УДК 519.633:536.24

В. А. Яковенко[1], д-р техн. наук, А. Г. Яковенко[2], д-р техн. наук

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПРОЦЕССОВ КОНВЕКТИВНОГО ТЕПЛООБМЕНА В КАНАЛАХ ДВИГАТЕЛЬНЫХ УСТАНОВОК ПРИ ФАЗОВЫХ ПРЕВРАЩЕНИЯХ РАБОЧИХ СРЕД

Предложена математическая модель и компьютерное информационное обеспечение процесса теплообмена в каналах двигательных установок космических летательных аппаратов при фазовых превращениях рабочих сред. Результаты могут быть использованы в практике проектирования двигательных установок космических летательных аппаратов.

Ключевые слова: *двигательные установки, рабочая среда, конвективный теплообмен, математическая модель, компьютерное информационное обеспечение.*

Введение. Развитие методов моделирования процессов тепло- и массообмена в каналах и накопленный опыт решения конкретных задач создают новые возможности для исследований, в особенности при изучении фазовых превращений и их компьютерного информационного обеспечения [2, 3].

Следует отметить, что влиянием на теплообмен аксиальной теплопроводности в жидкой и твёрдой фазе пренебрегалось. Однако, предположение, что изменение плотности теплового потока, обусловленное теплопроводностью вдоль оси, мало по сравнению с изменением по радиусу, может привести к значительным ошибкам, если число Пекле мало. Такие условия являются характерными при течении компонентов топлива в длинных трубопроводах, жидкометаллических теплоносителей в тепловых трубах. Следовательно, расчёт теплообмена с учетом теплопроводности вдоль оси представляет не только теоретический, но и практический интерес. Пренебрежение аксиальной теплопроводностью значительно упрощает расчет теплообмена, так как в этом случае единственным механизмом передачи тепла вдоль оси является конвективный перенос. Поэтому всякое «тепловое возмущение» сносится вниз по течению со скоростью движения жидкости. В этом случае температурное поле в некотором сечении потока будет зависеть от температурных полей только в предшествующих сечениях. Если же теплопроводность, обусловленная аксиальными градиентами температуры, принимается во внимание, то температурное поле в некотором сечении потока будет зависеть от температурных полей и в последующих сечениях. Эта особенность явлений теплообмена, рассматриваемых с учётом аксиальной теплопроводности, существенно усложняет расчёт. Поэтому лишь немногие задачи теплообмена решены с учётом аксиальной теплопроводности. В связи с этим актуальным является исследование установившегося и неустановившегося процессов теплообмена при течении жидких монокомпонентных сред в каналах двигательной установки в условиях их затвердевания и с учётом аксиальной теплопроводности [6].

Результаты фундаментальных исследований теплообмена рабочих тел с учетом их фазового превращения жидкость – пар приведены также в работах В. Ф. Приснякова, где впервые было получено аналитическое решение задачи о вскипании компонента топлива в охлаждающем тракте жидкостного ракетного двигателя (ЖРД) и предложена основанная на нем методика расчета импульса последействия тяги [1]. На основе разработанной им гомогенной модели вскипания были получены зависимости расхода парожидкостной смеси от времени, рассчитано давление вытеснения вскипающей жидкости при неравномерном обогреве канала по длине, проведено исследование устойчивости парожидкостного контура с жидкометаллическим теплоносителем и неустойчивости течения в каналах малых размеров.

Создание двигательных установок космических аппаратов (КА), работающих в режимах с фазовыми превращениями рабочих сред, связано с необходимостью решения научно-технической проблемы – разработки теоретических и методологических основ проектирования системы подачи топлива, систем терморегулирования и соплового блока. Тепловые процессы в этих системах сопровождаются соответственно затвердеванием, испарением и конденсацией, абляцией рабочих сред.

