УДК 536.24:532.526

В. М. Репухов

Институт технической теплофизики НАНУ, Киев, Украина

МЕТОД РЕШЕНИЯ СИСТЕМЫ УРАВНЕНИЙ-УСЛОВИЙ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ОБЩИХ ТРАНСПОРТНЫХ УРАВНЕНИЙ КОНВЕКТИВНОГО ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА К ПРОСТЕЙШЕМУ ВИДУ

АННОТАЦИЯ

Ранее полученная система уравнений-условий для преобразования σ нестационарных трехмерных дифференциальных транспортных уравнений конвективного тепломассопереноса высокоскоростного неизотермического и неоднородного трехмерного течения при любых состояниях вещества и законах переноса к простейшей форме уравнений низкоскоростного течения, включая квазиизотермическое и квазиоднородное течение, представляется в матричной форме и дается общий метод ее решения. Рассматриваются приближенные решения, включая аналитические, для пересчета методом σ эффективности трехмерных пристенных защитных завес.

1. ВВЕДЕНИЕ

Преобразование σ (σ_i - $\bar{\rho} = \text{const}$; σ_l - $K_{\oplus} = 1$) приводит мгновенные дифференциальные уравнения конвективного тепломассопереноса нестационарного высокоскоростного неизотермического и неоднородного трехмерного течения (прообраз), представляемые и дополняемые транспортными уравнениями общего вида (неразрывности, переноса импульса, массы j-го компонента, энергии и другие), при любых законах переноса и состояния вещества к соответствующим простейшим уравнениям низкоскоростного течения (образ, величины с верхней чертой), включая несжимаемое квазиизотермическое и квазиоднородное течение, и наоборот. Преобразование в форме численных процедур или аналитических решений применяется к прообразу (образу), данному в виде эксперимента, численного или аналитического решения, и приводит пространство прообраза с ортонормированным базисом и транспортными уравнениями к пространству образа, в конечном счете, с таким же базисом при основных функциях преобразования [1–5]

$$\tau \equiv \frac{\partial \bar{t}}{\partial t},\ \xi \equiv \frac{\partial \bar{x}}{\partial x},\ \eta \equiv \frac{\bar{\rho}\partial \bar{y}}{\rho \partial y},\ \frac{n_* K_{*0\alpha}}{n_{*0} K_{*\alpha}} = 1 \text{ и } f_* \equiv \frac{a_*}{\bar{a}_*}, \quad (1)$$

которые определены соответственно как отношения приращений обобщенных координат и транспортируемых величин a_* и $\bar{a}_*$. Эти функции позволяют вести пересчет одноименных величин в точках сходственных мгновенных линий тока прообраза и образа, а также связать вещественную неособенную обратную матрицу преобразования координат $[C]^{-1}$ с уравнением неразрывности и функционалами левых частей транспортных уравнений $L_V(a_*) \equiv \rho \dfrac{da_*}{dt}$ подсистемой уравнений-условий, а правых $R_D(a_*) \equiv div\, \vec{b}_{*T}$ и в целом транспортными уравнениями – полной системой [2–5].

Наименьшее число основных функций десять для бинарной смеси и шести первых транспортных уравнений, которые имеют замкнутую полную систему и к ним добавляются новые, а величины

$$f_\rho,\ f_u,\ f_v,\ f_w,\ f_{m_j} = 1 \text{ и } f_h = \text{const} \quad (2)$$

– соответственно отношения плотности смеси, проекций скорости, полных относительных массовых концентраций и энтальпий j-го компонента и смеси.

Левые части транспортных уравнений допускают точное аналитическое представление уравнений-условий подсистемы для выделения функционалов образа из функционалов прообраза, обобщенных функций преобразования $\bar{f}_* \equiv f_\rho f_* f_u \xi$ и дефектов преобразования s_* со скалярным произведением четырехмерных вектора преобразования $\vec{\Phi}(a_*)$ и обобщенной скорости $\vec{V}_T(1,u,v,w)$ в виде

$$L_V(a_*) = \bar{f}_* \bar{L}_V(\bar{a}_*) + s_* \text{ и } s_* \equiv \rho a_* (\vec{V}_T \circ \vec{\Phi}(a_*)), \quad (3)$$

где $\Phi_\alpha(a_*) = \dfrac{\partial \ln a_*}{\partial \alpha} - \dfrac{\partial \bar{\alpha}}{\partial \alpha}\dfrac{\partial \ln \bar{a}_*}{\partial \bar{\alpha}}$ проекции вектора преобразования, а $\alpha = t, x, y, z$ и $\bar{\alpha}$ – координаты.

