

УДК 532.526 : 532.24

А.А. ПРИХОДЬКО, С.В. АЛЕКСЕЕНКО

*Днепропетровский национальный университет им. О.Гончара, Украина***ОБЛЕДЕНЕНИЕ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ:
МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЗДУШНО-КАПЕЛЬНОГО ПОТОКА**

Разработано программно-методическое обеспечение для моделирования воздушно-капельного потока и процессов выпадения влаги на обтекаемую поверхность. Для описания воздушного потока используются уравнения Навье-Стокса сжимаемого газа, для описания движения переохлажденных капелек воды применены модель взаимопроникающих сред, инерционная модель осаждения капелек и гомогенная модель. Проведено тестирование численных алгоритмов на задачах, воспроизводящих различные режимы обтекания цилиндра и профиля. Представлены результаты расчета выпадения влаги на поверхность цилиндра и профиля NASA 0012 с помощью модели взаимопроникающих сред.

Ключевые слова: *воздушно-капельный поток, выпадение влаги на обтекаемую поверхность, обледенение аэродинамических поверхностей.*

Введение

Обледенение самолетов в неблагоприятных метеорологических условиях является чрезвычайно актуальной проблемой при обеспечении безопасности полетов. В определенных летных условиях переохлажденные капельки воды, содержащиеся в облаках, могут замерзать, попадая на поверхности самолета. Ледяные наросты на передних кромках крыльев и хвостового оперения изменяют структуру течения, уменьшают подъемную силу крыла, угол срыва потока, негативным образом сказываются на эффективности системы управления, вызывают потерю тяги, рост турбулентного следа, приводят к увеличению веса. Причем увеличение веса самолета играет вторичную роль по сравнению с негативными эффектами, вызванными изменениями режима обтекания.

Образование льда на поверхностях входного направляющего аппарата компрессора и обечайки мотогондол авиационных двигателей может происходить даже при положительных температурах окружающего воздуха (до $+10^{\circ}\text{C}$) вследствие адиабатического расширения воздуха. Такое обледенение очень опасно, поскольку при этом уменьшается площадь межлопаточных каналов и расход воздуха, падает тяга, растет удельный расход топлива. Неравномерность потока на входе в компрессор приводит к неустойчивому режиму его работы, изменению расчетных характеристик на входе в камеру сгорания. Нарастая, ледяная корка под действием аэродинамических сил и вибрации может разрушаться и попадать в двигатель, вызывая повреждение лопаток компрессора и даже вывести двигатель из строя.

Лед также накапливается и на всех выступающих элементах фронтальной поверхности самолета – на антеннах, вентилях и заборных устройствах. Удаление льда на таких элементах не всегда представляется возможным. Ледяные образования на антеннах вызывают настолько сильную вибрацию, что могут привести к их поломке. В неблагоприятных условиях легкий самолет может получить настолько сильное обледенение, что дальнейший полет станет невозможным. Поскольку самолет в таких условиях будет иметь более высокую скорость с меньшим углом атаки, это может привести к потере управления и необратимым последствиям.

Атмосферными параметрами, влияющими на обледенение, являются: скорость полета, температура, давление, а также метеорологические параметры: влажность, диаметр переохлажденных капелек и относительная влажность.

Наихудшие условия для возникновения обледенения наблюдаются при температурах около 0°C в слоистых облаках или в дожде на высотах до 2500 м, а также в диапазоне температур от 0°C до -20°C и в особенности от 0°C до -10°C [1 – 5].

Для решения задачи численного моделирования процесса обледенения аэродинамических поверхностей необходимо описать внешний воздушный поток и движение переохлажденных капелек воды, влагу на обтекаемой поверхности и нарастающий лед. В настоящей работе анализируются основные подходы к описанию набегающего влажного потока. Образование пленки, ее замерзание и изменение формы обтекаемой поверхности станет предметом последующего обсуждения.

1. Постановка задачи обтекания аэродинамической поверхности воздушно-капельным потоком

В настоящей работе рассматривается обтекание аэродинамической поверхности потоком воздуха, содержащим переохлажденные капельки воды.

Для расчета параметров воздушного потока применяются уравнения Навье–Стокса вязкого сжимаемого газа. При описании движения капель использованы модель взаимопроникающих сред, а также инерционная и гомогенная модели.

2. Модели для описания воздушно-капельных потоков

В механике многофазных сред выделяются четыре основные группы моделей. Это – чисто феноменологические модели, феноменологические модели с включением элементов статистики, статистические модели, содержащие элементы механики сплошной среды, чисто статистические модели, основанные на введении функций распределения, как для частиц, так и для молекул газа и получении соответствующих кинетических уравнений [6, 7]. При решении прикладных задач чаще всего используются феноменологические модели многофазных сред, описываемые уравнениями в частных производных, реализация которых возможна с помощью известных численных методов на существующей вычислительной технике.

Это модель взаимопроникающих континуумов, предложенная Х.А. Рахматулиным [6 – 8].

Траекторная модель в невязком потоке, была применена в [6].

Гомогенная модель обтекания с учетом обмена массой, импульсом и энергией между фазами, рассматривается в [9 – 11].

