

Так резервы развития системы управления строительными отходами составляют от 79,2 % в 1995 г. до 27,1 % 2015 г., а подсистем – от 83,65 в 1995 г. до 3,9 % в 2015 г.

ИСПОЛЬЗОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Постановление Правительства Москвы № 469-ПП от 25 июня 2002 г. «О порядке обращения с отходами строительства и сноса в г. Москве». – М., 2002.
2. ГОСТ 30775-2001. Ресурсосбережения. Обращение с отходами. Классификация, идентификация и кодирование отходов. Основные положения. – М., 2001.
3. **Олейник П. П.** Организация системы переработки строительных отходов / П. П. Олейник, С. П. Олейник / Монография. – М. : МГСУ, 2009. – 251 с.
4. **Олейник С. П.** Единая система переработки строительных отходов / С. П. Олейник. – М. : Изд-во СвР-АРГУС, 2006.
5. **Колосков В.Н.** Разборка жилых зданий и переработка их конструкций и материалов для повторного использования / В. Н. Колосков, П. П. Олейник, А. Ф. Тихонов. – М. : Изд-во АСВ, 2004.
6. **Аврамчук Е. Ф.** Технология системного моделирования / Е. Ф. Аврамчук, А. А. Вавилов и др. – М. : Машиностроение, 1988.

УДК 519.6

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВОЗГОРАНИЯ ТВЕРДОГО ТОПЛИВА В КОРПУСЕ РАКЕТЫ

*Н. Н. Беляев**, д. т. н., проф., *А. В. Берлов***, инж., *А. И. Губин***, к. т. н.

** Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта
имени академика В. Лазаряна*

*** Днепропетровский национальный университет имени Олеся Гончара*

Ключевые слова: процесс возгорания, твердое ракетное топливо, математическое моделирование, аварийная ситуация

Постановка проблемы. На территории Павлоградского химического завода (ПХЗ) хранится твердое ракетное топливо (ТРТ) ракетной системы РС-22 (рис. 1), которое представляет собой угрозу экологической безопасности региона, поскольку в случае техногенной аварии в атмосферу поступит огромное количество токсичных веществ. Спецификой размещения топлива на складах является то, что корпуса, содержащие топливо, размещаются вблизи друг друга (рис. 2). Это значит, что в случае чрезвычайной ситуации, при которой возможно возгорание одного топливного блока, огонь перекинется на соседние топливные блоки. В связи с этим возникает важная проблема по прогнозу возгорания близлежащих топливных блоков в случае развития аварийной ситуации по типу «эффект домино».

Анализ публикаций. Наличие ТРТ на территории Павлоградского химического завода создает угрозу интенсивного загрязнения окружающей среды при чрезвычайной ситуации на объекте [1; 5]. Возгорание топлива, находящегося на хранении, возможно в случае внешнего воздействия (теракт, авария). Большой практический интерес представляет прогноз возможного загрязнения атмосферы и масштаба поражения при горении данного топлива, а также, определение риска возгорания твердого топлива в хранилище [1; 5; 8].

Цель статьи. Совершенно очевидно, что прогноз возгорания близлежащих топливных блоков в случае развития аварийной ситуации по типу «эффект домино» может быть достаточно быстро выполнен с помощью метода математического моделирования. Поэтому цель данной работы заключалась в разработке математической модели для оценки времени возгорания соседних блоков с твердым ракетным топливом, если произошло инициированное возгорание первого блока с топливом.