Постановка задачи. Создание методологии проектирования систем подачи топлива и терморегулирования с фазовыми превращениями рабочих сред в двигательных и энергетических установках космических аппаратов связано с решением системы следующих уравнений [4]: для жидкой и паровой фазы – уравнение Фурье – Кирхгофа

$$C_{\rm P}\rho\frac{dt}{d\tau}=\lambda\nabla^2 t+\mu\Phi_\eta, \tag{1}$$

уравнение движения

$$\rho\frac{d\vec{V}}{d\tau}=-\nabla\rho+\mu\nabla^2\vec{V}+\rho\vec{q}, \tag{2}$$

для твердой фазы и стенки трубопровода – уравнение теплопроводности

$$div\ (\lambda gradt)=\frac{\lambda}{\alpha}\frac{\partial t}{\partial\tau}-q_v, \tag{3}$$

условия на подвижной границе

$$\begin{gathered}\lambda(M-0)\frac{\partial t(M-0)}{\partial n}-\lambda(M+0)\frac{\partial t(M+0)}{\partial n}=\rho\Phi V(M),\\ t(M-0)=t(M+0)=t_\Phi,\end{gathered} \tag{4}$$

где $dt/d\tau$, $d\bar{V}/d\tau$ – субстанциональные производные; Φ_η – диссипативная функция Рэлея; μ – коэффициент вязкости; *M* – граничная точка; *f(M-0)* – предел функции *f*, когда при фиксированном τ $t(M,\tau) < t_\Phi$; *f(M+0)* – предел функции *f*, когда при фиксированном τ $t(M,\tau) > t_\Phi$.

При проектировании соплового блока ракетного двигателя твердого топлива (РДТТ), рассматриваем его как составное тело вращения произвольного меридионального сечения, находящееся в условиях осесимметричного неизотермического процесса нагружения под действием поверхностных и объемных сил, не вызывающих деформацию кручения. Тогда его упругопластическое теплонапряженное состояние определяет следующая система дифференциальных уравнений равновесия [5]:

$$\begin{aligned} &\frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} + \frac{\partial \sigma_{zr}}{\partial r} + \frac{\sigma_{zr}}{r} + x_z = 0, \\ &\frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} + \frac{\partial \sigma_{rr}}{\partial r} + \frac{\sigma_{rr} - \sigma_{\phi\phi}}{r} + x_r = 0, \end{aligned} \tag{5}$$

где x_z и x_r – компоненты объемной силы.

Компоненты тензора напряжения на поверхности тела удовлетворяют статическим граничным условиям:

$$p_z = \sigma_{zz} l_z + \sigma_{zr} l_r, \quad p_r = \sigma_{rz} l_z + \sigma_{rr} l_r, \tag{6}$$

где l_z и l_r – направляющие косинусы. Соотношения Коши имеют вид:

$$\varepsilon_{ZZ} = \frac{\partial w}{\partial z}, \quad \varepsilon_{rr} = \frac{\partial u}{\partial r}, \quad \varepsilon_{\phi\phi} = \frac{u}{r}, \quad \varepsilon_{Zr} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial w}{\partial r} + \frac{\partial u}{\partial z}\right), \tag{7}$$

где w и u – компоненты перемещения точек тела вращения вдоль оси *z* и *r* соответственно; $\varepsilon_{ZZ}, \varepsilon_{rr}, \varepsilon_{\phi\phi}, \varepsilon_{Zr}$ – компоненты тензора деформации.

