

Моделирование фильтра циклон

Дмитрий Богданов

СПБГПУ

25 мая 2012 г.

Таблица 1: Геометрия фильтра

| | |
|--------------------------------------|----------|
| Диаметр цилиндра, D | $0.205m$ |
| Диаметр выходной трубы, D_e | $0.5D$ |
| Высота входного канала, a | $0.5D$ |
| Ширина входного канала, b | $0.2D$ |
| Длина выходной трубы, h_e | $0.75D$ |
| Полная высота фильтра, H | $4.0D$ |
| Высота цилиндра, h | $1.5D$ |
| Диаметр нижнего сечения фильтра, B | $0.36D$ |

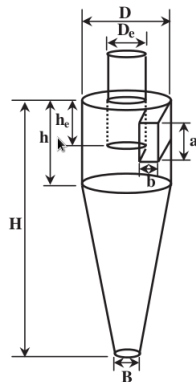


Рис. 1: Схема фильтра

Уравнения движения

Уравнение неразрывности:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho \vec{V}) = 0, \quad (1)$$

Уравнение баланса импульса:

$$\frac{\partial \rho \vec{V}}{\partial t} + \nabla(\rho \vec{V} \vec{V}) = -\nabla p + \nabla[(\mu + \mu_t) \nabla \vec{V}] + \rho \vec{S}_V, \quad (2)$$

Уравнение баланса энергии:

$$\frac{\partial \rho h}{\partial t} + \nabla(\rho \vec{V} h) = \frac{\partial p}{\partial t} + \nabla[(\alpha + \alpha_t) \nabla h] + \rho S_h, \quad \text{где } \alpha_t = \mu_t / Pr_t, \quad (3)$$

Уравнение состояния:

$$p = \rho R T \quad (4)$$

Модель турбулентности

Уравнение переноса кинетической энергии:

$$\frac{\partial \rho k}{\partial t} + \nabla(\rho \vec{V} k) = P_k f_{rot} + \beta^* \rho k \omega + \nabla[(\mu + \mu_t) \nabla k], \quad (5)$$

Уравнение переноса удельной скорости диссипации:

$$\frac{\partial \rho \omega}{\partial t} + \nabla(\rho \vec{V} \omega) = \alpha \frac{\rho P_k}{\mu_t} f_{rot} - D_\omega + C_d \omega + \nabla[(\mu + \mu_t) \nabla \omega], \quad (6)$$

Поправка на кривизну линий тока:

$$\begin{aligned} f_{r1}(r^*, \bar{r}) &= 2r^* \left(\frac{1 + C_{r1}}{1 + r^*} \right) [1 - C_{r3} \arctan(C_{r2} \bar{r})] - C_{r1}, \\ \bar{r} &= 2\Omega_{ik} S_{kj} \frac{DS_{ij}}{Dt} \frac{1}{\Omega D^3}, \quad D^2 = \max(S^2, 0.09\omega^2), \\ S^2 &= 2S_{ij}S_{ij}, \quad \Omega^2 = 2\Omega_{ij}\Omega_{ij}, \quad r^* = S/\Omega, \\ C_{r1} &= 1, \quad C_{r2} = 2, \quad C_{r3} = 1, \quad f_{rot} = \max[\min(f_{r1}, 1.25), 0] \end{aligned} \quad (7)$$

Субстанциональная производная тензора скоростей деформации

$$\tilde{r} = 2\Omega_{ik}S_{kj} \frac{DS_{ij}}{Dt} \frac{1}{\Omega D^3}$$

Здесь субстанциональная производная тензора скоростей деформации равна

$$\mathbf{P} = \frac{DS_{ij}}{Dt} = \text{div}(\vec{V} \cdot \mathbf{S}), \quad (8)$$

А суммирование компонент трёх тензоров по повторяющимся индексам явно расписывается как

$$\begin{aligned} \Omega_{ik}S_{kj} \frac{DS_{ij}}{Dt} = & \Omega_{xx}S_{xx}P_{xx} + \Omega_{xx}S_{xy}P_{xy} + \Omega_{xx}S_{xz}P_{xz} + \\ & \Omega_{yx}S_{xx}P_{yx} + \Omega_{yx}S_{xy}P_{yy} + \Omega_{yx}S_{xz}P_{yz} + \\ & \Omega_{zx}S_{xx}P_{zx} + \Omega_{zx}S_{xy}P_{zy} + \Omega_{zx}S_{xz}P_{zz} + \\ & \Omega_{xy}S_{yx}P_{xx} + \Omega_{xy}S_{yy}P_{xy} + \Omega_{xy}S_{yz}P_{xz} + \\ & \Omega_{yy}S_{yx}P_{yx} + \Omega_{yy}S_{yy}P_{yy} + \Omega_{yy}S_{yz}P_{yz} + \\ & \Omega_{zy}S_{yx}P_{zx} + \Omega_{zy}S_{yy}P_{zy} + \Omega_{zy}S_{yz}P_{zz} + \\ & \Omega_{xz}S_{zx}P_{xx} + \Omega_{xz}S_{zy}P_{xy} + \Omega_{xz}S_{zz}P_{xz} + \\ & \Omega_{yz}S_{zx}P_{yx} + \Omega_{yz}S_{zy}P_{yy} + \Omega_{yz}S_{zz}P_{yz} + \\ & \Omega_{zz}S_{zx}P_{zx} + \Omega_{zz}S_{zy}P_{zy} + \Omega_{zz}S_{zz}P_{zz} \end{aligned} \quad (9)$$

