

УДК 532.516 + 586.423.1

© 1995 г. А. П. КУРЯЧИЙ

## ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМЫ РАДИАЦИОННО-ИСПАРИТЕЛЬНОЙ ТЕПЛОВОЙ ЗАЩИТЫ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

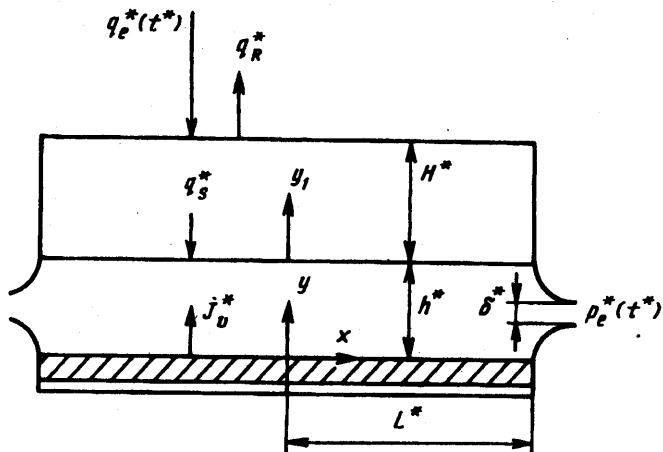
Сформулирована сопряженная краевая задача, описывающая нестационарные процессы тепло-массопереноса в слое внешней теплоизоляции и пароотводящем канале системы комбинированной тепловой защиты радиационно-испарительного типа. Рассчитаны габаритно-весовые характеристики системы комбинированной теплозащиты при одном наборе ее параметров и двух заданных режимах изменения внешних теплового потока и давления, схематично моделирующих полет гиперзвукового летательного аппарата, длительностью 30 и 60 мин с максимальным значением теплового потока  $10^5$  Вт/м<sup>2</sup>. Проведено сравнение характеристик систем комбинированной и пассивной радиационной теплозащиты для указанных режимов внешнего воздействия. Показана возможность значительного уменьшения толщины внешней теплоизоляции и полного веса комбинированной теплозащиты по сравнению с пассивной системой.

Система комбинированной тепловой защиты радиационно-испарительного типа в качестве основных компонентов включает внешний слой высокотемпературной теплоизоляции и расположенный на защищаемой конструкции слой влагоудерживающего материала, насыщенного веществом, называемом в дальнейшем хладагентом. В комбинированной теплозащите, идея которой впервые была предложена в [1], так же как и в пассивной радиационной системе (например, плиточной), основная часть поступающего на летательный аппарат теплового потока отражается в окружающую среду излучением нагретой до высокой температуры внешней поверхности слоя теплоизоляции. Тепловой поток, проникающий сквозь внешнюю теплоизоляцию, в отличие от пассивной системы затрачивается в основном на фазовые превращения хладагента (плавление, испарение или сублимацию).

Слой влагоудерживающего материала с хладагентом может располагаться на внешней поверхности защищаемой конструкции, как в схеме, предложенной в [2]. В этом случае испарение или сублимация хладагента происходит в канал, образованный открытой поверхностью влагоудерживающего материала и внутренней поверхностью теплозащитного слоя. Если защищаемая конструкция имеет свободную внутреннюю полость, то носитель хладагента может располагаться на внутренней поверхности конструкции и испарение будет происходить в ее полость. Такая схема комбинированной теплозащиты исследовалась, например, в [3—5].

В системе комбинированной тепловой защиты по сравнению с пассивной можно в несколько раз уменьшить толщину внешней теплоизоляции при одновременном значительном уменьшении веса всей системы. Уменьшение толщины теплозащитного слоя может быть весьма актуальным для малогабаритной конструкции. В этом случае уменьшение толщины теплозащиты при фиксированных внешних габаритах позволяет увеличить размеры защищаемой силовой конструкции и, как следствие, уменьшить ее вес при заданных прочностных требованиях к ней.

Комбинированная теплозащита в отличие от активных систем [6] не содержит вспомогательных элементов, служащих для подачи хладагента в рабочую зону.



Фиг. 1

Достоинством этой системы является и свойство саморегуляции, поскольку расход хладагента определяется величиной поступающего на его носитель теплового потока. Указанные факторы обеспечивают надежность и устойчивость функционирования системы комбинированной тепловой защиты.

Изложенным выше объясняется актуальность изучения рассматриваемой системы, некоторые оценки параметров которой приведены в [2], где, в частности, показано, что в стационарном приближении для теплозащиты, имеющей минимальный вес, массы внешней теплоизоляции и начального запаса хладагента равны.

В [7] рассматривалась схема комбинированной теплозащиты, аналогичная [2], в которой слой внешней теплоизоляции был заменен термически тонким термостойким экраном. Изучались стационарные процессы тепломассопереноса в пароотводящем канале. В [8] сформулирована краевая задача, описывающая процессы переноса в пароотводящем канале в нестационарных условиях, и рассмотрены их особенности при возрастании со временем поступающего в канал теплового потока и уменьшении внешнего давления. В настоящей работе предложенная в [8] модель использована для решения сопряженной нестационарной задачи тепломассопереноса в слое внешней теплоизоляции и пароотводящем канале комбинированной теплозащиты. Для двух режимов изменения со временем внешнего теплового потока и давления, схематично моделирующих полет гиперзвукового аппарата, длительностью 30 и 60 мин проведено сравнение габаритно-весовых характеристик систем комбинированной и пассивной плиточной теплозащиты.

1. Схема моделируемой системы тепловой защиты представлена на фиг. 1. В дальнейшем все размерные величины будут отмечаться верхним индексом звездочка. На внешнюю поверхность слоя высокотемпературной теплоизоляции толщиной  $H^*$  поступает тепловой поток  $q_e^*$ , зависящий от времени  $t^*$ . Излучением поверхности слоя, имеющей температуру  $T_e^*$  и коэффициент поглощения излучения  $\epsilon_e$ , в окружающую среду отражается часть внешнего теплового потока  $q_R^* = \epsilon_e \sigma^* T_e^{*4}$ , где  $\sigma^*$  — постоянная Стефана — Больцмана. Часть внешнего теплового потока  $q_s^*$  проникает сквозь слой теплоизоляции и достигает его внутренней поверхности. Предполагается, что на эту поверхность нанесено покрытие, имеющее коэффициент поглощения излучения  $\epsilon_i$  и обеспечивающее газонепроницаемость внутренней поверхности теплозащитного слоя. В дальнейшем для краткости это покрытие будет называться экраном.

