

## Базовая система уравнений решателя FNI

Система уравнений Навье-Стокса осредненные по Рейнольдсу (неподвижная Декартова система координат):

$$\frac{\partial}{\partial t} \iiint_{Vol} \bar{\Lambda} dV = -\iint_S (\bar{F}_C \bar{i} + \bar{G}_C \bar{j} + \bar{D}_C \bar{k}, d\bar{S}) + \iint_S (\bar{F}_D \bar{i} + \bar{G}_D \bar{j} + \bar{D}_D \bar{k}, d\bar{S}) ;$$

$$\bar{\Lambda} = \begin{bmatrix} \rho \\ \rho u \\ \rho v \\ \rho w \\ \rho[e + \frac{q^2}{2}] \end{bmatrix}; \quad \bar{F}_C = \begin{bmatrix} RU \\ RU^2 + P \\ RUV \\ RUW \\ RUH \end{bmatrix}; \quad \bar{G}_C = \begin{bmatrix} RV \\ RUV \\ RV^2 + P \\ RVW \\ RVH \end{bmatrix}; \quad \bar{D}_C = \begin{bmatrix} RW \\ RUW \\ RVW \\ RW^2 + P \\ RWH \end{bmatrix};$$

$$\bar{F}_D = \begin{bmatrix} 0 \\ (\mu + \mu_t)\tau_{xx} \\ (\mu + \mu_t)\tau_{xy} \\ (\mu + \mu_t)\tau_{xz} \\ (\mu + \mu_t)(u\tau_{xx} + v\tau_{xy} + w\tau_{xz}) + \gamma(\frac{\mu}{Pr} + \frac{\mu_t}{Pr_t})\frac{\partial e}{\partial x} \end{bmatrix}; \quad \bar{G}_D = \begin{bmatrix} 0 \\ (\mu + \mu_t)\tau_{yx} \\ (\mu + \mu_t)\tau_{yy} \\ (\mu + \mu_t)\tau_{yz} \\ (\mu + \mu_t)(u\tau_{yx} + v\tau_{yy} + w\tau_{yz}) + \gamma(\frac{\mu}{Pr} + \frac{\mu_t}{Pr_t})\frac{\partial e}{\partial y} \end{bmatrix};$$

$$\bar{D}_D = \begin{bmatrix} 0 \\ (\mu + \mu_t)\tau_{xx} \\ (\mu + \mu_t)\tau_{xy} \\ (\mu + \mu_t)\tau_{zz} \\ (\mu + \mu_t)(u\tau_{xx} + v\tau_{xy} + w\tau_{zz}) + \gamma(\frac{\mu}{Pr} + \frac{\mu_t}{Pr_t})\frac{\partial e}{\partial z} \end{bmatrix};$$

$$\tau_{xx} = 2\frac{\partial u}{\partial x} - \frac{2}{3}\text{div } \vec{V}; \quad \tau_{xy} = \tau_{yx} = \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y};$$

$$\tau_{yy} = 2\frac{\partial v}{\partial y} - \frac{2}{3}\text{div } \vec{V}; \quad \tau_{yz} = \tau_{zy} = \frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z};$$

$$\tau_{zz} = 2\frac{\partial w}{\partial z} - \frac{2}{3}\text{div } \vec{V}; \quad \tau_{zx} = \tau_{xz} = \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x}; \quad \text{div } \vec{V} = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z};$$

$$p = R\rho T; \quad q^2 = u^2 + v^2 + w^2; \quad e = \frac{1}{(\gamma-1)}\frac{p}{\rho} = c_v T; \quad H = e + \frac{q^2}{2} + p/\rho; \quad \gamma = \frac{c_p + R}{c_v}; \quad Pr = \frac{\mu c_p}{\lambda}; \quad Pr_t = 0.89;$$

$$\frac{\mu}{\mu_c} = \left(\frac{T}{T_c}\right)^{3/2} \frac{T_c - T_s}{T + T_s}; \quad T_c = 288^\circ K; \quad T_s = 122^\circ K;$$

Для замыкания данной системы уравнений используются алгебраические и дифференциальные соотношения (одно и двух параметрические) для расчета турбулентной вязкости. В качестве рекомендуемой модели ниже представлена однопараметрическая дифференциальная модель Секундова А.Н. 1990. Опыт использования данной модели в различных задачах внутренней и внешней аэродинамики позволяет говорить о хорошем соответствии между экспериментальными и расчетными данными.

$$\frac{\partial \mu_t}{\partial t} = -\left(\frac{\partial \mu_t}{\partial x} + \frac{\partial \mu_t}{\partial y} + \frac{\partial \mu_t}{\partial z}\right) + \frac{\partial}{\partial x} \left[ (c_1 \mu_t + \mu) \frac{\partial \mu_t / \rho}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ (c_1 \mu_t + \mu) \frac{\partial \mu_t / \rho}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ (c_1 \mu_t + \mu) \frac{\partial \mu_t / \rho}{\partial z} \right] + \mu_t J;$$

$$J = c_2 \Gamma \times \frac{(\mu_t / \mu + 5.6)^2 - 18.56}{(\mu_t / \mu - 5.6)^2 + 32.64} + \frac{c_3}{\rho} (u \frac{\partial p}{\partial x} + v \frac{\partial p}{\partial y} + w \frac{\partial p}{\partial z}) - c_4 \frac{\mu_t}{\rho} \Gamma^2 - \frac{1}{\rho} \frac{c_5 \mu_t + c_6 \mu}{S^2};$$

$$\Gamma^2 = 2(u_x^2 + v_y^2 + w_z^2) + (u_y + v_x)^2 + (u_z + w_x)^2 + (v_z + w_y)^2 = \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right);$$

$$c_1 = 2; \quad c_2 = 0.2; \quad c_3 = 0.7; \quad c_4 = 5; \quad c_5 = 3; \quad c_6 = 50;$$