Правые части транспортных уравнений, связаны с дивергенцией обобщенных четырехмерных векторов переноса $\vec{b}_{*T}$. Выделение функционалов образа из функционалов прообраза в правой части транспортных уравнений приводит к обобщенным уравнениям-условиям дефектов в виде

$$R_D(a_*) = \bar{f}_* \bar{R}_D(\bar{a}_*) + S_{*T} \text{ и } s_* = S_{*T}, \quad (4)$$

где $s_* = \bar{f}_* \bar{s}_*$ и $S_{*T} \equiv \bar{f}_* \bar{S}_{*T} = -\bar{f}_* \sum\limits_{\bar{\alpha}} \bar{C}_{*\alpha} \dfrac{\partial \bar{b}_{*\alpha}}{\partial \bar{\alpha}}$ – равенства для дефектов при обобщенных коэффициентах $\bar{C}_{*\alpha}$; а индексы $* = u, v, w, m_j, h, ...$ сочетаются в левой части уравнений с $\alpha = t, x, y, z$ и правой с $\alpha = \alpha_*, x, y, z$. Уравнение дефекта правой части становится уравнением-условием дефектов после подстановки в него величины $S_{*T} = s_*$ [2–5].

Обобщенные коэффициенты дефектов задаются, как и учитываются законы термодинамики в отношении уравнений состояния прообраза и образа

$$\left.(1-\frac{u^2+v^2+w^2}{2h^0})\frac{f_\rho f_h}{f_P}\right|_{\frac{P}{\overline{P}}=\frac{\varphi}{\overline{\varphi}}=\frac{p}{\overline{p}}}=\frac{(\rho h/p)}{(\overline{\rho}\overline{h}/\overline{p})}, \qquad (5)$$

в частности, $\frac{(\rho h/p)}{(\overline{\rho}\overline{h}/\overline{p})}=(\frac{\overline{\kappa}-1}{\overline{\kappa}}/\frac{\kappa-1}{\kappa})=\frac{Z}{\overline{Z}}$, где Z и $\overline{Z}$ – коэффициенты сжимаемости в уравнении состояния, а у совершенного газа $\kappa=\overline{\kappa}=0,4$ [1, 2, 4].

Отношения проекций векторов переноса связаны равенствами с относительными законами и законами переноса, и состояния вещества соответственно $f_{b*\alpha}\equiv\frac{b_{*\alpha}}{\overline{b}_{*\alpha}}=(\frac{b_{*\alpha}}{b^0_{*\alpha}}/\frac{\overline{b}_{*\alpha}}{\overline{b}^0_{*\alpha}})\Psi^0_{*\alpha}$, $\Psi^0_{*\alpha}\equiv\frac{b^0_{*\alpha}}{\overline{b}^0_{*\alpha}}$, $(-b^0_{*\alpha})$ и $(-\overline{b}^0_{*\alpha})$, где последние записаны с помощью полных параметров и представляют интерес случаи их локального подобия и записи однородными функциями с аргументами из локальных линейных комбинаций проекций градиентов величин a_* и $\overline{a}_*$.