Рис. 1. Межконтинентальная баллистическая ракета РС-22 в железнодорожной мобильной пусковой установке (ЖМПУ)

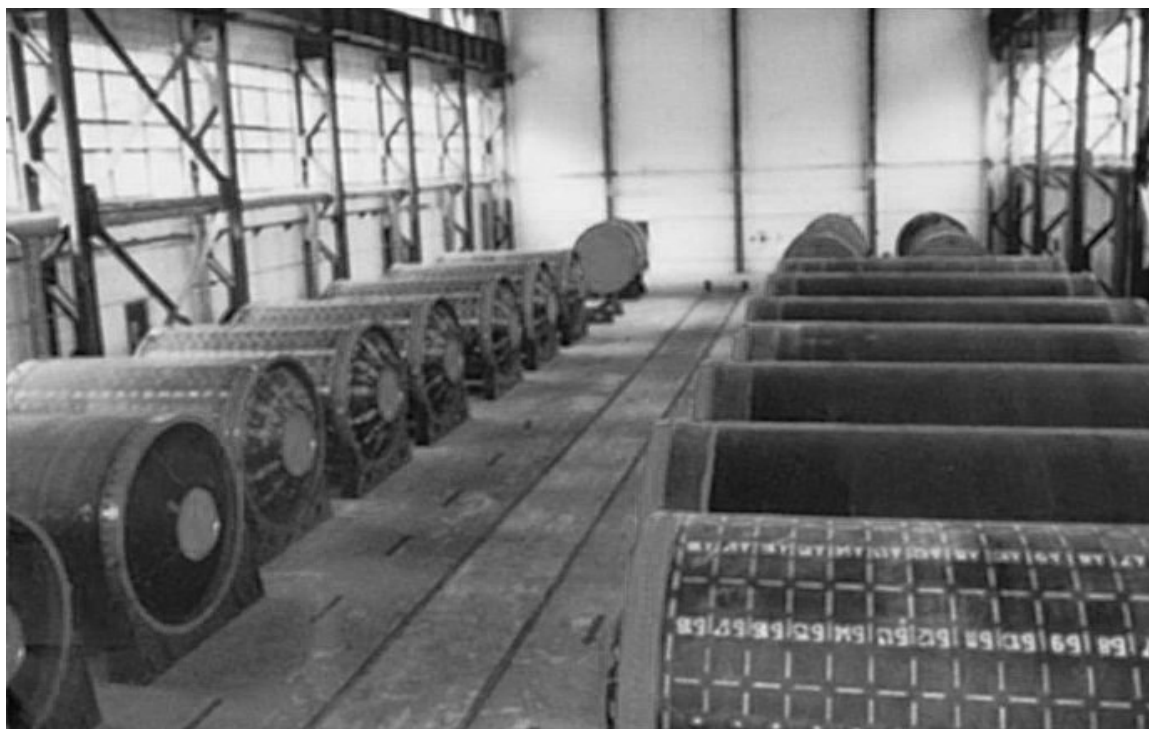


Рис. 2. Размещение твердотопливных блоков I ступени РС-22 на складе

Математическая модель. Решение поставленной задачи осуществлялось в два этапа.

На I этапе определялось время, при котором произойдет возгорание первого блока твердого ракетного топлива первой ступени РС-22 (рис. 3).

На II этапе рассматривалась задача о возгорании соседнего блока, который находится рядом с горящим.



Рис. 3. I ступень межконтинентальной баллистической ракеты РС-22

При проведении моделирования рассматривалась следующая схема.

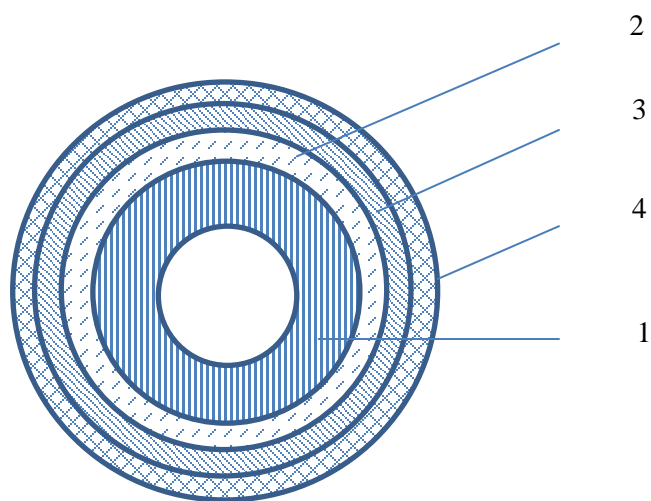


Рис. 4. Расчетная схема конструкции: 1 – ТРТ; 2 – капрон; 3 – резина; 4 – материал типа KEVLAR

Рассматривается многослойная конструкция, на которой происходит инициированное воздействие тепловым потоком величиной q . Внутренний слой 1 – слой твердого ракетного топлива; 2 – слой капрона; 3 – резина; внешний слой корпуса топливного блока 4 – материала типа KEVLAR. Принималось, что возгорание ТРТ происходит, если его температура достигла $t = 240^{\circ}\text{C}$.