На расстоянии  $h^*$  от экрана параллельно ему находится открытая поверхность носителя хладагента, с которой происходит испарение последнего с интенсивностью  $J_v^*$ . Носитель хладагента расположен на внешней поверхности защищаемой конструкции, имеющей вид плоской пластины толщиной  $\Delta^*$ , материал которой имеет плотность  $\rho_c^*$  и удельную теплоемкость  $c_c^*$ .

Открытая поверхность носителя хладагента и экран образуют плоский канал длиной  $2L^*$ . На обоих концах канала имеются участки сужения, заканчивающиеся щелями высотой  $\delta^*$ , через которые пар (на начальном этапе паровоздушная смесь) вытекает в окружающую среду с зависящим от времени давлением  $p_e^*$ . Выходные щели моделируют дренажную систему комбинированной теплозащиты, при этом  $\delta^*/L^*$  представляет собой отношение площади дренажных отверстий к площади открытой поверхности носителя хладагента.

Предполагается, что изменением внешних теплового потока и давления вдоль обтекаемой поверхности летательного аппарата на длине одного рассматриваемого сегмента системы теплозащиты  $2L^*$  можно пренебречь. Вследствие этого течение в канале является симметричным относительно линии растекания, расположенной при  $x^* = 0$ .

В системе пассивной радиационной теплозащиты, с которой будут сравниваться параметры комбинированной системы, слой внешней теплоизоляции расположен непосредственно на поверхности защищаемой пластины.

В качестве теплозащитного слоя в системе комбинированной теплозащиты в общем случае может применяться пакет из различных теплоизоляционных материалов. Однако с целью сравнения с пассивной системой будет рассматриваться теплозащитный слой в виде плитки из супертонкого кварцевого волокна, имеющей плотность  $\rho_i^*$ , удельную теплоемкость  $c_i^*$  и эффективный коэффициент теплопроводности  $\lambda_i^*$ . Учитываются зависимости параметров  $c_i^*$  и  $\lambda_i^*$  от температуры, а коэффициента теплопроводности — и от внешнего давления  $p_e^*$ . Эти зависимости  $c_i^*(T^*)$  и  $\lambda_i^*(T^*, p_e^*)$  определены экспериментально и для проведения расчетов представлены в аналитическом виде в результате интерполяции экспериментальных данных. Предполагается, что величина  $\lambda_i^*$  учитывает все составляющие теплопроводности в диапазонах изменения температуры и давления, представляющих интерес.

При сделанных предположениях процесс переноса тепла в слое внешней теплоизоляции описывается обычной краевой задачей теплопроводности, которая в безразмерных переменных имеет вид

$$c_i \frac{\partial T}{\partial Fo} = \frac{\partial}{\partial y_1} \left( \lambda_i \frac{\partial T}{\partial y_1} \right) \quad (1.1)$$

$$Fo = 0, \quad 0 \leq y_1 \leq 1: \quad T = T_0 \quad (1.2)$$

$$y_1 = 0: \quad T = T_e \quad \text{или} \quad \lambda_i \frac{\partial T}{\partial y_1} = C \frac{\partial T}{\partial Fo} \quad (1.3)$$

$$y_1 = 1: \quad \lambda_i \frac{\partial T}{\partial y_1} = St_i (q_e - \epsilon_e T^4) \quad (1.4)$$

$$C = \frac{\rho_c^* c_c^* \Delta^*}{\rho_i^* c_{i*}^* H^*}, \quad St_i = \frac{\sigma^* T_*^{*3} H^*}{\lambda_{i*}^*}, \quad q_e(Fo) = \frac{q_e^*(t^*)}{\sigma^* T_*^{*4}}$$

$$y_1 = \frac{y_1^*}{H^*}, \quad Fo = \frac{\lambda_{*}^* t^*}{\rho_i^* c_{i*}^* H^{*2}}, \quad T = \frac{T^*}{T_*^*}, \quad T_0 = \frac{T_0^*}{T_*^*}, \quad c_i = \frac{c_i^*}{c_{i*}^*}, \quad \lambda_i = \frac{\lambda_i^*}{\lambda_{*}^*}$$

$$c_{i*}^* = c_i^*(T_*^*), \quad \lambda_{*}^* = \lambda_i^*(T_*^*, p_*^*), \quad T_*^* = 273 \text{ К}, \quad p_*^* = 10^5 \text{ Па}$$

Здесь координата  $y_1^*$  отсчитывается от поверхности экрана, как показано на фиг. 1,  $T_0^*$  — начальная температура всей системы теплозащиты.

Первое граничное условие (1.3) используется при расчете комбинированной теплозащиты. При этом для определения неизвестной заранее температуры экрана  $T$ , используется условие сопряжения тепловых потоков, которое будет сформулировано ниже. Второе условие (1.3) используется при определении толщины плитки пассивной тепловой защиты. При этом минимальная толщина определяется из условия, что  $T(0, Fo)$  за время теплового воздействия не превосходит некоторой заданной величины  $T_m$ .

2. Процессы тепломассопереноса в пароотводящем канале при выполнении условия  $h^*/L^* \ll 1$ , которое принимается в настоящей задаче, описывается системой уравнений Прандтля [9], в которой градиент давления вдоль канала является одной из неизвестных функций. Перепад давления  $\Delta p_L^*$  на участке испарения  $0 \leq x^* \leq L^*$ , где координата  $x^*$  отсчитывается от середины канала, при выполнении условия  $Re = \rho_*^* v_*^* h^* / \mu_*^* \geq 1$  оценивается выражением  $\Delta p_L^* \sim \rho_*^* u_*^{*2}$  [10]. Здесь  $\rho_*^*$  и  $\mu_*^*$  — характерные значения плотности и вязкости газа, а  $u_*^*$  и  $v_*^*$  — характерные значения продольной и поперечной компонент его скорости.