При $f_{b*\alpha}\big|_{*\neq h}=\Psi^0_{*\alpha}$, $q_\alpha=q_{\lambda\alpha}+\sum_j\frac{h_j}{Le_{e\alpha}}J^0_{j\alpha}$, $f_{bh\alpha}=\Psi^0_{h\alpha}(1+B_{h\alpha})$ и $\overline{b}^0_{h\alpha}=-\overline{q}^0_\alpha$ следует

$$B_{h\alpha}\equiv\frac{\frac{b_{h\alpha}}{b^0_{h\alpha}}}{\frac{\overline{b}_{h\alpha}}{\overline{b}^0_{h\alpha}}}-1=\frac{\frac{q^0_\alpha-q_\alpha+(u\tau_{x\alpha}+v\tau_{y\alpha}+w\tau_{z\alpha})}{b^0_{h\alpha}}}{1+(\overline{Le}_{e\alpha}-1)\sum_j\frac{\overline{h}_j}{\overline{Le}_{e\alpha}}\frac{\overline{b}_{m_j\alpha}}{\overline{b}^0_{h\alpha}}}+$$

$$+\frac{(Le_{e\alpha}-1)\sum_j\frac{h_j}{Le_{e\alpha}}\frac{b_{m_j\alpha}}{b^0_{h\alpha}}-(\overline{Le}_{e\alpha}-1)\sum_j\frac{\overline{h}_j}{\overline{Le}_{e\alpha}}\frac{\overline{b}_{m_j\alpha}}{\overline{b}^0_{h\alpha}}}{1+(\overline{Le}_{e\alpha}-1)\sum_j(\frac{\overline{h}_j}{\overline{Le}_{e\alpha}}\frac{\overline{b}_{m_j\alpha}}{\overline{b}^0_{h\alpha}})},$$

а $B_{h\alpha}=0$ при специальном σ – преобразовании с нулевым числителем суммы последних дробей или одновременно каждой из них (непроницаемая стенка; в первой – равномерный сильный вдув или локальное подобие с $\mathrm{Pr}_{e\alpha}=\mathrm{K}_\Pi=1$; а во второй – $Le_{e\alpha}=\overline{Le}_{e\alpha}$ и $\left.\sum_j h_j b_{m_j\alpha}\right|_{Le=\mathrm{const}}=\sum_j h^0_j b_{m_j\alpha}$, или $Le_{e\alpha}=\overline{Le}_{e\alpha}=1$, или однородное течение) [1, 2, 3].

Ниже рассматриваются транспортные полные уравнения (НС), укороченные за счет продольных и других производных (УНС) и пограничного слоя (ПС) как мгновенные, либо одной формы для ламинарных и турбулентных течений, дополненных уравнениями модели для турбулентной вязкости.

2. ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Мгновенные транспортные уравнения величин a_* в общем виде представляются равенствами $L_V(a_*)\equiv\rho\frac{da_*}{dt}=\pm\frac{\partial P}{\partial\alpha_*}+\mathrm{div}\,\vec{b}_*\equiv R_D(a_*)$, или

$$L_V(a_*)\equiv\rho\frac{da_*}{dt}=div\,\vec{b}_{*T}\equiv R_D(a_*), \qquad (6)$$

где $L_V(a_*)$ и $R_D(a_*)$ – функционалы левой и правой частей уравнений; P – скаляр (давление, потенциал объемных сил и другие величины); $\vec{b}_*(b_{*x},b_{*y},b_{*z})$ и $\vec{b}_{*T}(b_{*\alpha_*}\equiv b_{p\alpha_*},b_{*x},b_{*y},b_{*z})$ – трехмерный и упрощающий запись обобщенный четырехмерный векторы переноса с проекциями, определяемым законом переноса величины a_* ($b_{p\alpha_*}=0$ – $*=\rho,m_j$; $b_{p\alpha_*}=-P$ – $*=u,v,w$; $b_{p\alpha_*}=+P$ – $*=h$); α и α_* – координаты, которые принимают в общем случае значения t,x,y,z, причем вторая в соответствии с $*=(1\text{ и }h),u,v,w$ [2-5].