Физические уравнения в рассматриваемой задаче термопластичности при условии, что действующая на тело вращения нагрузка не вызывает деформацию кручения, имеют вид:

$$\sigma_{ZZ} = 2G^* \varepsilon_{ZZ} + \lambda^* \theta - \sigma_{ZZ}^D, \quad \sigma_{rr} = 2G^* \varepsilon_{rr} + \lambda^* \theta - \sigma_{rr}^D,$$

$$\sigma_{\phi\phi} = 2G^* \varepsilon_{\phi\phi} + \lambda^* \theta - \sigma_{\phi\phi}^D, \quad \sigma_{rZ} = 2G^* \varepsilon_{rZ} - \sigma_{rZ}^D, \tag{8}$$

где σ^D – дополнительные компоненты напряжения; G^*, λ - переменные параметры упругости, в которых интенсивности касательных напряжений и деформаций сдвига определяются формулами [4]:

$$S = \sqrt{\frac{1}{6}\left[\left(\sigma_{ZZ} - \sigma_{rr}\right)^2 + \left(\sigma_{rr} - \sigma_{\phi\phi}\right)^2 + \left(\sigma_{\phi\phi} - \sigma_{ZZ}\right)^2 + 6\sigma_{Zr}^2\right]}, \quad (9)$$

$$\Gamma = \sqrt{\frac{1}{6}\left[\left(\varepsilon_{ZZ} - \varepsilon_{rr}\right)^2 + \left(\varepsilon_{rr} - \varepsilon_{\phi\phi}\right)^2 + \left(\varepsilon_{\phi\phi} - \varepsilon_{Zr}\right)^2 + 6\varepsilon_{Zr}^2\right]}. \quad (10)$$

Распределение температуры в элементах конструкции соплового блока определяется дифференциальным уравнением нестационарной теплопроводности вида (3) при следующих начальном и граничном условиях: $t = t_0(r,z)$, $\lambda\left(\partial t/\partial n\right) = \alpha(t-\theta)$, где $\vec{n}$ – направление внешней нормали к поверхности *F*, омываемой высокотемпературным газовым потоком и абляция на этой поверхности происходит с заданной постоянной скоростью V, $F = F(V,\tau)$.

Рассмотрим рабочую среду, проводящую тепло посредством теплопроводности и находящуюся в двухфазном состоянии. Пусть t_i, λ_i, c_i и p_i $(i = 1,2)$ – соответственно температуры, коэффициенты теплопроводности, теплоемкости и плотность, характеризующие эти фазы. Предположим, что переход из фазы «1» в фазу «2» сопровождается поглощением тепла. Пусть $Д_{1t}$ и $Д_{2t}$ – области, занятые в момент времени τ соответственно «1» и «2» фазами, а S_t – граница раздела фаз. Будем предполагать, что S_t – гладкая поверхность, при переходе через которую происходит разрыв теплофизических характеристик λ_i и c_i. В то же время ее следует рассматривать как поверхность, вдоль которой распределены поверхностные источники тепла. Пусть *M* – точка на поверхности S_t, и $\overline{n}_M$ – нормаль к S_t в точке *M*, внешняя относительно $Д_{1t}$. Обозначим через M_1 точку пересечения $\overline{n}_м$ $S_{t+\delta t}$, где $\delta_t > 0$. Тогда

$$\overline{MM_1} = \overline{\delta}^n = \delta_n \cdot \overline{n}^\circ,$$

где $\overline{n}^\circ$ – единичный вектор нормали $\overline{n}$.

Следовательно, $\delta_n > 0$ при $M_1 \in Д_{2t}$, и $\delta_n < 0$ при $M_1 \in Д_{1t}$. Это означает, что если $\delta_n > 0$, то в окрестности точки *M* в течение времени δ_t происходит превращение фазы «2» в фазу «1», сопровождающееся выделением скрытой теплоты и, наоборот, если $\delta_n < 0$, то фазовый переход сопровождается ее поглощением.

Пусть *ds* – элемент поверхности S_t, содержащий точку *M*, а $d\omega$ – цилиндрический элемент, построенный на *ds* как на основании. Тогда

$$|d\omega| = |\delta_n|\, ds.$$

Считаем, что знак $d\omega$ совпадает со знаком δ_n. В результате фазового перехода выделяется количество тепла, равное

$$\delta q = \Phi \rho d\omega = \Phi \rho \delta_n ds,$$

где Φ – скрытая теплота фазового перехода. Относя δ_q к единице поверхности и к единице времени, определим, что величина

$$q = \Phi \rho^{-} \frac{\delta_n}{\delta_t},$$

равная скорости выделения скрытой теплоты фазового перехода, должна рассматривается как плотность источников тепла, распределенных вдоль поверхности раздела фаз.