Оценка характерного значения продольной скорости газа  $u_*^*$  получается из условия равенства расхода газа в крайнем сечении канала  $x^* = L^*$ , оцениваемого выражением  $Q_L^* \sim \rho_*^* u_*^* h^*$ , расходу через дренажную щель  $Q_e^*$ . Величина последнего оценивается выражением для адиабатического истечения газа из полости [11]  $Q_e^* \sim Q \delta^* p^* / (R_g^* T^*)^{1/2}$ , где  $Q(\epsilon_p) \leq 1$ ,  $\epsilon_p = p_e^* / p^*$ ,  $p^*$  — давление газа в канале в сечении  $x^* = L^*$ ,  $R_g^*$  — газовая постоянная,  $T^*$  — средняя температура газа.

Учитывая, что  $\rho_*^* \sim p^* / R_g^* T^*$ , из условия  $Q_L^* = Q_e^*$  получим оценку

$$u_*^* \sim Q(\epsilon_p) \frac{\delta^*}{h^*} (R_g^* T^*)^{1/2} \quad (2.1)$$

Отношение перепада давления вдоль канала к характерному значению давления в нем на основании (2.1) оценивается выражением  $\Delta p_L^* / p^* \sim (Q \delta^* / h^*)^2$ . Предполагая, что выполняется условие  $(\delta^* / h^*)^2 \ll 1$ , с учетом того, что  $Q \leq 1$ , приходим к выводу о том, что изменением давления вдоль канала в главном приближении можно пренебречь. Поскольку при этом в канале реализуется течение с характерным числом Маха  $M_*$ , удовлетворяющим условию  $M_*^2 \sim \rho_*^* u_*^{*2} / p^* \ll 1$ , то продольная скорость газа и градиент давления являются линейными функциями координаты  $x = x^* / L^*$  [10]. Остальные параметры течения в главном приближении от  $x$  не зависят. При этом в уравнении энергии можно пренебречь членами вязкой диссипации и работы сил давления, отношение которых к главному конвективному члену имеет порядок  $M_*^2$ .

Пренебрежение изменением давления и скорости испарения вдоль канала в настоящей работе является следствием наличия дренажной системы, удовлетворяющей условию  $(\delta^* / h^*)^2 \ll 1$ . В противном случае изменение давления вдоль

канала необходимо учитывать. При этом скорость испарения, например, почти линейно возрастает от центра к выходному сечению канала [12].

В уравнения неразрывности, импульса, диффузии, энергии и состояния, описывающие процессы тепломассопереноса в канале, кроме неизвестных двух компонент скорости, концентрации воздуха, температуры и плотности паровоздушной смеси, очевидно, войдут и зависящие только от времени давление и его вторая производная вдоль канала. Следовательно, для замыкания задачи необходимы еще два уравнения.

Одним из этих уравнений является упоминавшееся ранее условие  $Q_L^* = Q_c^*$ . Второе уравнение можно получить, учитывая, что в приближении Прандтля давление поперек канала постоянно и равно, в частности, давлению паровоздушной смеси на поверхности испарения  $y^* = 0$ . Парциальное давление воздуха при этом равно  $p_a^* = (\rho^* g T^*)_w R_a^*$ , где  $g$  — массовая концентрация воздуха,  $R_a^*$  — его газовая постоянная, а индекс  $w$  обозначает значения соответствующих величин при  $y^* = 0$ .

Наибольшее отличие давления пара  $p_v^*$  на поверхности испарения от давления насыщения  $p_{v*}^*$  имеет место при максимальной скорости испарения, которая достигается в случае отсутствия воздуха в канале и оценивается по формуле Герца — Кнудсена

$$\rho_v^* v_w^* \sim (p_{v*}^* - p_v^*)(2\pi R_v^* T_w^*)^{-1/2}, \quad p_v^* = p_{v*}^* (R_v^* T_w^*)^{-1}$$

где  $\rho_v^*$  — плотность пара,  $R_v^*$  — его газовая постоянная.

Подставляя в это уравнение характерное значение вертикальной скорости  $v_w^* \sim u_*^* h^* / L^*$ , которое следует из уравнения неразрывности, и считая  $T_w^* \sim T^*$ , с учетом оценки (2.1) получим  $(p_{v*}^* - p_v^*) / p_v^* \sim Q \delta^* / L^*$ . Так как по условиям задачи  $\delta^* / L^* \ll 1$ , то давление пара на поверхности испарения можно считать равным давлению насыщения при температуре этой поверхности. Давление паровоздушной смеси в канале, таким образом, удовлетворяет уравнению

$$p^* = p_{v*}^* (T^*) + (\rho^* g T^*)_w R_a^*$$

Вводя безразмерные переменные, краевую задачу, описывающую процессы тепломассопереноса в пароотводящем канале, представим в виде

$$x^* = L^* x, \quad y^* = h^* y, \quad t^* = \frac{L^*}{u_*^*} \tau, \quad u^* = u_*^* x U,$$

$$\rho^* v^* = \frac{\rho_*^* u_*^* h^*}{L^*} V, \quad T^* = T_*^* T$$

$$p^* = p_*^* p, \quad \frac{dp^*}{dx^*} = \frac{\rho_*^* u_*^{*2}}{L^*} x P, \quad \rho^* = \rho_*^* \rho, \quad u_*^* = \frac{\delta^*}{h^*} (R_v^* T_*^*)^{1/2}, \quad p_*^* = \frac{p_*^*}{R_v^* T_*^*}$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial \tau} + \rho U + \frac{\partial V}{\partial y} = 0 \quad (2.2)$$

$$\rho \frac{\partial U}{\partial \tau} + \rho U^2 + V \frac{\partial U}{\partial y} + P = \frac{1}{\text{Re}} \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu \frac{\partial U}{\partial y} \right) \quad (2.3)$$