Модель взаимопроникающих сред. Большинство практических результатов по расчету многофазных течений получено с использованием модели взаимопроникающих континуумов, предложенной Х.А. Рахматулиным [8]. Модель базируется на понятии многоскоростной многотемпературной среды, в каждой точке которой имеется столько скоростей и температур, сколько фаз содержит рассматриваемая среда. Каждая фаза заполняет пространство непрерывно. Основные допущения модели следующие:

- среда является двухскоростной и двухтемпературной, состоящей из вязкого сжимаемого несущего газа и фракции несжимаемых сферических частиц одного диаметра, не взаимодействующих между собой;

- теплоемкости газа и частиц постоянны;
- размеры частиц во много раз больше молекулярно-кинетических и во много раз меньше расстояний, на которых осредненные макроскопические параметры течения меняются существенно;
- взаимодействие частиц с несущей средой происходит посредством вязкости газа;
- температура отдельной частицы постоянна по ее объему;
- несущий газ предполагается химически не реагирующим, с постоянным показателем адиабаты.

Уравнения, описывающие несущую и дисперсную фазы, связаны через источниковые члены, учитывающие межфазный обмен импульсом и энергией. Они отличаются от уравнений Навье–Стокса лишь наличием этих источников. Для определения слагаемых, описывающих межфазное взаимодействие, пользуются результатами исследования процессов, происходящих при обтекании частиц потоками газа.

Нестационарные уравнения двухфазного течения имеют вид [6, 8]:

$$\frac{\partial \hat{\mathbf{q}}}{\partial t} + \frac{\partial \hat{\mathbf{E}}}{\partial \xi} + \frac{\partial \hat{\mathbf{F}}}{\partial \eta} + \hat{\mathbf{H}} = \frac{1}{\text{Re}} \left(\frac{\partial \hat{\mathbf{T}}}{\partial \xi} + \frac{\partial \hat{\mathbf{S}}}{\partial \eta} \right), \quad (1)$$

где

$$\hat{\mathbf{q}} = \frac{1}{J} \begin{bmatrix} \rho \\ \rho u \\ \rho v \\ e \\ \rho_j \\ \rho_j u_j \\ \rho_j v_j \\ e_j \end{bmatrix}, \quad \hat{\mathbf{E}} = \frac{1}{J} \begin{bmatrix} \rho U \\ \rho U u + \xi_x p \\ \rho U v + \xi_y p \\ (e + p) U \\ \rho_j U_j \\ \rho_j U_j u_j \\ \rho_j U_j v_j \\ e_j U_j \end{bmatrix},$$

$$\hat{\mathbf{F}} = \frac{1}{J} \begin{bmatrix} \rho V \\ \rho V u + \eta_x p \\ \rho V v + \eta_y p \\ (e + p) V \\ \rho_j V_j \\ \rho_j V_j u_j \\ \rho_j V_j v_j \\ e_j V_j \end{bmatrix}, \quad \hat{\mathbf{H}} = \frac{1}{J} \begin{bmatrix} 0 \\ H_u \\ H_v \\ H_e \\ 0 \\ -H_u \\ -H_v \\ -H_e \end{bmatrix}, \quad (2)$$

$$\hat{\mathbf{R}} = \frac{1}{J} \begin{bmatrix} 0 \\ \mu(\xi_x^2 + \xi_y^2)u_\xi + \left(\frac{\mu}{3}\right)\xi_x(\xi_x u_\xi + \xi_y v_\xi) \\ \mu(\xi_x^2 + \xi_y^2)v_\xi + \left(\frac{\mu}{3}\right)\xi_y(\xi_x u_\xi + \xi_y v_\xi) \\ \frac{k}{Pr(\gamma-1)}(\xi_x^2 + \xi_y^2)\frac{\partial}{\partial \xi}(a^2) + \\ + \frac{\mu}{2}(\xi_x^2 + \xi_y^2)(u^2 + v^2)_\xi + \\ + \frac{\mu}{6}\left[\xi_x^2(u^2)_\xi + \xi_y^2(v^2)_\xi + 2\xi_x \xi_y (uv)_\xi\right] \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix},$$

$$\hat{\mathbf{S}} = \frac{1}{J} \begin{bmatrix} 0 \\ \mu(\eta_x^2 + \eta_y^2)u_\eta + \left(\frac{\mu}{3}\right)\eta_x(\eta_x u_\eta + \eta_y v_\eta) \\ \mu(\eta_x^2 + \eta_y^2)v_\eta + \left(\frac{\mu}{3}\right)\eta_y(\eta_x u_\eta + \eta_y v_\eta) \\ \frac{k}{Pr(\gamma-1)}(\eta_x^2 + \eta_y^2)\frac{\partial}{\partial \eta}(a^2) + \\ + \frac{\mu}{2}(\eta_x^2 + \eta_y^2)(u^2 + v^2)_\eta + \\ + \frac{\mu}{6}\left[\eta_x^2(u^2)_\eta + \eta_y^2(v^2)_\eta + 2\eta_x \eta_y (uv)_\eta\right] \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix},$$

$$e = \rho \left[\varepsilon + \frac{1}{2}(u^2 + v^2) \right],$$

$$e_j = \gamma \rho_j \left[\omega T_j + (u_j^2 + v_j^2) \right]. \quad (3)$$

В уравнениях (2,3) переменные с индексом j описывают частицы; ω – отношение удельной теплоемкости капель к теплоемкости газа при постоянном давлении; U, V – контравариантные компоненты вектора скорости несущей фазы и капель. Остальные обозначения общепринятые.