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 бралась локальная система координат $(0_v \leq x_v \leq R_v)$, формулируется следующим образом:

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

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

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

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

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 теплопроводности и линейный размер, служащие для обезразмеривания величин, $f(Fo)$ – граничная функция, которая в зависимости от граничных условий является либо температурой (граничное условие первого рода), либо тепловым потоком (граничное условие 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 [6; 7]. 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 современных персональных компьютеров 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 [7].

Для решения поставленной задачи был применен структурный метод, основанный на интегральном преобразовании Лапласа, который получил развитие в работах [2–4], применительно к решению задач теплопроводности для многослойных тел.

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

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

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

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) представим 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 [6; 7].

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:

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

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

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

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

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

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

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

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

Переходя к оригиналам функций, следуя [2 – 4], получим решение:

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

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

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

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

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 $\{\mu_{n,r}^v(x)\}$, $\{\phi_n\}$, $p_k = -\gamma_k^2$, входящие в простые структуры решения, – функциональные комплексы, а $\Omega_n[\mu_{n,r}^v(x), \phi_n]$, $Q[\mu_{n,r}^v(x), p_k]$, $\Psi[\phi_n, p_k]$ – 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 $\Omega_n[\mu_{n,r}^v(x)]$, $Q[\mu_{n,r}^v(x), p_k]$, $\Psi[\phi_n, p_k]$, $\Psi'[\phi_n, p_k]$; 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 $\{\phi_n\}_0^{\infty}$, $\{\mu_{n,r}^v(x)\}_0^{\infty}$, $p_k = -\gamma_k^2$ 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.

Практическая реализация. Разработанная математическая модель была использована для расчета возгорания ТРТ при различной интенсивности внешнего удельного теплового потока q (первый этап расчета). 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.

Значения толщин стенки корпуса, а также теплофизические характеристики материалов слоев приведены в таблице 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)
капрон	2 ÷ 4	0,27	1 140	2 100
резина	2 ÷ 4	0,157	1 200	1 382
материал типа KEVLAR	6 ÷ 12	0,04	1 440	1 420

Был проведен ряд расчетов, в которых варьировались толщины материалов слоев в соответствии со схемой конструкции поперечного сечения корпуса I ступени (рис. 4). Результаты расчета представлены в таблице 2.

В результате решения тепловой задачи рассчитывалось температурное поле в сечении корпуса и оценивалось время достижения температуры воспламенения ТРТ.

Как видно из таблицы 2, при внешнем удельном тепловом потоке порядка 40 кВт/м^2 возгорание твердого ракетного топлива I ступени произойдет примерно через 1,7 минуты, т. е. достаточно быстро.

На втором этапе выполнялся расчет прогрева корпуса соседнего топливного блока, который располагается рядом с горящим. Эмиссия тепла при горении ТРТ составляет величину $Q_{\Sigma} = 264920 \text{ кДж/сек}$. При расчетах полагалось, что на соседний корпус поступает 1 % от величины данного потока. Результаты расчета прогрева корпуса соседнего топливного блока представлены в таблице 3.