$$c_p \left( \rho \frac{\partial T}{\partial \tau} + V \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{1 - \gamma_v}{\gamma_v} \frac{\partial P}{\partial \tau} = \frac{1}{\text{Re}} \left[ \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{\lambda}{\text{Pr}} \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\rho D}{\text{Sc}} (c_{pa} - 1) \frac{\partial T}{\partial y} \frac{\partial g}{\partial y} \right] \quad (2.4)$$

$$\rho \frac{\partial g}{\partial \tau} + V \frac{\partial g}{\partial y} = \frac{1}{\text{Re}} \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{\rho D}{\text{Sc}} \frac{\partial g}{\partial y} \right) \quad (2.5)$$

$$p = \rho RT \quad (2.6)$$

$$\int_0^1 \frac{U}{RT} dy = \frac{KQ}{(\langle R \rangle \langle T \rangle)^{1/2}}, \quad K = \left[ \gamma \left( \frac{2}{\gamma + 1} \right)^{(\gamma+1)/(\gamma-1)} \right]^{1/2} \quad (2.7)$$

$$Q = \left( \frac{\gamma + 1}{2} \right)^{1/(\gamma-1)} \varepsilon_p^{1/\gamma} \left[ \frac{\gamma + 1}{\gamma - 1} (1 - \varepsilon_p^{(\gamma-1)/\gamma}) \right]^{1/2}, \quad \varepsilon_p > \varepsilon_{cr}$$

$$Q = 1, \quad \varepsilon_p \leq \varepsilon_{cr} = \left( \frac{2}{\gamma + 1} \right)^{\gamma/(\gamma-1)}$$

$$p = \frac{1 + g_w (R_a - 1)}{1 - g_w} p_{ws} (T_w), \quad p_{ws} (T) = 1,334 \cdot 10^{-3} \exp \left( 18,681 - \frac{4105}{T^* T - 35} \right) \quad (2.8)$$

$$\tau = 0, \quad 0 \leq y \leq 1: \quad U = V = 0, \quad p = p_0, \quad T = T_0, \quad g = \frac{p_0 - p_{ws} (T_0)}{p_0 + (R_a - 1) p_{ws} (T_0)} \quad (2.9)$$

$$y = 0: \quad U = 0, \quad \frac{\rho D}{\text{Re Sc}} \frac{\partial g}{\partial y} = gV, \quad \text{Ko } rV + W \frac{\partial T}{\partial \tau} =$$

$$= \frac{1}{\text{Re Pr}} \left[ \lambda \frac{\partial T}{\partial y} + \varepsilon \text{St} (T_s^* - T^*) \right] \quad (2.10)$$

$$y = 1: \quad U = V = \frac{\partial g}{\partial y} = 0, \quad T = T_s \quad (2.11)$$

$$W(\tau) = m_c c_c + c_l \left( m_l - \int_0^\tau V_w d\tau \right), \quad m_c = \frac{\rho_c^* \Delta^*}{\rho_{*l}^* h^*}, \quad c_c = \frac{c_c^*}{c_{pv}^*}, \quad m_l = \frac{m_l^*}{\rho_{*l}^* h^*} \quad (2.12)$$

$$r(T) = 1 - (c_l - 1) \frac{T}{\text{Ko}}, \quad c_l = \frac{c_l^*}{c_{pv}^*} \quad (2.13)$$

$$R(g) = 1 + g(R_a - 1), \quad c_p(g) = 1 + g(c_{pa} - 1), \quad \gamma(g) = \gamma_v \frac{1 + g(c_{pa} - 1)}{1 + g(c_{wv} - 1)} \quad (2.14)$$

$$R_a = \frac{R_a^*}{R_v^*}, \quad c_{pa} = \frac{c_{pa}^*}{c_{pv}^*}, \quad c_{wv} = c_{pa} \frac{\gamma_v}{\gamma_a}, \quad \gamma_v = 1, 3, \quad \gamma_a = 1, 4$$

$$\text{Re} = \frac{\delta^* h^* p^*}{L^* \mu_0^*} (R_v^* T^*)^{-1/2}, \quad \text{Pr} = \frac{c_{pv}^* \mu_0^*}{\lambda_0^*}, \quad \text{Sc} = \frac{\mu_0^* R_v^* T^*}{p^* D_0^*} \quad (2.15)$$

$$\text{Ko} = \frac{r_0^*}{c_{pv}^* T^*}, \quad \text{St} = \frac{\sigma^* T^*{}^3 h^*}{\lambda_0^*}, \quad \varepsilon = \frac{\varepsilon_w \varepsilon_s}{\varepsilon_w + \varepsilon_s - \varepsilon_w \varepsilon_s}$$

При формулировке задачи (2.2) — (2.15) предполагается, что в качестве хладагента используется вода, причем начальная температура системы  $T_0 > 1$ , т. е. хладагент находится в жидком состоянии. Давление насыщенного водяного пара в диапазоне температуры  $273 \text{ K} \leq T_w^* \leq 390 \text{ K}$  описывается эмпирической формулой (2.8) [13]. Величины  $c_{pv}^*$  и  $c_{pa}^*$  являются удельными теплоемкостями водяного пара и воздуха при постоянном давлении.

В уравнении (2.7) используется выражение для расхода газа при его адиабатическом истечении из полости [11]. В этом уравнении  $\langle R \rangle = R(\langle g \rangle)$ , а  $\langle g \rangle$ ,  $\langle T \rangle$  — осредненные поперек канала концентрация воздуха и температура паровоздушной смеси.

В начальных условиях (2.9)  $p_0$  — безразмерное давление окружающей среды в начальный момент времени.

Второе граничное условие (2.10) является условием непроницаемости для воздуха поверхности испарения. В настоящей модели системы комбинированной тепловой защиты не рассматриваются процессы тепломассопереноса в носителе хладагента. При этом не учитываются и некоторые эффекты, вытекающие из рассмотрения таких процессов. В частности, не учитываются возможности потери жидкого хладагента, которые могут иметь место при уменьшении давления окружающей среды [14]. Входящая в третье граничное условие (2.10) и определяемая выражением (2.12) функция времени  $W$  учитывает только конечное значение теплоемкости защищаемой конструкции и хладагента, а также изменение массы последнего со временем. Тем самым не учитываются теплоемкость носителя хладагента, предполагаемая незначительной, и градиент температуры в нем. В последнем выражении (2.12)  $m_i^*$  — начальная масса хладагента, приходящаяся на единицу площади поверхности защищаемой конструкции.