Интенсивность межфазного обмена импульсом определяется выражением:

$$\begin{aligned} H_u &= \rho_j A_j (u - u_j), \\ H_v &= \rho_j A_j (v - v_j), \\ H_e &= \rho_j A_j B_j, \end{aligned} \quad (4)$$

где A_j, B_j – коэффициенты, определяющие обмен импульсом и энергией между фазами,

$$A_j = \frac{9}{2} \frac{\mu_g f_j \bar{L}}{m_j \tau_j^2 \bar{V}},$$

$$B_j = 2\gamma \left[\bar{q}_j \Delta \bar{q}_j - g_c (T_j - T) \right], \quad (5)$$

$$\bar{q}_j \Delta \bar{q}_j = u_j (u - u_j) + v_j (v - v_j), \quad g_c = Nu_j / 6f_j Pr.$$

Нормированный коэффициент трения f_j определяется формулой:

$$f_j = \frac{C_D}{C_{D\text{stokes}}}, \quad (6)$$

где C_D – коэффициент сопротивления частицы,

$$C_{D\text{stokes}} = \frac{24}{Re_j}.$$

Число Рейнольдса Re_j , определенное по относительной скорости движения частиц:

$$|\Delta q_j| = \sqrt{(u - u_j)^2 + (v - v_j)^2},$$

вычислялось по формуле:

$$Re_j = \frac{2|\Delta q_j| \tau_j \rho}{\mu_g}. \quad (7)$$

В расчетах нормированный коэффициент трения f_j и число Нуссельта для частиц определялись соотношениями:

$$f_j = \begin{cases} 1, & Re_j \leq 0,49; \\ 1,125 Re_j^{0,163}, & 0,49 \leq Re_j \leq 80; \\ 0,0125 Re_j^{1,217}, & 80 \leq Re_j \leq 1000; \\ Re_j/12, & Re_j > 1000, \end{cases} \quad (8)$$

$$Nu = 2 + 0,459 Re^{0,55} Pr^{0,33}. \quad (9)$$

В соотношениях (4) – (9) \bar{L} – характерный масштаб длины; τ_j – радиус твердой частицы; μ_g – коэффициент динамической вязкости несущей среды; m_j – массовая плотность частиц; \bar{V} – характерная скорость; ρ – безразмерная плотность несущей фазы, остальные обозначения общепринятые.

Начальное распределение параметров частиц вычислялось с помощью коэффициентов λ_v и λ_T , определяющих механическую и тепловую инерционность частиц:

$$\begin{aligned} \rho_j &= \rho \varphi / (1 - \varphi), \quad u_j = u \lambda_v, \\ v_j &= v \lambda_v, \quad T_j = T / \lambda_T, \end{aligned} \quad (10)$$

где $\phi = W_j / W_m$ – массовая доля частиц в двухкомпонентной среде.

Инерционное осаждение капель. Анализ процессов обледенения элементов конструкций летательных аппаратов показывает, что решающую роль на многих режимах вносит инерционное осаждение капель. В этой модели влияние капель на картину течения газа не учитывается. Задача аэродинамического обтекания профиля газом решается в переменных u, v, p, ρ – компоненты скорости, давления и плотности.

Численное моделирование осуществляется на основе решения уравнений Навье-Стокса совместно с уравнениями неразрывности и сохранения энергии в криволинейных координатах.

При найденных газодинамических параметрах стационарные поля скорости частиц находятся интегрированием двух скалярных уравнений, имеющих вид обыкновенных дифференциальных уравнений, выполняющихся вдоль траекторий частиц [6]:

$$\frac{dx}{ds} = \frac{u_{gp}}{V_{gp}}, \quad \frac{dy}{ds} = \frac{v_{gp}}{V_{gp}}, \quad (11)$$

где V_{gp} – модуль вектора скорости частиц,

S – расстояние вдоль траектории,

$$\begin{aligned} \frac{dV_{gp}}{ds} &= \frac{P_{st} C_D (Re) \rho |U_g| U_g}{V_{gp}}, \\ U_g &= V_g - V_{gp}, \\ |U_g| &= \sqrt{(u_g - u_{gp})^2 + (v_g - v_{gp})^2}, \\ P_{st} &= \frac{3L^0 \rho_0^0}{8\rho_w^0 r^0}, \\ C_D &= 21,12 Re^{-1} + 6,3 Re^{-0,5} + 0,25, \\ Re &= \rho |U_g| Re_p, \\ Re_p &= \frac{2r^0 \rho_0^0 V_g^0}{\mu_0^0}, \end{aligned} \quad (12)$$

где U_g – безразмерная скорость движения частицы относительно воздуха, отнесенная к V_g^0 ;

r – отнесенная к r^0 плотность воздуха;

ρ_w^0, ρ_0^0 – размерная плотность вещества капли (переохлажденной воды);

C_D – коэффициент сопротивления сферической частицы;

Re – число Рейнольдса, определенное по диаметру частицы и её относительной скорости при

$\mu = 1$, т. е. при постоянной вязкости, что далее предполагается;

$P_{st} = Re_p / (24 St)$, St – число Стокса. Выражение для C_D справедливо в диапазоне изменения числа Рейнольдса относительно обтекания частицы газом: $0 < Re < 10^5$. При $Re > 10^5$ обтекание сферы становится полностью турбулентным с резким увеличением C_D .

Интегрирование уравнений (11) и (12) проводится по конечно-разностным уравнениям:

$$V_{gp,i} = \frac{2\bar{R}}{2+\bar{R}} \bar{V}_g + \frac{2-\bar{R}}{2+\bar{R}} V_{gp,i-1}, \quad (13)$$

$$\bar{R} = \frac{P_{st} C_D (\bar{Re}) \bar{\rho} |\bar{U}_g| \Delta s}{\bar{V}_g}, \quad (14)$$

$$x_i = x_{i-1} + \frac{u_{gp}}{V_{gp}} \Delta s, \quad y_i = y_{i-1} + \frac{v_{gp}}{V_{gp}} \Delta s, \quad (15)$$

где черта сверху означает среднеарифметические величины в точках i и $i-1$.