Первые уравнения ($*=\rho,u,v,w,m_j,h$) имеют

$$R_D(\rho)=-\rho^2\mathrm{div}\,\vec{V},\ \vec{R}_D(\vec{V})=-\mathrm{grad}\varphi+\vec{Div}P,$$

$$R_D(m^0_j)=-\mathrm{div}\,\vec{J}^0_j \text{ и } R_D(h^0)=-\mathrm{div}\,\vec{Q}, \qquad (7)$$

где φ и $\vec{Q}=\vec{q}_\lambda-(\vec{V}\circ(P+pE))+\sum_j h_j\vec{J}^0_j$ – потенциал объемных сил и вектор потока теплоты (теплопроводность, работа сил трения, диффузия); P и $\vec{Div}P$ – тензор напряжений и его дивергенция; $\vec{b}_u=\vec{\tau}_X$, $\vec{b}_v=\vec{\tau}_Y$, $\vec{b}_w=\vec{\tau}_Z$, $\vec{b}_{m_j}=-\vec{J}^0_j$, $\vec{b}_h=-\vec{Q}$, $div\,\vec{J}^0_j=\frac{\partial J^0_{jx}}{\partial x}+\frac{\partial J^0_{jy}}{\partial y}+\frac{\partial J^0_{jz}}{\partial z}$ и

$$\mathrm{div}\,\vec{Q}=\frac{\partial}{\partial x}\{q_{\lambda x}-u\tau_{xx}-v\tau_{yx}-w\tau_{zx}+\sum_j h_jJ^0_{jx}\}+$$

$$+\frac{\partial}{\partial y}\{q_{\lambda y}-v\tau_{yy}-u\tau_{xy}-w\tau_{zy}+\sum_j h_jJ^0_{jy}\}+$$

$$+\frac{\partial}{\partial z}\{q_{\lambda z}-w\tau_{zz}-u\tau_{xz}-v\tau_{yz}+\sum_j h_jJ^0_{jz}\}$$

– векторы переноса с дивергенциями; $\vec{\tau}_\alpha(\tau_{x\alpha},\tau_{y\alpha},\tau_{z\alpha})$, $\vec{q}_\lambda(q_{\lambda x},q_{\lambda y},q_{\lambda z})$ и $\vec{J}^0_j(J^0_{jx},J^0_{jy},J^0_{jz})$ – векторы напряжений за счет вязкости, плотностей потоков теплоты и массы *j*-го компонента с их проекциями.

Вводятся также и задаются аналогичные основным дополнительные функции ($\alpha=\alpha_*,x,y,z$)

$$f_{b*\alpha}\equiv b_{*\alpha}/\overline{b}_{*\alpha},\text{ включая } f_P=P/\overline{P}, \qquad (8)$$

которые при известной обратной матрице преобразования координат $[C]^{-1}$ однозначно связаны с обобщенными коэффициентами дефектов

$$\overline{C}_{*\alpha}(\bar{t},\bar{x},\bar{y},\bar{z}) \equiv 1-\frac{1}{\overline{f}_*}\left(\frac{\partial b_{*\alpha}}{\partial\alpha}/\frac{\partial\overline{b}_{*\alpha}}{\partial\overline{\alpha}}\right) = \\ = 1-\frac{f_{b*\alpha}}{\overline{f}_*}\left(\frac{\partial\ln b_{*\alpha}}{\partial\alpha}/\frac{\partial\ln\overline{b}_{*\alpha}}{\partial\overline{\alpha}}\right) \tag{9}$$

включая $\overline{C}_{p\alpha*} = 1-\frac{f_P}{\overline{f}_*}\left(\frac{\partial\ln P}{\partial\alpha_*}/\frac{\partial\ln\overline{P}}{\partial\overline{\alpha}_*}\right)$.

Строго говоря, искомыми в системах уравнений-условий являются логарифмические производные основных функций (основные первичные функции). Они связывают линейными алгебраическими уравнениями основные величины прообраза и образа, как и логарифмические производные дополнительных связывают проекции векторов переноса:

$$[a_*]=[\overline{a}_*][f_*] \text{ и } [Ga_*]=[\overline{Ga}_*][C]^{-1}+[Gf_*], \\ [b_{*\alpha}]=[\overline{b}_{*\alpha}][f_{b*\alpha}] \text{ и } \\ [Gb_{*\alpha}]=[\overline{Gb}_{*\alpha}][C]_*^{-1}+[Gf_{b*\alpha}], \tag{10}$$