В последнем условии (2.10) учтен радиационный теплообмен между экраном и поверхностью испарения, которые рассматриваются как диффузно-серые поверхности. В приведенном коэффициенте поглощения излучения  $\epsilon$ , определяемом (2.15),  $\epsilon_w$  — коэффициент поглощения поверхности испарения.

Выражения (2.13) определяют зависимость удельной теплоты испарения от температуры, где  $c_i^*$  — теплоемкость воды.

В критерии подобия задачи (2.15) входят  $r_0^* = 3,2 \cdot 10^6$  Дж/кг — теплота испарения воды при 0 К, а также коэффициенты вязкости  $\mu_0^*$ , теплопроводности  $\lambda_0^*$  и диффузии  $D_0^*$  паровоздушной смеси, рассчитанные при начальных значениях давления, температуры и концентрации воздуха. Входящие в уравнения и граничные условия коэффициенты переноса  $\mu$ ,  $\lambda$ ,  $D$  безразмерены с помощью значений  $\mu_0^*$ ,  $\lambda_0^*$  и  $D_0^*$  соответственно. Коэффициент диффузии смеси рассчитывается по формуле  $D^* = 2,16 \cdot 10^{-5} T^{*1,8}$  м<sup>2</sup>/с, коэффициент вязкости — по формуле Уилке, а теплопроводности — по формуле Лемана [15]. При этом коэффициенты переноса компонент смеси определяются формулами

$$\mu_v^* = (-3,05 + 0,0406T^*) 10^{-6}, \quad \mu_a^* = 1,51 \cdot 10^{-6} T^{*3/2} (T^* + 122)^{-1} \text{ кг/мс}$$

$$\lambda_v^* = (-5,8 + 0,0856T^*) 10^{-3}, \quad \lambda_a^* = c_{pa}^* \mu_a^* / 0,72 \text{ Вт/мК}$$

Условие сопряжения тепловых потоков на поверхности экрана, служащее для определения его температуры, в пренебрежении его теплоемкостью имеет вид

$$\frac{\lambda_v^* h^*}{\lambda_0^* H^*} \lambda_v \frac{\partial T}{\partial y_1} (0, Fo) = \lambda \frac{\partial T}{\partial y} (1, \tau) + \epsilon St [T(1, \tau)^4 - T(0, \tau)^4] \quad (2.16)$$

В левой части этого уравнения используется решение задачи (1.1)—(1.4), в правой — (2.2)—(2.15).

В процессе численного решения сформулированной сопряженной задачи (1.1)—(1.4), (2.2)—(2.16) на начальном этапе при падении внешнего давления и возрастании теплового потока происходит увеличение  $U > 0$  и уменьшение  $g$  и  $P < 0$ . Начиная с некоторого момента времени, при котором значение концентрации воздуха в канале достигает нуля, из рассмотрения исключается уравнение диффузии (2.5). Давление в канале с этого момента равно давлению насыщенного пара при температуре поверхности испарения и, следовательно, является функцией этой температуры. По этой причине величина  $p$  также исключается из числа неизвестных функций, количество которых, таким образом, уменьшается на две.

В дальнейшем, когда происходит возрастание внешнего давления, величина  $U > 0$  начинает уменьшаться, а  $P < 0$  — возрастать. При достаточно толстом

слое теплоизоляции возможно возникновение ситуации, при которой внешнее давление сравнивается с давлением пара в канале. В этот момент времени  $U = P = 0$ . Дальнейшее возрастание  $p_e$  ведет к натеканию воздуха в канал из окружающей среды. Для моделирования этого процесса предполагается, что давление в канале равно внешнему. В этом случае функция  $U$  принимает отрицательные значения, а  $P$  — положительные. Уравнение диффузии (2.5) вновь принимается в рассмотрение, и число неизвестных функций увеличивается на одну. Первое уравнение (2.8) с заданным  $p = p_e$  служит граничным условием для уравнения диффузии при  $y = 0$ , обеспечивающим появление  $g > 0$ . Для определения неизвестной функции  $P$  на этом этапе вместо уравнения для расхода (2.7) используется второе условие (2.10).

По мере возрастания величины теплового потока  $q_e^*$ , поступающего в канал, функция  $U < 0$  может достигать минимальных значений и затем возрастать до  $U = 0$ . Начиная с этого момента расчеты ведутся так же, как на начальном этапе процесса.

3. На основе сформулированной сопряженной задачи (1.1)—(1.4), (2.2)—(2.16) можно рассчитать характеристики комбинированной тепловой защиты при заданных режимах изменения внешних теплового потока и давления. Для оценки характеристик рассматриваемой системы теплозащиты и сравнения ее с пассивной радиационной системой, а также с целью выявления основных особенностей процессов тепломассопереноса рассматриваются зависимости  $q_e^*$  и  $p_e^*$  от времени в виде кусочно-линейных функций  $t^*$ , схематично моделирующие режимы взлета, крейсерского полета и посадки летательного аппарата

$$q_e^* = q_{em}^* t^*, \quad p^* = p_0^* \left( 1 - \frac{t^*}{t_1^*} \right) + p_{em}^* \frac{t^*}{t_1^*}, \quad 0 \leq t^* \leq t_1^*$$

$$q_e^* = q_{em}^*, \quad p^* = p_{em}^*, \quad t_1^* \leq t^* \leq t_2^* \quad (3.1)$$

