом решении задачи теплопроводности для многослойного тела.

На основе разработанной модели проведен ряд вычислительных экспериментов. Дальнейшую разработку модели следует проводить в направлении учета в ней условий неидеального теплового контакта на стыках слоев конструкций.

Список литературы

1. Антошкина Л. И. Оценка экологического риска при авариях с химически опасными веществами / Л. И. Антошкина, Н. Н. Беляев, Е. Ю. Гунько – Днепропетровск.: Наука и образование, 2008. – 132 с.
2. Згуровский М. З. Численное моделирование распространения загрязнения в окружающей среде / М. З. Згуровский, В. В. Скопецкий, В. К. Хрущ, Н. Н. Беляев. – К.: Наукова думка, 1997. – 367 с.
3. Швыдько П. В. Экологические последствия утилизации твердого ракетного топлива / П. В. Швыдько // Науковий вісник НГУ. – 2009. – № 8. – С. 87-91.
4. Карташов Э. М. Аналитические методы в теории теплопроводности твердых тел. Э. М. Карташов. – М.: Высшая школа, 2001. – 540 с.

5. Кудинов В. А. Аналитические решения задач тепломассопереноса и термоупругости для многослойных конструкций / В. А. Кудинов, Э. М. Карташов, В. В. Калашников – М.: Высш. шк., 2005. – 430 с.

6. Веселовський В.Б. Розрахунок температурних полів складених конструкцій / В.Б. Веселовський, О.В. Берлов // Вісник ТДТУ. – Тернопіль. – Вип.№1, 2008. – С.161-170.

7. Веселовский В.Б. Структурные решения задач нестационарной теплопроводности для составных теплозащитных покрытий / В.Б. Веселовский, А.В. Берлов // Зб. Наук. пр. ДНУ. – Д.: Диференціальні рівняння та їх застосування. 2005. – С.62-72.

8. Берлов А.В. Решение структурным методом задач теплопроводности для составных элементов конструкций при воздействии электромагнитных полей / А.В. Берлов // Зб. Наук. пр. ДНУ. – Д.: Диференціальні рівняння та їх застосування. 2006. – С.73-81.

9. Мощнейший портативный лазер Wicked Lasers Arctic Spider III [Электрон. ресурс] / Режим доступа: <http://xage.ru/comments.php?id=15873>.

*Рекомендовано до публікації д.т.н.Голіньком В.І.
Надійшла до редакції 26.10.2012*

УДК 625.35

© Н.Н. Беляев, Е.К. Нагорная

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ВЕРТИКАЛЬНОГО ОТСТОЙНИКА НА БАЗЕ 3D CFD МОДЕЛИ

Разработана 3D CFD модель для расчета вертикального отстойника. Модель основывается на численном интегрировании уравнения конвективно-диффузионного переноса примеси и модели потенциального течения. Приводятся результаты вычислительного эксперимента.

Розроблено 3D CFD модель для розрахунку вертикального відстійника. Модель базується на чисельному інтегруванні рівняння конвективно-дифузійного переносу домішки та моделі потенціальної течії. Наведено результати чисельного експерименту.

3D CFD model developed to calculate the vertical settlers. The model is based on numerical simulations of convection-diffusion transport of impurities and the potential flow model/ The results of numerical experiments.

Введение. Канализационные отстойники (первичные, вторичные) являются одним из важнейших элементов в системе очистки сточных вод. Данные сооружения определяют, в значительной степени, эффективность функционирования комплекса очистных сооружений в целом. Кроме этого, необходимо учитывать, что после вторичных отстойников сточные воды, содержащие определенную долю взвешенных веществ, сбрасываются в водоем. Поэтому обеспечение эффективной очистки воды на вторичных отстойниках является важнейшим средством защиты поверхностных вод от загрязнения взвешенными веществами.

При разработке систем очистки воды для малых предприятий в настоящее время широко применяются вертикальные отстойники. Оценка эффективности работы этих отстойников на стадии проектирования комплекса очистных сооружений – сложная и ответственная задача. Оперативное решение этой задачи, когда рассматриваются различные варианты отстойников, варьируется их кон-