При расчете в набегающем потоке сначала строятся траектории частиц, которые с небольшим запасом «охватывают» обтекаемый профиль. Затем, между ними, с равномерным разбиением по u , рассчитываются промежуточные траектории. В начальных точках траекторий скорости капель принимаются равными скорости воздуха.

Концентрация частиц C_p у поверхности непосредственно перед выпадением на неё определяется условием сохранения потока массы частиц в сечении, ограниченными приходящими из бесконечности траекториями частиц, которые пометим индексами $j-1$ и j . Пусть x_j, y_j и y_{j0} – координаты точек траектории на теле и при $x = x_0$. Тогда, поскольку скорости частиц отнесены к V_0 , то:

$$\begin{aligned} \frac{C_p^0}{C_{p0}^0} &= 2(y_j + y_{j-1})_0 (y_j - y_{j-1})_0 / \\ & / \left[(y_j + y_{j-1}) \times (u_{p,j} + u_{p,j-1})(y_j - y_{j-1}) - \right. \\ & \left. - (v_{p,j} + v_{p,j-1})(x_j - x_{j-1}) \right]. \end{aligned} \quad (16)$$

Коэффициент захвата капель профилем крыла $C_s = A_0 / A_\infty$. Здесь A_0 – площадь поперечного сечения в набегающем потоке, ограниченной верхней и нижней траекториями, а A_∞ – максимальная площадь проекции крыла на плоскость YOZ . Коэффициент C_s указывает долю капель, выпадающих на крыло, от их максимально возможной величины.

Гомогенная модель. Нестационарное течение пара воды и водяных капелек с учетом неравновесного процесса протекания конденсации будем опи-

сывать уравнениями газовой динамики с учетом обмена массой, импульсом и энергии между фазами [9 – 11]. Уравнения для пара воды могут быть записаны в виде (1), где:

$$\hat{\mathbf{q}} = \frac{1}{J} \begin{bmatrix} \rho_g \\ \rho_g u \\ \rho_g v \\ e_g \end{bmatrix}, \hat{\mathbf{E}} = \frac{1}{J} \begin{bmatrix} \rho_g U \\ \rho_g Uu + \xi_x p \\ \rho_g Uv + \xi_y p \\ (e_g + p)U \end{bmatrix},$$

$$\hat{\mathbf{F}} = \frac{1}{J} \begin{bmatrix} \rho_g V \\ \rho_g Vu + \eta_x p \\ \rho_g Vv + \eta_y p \\ (e_g + p)V \end{bmatrix}, \hat{\mathbf{R}} = \frac{1}{J} \begin{bmatrix} 0 \\ \tau_{xx} \\ \tau_{xy} \\ \beta_x \end{bmatrix}, \quad (17)$$

$$\hat{\mathbf{S}} = \frac{1}{J} \begin{bmatrix} 0 \\ \tau_{xy} \\ \tau_{yy} \\ \beta_y \end{bmatrix}, \hat{\mathbf{H}} = -\frac{1}{J} \begin{bmatrix} -\rho \dot{m} \\ -\rho u \dot{m} \\ -\rho v \dot{m} \\ \rho \dot{m} (h_{fg} - h_t) \end{bmatrix},$$

здесь ρ_g – плотность пара; u и v – компоненты скорости в x и y направлениях соответственно; p – давление; e – полная энергия; нижний индекс g обозначает пар. Источниковый член \mathbf{H} включает обмен массой, импульсом и энергией между фазами. В источниковом члене \dot{m} – конденсированная масса в единицу времени, ρ – плотность влажного пара; h_{fg} – скрытая теплота фазового перехода и $\rho \dot{m} (h_{fg} - h_t)$ – количество тепла переданного в процессе конденсации, $\tau_{xx}, \tau_{xy}, \tau_{yx}, \tau_{yy}$ – компоненты тензора напряжений, β_x, β_y – компоненты вектора теплового потока.

Процесс гомогенной конденсации условно разбивается на два: образование центров конденсации (ядер критического размера) и рост этих ядер конденсации. Конденсированная масса в единицу времени определяется соотношением

$$\dot{m} = (1 - Y) J \rho_l \frac{4\pi r_c^3}{3} + 4\pi r^2 \frac{dr}{dt} \rho_l N; \quad (18)$$

здесь J – скорость нуклеации; $\frac{dr}{dt}$ – скорость роста капли; ρ_l – плотность воды; r_c – критический радиус; N – число водяных капелек, содержащихся в единице массы влажного пара с радиусом r . Соотношение (18) получено из условия равенства конденсированной массы массе капелек от конденсации с критическим радиусом и массе за

счет роста капелек на поверхностях существующих капелек.

В уравнениях (17) предполагается, что жидкая и газообразная фазы движутся с одинаковыми скоростями. Это предположение оправдано тем, что размеры капелек воды весьма маленькие. Известные оценки [9 – 11] показывают, что скорость капелек воды будет отличаться от скорости пара не более чем на 1 %.