Следовательно, на границе раздела фаз S_t должно выполнятся условие сопряжения

$$\lambda_1 \frac{\partial t_1}{\partial n}\bigg|_{st} - \lambda_2 \frac{\partial t_2}{\partial n}\bigg|_{s_t} = \Phi \rho \frac{\delta_n}{\delta_t},$$

показывающее, что разрыв в потоке тепла при переходе через границу раздела фаз в сторону фазы «1» равен скорости выделения скрытой теплоты фазового перехода.

Запишем это условие в развернутом виде. Пусть *x*, *y*, *z* – декартова система координат и $F(x, y, z) = 0$ – уравнение поверхности раздела фаз. Нормальное уравнение касательной плоскости к этой поверхности имеет вид

$$(X - x)\alpha + (Y - y)\beta + (Z - z)\gamma = 0,$$

где

$$\alpha = \frac{\frac{\partial F}{\partial x}}{\pm|gradF|}; \quad \beta = \frac{\frac{\partial F}{\partial y}}{\pm|gradF|}; \quad \gamma = \frac{\frac{\partial F}{\partial z}}{\pm|gradF|}$$

направляющие косинусы δ_{n_M}, а *X*, *Y*, *Z* – текущие координаты. Пусть точка M_1 имеет координаты x_1, y_1, z_1 и

$$dx = x_1 - x; \;\; dy = y_1 - y; \;\; dz = z_1 - z,$$

тогда

$$\delta_n = \alpha dx + \beta dy + \gamma dz.$$

С другой стороны,

$$\frac{\partial F}{\partial x}dx + \frac{\partial F}{\partial y}dy + \frac{\partial F}{\partial z}dz + \frac{\partial F}{\partial \tau}d\tau = 0.$$

Таким образом, условие на границе раздела фаз имеет вид

$$\left(\lambda_1 gradt_1 - \lambda_2 gradt_2, gradF\right)_F + \Phi\rho\frac{\partial F}{\partial\tau} = 0,$$

где (,) – скалярное произведение.

В случае учета теплового потока $Q\left(Q_x, Q_y, Q_z\right)$ на границе раздела фаз получено следующее граничное условие на фронте фазового превращения

$$\left[1+\left(\frac{\partial F/\partial x}{\partial F/\partial z}\right)^2+\left(\frac{\partial F/\partial y}{\partial F/\partial z}\right)^2\right]\left[\lambda_1\frac{\partial t_1}{\partial z}-\lambda_2\frac{\partial t_2}{\partial z}\right]=$$

$$=\rho\Phi\frac{\partial F/\partial\tau}{\partial F/\partial z}-\left[\frac{\partial F/\partial x}{\partial F/\partial z}Q_X+\frac{\partial F/\partial y}{\partial F/\partial z}Q_Y+Q_Z\right].$$

Если $Q=0$ и $F\left(x,y,z,\tau\right)=z-\eta\left(x,y,z,\tau\right)=0$, то это соотношение принимает вид

$$\left[1+\left(\frac{\partial\eta}{\partial x}\right)^2+\left(\frac{\partial\eta}{\partial y}\right)^2\right]\left[\lambda_1\frac{\partial t_1}{\partial z}-\lambda_2\frac{\partial t_2}{\partial z}\right]=\rho\Phi\frac{\partial\eta}{\partial\tau}.$$

