

Моделирование фильтра циклон

Дмитрий Богданов

СПБГПУ

10 июня 2012 г.

- 1 Постановка задачи
- 2 Определяющие уравнения
- 3 Верификация модели турбулентности
- 4 Решение

Геометрия фильтра

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	$0.36D$

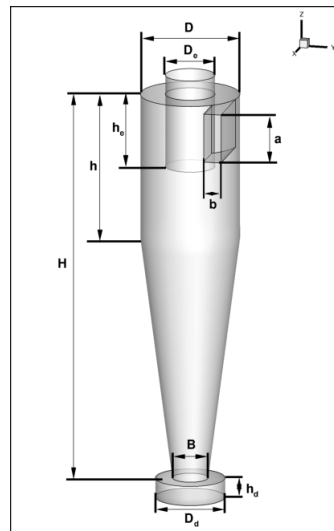


Рис. 1: Схема фильтра

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

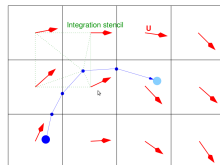


Рис. 2: Схема движения частиц

- Cell-to-face-to-cell tracking для траекторий частиц.
- Если необходимы более детальные траектории используются дополнительные циклы решения внутри ячеек.
- Для решения уравнения (10) используется встроенный в OpenFOAM ODE солвер.

Течение в тестовом циклоне

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, $nCells$	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	$300[K]$

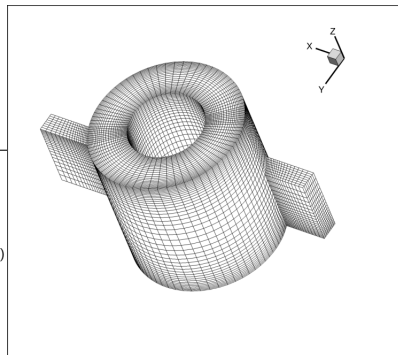


Рис. 3: Сетка для задачи о течении в тестовом циклоне

Результаты верификации

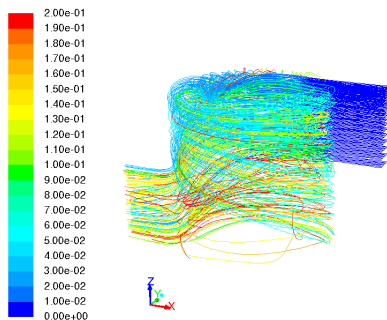


Рис. 4: Линии тока

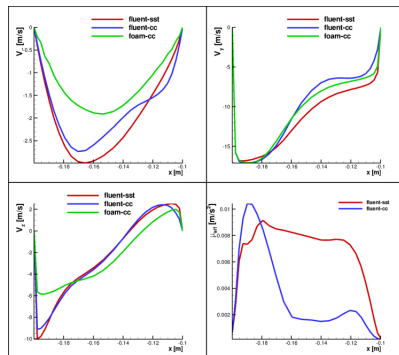


Рис. 5: Влияние кривизны линий тока на профиль скорости

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	

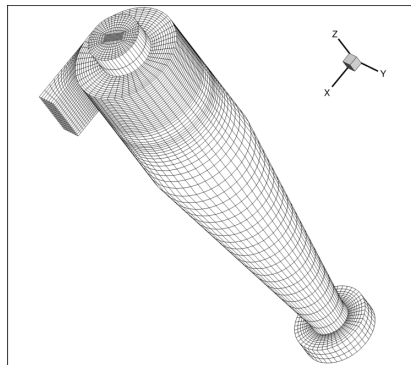


Рис. 6: Сетка для реального фильтра

SST без коррекции на кривизну

Расчёт для геометрии циклона, приведённой в таблице 1 :

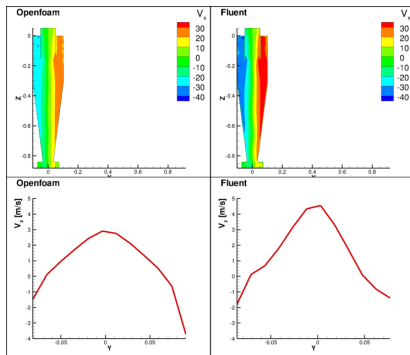


Рис. 7: Сравнение решения в OpenFOAM и FLUENT

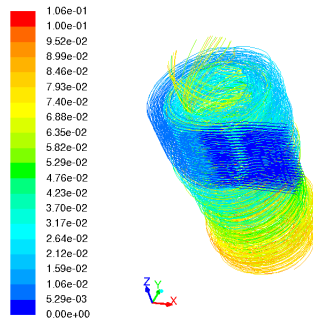


Рис. 8: Линии тока