Жидкая фаза может рассматриваться как континуум, состоящий из большого количества капелек воды, содержащихся во влажных паровых потоках. В связи с отсутствием отставания между паровыми и водяными капельками уравнения импульса для этих капелек не нужны. Для описания жидкой фазы используются два дополнительных уравнения сохранения. Первое уравнение описывает распределение числа капелек воды, а второе – распределение влажности. В декартовых координатах эти два уравнения могут быть записаны:

$$\frac{\partial \hat{\mathbf{q}}_1}{\partial t} + \frac{\partial \hat{\mathbf{E}}_1}{\partial \xi} + \frac{\partial \hat{\mathbf{F}}_1}{\partial \eta} = \hat{\mathbf{H}}_1, \quad (19)$$

где

$$\hat{\mathbf{q}}_1 = \frac{1}{J} \begin{bmatrix} \rho N \\ \rho Y \end{bmatrix}, \hat{\mathbf{E}}_1 = \frac{1}{J} \begin{bmatrix} \rho UN \\ \rho UY \end{bmatrix},$$

$$\hat{\mathbf{F}}_1 = \frac{1}{J} \begin{bmatrix} \rho VN \\ \rho VY \end{bmatrix}, \hat{\mathbf{H}}_1 = \frac{1}{J} \begin{bmatrix} \rho_g J_c \\ \rho \dot{m} \end{bmatrix}, \quad (20)$$

Y – влажность. Согласно определению влажности Y может быть получено соотношение

$$r^3 = \frac{3Y}{4\pi \rho_l N}. \quad (21)$$

Это соотношение может использоваться для вычисления радиуса водяной капельки после того, как параметры N и Y определены на каждом шаге по времени.

Радиус зародыша капли вычислялся с помощью соотношения [9 – 11]

$$r_c = \frac{2\sigma T_s}{\rho_l h_{fg} \Delta T}. \quad (22)$$

Скорость нуклеации J и скорость роста капелек $\frac{dr}{dt}$ определяются из классической теории нук-

леации [9]. Соотношения для этих скоростей имеют следующий вид [9 – 11]:

$$J = \frac{1}{1+\varphi} q_c \sqrt{\frac{2\sigma}{\pi m^3}} \frac{\rho_g}{\rho_l} \exp\left(-\frac{4\pi r_c^2}{3kT_g}\right),$$

$$\varphi = \frac{2(\gamma-1)}{\gamma+1} \frac{h_{fg}}{R_g T_g} \left(\frac{h_{fg}}{R_g T_g} - \frac{1}{2} \right),$$

$$\frac{dr}{dt} = \frac{\lambda_g \Delta T}{\rho_l r h_{fg} \left(\frac{1}{1+4K_n} + 3,78(1-\nu) \frac{K_n}{P_{rg}} \right)}, \quad (23)$$

$$\nu = \frac{R_g T_s}{h_{fg}} \left[\alpha - \frac{1}{2} - \frac{2-q_c}{2q_c} \left(\frac{\gamma+1}{2\gamma} \right) c_p \frac{T_s}{h_{fg}} \right].$$

$$\Delta T = T_s - T_g.$$

Для нахождения температуры насыщения водяного пара по известному давлению использовано уравнение из [16].

Исходные уравнения записаны в безразмерном виде. В качестве масштабов использованы параметры набегающего потока.

3. Реализация моделей и методов расчета обтекания аэродинамических поверхностей воздушно-капельным потоком

Рассмотренные выше математические модели были реализованы в рамках пакета программ [12 – 15].

В этих же работах было проведено тестирование численных алгоритмов на задачах, воспроизводящих различные режимы обтекания цилиндра и профиля.

4. Результаты расчета обтекания цилиндра и профиля воздушно-капельным потоком

В гомогенной модели физически выпадение влаги на поверхность обусловлено скачком температур на границе раздела паровой и жидкой фаз. Выпадение влаги является результирующим эффектом процессов конденсации совокупности молекул, ударяющихся о поверхность жидкости и захватываемых ею, и испарения молекул, отрывающихся за то же время с той же поверхности. В отличие от

инерционной модели и модели взаимопроникающих сред, при использовании гомогенной модели выпадение влаги происходит не только в передней части профиля. Таким образом, гомогенная модель может быть применена в случаях, когда обтекание влажным потоком происходит при температурах около 0° С, размеры капелек относительно невелики и когда процессы замерзания водяной пленки будут, главным образом, обусловлены более низкой температурой обтекаемого тела, а также оттоком теплоты от сконденсированной на поверхности влаги за счет испарения.

Экспериментальные данные показывают, что в процессе обледенения ключевую роль в выпадении влаги на обтекаемую поверхность и формирование ледяных наростов играют относительно крупные переохлажденные капельки, попадающие, в основном, на переднюю часть профиля. Поэтому, для описания задачи обледенения в полете уместно использовать либо инерционную модель, либо модель взаимопроникающих сред.

Поскольку инерционная модель не учитывает обмен механической и тепловой энергией между фазами, а также имеет некоторые условности в расчетах траекторий, то в данной работе в дальнейших расчетах использовалась модель взаимопроникающих сред. При моделировании турбулентности была применена модель Болдвина–Ломакса [17]. Для решения исходных уравнений использовался метод контрольных объемов, векторы потоков через грани контрольных объемов вычислялись с помощью схемы Роу [18].

4.1. Обтекание цилиндра

Рассмотрим обтекание цилиндра сжимаемым вязким двухфазным дозвуковым потоком, имеющим параметры: диаметр цилиндра $D = 0,05$ м, скорость набегающего потока $V_\infty = 70$ м/с, температура набегающего потока $T_\infty = -10$ 0С, давление на бесконечности $p_\infty = 1,01 \cdot 10^5$ Па, водность $LWC = 0,0005$ кг/м³, для четырех расчетных случаев с различными диаметрами капелек: а) $d_k = 20$ мкм, б) $d_k = 40$ мкм, в) $d_k = 100$ мкм, г) $d_k = 200$ мкм.