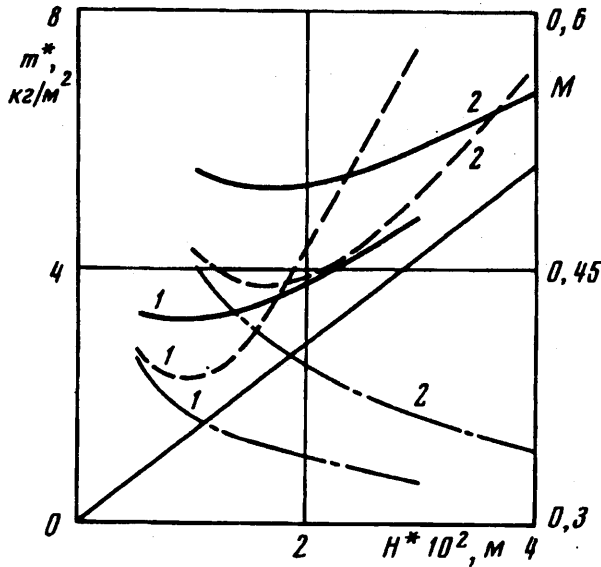
$$q_e^* = q_{em}^* \frac{t_3^* - t^*}{t_3^* - t_2^*}, \quad p^* = p_0^* + (p_0^* - p_{em}^*) \frac{t^* - t_2^*}{t_3^* - t_2^*}, \quad t_2^* \leq t^* \leq t_3^*$$

В проведенных расчетах максимальное значение теплового потока  $q_{em}^* = 10^5$  Вт/м<sup>2</sup>, максимальное и минимальное давление  $p_0^* = 10^5$  Па,  $p_{em}^* = 300$  Па.

Изменяемыми параметрами представленной на фиг. 1 схемы комбинированной теплозащиты являются параметры теплоизоляции  $\rho_i^*$ ,  $c_i^*$ ,  $\lambda_i^*$ ,  $H^*$ ,  $\epsilon_e$ , размеры пароотводящего канала  $L^*$ ,  $h^*$ ,  $\delta^*$ , коэффициенты поглощения излучения  $\epsilon_s$ ,  $\epsilon_w$ , начальная температура системы  $T_0^*$  и фазовый состав хладагента. Как отмечалось выше, в качестве внешней теплоизоляции рассматривается кварцевая плитка с плотностью  $\rho_i^* = 140$  кг/м<sup>3</sup>, а в качестве хладагента — вода в жидком состоянии. Начальная температура  $T_0^* = 290$  К. В проведенных расчетах были фиксированы и все другие параметры, кроме толщины плитки:  $L^* = 0,5$  м,  $h^* = 10^{-2}$  м,  $\delta^* = 5 \cdot 10^{-5}$  м,  $\epsilon_e = \epsilon_w = 0,8$ ,  $\epsilon_s = 0,1$ . Предполагается, что защищаемая конструкция изготовлена из алюминиевого сплава и имеет следующие параметры:  $\Delta^* = 2 \cdot 10^{-3}$  м,  $\rho_c^* = 2,8 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>,  $c_c^* = 800$  Дж/кгК. Максимальная допустимая температура конструкции  $T_m^* = 443$  К.

Были проведены расчеты для двух режимов (3.1), различающихся длительностью стационарного участка  $t_1^* \leq t^* \leq t_2^*$ :  $t_1^* = 600$  с,  $t_2^* = 1200$  с,  $t_3^* = 1800$  с (вариант 1) и  $t_1^* = 600$  с,  $t_2^* = 3000$  с,  $t_3^* = 3600$  с (вариант 2). Основным интерес представляло исследование влияния толщины слоя теплоизоляции  $H^*$  на вес системы комбинированной теплозащиты  $m_{clp}^* = \rho_i^* H^* + m_i^*$ . Начальный



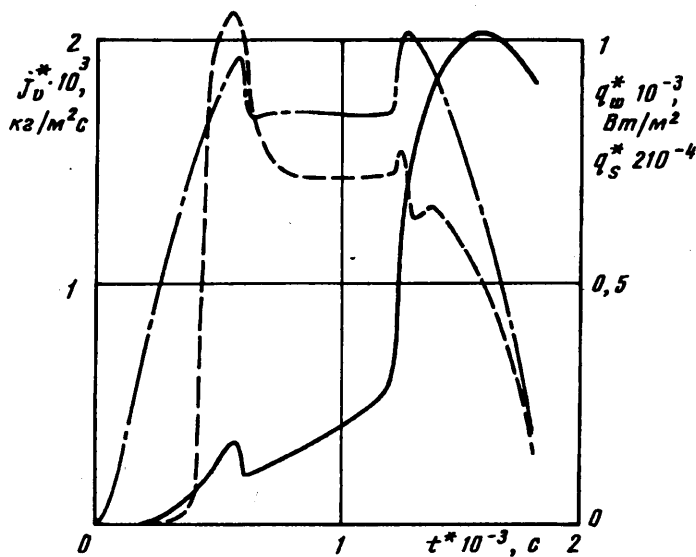


Фиг. 2

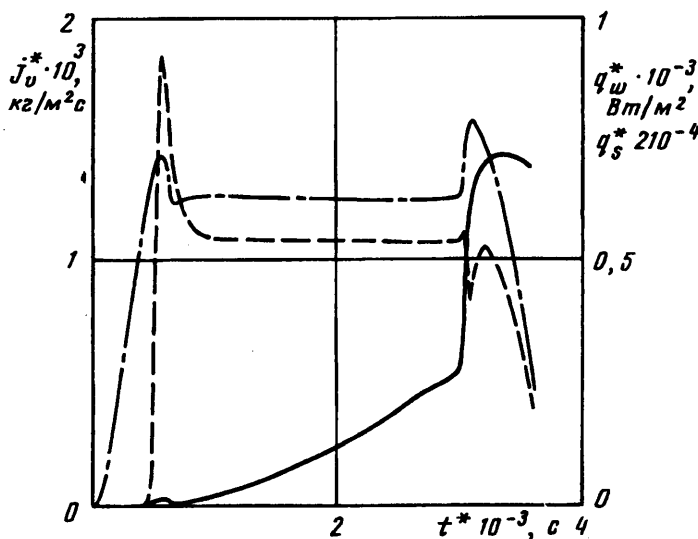
запас хладагента  $m_i^*$  определялся итерационным путем из условия  $W(t_3) = m_{cc}$ , где  $W(t)$  рассчитывается по формуле (2.12). В качестве первого приближения входящую в (2.12) величину  $m_i$  при разных значениях  $H^*$  можно задавать из уравнения  $m_i = \text{const} / H^*$ . Затем, как показывают расчеты, достаточно проведения еще одной итерации.