Для определения распределения температур в фазах «1» и «2» можно воспользоваться следующей системой уравнений, дополненной условием на границе раздела фаз

$$\begin{aligned}
&\frac{\partial t_i}{\partial t}=a^{\,2}div\left(gradt_i\right)+q_i, && \left(i=1.2\right);\\
&t_1\left(x,y,z,0\right)=\phi_1\left(x,y,z\right), && x,y,z\in Д_1;\\
&t_2\left(x,y,z,0\right)=\phi_2\left(x,y,z\right), && x,y,z\in Д_2;\\
&t_1/_{S_1}=\phi_1\left(x,y,z,\tau\right),\tau\rangle 0, && x,y,z\in s_1;\\
&t_2/_{S_2}=\phi_2\left(x,y,z,\tau\right),\tau\rangle 0, && x,y,z\in s_2;\\
&t_1/_F=t_2/_F=t_\varphi\left(x,y,z,\tau\right),\tau\rangle 0, && x,y,z\in F,
\end{aligned}$$

где $s_1+F,\ s_2+F$ – соответственно поверхности фаз «1» и «2»; $t_\varphi\left(x,y,z,\tau\right)$ – температура фазового перехода; q_i – действующие источники тепла.

Рабочий процесс для двухкомпонентных ЖРД малой тяги (ЖРДМТ) имеет ряд особенностей, среди которых, например, запуск в условиях космического пространства, значительные временные промежутки между включениями, а также смесеобразование в ограниченных объемах при малых расходах компонентов топлива и ограниченном числе смесительных элементов. Высокая полнота и устойчивость сгорания топлива достигается в том случае, если форсуночная головка обеспечивает равномерное поле соотношения компонентов в ядре потока и в пристеночном слое. Для качественного смесеобразования применяют смесительные головки со струйными элементами с пересечением струй. Проектирование форсуночных головок, отвечающих особенностям организации рабочего процесса в камере ЖРДМТ, представляет значительные трудности.

К проблеме смешения струй проявляется повышенный интерес в связи с широким применением процесса при создании смесительных устройств двигательной установки, которые должны обеспечивать для камеры сгорания двигателя высокое значение удельного импульса и устойчивую работу. Для этого необходимо создать однородное распределение компонентов топлива по площади камеры. Поэтому смесеобразование, осуществляемое смесительной головкой, должно способствовать полноте сгорания топлива и однородности поля скоростей.

Рассмотрим процесс смешения струй жидкости, вытекающих в прямоугольную область из двух насадок, расположенных по обе стороны широких граней.

Функция тока в каждой точке исследуемой области в случае безвихревого плоского давления должна удовлетворять уравнению Лапласа

$$\frac{\partial^2\Omega}{\partial x^2}+\frac{\partial^2\Omega}{\partial y^2}=0$$

с граничными условиями

$$\Omega_{x=0}=\varphi_1(y);\ \Omega_{x=a}=\varphi_2(y);\ \Omega_{y=0}=\psi_1(x);\ \Omega_{y=b}=\psi_2(x).$$

Для решения поставленной задачи предварительно были экспериментально определены скорости потоков жидкости, омывающих широкие и узкие грани.

По приведенным зависимостям потоков определим функции тока из соотношений

$$\frac{\partial\Omega}{\partial y}=u;\ \frac{\partial\Omega}{\partial x}=-\upsilon.$$

Для решения граничной задачи введем новую функцию $V(x,y)$, приводящую граничные условия по y к однородным:

$$V(x,y)=\Omega(x,y)-\psi_1(x)\frac{b-y}{b}-\psi_2\frac{y}{b}.$$

Относительно функции $V(x,y)$ исходная задача преобразуется к виду

$$\frac{\partial^2 V}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 V}{\partial y^2}=-\psi_1^{//}(x)\frac{b-y}{b}-\psi_2^{//}(x)\frac{y}{b}=-F(x,y);$$

$$V_{x=0}=\varphi_1(x)-\psi_1(0)\frac{b-y}{b}-\psi_2(0)\frac{y}{b}=f_1(y);$$

$$V_{x=a}=\varphi_2(y)-\psi_1(a)\frac{b-y}{b}-\psi_2(a)\frac{y}{b}=f_2(y);$$

$$V_{y=0}=V_{y=b}=0.$$

Решение уравнения имеет вид

$$V(x,y)=\sum_{n=1}^{\infty}\alpha_n(x)\sin\frac{n\pi}{b}y.$$

Тогда

$$\Omega(x,y)=\sum_{n=1}^{\infty}\alpha_n(x)\sin\frac{n\pi}{b}y+\psi_1(x)\frac{b-y}{b}+\psi_2(x)\frac{y}{b}.$$