которые не учитываются далее при подсчете числа уравнений-условий, как и их интегралы, и где $F(\lambda A)=\lambda^{\mathrm{K}}F(A)$ отличается от $[\overline{C}]^{-1}$ первым столбцом $\left(\frac{\partial\bar{t}}{\partial\alpha_*},\frac{\partial\bar{x}}{\partial\alpha_*},\frac{\partial\bar{y}}{\partial\alpha_*},\frac{\partial\bar{z}}{\partial\alpha_*}\right)'$; $\left[\frac{\partial\overline{\alpha}}{\partial\alpha}\right]\equiv\left[\frac{\partial\bar{t}}{\partial t},\frac{\partial\bar{x}}{\partial x},\frac{\partial\bar{y}}{\partial y},\frac{\partial\bar{z}}{\partial z}\right]$, $[a_*]\equiv[\rho,u,v,...]$ и $[f_*]\equiv[f_\rho,f_u,f_v,...]$ – диагональные матрицы; $[Ga_*]\equiv\left[\frac{\partial\ln a_*}{\partial\alpha}\right]$ и $[Gf_*]\equiv\left[\frac{\partial\ln f_*}{\partial\alpha}\right]$ – матрицы, имеющие индексы $*=\rho,u,v,w,m_j,h,...$ для строк и $\alpha=t,x,y,z$ для столбцов; $[b_{*\alpha}]$, $[f_{b*\alpha}]$ $[Gb_{*\alpha}]\equiv\left[\frac{\partial\ln b_{*\alpha}}{\partial\alpha}\right]$ и $[Gf_{b*\alpha}]\equiv\left[\frac{\partial\ln f_{b*\alpha}}{\partial\alpha}\right]$ – аналогичные матрицы, имеющие индексы соответственно $*\alpha=*\alpha_*,*x,*y,*z$ и $\alpha=\alpha_*,x,y,z$.

Основная полная система уравнений-условий получена и опубликована для случая нестационарной и стационарной задачи, включая ПС [1–4] и ниже записывается в матричной форме, которая удобна для анализа и при тридцати пяти неизвестных ($f_T\equiv\frac{d\bar{t}}{dt}$, f_{m_j}, f_h, $[C]^{-1}$, $[Gf_*]\big|_{*=\rho,u,v,w}$) имеет столько же уравнений-условий:

– одиннадцать подсистемы (соответственно четыре существования сходственных мгновенных линий тока, три основных для преобразования, два закона аддитивности массы и энергии; два бездефектного преобразования уравнения неразрывности)

$$\left([C]^{-1}-\left[\frac{\partial\overline{\alpha}}{\partial\alpha}\right]\right)(V_T)'=\left(f_T-\frac{\partial\bar{t}}{\partial t}\right)(\overline{V}_T)',$$

$$\frac{\partial\bar{t}}{\partial t}[E]=[f_V]\left[\frac{\partial\overline{\alpha}}{\partial\alpha}\right],\ [f_{m_j}]=[E],\ [f_h]=\mathrm{const}[E],$$

$$(\Phi_\alpha(\rho))(V_T)'=0 \text{ и } (\Phi_{\alpha*}(a_*))(V_T)'\Big|_{\substack{a_1=1,\\ \alpha_*=1,u,v,w}}=0;$$

– пять уравнений-условий дефектов (11)

$$\left(\frac{s_*}{\rho a_*}\right)'=[Gb_{*\alpha}]\left(\frac{b_{*T}}{\rho a_*}\right)'-\frac{\partial\bar{t}}{\partial t}[\overline{Gb}_{b*\alpha}]\left(\frac{\overline{b}_{*T}}{\overline{\rho a}_*}\right)'\Bigg|_{\substack{*=h,u,v,w,m_j\\ \alpha_*=t,x,y,z,\text{нет}\\ \alpha=\alpha_*,x,y,z,}};$$

– девятнадцать дополнительных для коэффициентов

$$[Gf_{b*\alpha}]=[\overline{Gb}_{b*\alpha}]\left(\left[\frac{1-\overline{C}_{*\alpha}}{f_{b*\alpha}}\overline{f}_*\right]'-[C]_*^{-1}\right)\Bigg|_{\substack{*=h,u,v,w,m_j\\ \alpha_*=t,x,y,z,\text{нет}\\ \alpha=\alpha_*,x,y,z}},$$