Модель частиц

Уравнение движения частицы:

$$m_p \frac{d\vec{V}_p}{dt} = \frac{1}{2} \rho |\vec{V} - \vec{V}_p| (\vec{V} - \vec{V}_p) \frac{d_p^2 \pi}{4} C_D + m_p \vec{g} \frac{\rho_I - \rho}{\rho_I} + \vec{F}_{\nabla p} \quad (10)$$

- m_p – масса частицы
- \vec{V}_p – скорость частицы
- \vec{V} – скорость жидкости
- C_D – коэффициент сопротивления
- ρ_I – плотность частицы (жидкой)
- ρ – плотность жидкости
- $\vec{F}_{\nabla p}$ – сила, обусловленная действием на частицу градиента давления

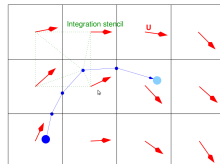


Рис. 2: Схема движения частиц

- Cell-to-face-to-cell tracking для траекторий частиц.
- Если необходимы более детальные траектории используются дополнительные циклы решения внутри ячеек.
- Для решения уравнения (??) используется встроенный в OpenFOAM ODE солвер.

Таблица 2: Параметры задачи о течении в тестовом циклоне

| | |
|--|------------------------------------|
| Высота входного канала, h_{in} | 0.2[m] |
| Высота выходного канала, h_{out} | 0.2[m] |
| Ширина входного канала, w_{in} | 0.1[m] |
| Ширина выходного канала, w_{out} | 0.1[m] |
| Высота циклона, H_{full} | 0.4m |
| Количество ячеек сетки, n_{Cells} | 91440 |
| Массовый расход через входное сечение, Q_{in} | 0.25[kg/s] ($V \approx 20[m/s]$) |
| Кинетическая энергия турбулентности на входе, k_{in} | $10^{-5}[m^2/s^2]$ |
| Удельная скорость диссипации на входе, ω_{in} | 1[s ⁻¹] |
| Давление в выходном сечении, p_{out} | 101325[Pa] |
| Температура во входном сечении, T_{in} | 300[K] |
| Температура стенок, T_w | 300[K] |

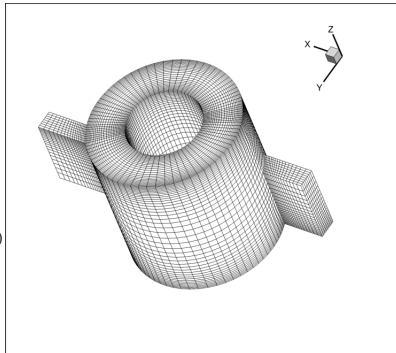


Рис. 3: Сетка для задачи о течении в тестовом циклоне

Результаты верификации

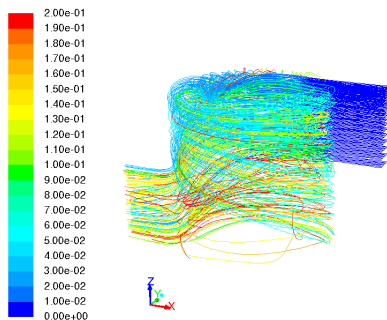


Рис. 4: Линии тока

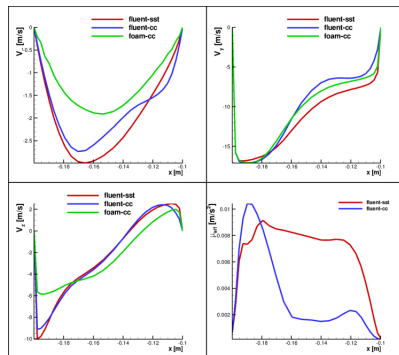


Рис. 5: Влияние кривизны линий тока на профиль скорости

Граничные условия

Таблица 3: Граничные условия

| | |
|---|------------|
| Массовый расход через входное сечение, Q_{in} | 0.08[kg/s] |
| Температура газа на входе в циклон, T_{in} | 300[K] |
| Температура внешних стенок, T_w | 300[K] |
| Давление в выходном сечении, p_{out} | 101325[Pa] |
| Внутренние стенки - адиабатические | |

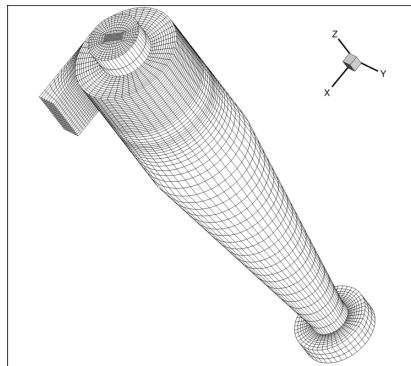


Рис. 6: Сетка для реального фильтра

SST без коррекции на кривизну

Расчёт для геометрии циклона, приведённой в таблице ?? :

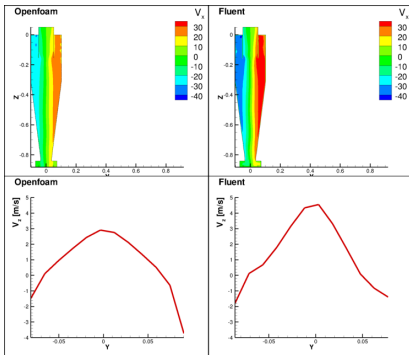


Рис. 7: Сравнение решения в OpenFOAM и FLUENT

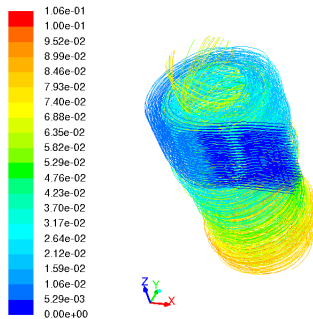


Рис. 8: Линии тока