Определим неизвестные коэффициенты $\alpha_n(x)$. Предположим, что

$$F(x,y)=\sum_{n=1}^{\infty}\beta_n(x)\sin\frac{n\pi}{b}y;$$

$$f_1(y)=\sum_{n=1}^{\infty}\gamma_n\sin\frac{n\pi}{b}y;\quad f_2(y)=\sum_{n=1}^{\infty}\chi_n\sin\frac{n\pi}{b}y,$$

где

$$\beta_n(x)=\frac{a}{b}\int_0^b F(x,y)\sin\frac{n\pi}{b}ydy;\quad \gamma_n(x,y)=\frac{2}{b}\int_0^b f_1(y)\sin\frac{n\pi}{b}ydy;$$

$$\chi_n=\frac{2}{b}\int_0^b f_2(y)\sin\frac{n\pi}{b}ydy.$$

Подставляя эти выражения, получаем

$$\begin{cases}\alpha_n^{//}(x)-\lambda_n^2\alpha_n=-\beta_n,\\ \alpha_n(0)=\gamma_n,\\ \alpha_n(a)=\chi_n.\end{cases}$$

Решим эту задачу методом вариации произвольных постоянных

$$\alpha_n(x)=c_{1n}(x)e^{\lambda_n x}+c_{2n}(x)e^{-\lambda_n x},$$

где $c_{1n}(x)$ и $c_{2n}(x)$ определяются из системы алгебраических уравнений относительно $c'_{1n}(x)$ и $c'_{2n}(x)$.

Разрешая ее, получим

$$\begin{cases} c_{1n} = -\dfrac{1}{2\lambda_n}\displaystyle\int e^{-\lambda_n x}\beta_n(x)dx + c_1, \\ c_{2n} = \dfrac{1}{2\lambda_n}\displaystyle\int e^{-\lambda_n x}\beta_n(x)dx + c_2. \end{cases}$$

Постоянные c_1 и c_2 находятся из системы алгебраических уравнений. Окончательно функция тока определяется выражением

$$\Omega(x,y) = \sum_{n=1}^{\infty}\alpha_n(x)\sin\frac{n\pi}{0,25}y + x^2(0,15-1,2y) - (0,54-1,92y)x + 0,3y.$$

Из последнего выражения найдем компоненты скоростей, выполнив дифференцирование по текущей координате:

$$U = 12,57\sum_{n=1}^{\infty} n\alpha_n \cos\frac{n\pi}{0,25}y + 2,4x - 0,304;$$

$$\upsilon = -\sum_{n=1}^{\infty}\frac{d\alpha_n}{dx}\sin\frac{n\pi}{0,25}y - 0,3x - 2,4y + 0,54.$$

На основании анализа полученных результатов расчета можно сделать вывод, что изменение продольной скорости в потоке имеет прямо пропорциональную зависимость от продольной координаты и представляет собой семейство прямых линий, располагающихся одна под другой при различных расстояниях y от стенки.

Выводы. Разработаны постановка и методы решения задачи проектирования систем подачи топлива, терморегулирования с фазовыми превращениями рабочих сред, соплового блока ракетного двигателя на твердом топливе.