Результаты расчетов габаритно-весовых характеристик системы комбинированной тепловой защиты показаны на фиг. 2. Прямая линия представляет зависимость веса плитки от ее толщины, штрихпунктирные кривые — вес хладагента  $m_i^*(H^*)$ , сплошные кривые — суммарный вес теплозащиты  $m_{cnp}^*$ , штриховые кривые показывают отношение веса комбинированной теплозащиты к пассивной:  $M = m_{cnp}^* / m_{pnp}^*$ . Цифрами отмечены варианты режимов (3.1). Параметры пассивной теплозащиты, рассчитанные на основе решения задачи (1.1)—(1.4) со вторым условием (1.3), для вариантов 1 и 2 составляют соответственно  $H^* = 5,95 \cdot 10^{-2}$  м,  $m_{pnp}^* = 8,33$  кг/м<sup>2</sup> и  $H^* = 8,5 \cdot 10^{-2}$  м,  $m_{pnp}^* = 11,9$  кг/м<sup>2</sup>. Минимальный вес комбинированной теплозащиты в варианте 1 достигается при  $H^* \cong 10^{-2}$  м, а в варианте 2 — при  $H^* \cong 1,5 \cdot 10^{-2}$  м. При увеличении длительности полета летательного аппарата, согласно фиг. 2, выигрыш в толщине теплозащитного слоя и весе системы комбинированной теплозащиты по сравнению с пассивной уменьшается. Однако это снижение в обоих случаях весьма значительно. Минимальные значения  $m_{cnp}^* / m_{pnp}^*$  составляют 0,378 и 0,438 соответственно для вариантов 1 и 2.

На фиг. 3 представлены зависимости от времени теплового потока, поступающего на защищаемую конструкцию в пассивной системе,  $q_w^*$  (сплошная кривая), теплового потока, достигающего экрана,  $q_s^*$  (штрихпунктирная кривая) и скорости испарения  $j_v$  (штриховая кривая) в комбинированной теплозащите для варианта 1. Аналогичные зависимости для варианта 2 показаны на фиг. 4. Локальный максимум в зависимостях  $q_w^*(t^*)$  и  $q_s^*(t^*)$  в окрестности момента  $t_1^*$  обусловлен влиянием внешнего давления на коэффициент теплопроводности плитки. При приближении к моменту  $t_1^*$  возрастание  $q_s^*(t^*)$  перестает компенсировать умень-



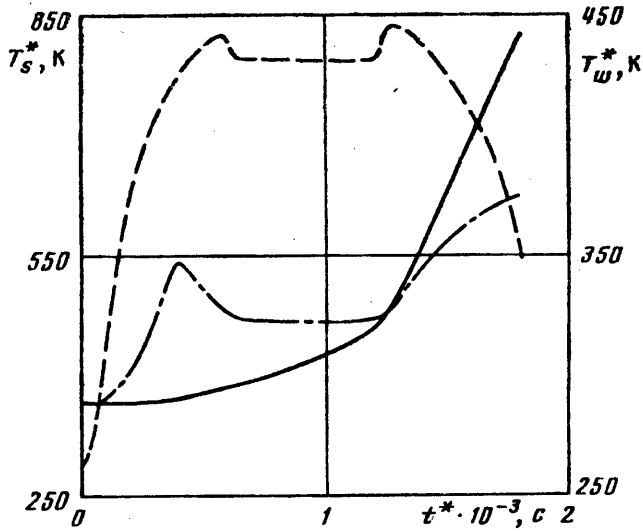
Фиг. 3



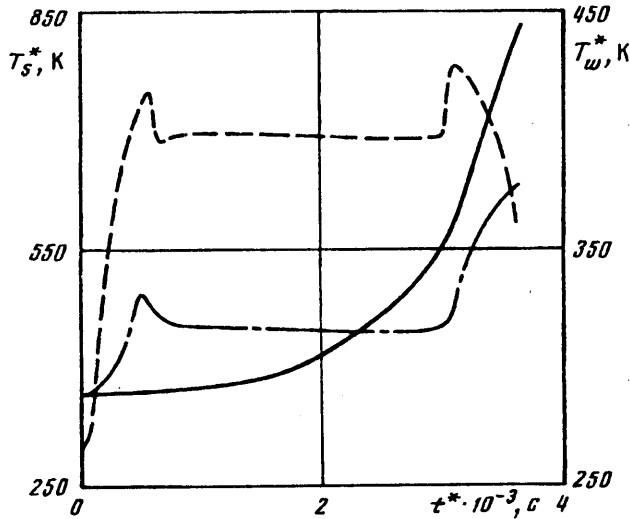
Фиг. 4

шение  $\lambda_1^*$  вследствие падения  $p_e^*$ , из-за чего и происходит уменьшение  $q_w^*$  и  $q_s^*$ . Обратный эффект имеет место в окрестности момента  $t_2^*$ , когда увеличение  $\lambda_1^*$ , связанное с ростом  $p_e^*$ , приводит к возрастанию  $q_w^*$  и  $q_s^*$ , несмотря на уменьшение  $q_e^*$ .

Зависимости от времени температуры защищаемой конструкции для пассивной системы  $T_w^*$  (сплошные кривые, шкала  $T_w^*$ ) поверхности испарения  $T_w^*$  (штрихпунктирные кривые, шкала  $T_w^*$ ) и экрана  $T_s^*$  (штриховые кривые) для варианта 1 приведены на фиг. 5, а для варианта 2 — на фиг. 6. Данные, представленные на фиг. 3—6, получены при  $H^* = 10^{-2}$  м для варианта 1 и  $H^* = 1,5 \cdot 10^{-2}$  м для варианта 2.