где $[f_V]\equiv[1,f_u,f_v,f_w]$ – диагональная матрица, совпадающая с матрицей $[f_*]\big|_{*=1,u,v,w}$; $(V_T)'$ и $(b_{*T})'=(b_{p\alpha_*},b_{*x},b_{*y},b_{*z})'$ – четырехмерные вектор скорости и вектор переноса в виде столбца, а

$$\frac{1-\overline{C}_{*\alpha}}{f_{b*\alpha}}\overline{f}_*=\frac{1-\overline{C}_{*\alpha}}{f_{b*\alpha}}f_\rho f_* f_V\frac{\partial\overline{\alpha}_*}{\partial\alpha_*};$$

$$(V_T)'=[f_V]'(\overline{V}_T)',\ \left(\frac{b_{*T}}{\rho a_*}\right)'=\frac{f_{b_{*\alpha}}}{f_\rho f_*}\left(\frac{\overline{b}_{*T}}{\overline{\rho a}_*}\right)'. \tag{12}$$

$[\Phi_\alpha(a_*)]=[Gf_*]+[\overline{Ga}_*]\left([C]^{-1}-\left[\frac{\partial\overline{\alpha}}{\partial\alpha}\right]\right)$ и

$\left(\frac{s_*}{\rho a_*}\right)'=[\Phi_\alpha(a_*)](V_T)'$ – пересчетные равенства, позволяющие брать за основу прообраз или образ.

Общий метод расчета приведенной полной основной системы уравнений-условий последовательными приближениями основывается на том, что существование однозначной связи обобщенных коэффициентов дефектов $\overline{C}_{*\alpha}$ и дополнительных функций преобразования $f_{b*\alpha}$ позволяет задавать функции вместо коэффициентов, ввиду более ясной физической природы последних, а для нахождения f_T, элементов матриц $[C]^{-1}$ и $[C]_*^{-1}$ подсистема пополняется необходимым числом дополнительных уравнений-условий для коэффициентов в виде $\frac{1-\overline{C}_{*\alpha}}{f_{b*\alpha}}\overline{f}_*=\frac{\partial\overline{\alpha}_*}{\partial\alpha_*}F(\text{элементы}[C]^{-1})$, которые выделяют класс преобразований с заданным отношением законов переноса и состояний вещества. В частности, отношение указанных выше уравнений состояния веществ и $\frac{1-\overline{C}_{*\alpha}}{f_{b*\alpha}}f_\rho f_* f_V=1$ дают линейные алгебраические связи, включая приближенные аналитические решения интегральных уравнений-условий дефектов, рассмотренные ранее [1–5].

Действительно, если в выбранных координатных точках ($\alpha = t, x, y, z$) известны все характеристики прообраза (образа) и в N-м приближении заданы значения величин f_T, $\frac{\partial \bar{t}}{\partial t}$, основных f_* (f_ρ, f_u, f_v, f_w, $f_{m_j} = 1$ и $f_h = \text{const}$) и дополнительных $f_{b*\alpha}$ функций преобразования, то исходная подсистема уравнений-условий содержит одиннадцать линейных алгебраических уравнений относительно элементов обратной матрицы преобразования координат $[C]^{-1}$, причем в сходственных точках ее диагональные элементы вычисляются точно с помощью трех основных уравнений, а частные производные основных и дополнительных функций, включая логарифмические, приближенно с помощью конечных разностей с учетом связи полных дифференциалов координат точек в виде равенств $\frac{d\bar{\alpha}_*}{dt} = \frac{f_T}{f_*} a_* \Big|_{*=1,u,v,w}$, следующих из уравнений мгновенных линий тока. Вычисляются матрицы прообраза ($[a_*]$, $[Ga_*]$, $[Gf_*]$, $[Gb_{*\alpha}]$) и соответственно образы, увязанные с f_T условием $s_\rho = 0$.