Предложены физическая и математическая модели, алгоритм их численной реализации с использованием компьютерного информационного обеспечения на базе алгоритма «Extended Delta-Bar-Delta» прогнозирования с использованием методов нейронных сетей. Для расчета струйного истечения из форсуночных головок двигательной установки космического аппарата получены зависимости, которые могут быть внедрены в практику проектирования форсуночных головок двигательных установок.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. ***Присняков В. Ф.*** Исследование динамических процессов с изменением агрегатного состояния рабочих тел в ракетных и ядерных силовых установках летательных аппаратов и космических объектов: Дис. д-ра техн. наук. Днепропетровск,1971. 436 с.

2. ***Яковенко А. Г.,*** *Драновский В. И., Кошкин М. И.* Математическая модель элемента системы терморегулирования космического летательного аппарата. // Технологические системы. 2003. № 1. С. 49–53.

3. ***Яковенко А. Г.*** Моделироване процесса переноса в трубопроводах силовой установки. // Пробл. обчисл. механіки і міцності конструкцій. 2016. Вип.25. С. 217–229.

4. ***Яковенко А. Г.*** Моделирование процесса гидрорезания заряда твердого ракетного топлива. / Вісн. Дніпропетр. ун-ту. Сер.: Механіка неоднорідних структур. 2016. Вип.1 (20). С. 112–117.

5. ***Яковенко А. Г.,*** *Кошкин М. И., Яковенко В. А.* Моделирование процесса взаимодействия струй в емкости. // Вісн. Дніпропетр. ун-ту. Сер.: Ракетно-космічна техніка. 2002. Вип.6. С. 37–41.

6. ***Яковенко А. Г.,*** *Яковенко В. А.* Проектирование элементов системы подачи топлива силовой установки. // Наук. вісн. нац. гірничого ун-ту. 2003. № 2. С. 70–71.

УДК 519.633:536.24

В. А. Яковенко[1], д-р техн. наук, А. Г. Яковенко[2], д-р техн. наук

МОДЕЛЮВАННЯ ТА ІНФОРМАЦІЙНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПРОЦЕСІВ КОНВЕКТИВНОГО ТЕПЛООБМІНУ В КАНАЛАХ РУХОВИХ УСТАНОВОК ПРИ ФАЗОВИХ ПРЕТВОРЕННЯХ РОБОЧИХ СЕРЕДОВИЩ

Запропонована математична модель і комп'ютерне інформаційне забезпечення процесу теплообміну в каналах рухових установок космічних літальних апаратів при фазових перетвореннях робочих середовищ. Результати можуть бути використані в практиці проектування рухових установок космічних літальних апаратів.

Ключові слова: *рухові установки, робоче середовище, конвективний теплообмін, математична модель, комп'ютерне інформаційне забезпечення.*

UDC 519.633:536.24

V. A. Yakovenko[1], Dr. Sci. (Tech.), A. G. Yakovenko[2], Dr. Sci. (Tech.)

MODELING AND INFORMATIONAL TECHNOLOGIES OF CONVECTIVE HEAT TRANSFER PROCESSES IN THE CHANNELS OF PROPULSION SYSTEMS DURING PHASE TRANSFORMATIONS OF WORKING MEDIA

A mathematical model and computer informational technologies of the process of heat transfer in the channels of propulsion systems of spacecrafts during phase transformations of working media is proposed. The results can be used in the practice of designing propulsion systems of spacecraft.

Keywords: *propulsion systems, working environment, convective heat transfer, mathematical model, computer informational technologies.*

The development of methods for modeling the processes of heat and mass transfer in channels and the accumulated experience in solving specific problems create new opportunities for research, especially when studying phase transformations.

However, the effect of axial thermal conductivity in the liquid and solid phases on heat exchange was neglected. Note, the assumption that a change in the density of the heat flux due to thermal conductivity along the axis is small in comparison with the variation along the radius, can lead to significant errors if the Peclet number is small.

Such conditions are characteristic for the flow of fuel components in long pipelines, liquid metal coolants in heat pipes. Consequently, the calculation of heat transfer taking into account the thermal conductivity along the axis represents not only theoretical but also practical interest.

