

Динамика пелены распыла воды для моделирования условий обледенения ЛА

А.В. Кашеваров¹, А.Л. Стасенко^{1,2}¹Центральный аэрогидродинамический институт им. проф. Н.Е. Жуковского²Московский физико-технический институт (государственный университет)

Целью работы является математическое сопровождение экспериментов, проводимых на аэрохолодильном стенде ЦАГИ [1]. Один из сценариев обледенения предполагает взаимодействие кристаллов льда с плёнкой воды, образовавшейся например, на тёплой лопатке двигателя. Для создания такой плёнки на поверхности экспериментальной модели используются форсунки, распыливающие воду перпендикулярно набегающему потоку воздуха (рис. 1), что, вообще говоря, искажает поток, несущий кристаллы. Для моделирования этой ситуации создана теоретическая модель плоского факела распыла (пелены) воды, учитывающие разницу температур несущего потока и впрыскиваемых капель:

$$\frac{\partial(\rho u)_j}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)_j}{\partial y} = 0,$$

$$\frac{\partial(\rho u u)_j}{\partial x} + \frac{\partial(\rho u v)_j}{\partial y} = -(2-j) \frac{\partial p}{\partial x} + \rho_2 \frac{F_{2x}}{m_2} (-1)^j,$$

$$\frac{\partial(\rho v u)_j}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v v)_j}{\partial y} = -(2-j) \frac{\partial p}{\partial y} + \rho_2 \frac{F_{2r}}{m_2} (-1)^j,$$

$$\frac{\partial(\rho e u)_j}{\partial x} + \frac{\partial(\rho e v)_j}{\partial y} = -(2-j) \left[\frac{\partial(\rho u)_j}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)_j}{\partial y} \right] + (-1)^j \left[\rho_2 \frac{q_2}{m_2} + u_2 \frac{F_{2x}}{m_2} + v_2 \frac{F_{2r}}{m_2} \right],$$

$$p = \rho_1 R_1 T_1, \quad e_j = c_{vj} T_j + V_j^2 / 2, \quad \left(\frac{F_{2x}}{m_2} \right) = \left(\frac{u_1 - u_2}{v_1 - v_2} \right) \frac{3}{8} \frac{\rho_1}{\rho^0} \frac{|\mathbf{V}_1 - \mathbf{V}_2|}{a_2} C_D, \quad C_D = \frac{24}{\text{Re}_2} + \frac{4}{\sqrt{\text{Re}_2}} + \frac{1}{2},$$

$$\frac{q_2}{m_2} = \frac{3}{2} \frac{\lambda_1}{a_2^2 \rho^0} (T_1 - T_2) \text{Nu}, \quad \text{Nu} = 2 + 0.6 \sqrt{\text{Re}_2} \text{Pr}_1^{1/3}, \quad \text{Re}_2 = 2 a_2 \rho_1 |\mathbf{V}_1 - \mathbf{V}_2| / \mu_1,$$

$$|\mathbf{V}_1 - \mathbf{V}_2| = \sqrt{(u_1 - u_2)^2 + (v_1 - v_2)^2}, \quad \rho_2 = \frac{4}{3} \pi a_2^3 n_2 \rho^0.$$

Здесь j – номер фазы: $j = 1$ – газ; 2 – жидкость; u, v – осевая и радиальная компоненты скорости фаз; ρ – их среднеобъемные плотности; T – температуры; e – полные удельные внутренние энергии (с учетом плотности кинетической энергии); $a_2, m_2, \mathbf{F}_2, q_2$ – радиус, масса отдельной частицы, действующая на частицу сила, направленный к поверхности частицы тепловой поток; C_D, Nu – коэффициент сопротивления и число Нуссельта частицы, зависящие от числа Рейнольдса Re_2 ; n_2 – концентрация частиц; ρ^0 – плотность материала частицы; μ_1, λ_1 – коэффициенты вязкости и теплопроводности газа; Pr_1 – число Прандтля.

В докладе представлены примеры расчётов, проведённых в широкой области управляющих параметров в рамках представленной модели.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ, грант 16-19-10472.

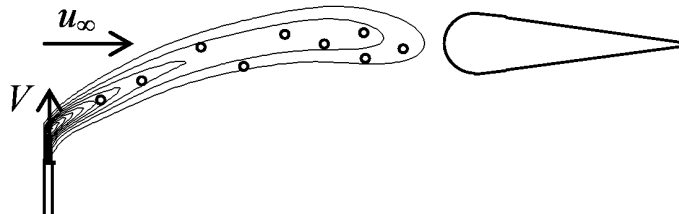


Рис. 1. Схема создания плёнки на модели

Литература

1. Miller A.B., Potapov Y.F., Stasenko A.L. Experimental and theoretical investigations of aircraft icing in the case of crystal and mixed-phase flow // 29th Congress Intern. Council of the Aeronaut. Sciences, Sep. 7–12, 2014. St-Petersburg, Russia. Paper 2014-0575.