На рис. 1 представлен коэффициент захвата выпадающей влаги на поверхность обтекаемого тела в зависимости от размеров переохлажденных капелек, откуда видно, что с ростом размеров капелек увеличивается поток выпадающей влаги и увеличивается площадь зоны выпадения. Для капель диаметром 20 мкм коэффициент захвата, а также площадь выпадения изменяются значительно, поскольку капли такого диаметра увлекаются внешним потоком и существенно изменяют свою траекторию. Капли, имеющие диаметр 100 и 200 мкм более

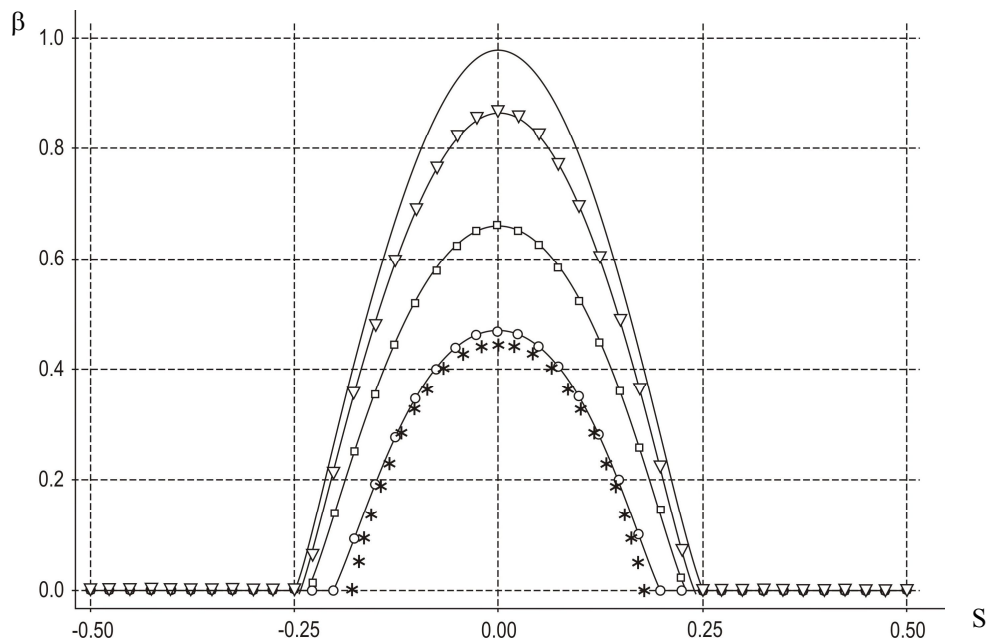


Рис. 1. Коэффициент захвата выпадающей влаги при обтекании цилиндра воздушно-капельным потоком: расчет: $d_k = 20$ мкм (○), $d_k = 40$ мкм (□), $d_k = 100$ мкм (▽), $d_k = 200$ мкм (—); известные данные [19]: $d_k = 20$ мкм (*)

инертны и в гораздо меньшей степени реагируют на несущую среду, коэффициенты распределения для таких капелек незначительно отличаются друг от друга и близки к значениям, которые имел бы поток, в котором фазы не взаимодействуют между собой.

4.2. Обтекание профиля NASA 0012

На рис. 2 представлены распределение концентрации переохлажденных капелек воды и коэффициент захвата капелек крылом при обтекании профиля NASA 0012 под углом атаки $\alpha = 0$ и $\alpha = 4^\circ$ двухфазным потоком. Параметры потока принимались следующими: скорость набегающего потока $V_\infty = 130$ м/с, температура набегающего потока $T_\infty = -12,6^\circ\text{C}$, давление на бесконечности $p_\infty = 9,075 \cdot 10^4$ Па, водность $LWC = 0,0005$ кг/м³, диаметр капелек $d_k = 20$ мкм.

Выводы

Для описания потока воздуха и переохлажденных капелек воды использованы модель взаимопроникающих сред, инерционная модель осаждения капелек, гомогенная модель и показано, что наиболее предпочтительным является использование модели взаимопроникающих сред. Приведен пример расчета выпадения влаги на поверхность цилиндра и профиля NASA 0012.

Направлением дальнейших исследований обле-

денения аэродинамических поверхностей летательных аппаратов будет учет особенностей обтекания тел двухфазным вязким сжимаемым потоком с учетом взаимодействия несущей и жидкой фаз, формы существования влаги на профиле (капельки, ручейки, пленка), режима нарастания льда (сухой, влажный, смешанный), изменения геометрии обтекаемого тела и влияния этого изменения на внешний поток.

Литература

1. Мецзякова, Т.П. Проектирование систем защиты самолетов и вертолетов [Текст] / Т.П. Мецзякова. – М.: Машиностроение, 1977. – 232 с.
2. Приходько, А.А. Обледенение аэродинамических поверхностей. Условия возникновения и методики расчета [Текст] / А.А. Приходько, С.В. Алексеенко // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2012. – №6/93. – С. 37-47.
3. *Aircraft Icing Handbook* [Электронный ресурс] // Civil Aviation Authority of New Zealand, 2000. – 97 p. – Режим доступа: http://www.caa.govt.nz/safety_info/gaps/aircraft_icing_handbook.pdf. – 14.06.2000.
4. AGARD-AR-344 - Ice Accretion Simulation [Электронный ресурс]. – Advisory Group for Aerospace Research and Development North Atlantic Treaty Organization 7 rue Ancelle, 92200 Neuilly-sur-Seine, France, 1997. – 184 p. – Режим доступа: <http://ftp.rta.nato.int/public//PubFullText/AGARD/AR/AGARD-AR-344//AGARDAR344.pdf>. – 12.05.2013.