Таблица 2

Время до возгорания материалов слоев конструкции при различных значениях внешнего удельного теплового потока q

Слой	Материал типа KEVLAR	Резина	Капрон	ТРТ
Время разрушения	20 кВт/м^2			
	33 с	71 с	112 с	419 с
	25 кВт/м^2			
	21 с	45 с	72 с	270 с
	30 кВт/м^2			
	15 с	31 с	50 с	188 с
	35 кВт/м^2			
	11 с	23 с	37 с	138 с
	40 кВт/м^2			
8 с	18 с	29 с	106 с	

Таблица 3

Время до возгорания корпуса соседнего топливного блока по слоям конструкции

Слой	Материал типа KEVLAR	Резина	Капрон	ТРТ
Время разрушения	0,3 с	0,5 с	0,84 с	2,41 с

Для удобства анализа здесь показано время, в течение которого произойдет разрушение того или иного слоя конструкции корпуса. Как видно из таблицы 3, возгорание топлива в соседней ступени в случае чрезвычайной ситуации произойдет примерно через несколько секунд, что обусловлено мощнейшим тепловым воздействием на корпус соседнего топливного блока. Однако если тепловой поток будет больше принятой величины (как отмечено выше, в расчете было принято 1 % от общего теплового потока при горении твердого ракетного топлива), то совершенно очевидно, что соседний блок загорится практически мгновенно и в хранилище пойдет «цепная реакция» возгорания всех имеющихся блоков с твердым ракетным топливом. Это значит, что при чрезвычайной ситуации, при которой произойдет инициированный поджог только одного блока с твердым ракетным топливом, в течение короткого промежутка времени вспыхнут все остальные, причем остановить процесс горения данного топлива невозможно. При развитии чрезвычайной ситуации в таком направлении в

атмосферу будет поступать огромное количество токсичных веществ – продуктов горения ТРТ. Следует отметить, что опасные по величине тепловые потоки могут быть созданы современными портативными лазерами, такими как, например, лазер Wicked Lasers Arctic Spider III (рис. 5).



Рис. 5. Фото портативного лазера Wicked Lasers Arctic Spider III

На рисунке 5 представлен внешний вид такого лазера [9], причем его габариты составляют порядка $228 \times 35,8$ мм, т. е. такой прибор можно незаметно доставить на объект. Однако можно приобрести и более мощные лазеры.

Выводы. Разработана методика расчета прогрева корпуса I ступени ракеты РС-22 при инициированном тепловом воздействии в хранилище ТРТ, а также соседних блоков и возникновения аварийной ситуации по типу «эффект домино». Методика расчета основывается на аналитическом решении задачи теплопроводности для многослойной конструкции.

ИСПОЛЬЗОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Антошкина Л. И. Оценка экологического риска при авариях с химически опасными веществами / Л. И. Антошкина, Н. Н. Беляев, Е. Ю. Гунько. – Д. : Наука и образование, 2008. – 136 с.
2. Берлов А. В. Решение структурным методом задач теплопроводности для составных элементов конструкций при воздействии электромагнитных полей / А. В. Берлов // Диференціальні рівняння та їх застосування. – 2006. – № 1. – С. 73 – 81.
3. Веселовський В. Б. Розрахунок температурних полів складених конструкцій / В. Б. Веселовський, О. В. Берлов // Вісник ТДТУ. – 2008. – Вип. 1. – С. 161 – 170.
4. Веселовський В. Б. Структурные решения задач нестационарной теплопроводности для составных теплозащитных покрытий / В. Б. Веселовский, А. В. Берлов // Диференціальні рівняння та їх застосування. – 2005. – № 1. – С. 62 – 72.
5. 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.
6. Карташов Э. М. Аналитические методы в теории теплопроводности твердых тел. Карташов Э. М. – М. : Высшая школа, 2001. – 540 с.
7. Кудинов В. А. Аналитические решения задач тепломассопереноса и термоупругости для многослойных конструкций / В. А. Кудинов, Э. М. Карташов, В. В. Калашников. – М. : Высшая школа, 2005. – 430 с.
8. Швыдько П. В. Экологические последствия утилизации твердого ракетного топлива / П. В. Швыдько // Науковий вісник НГУ. – 2009. – № 8. – С. 87 – 91.
9. Wicked Lasers Arctic Spider III [Электрон. ресурс] / Режим доступа: <http://xage.ru/comments.php?id=15873>.