Фиг. 5



Фиг. 6

Поведение  $T_w^*$  для пассивной системы достаточно очевидно. Наличие максимумов в зависимостях  $T_s^*(t^*)$  в окрестностях моментов времени  $t_1^*$  и  $t_2^*$ , так же как и для  $q_s^*(t^*)$ , связано с зависимостью  $\lambda_s^*$  от  $p_s^*$ . Особенности поведения температуры поверхности испарения, в частности наличие локального максимума и дальнейшее уменьшение  $T_w^*$  при возрастающем тепловом потоке, так же как и поведение  $j_v^*(t^*)$ , до момента времени  $t_2^*$  объяснены в [8].

Наличие локальных максимумов и минимумов в зависимости  $j_v^*(t^*)$  при  $t^* > t_2^*$  на фиг. 3, 4 объясняется следующим образом. Первый максимум обусловлен увеличением теплового потока, поступающего к поверхности носителя хладагента и затрачиваемого на испарение. Затем по мере роста скорости увеличения

температуры поверхности испарения  $dT_w^*/dt^*$  в соответствии с фиг. 5, 6 доля теплового потока, расходуемого на испарение, уменьшается и  $j_v^*$  падает. В дальнейшем величина  $dT_w^*/dt^*$  уменьшается и скорость испарения растет до тех пор, пока не начнет быстро падать поступающий на поверхность испарения тепловой поток.

Даже на участках стационарного теплопереноса, наблюдаемых при  $t_1^* < t^* < t_2^*$ , тепловой поток  $q_s^*$ , поступающий в канал, не полностью затрачивается на испарение хладагента. В стационарном режиме уравнения неразрывности и энергии с соответствующими граничными условиями имеют следующий вид:

$$pU + TV' = 0, \quad \text{Re Pr } VT' = (\lambda T')' \quad (3.2)$$

$$y = 0: \text{Re Pr } \text{Ko } rV = \lambda T' + q_s; \quad y = 1: V = 0, \quad \lambda T' + q_s = q_r \quad (3.3)$$

где штрихом обозначено дифференцирование по  $y$ ,  $q_r$  — радиационный тепловой поток,  $q_s$  — поток тепла, поступающего в канал с экрана.

В левой части первого условия (3.3) стоит тепловой поток, затрачиваемый на испарение. Подставляя в это условие  $q_s$  из последнего условия (3.3), интегрируя второе уравнение (3.2) поперек канала с учетом первого уравнения (3.2), получим

$$\Delta q^* \equiv q_s^* - r^* j_v^* = \frac{\lambda_0^* T_0^*}{h^*} \text{Re Pr} \left( p \int_0^1 U dy - V_w T_w \right)$$

Эта разность тепловых потоков  $\Delta q^*$  является достаточно заметной величиной. Для обоих вариантов на стационарных режимах  $\Delta q^*/q_s^* \approx 0,16$ .

Максимально допустимое значение температуры экрана  $T_s^*$  ограничено термостойкостью наносимого на него покрытия с целью получения возможно более низкого значения коэффициента  $\epsilon_s$ , обеспечивающего большое тепловое сопротивление зазора между экраном и носителем хладагента. Такое ограничение максимального значения может препятствовать снижению толщины слоя теплоизоляции до значения, при котором вес системы теплозащиты является минимальным.

Максимальный перепад давления между каналом и внешней средой, допустимое значение которого определяется прочностью конструкции системы теплозащиты, в обоих случаях достигается в окрестности момента времени  $t_1^*$  и равен  $0,1301p_s^*$  и  $0,1072p_s^*$  для вариантов 1 и 2 соответственно.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Roberts L. Radiation and ablation cooling for manned re-entry vehicles//Advances in Aeronaut Sci. N. Y. et al.: Pergamon Press, 1962. V. 4. P. 1019—1044.
2. Bridges J. H., Richmond F. D. Design considerations for a re-entry vehicle thermal protection system//Technol. Lunar Explorat. N. Y.; L.: Acad. Press, 1963. P. 761—782.
3. Курячий А. П. Математическая модель системы тепловой защиты с испарением хладагента из капиллярно-пористого материала в полость//Теплофизика высоких температур. 1991. Т. 29. № 3. С. 540—547.
4. Бобров И. Н., Курячий А. П. Численное моделирование процессов теплопереноса в системе испарительной тепловой защиты//Инж.-физ. журн. 1992. Т. 62. № 2. С. 301—308.
5. Ананьев В. Н., Курячий А. П. Сравнительные испытания моделей систем пассивной и комбинированной тепловой защиты//Теплофизика высоких температур. 1992. Т. 30. № 6. С. 1194—1202.
6. Поляев В. М., Майоров В. А., Васильев Л. Л. Гидродинамика и теплообмен в пористых элементах конструкций летательных аппаратов. М.: Машиностроение, 1988. 168 с.

7. *Курячий А. П.* Тепломассоперенос в плоском канале системы тепловой защиты радиационно-испарительного типа при течении пара с малыми скоростями//Изв. РАН. МЖГ. 1992. № 6. С. 22—28.
8. *Курячий А. П.* Моделирование нестационарного тепломассопереноса в пароотводящем канале радиационно-испарительной тепловой защиты//Изв. РАН. МЖГ. 1994. № 1. С. 5—12.
9. *Williams J. C.* Viscous compressible and incompressible flow in slender channels//AIAA Journal. 1963. V. 1. № 1. P. 186—195.
10. *Van Ooijen H., Hoogendoorn C. J.* Vapor flow calculations in a flat-plate heat pipe//AIAA Journal. 1979. V. 17. № 11. P. 1251—1259.
11. *Абрамович Г. Н.* Прикладная газовая динамика. М.: Наука, 1969. 824 с.
12. *Курячий А. П.* Расчет течения в канале с испаряющейся под воздействием радиационно-кондуктивного подвода тепла стенкой//Изв. РАН. МЖГ. 1993. № 5. С. 27—34.
13. *Красников В. В.* Кондуктивная сушка. М.: Энергия, 1973. 288 с.
14. *Бобров И. Н., Курячий А. П.* Особенности тепломассопереноса в испарительной теплозащите при изменении внешнего давления//Изв. РАН. МЖГ. 1993. № 1. С. 129—136.
15. *Бретшнайдер С.* Свойства газов и жидкостей. Инж. методы расчета. М.; Л.: Химия, 1966. 535 с.

Москва

Поступила в редакцию  
22.VI.1993