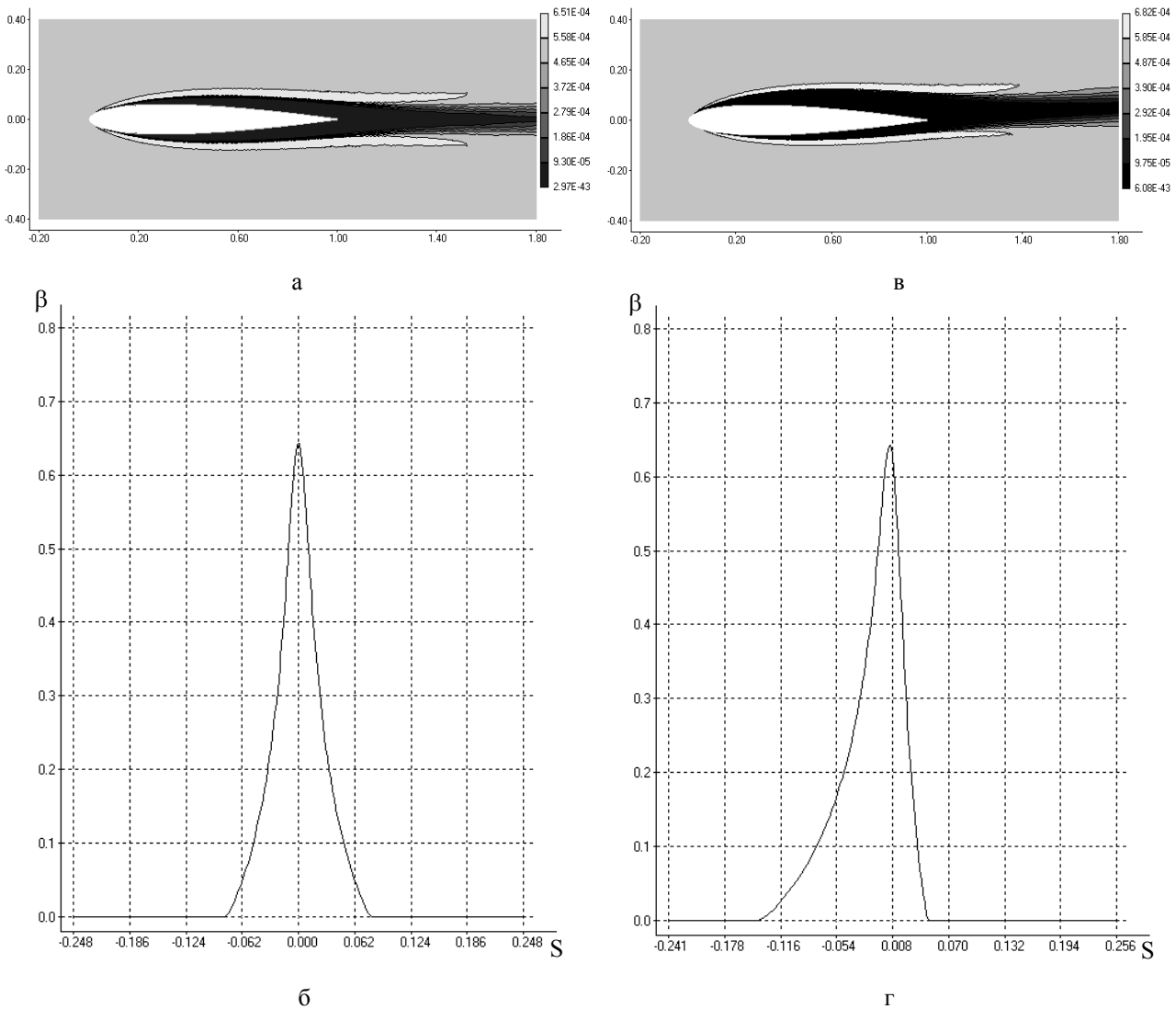


Рис. 2. Обтекание профиля NASA 0012 воздушно-капельным потоком:
 а, в – концентрация жидкой фазы для углов атаки $\alpha = 0$ и $\alpha = 4^\circ$,
 б, г – коэффициент захвата выпадающей влаги для углов атаки $\alpha = 0$ и $\alpha = 4^\circ$

5. Wright, W.B. Users Manual for the Improved NASA Lewis Ice Accretion Code LEWICE 1.6 [Электронный ресурс] / W.B. Wright. – National Aeronautical and Space Administration (NASA), Contractor Report, June 1995. – 95 p. – Режим доступа: http://www.researchgate.net/publication/24327483_Users_manual_for_the_improved_NASA_Lewis_ice_accretion_code_LEWICE_1.6. – 12.05.2013.

6. Нугматулин, Р.И. Динамика многофазных сред [Текст] / Р.И. Нугматулин. – М.: Наука, 1987. – Т. 1, 2. – 464 с.

7. Дейч, М.Е. Газодинамика двухфазных сред [Текст] / М.Е. Дейч, Г.А. Филиппов. – М.: Энергия, 1968. – 424 с.