Neglecting the axial thermal conductivity greatly simplifies the calculation of heat transfer, since in this case the only mechanism of heat transfer along the axis is convective transport. Therefore, any «thermal perturbation» is carried downstream with the velocity of the fluid.

In this case, the temperature field in a certain section of the flow will depend on the temperature fields only in the preceding sections.

If the thermal conductivity due to axial temperature gradients is taken into account, the temperature field in a certain section of the flow will depend on the temperature fields and in subsequent sections. This feature of heat exchange phenomena, considered with allowance for axial thermal conductivity, significantly complicates the calculation. Therefore, only a few problems of heat exchange are solved with allowance for axial thermal conductivity.

In connection with this, it is important to study the steady-state and unsteady heat exchange processes during the flow of liquid monocomponent media in the channels of the propulsion system under conditions of their solidification and taking into account the axial thermal conductivity.

The results of fundamental studies of the heat transfer of working bodies, taking into account their phase transformation of liquid-vapor, are also given in the works of V. F. Prisnyakov, where the analytical solution of the problem of effervescence of a fuel component in the cooling path of a liquid rocket engine was first obtained and a technique for calculating the aftereffect of thrust.

On the basis of the homogeneous boiling model developed by him, the dependences of the flow rate of the vapor-liquid mixture on time were obtained, the pressure of displacement of the effervescent liquid was calculated for uneven heating of the channel along the length, stability of the vapor-liquid circuit with a liquid-metal coolant and instability of flow in channels of small dimensions was studied.

Creation of propulsion systems of spacecrafts operating in modes with phase transformations of working media is associated with the need to solve the scientific and technical problem – the development of theoretical and methodological foundations for the design of a fuel supply system, thermal control systems and a nozzle unit. The thermal processes in these systems are accompanied, respectively, by solidification, evaporation and condensation, ablation of working media.

The formulation and methods for solving the problem of designing fuel supply systems, a nozzle block of a rocket engine with solid fuel, thermal control with phase transformations of working media have been developed. The methodology of research is offered.

The physical and mathematical models and the algorithm of their numerical realization for calculation of jet flow from the nozzle heads of the propulsion system of the spacecraft are proposed. The obtained dependences can be introduced into the practice of designing nozzle heads of propulsion systems.

REFERENCES

1. ***Prisnyakov V. F.*** Research of dynamic processes with change of an aggregate condition of working bodies in rocket and nuclear power plants of flying machines and space objects: Dissertation of the doctor of technical sciences. Dnipropetrovsk, 1971. 436 P. (in Russian).

2. ***Yakovenko A. G.,*** *Dranovsky V. I., Koshkin M. I.* Mathematical model of the system of thermoregulation of a spacecraft // Technological systems. 2003. No. 1. P. 49–53. (in Russian).

3. ***Yakovenko A. G.*** Modeling of the transfer process in the pipelines of the power plant // Problems of the computational mechanics and strength of structures. 2016. Vol. 25. P. 217–229. (in Russian).

4. ***Yakovenko A. G.*** Modeling of the process of hydraulic cutting of a solid rocket fuel charge // Bulletin of Dnipropetrovsk university. Ser.: Mechanics of inhomogeneous. structures. – 2016. Vol.1 (20). P. 112–117. (in Russian).

5. ***Yakovenko A. G.,*** *Koshkin M. I.* Modelling process of jets' interaction in tanks // Bulletin of the Dnipropetrovsk university.Ser.: Rocket and space technics. 2002. Vol. 6. P. 37–41. (in Russian).

6. ***Yakovenko A. G.,*** *Yakovenko V. A.* Designing the elements of the propulsion system of power plant// Naukovy visnyk of National mining university. 2003. № 2. P. 70–71. (in Russian).

[1]Університет митної справи та фінансів,
[2]Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара,
Дніпро, Україна

Надійшла до редколегії 05.09.2018