Пополнение указанным выше способом подсистемы позволяет определить в N-м приближении матрицы $[C]^{-1}$ и $[C]_*^{-1}$, а с помощью уравнений-условий дефектов в (N+1)-м приближении их диагональные элементы и далее, используя соответствующие уравнения-условия исходной подсистемы и обратные связи, определить f_T, $\frac{\partial \bar{t}}{\partial t}$, f_* и $f_{b*\alpha}$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенный метод решения системы уравнений-условий преобразования σ транспортных уравнений конвективного тепломассопереноса открывает возможности нового подхода к численным расчетам сложных течений, когда сначала находится решение простых транспортных уравнений образа и затем определяются характеристики прообраза решением более простых линейных алгебраических уравнений-условий преобразования как с дифференциальными, так и с интегральными уравнениями-условиями дефектов, а также интегралов перехода от первичных основных функций преобразования к основным функциям [1–5].

Кроме того, появляется возможность использования экспериментальных характеристик образа, а также упрощения процедур при вычислительных методах в конвективном тепломассопереносе, анализе и обобщении многофакторного эксперимента.

Метод σ преобразования обобщает преобразования А. Дородницина, К. Стюартсона, К. Иллингворта, Д. Коулза, Л. Крокко и других для плоского ПС, а его подтверждение получено на опытных данных по эффективности защитных завес [2, 4].

СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

a_* – основная транспортируемая величина;

$\vec{b}_*(b_{*x}, b_{*y}, b_{*z})$ и $\vec{b}_{*T}(b_{*\alpha_*} \equiv b_{p\alpha_*}, b_{*x}, b_{*y}, b_{*z})$ – трехмерный и обобщенный четырехмерный векторы переноса с проекциями на координатные оси;

f_* – основные функции преобразования (f_ρ,…., f_h,…);

$f_{b*\alpha}$ и f_p – дополнительные функции преобразования;

h^0 – полная энтальпия;

$L_V(a_*)$ и $R_D(a_*)$ – соответственно функционалы левой и правой частей транспортных уравнений;

m_j^0 – полная относительная массовая концентрация;

P – скалярная величина (давление, потенциал и другие);

$\vec{V}(u, v, w)$ и $\vec{V}_T(1, u, v, w)$ – трех- и четырехмерный векторы скорости с проекциями на координатные оси;

s_* и S_{*T} – дефекты преобразования функционалов левой и правой частей транспортных уравнений;

t, x, y и z – координаты на соответствующих осях четырехмерной ортогональной системы координат;

α и α_* – координаты, принимающие в общем случае значения t, x, y, z, причем вторая в соответствии с индексом $* = (1 \text{ и } h), u, v, w$ и $a_1 = 1$;

ρ – плотность;

НС – полные транспортные уравнения;

ПС – пограничный слой;

УНС – укороченные транспортные уравнения.

Верхний индекс:

черта сверху – образ;

0 – полные параметры.

Нижний индекс:

$*$ – плотность, проекции вектора скорости, относительная массовая концентрация и энтальпия, другие величины, являющиеся решением транспортных уравнений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Репухов В. М.** Преобразование уравнений конвективного тепломассопереноса трехмерного сжимаемого пограничного слоя (анализ системы уравнений)// Теплофизика и аэромеханика. 2004. Т. 11. № 2. С. 227–245.
2. **Репухов В. М.** Общее преобразование уравнений конвективного тепломассопереноса и расчет эффективности трехмерных пристенных защитных завес// Пром. теплотехника. 2004.Т. 26. № 3. С. 18–27.
3. **Репухов В. М.** Общее преобразование уравнений нестационарного конвективного тепломассопереноса к простейшему виду// Пром. теплотехника. 2005. Т. 27. №2. С. 9–20.
4. **Репухов В. М.** Преобразование общих транспортных уравнений конвективного тепломассопереноса к простейшей форме// Проблемы газодинамики и тепломассообмена в энергетических установках: Тр. XV Школы-семинара молодых ученых и специалистов. М.: МЭИ, 2005. Т. 1. С. 13–19.
5. **Репухов В. М.** Влияние законов переноса на преобразование транспортных уравнений конвективного тепломассопереноса// Пром. теплотехника. 2006. Т. 28. № 5. С. 10–18.