8. Рахматулин, Х.А. Основы газодинамики взаимопроникающих движений сжимаемых сред [Текст] / Х.А. Рахматулин // Прикл. мат. и механика. – 1956. – Вып. 20, № 3. – С. 184-195.

9. Френкель, Я.И. Кинетическая теория жидкостей [Текст] / Я.И. Френкель. – Л.: Наука, 1975. –

592 с.

10. Dykas, S. Numerical calculation of the stream condensing flow [Text] / S. Dykas // CFD for Turbomachinery Applications 2001. – Gdansk, 2001. – K10. – 11 p.

11. Liang, L. Numerical simulation of spontaneously condensing flows in a plane turbine cascade [Text] / L. Liang, L. Guojun, F. Zhenping // CFD Turbo for Turbomachinery Applications 2001. – Gdansk, 2001. – С 21. – 7 p.

12. Приходько, А.А. Математическое моделирование многофазных течений при обледенении летательных аппаратов [Текст] / А.А. Приходько, С.В. Алексеев // Труды XII международного симпозиума "Методы дискретных особенностей в задачах математической физики", Харьков-Херсон, 2005. – С. 279-282.

13. Prykhodko, O.A. Numerical modelling of icing processes [Text] / O.A. Prykhodko, S.V. Alekseenko // GAMM 2005. Gesellschaft fur Angewandte Mathematik

und Mechanik. 76th Annual Scientific Conference Luxembourg, March 28 - April 1, 2005. – P. 257.

14. Приходько, А.А. Математическое моделирование процессов теплообмена при обледенении аэродинамических профилей [Текст] / А.А. Приходько, С.В. Алексеенко // Теплообмен-2008. ММФ-VI. – Т.1. – Конвективный теплообмен. Минск: АНК «ИТМО им А.В. Лыкова» НАНБ. – 2008. – С. 1–10.

15. Приходько, А.А. Численное моделирование обледенения аэродинамических поверхностей [Текст] / А.А. Приходько, С.В. Алексеенко // Доклады двенадцатой международной школы-семинара "Модели и методы аэродинамики", Изд. ЦАГИ, Евпатория, 2012. – С. 177–178.

16. Ривкин, С.Л. Уравнение состояния воды и водяного пара для машинных расчетов процессов и

оборудования электростанций [Текст] / С.Л. Ривкин, Е.А. Кременевская // Теплоэнергетика. – 1977. – № 3. – С. 69–73.

17. Baldwin, B. Thin layer approximation and algebraic model for separated turbulent flows [Text] / B. Baldwin, H. Lomax // AIAA Paper. – 1978. – № 0257. – 8 p.

18. Roe, P.L. Characteristic-based schemes for the Euler equations [Text] / P.L. Roe // Annual review of fluid mechanics. – 1986. – V. 18. – P. 337–365.

19. Wright, W.B. User's Manual for LEWICE Version 3.2. NASA/CR-2008-214255 [Электронный ресурс] / W.B. Wright. – QSS Group, Inc.; Cleveland, OH, United States. – 2008. – 454 p. – Режим доступа: http://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/2008048307_2008049062.pdf. – 12.05.2013.

Поступила в редакцию 12.04.2013, рассмотрена на редколлегии 15.05.2013

Рецензент: д-р техн. наук, проф., заведующий кафедрой теплотехники В.А. Габриец, Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта, г. Днепропетровск.

ОБМЕРЗАННЯ АЕРОДИНАМІЧНИХ ПОВЕРХОНЬ: МОДЕЛЮВАННЯ ПОВІТРЯНО-КРАПЕЛЬНОГО ПОТОКА

О.А. Приходько, С.В. Алексеенко

Розроблено програмно-методичне забезпечення для моделювання повітряно-крапельного потоку і процесів випадання вологи на обтічну поверхню. Для опису повітряного потоку використовуються рівняння Нав'є-Стокса стисливого газу, для опису руху переохолоджених крапельок води використано модель взаємопроникних середовищ, інерційна модель осадження крапельок та гомогенна модель. Проведено тестування чисельних алгоритмів на задачах, що відтворюють різні режими обтікання циліндра та профілю. Наведено результати розрахунку випадання вологи на поверхню циліндра і профілю NASA 0012 за допомогою моделі взаємопроникних середовищ.

Ключові слова: повітряно-крапельний потік, випадіння вологи на обтічну поверхню, обмерзання аеродинамічних поверхонь.

AIRFOILS ICING: SIMULATION OF THE AIR-DROPLET FLOW

O.A. Prykhodko, S.V. Alekseyenko

Computational procedures for modeling of air-droplet flow and the droplets impingement on the streamlined surface are developed. For the description of the air flow field the Navier-Stokes equations for a viscous compressible gas are used. Validation of numerical algorithms of flow of a cylinder and NACA 0012 airfoil is held. The model of interpenetrating mediums, trajectory model and homogeneous model are applied to describe the motion of super-cooled water droplets. The results of the calculation of impingement volume of water on the surface of a cylinder and NACA 0012 airfoil are presented.

Keywords: air-droplet flow, droplets impingement on the streamlined surface, ice accretion, airfoils icing.

Приходько Александр Анатольевич - д-р физ.-мат. наук, проф., заведующий кафедрой технической механики, Днепропетровский национальный университет, г. Днепропетровск, Украина, e-mail: raadr@mail.ru.

Алексеенко Сергей Викторович – канд. техн. наук, доцент кафедры технической механики, Днепропетровский национальный университет, г. Днепропетровск, Украина, e-mail: alexeyenko_sv@ukr.net.