

# Численное исследование течения в фильтре-циклоне

Выполнил студент гр. 6054/11

Богданов Д.А.

Руководитель, к.ф.-м.н., с.н.с.

Поняев С.А.

Санкт-Петербургский Государственный Политехнический Университет

21 июня 2012 г.

# Содержание

- Мотивации к работе
- Схема течения в циклоне
- Цели работы
- SST - модель с поправкой на кривизну
- Верификация реализованной поправки
- Решение без дисперсных включений
- Расчёт траекторий частиц
- Заключение

# Мотивации к работе

- 1 Актуальность исследуемой проблемы
- 2 Отсутствие в OpenFOAM модели турбулентной вязкости с поправкой на кривизну линий тока
- 3 Отсутствие солвера,использующего уравнение идеального газа в качестве уравнения состояния, и учитывающего при этом обратное влияние на поток

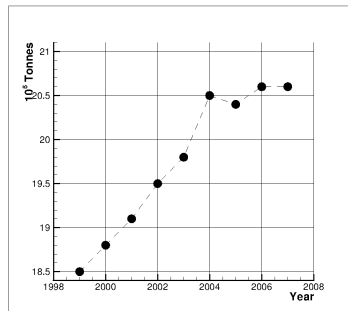
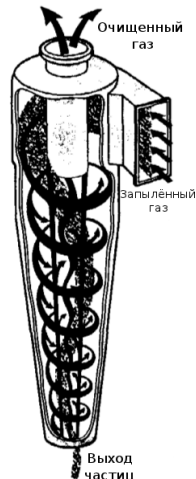


Рис. 1: Динамика выбросов вредных веществ

# Схема течения в циклоне

- Запылённый воздух входит в циклон через тангенциальный патрубок и, приобретая вращательное движение, опускается винтообразно вниз вдоль внутренних стенок цилиндра и конуса.
- Небольшая часть этого потока, в котором сконцентрированы пылевые частицы, движется в непосредственной близости от стенок циклона и поступает через пылеотводящее отверстие в пылесборный бункер, где происходит осаждение и накопление пылевых частиц.
- В центральной зоне циклона воздушный поток, освобождённый от пыли, поднимается винтообразно вверх и удаляется через выхлопную трубу наружу.



# Цели работы

- 1 Реализация  $k - \omega - SST$  модели турбулентности с поправкой на кривизну линий тока при помощи открытой интегрируемой платформы для численного моделирования задач механики сплошных сред OpenFOAM.
- 2 Реализация с использованием OpenFOAM солвера, имеющего в основе модель идеального газа и учитывающего при этом обратное влияние частиц на поток.
- 3 Численное моделирование циклона с учётом обратного влияния частиц на поток и поправки на кривизну линий тока к генерации турбулентности.

# Формулировка SST-модели с поправочным коэффициентом Шура-Спалларта

Уравнение переноса  $k$

$$\frac{\partial \rho k}{\partial t} + \frac{\partial \rho U_j k}{\partial x_j} = \tilde{P}_k f_{rot} - \beta^* \rho k \omega + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right), \quad (1)$$

Уравнение переноса  $\omega$

$$\frac{\partial \rho \omega}{\partial t} + \frac{\partial U_j \omega}{\partial x_j} = \frac{\gamma}{\nu_t} P_k f_{rot} - \beta \rho \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) + (1 - F_1) 2 \rho \sigma \omega_2 \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j}, \quad (2)$$

Уравнения для поправочного коэффициента  $f_{rot}$

$$f_{r1}(r^*, \tilde{r}) = 2r^* \left( \frac{1 + C_{r1}}{1 + r^*} \right) [1 - C_{r3} \arctan(C_{r2} \tilde{r})] - C_{r1}, \quad (3)$$

$$\tilde{r} = 2\Omega_{ik} S_{kj} \frac{DS_{ij}}{Dt} \frac{1}{\Omega D^3}, \quad D^2 = \max(S^2, 0.09\omega^2), \quad (4)$$

$$S^2 = 2S_{ij}S_{ij}, \quad \Omega^2 = 2\Omega_{ij}\Omega_{ij}, \quad r^* = S/\Omega$$

$$C_{r1} = 1, \quad C_{r2} = 2, \quad C_{r3} = 1, \quad f_{rot} = \max[\min(f_{r1}, 1.25), 0]$$

# Постановка задачи

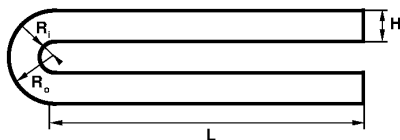


Рис. 2: Геометрия канала

Высота,	$H = 3.81cm$
Длина канала,	$L = 10H$
Внутренний радиус,	$R_i = 1.91cm$
Внешний радиус,	$R_o = 5.72cm$
Ср. скорость на входе,	$U_{in} = 30.1m/s$
Температура на входе,	$T_{in} = 264K$

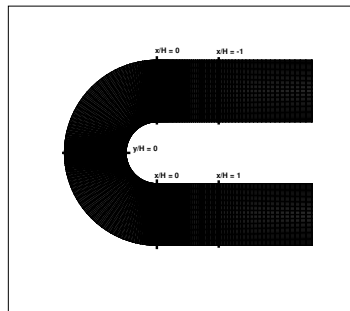


Рис. 3: Сетка расчётной области на участке поворота

# Методические исследования

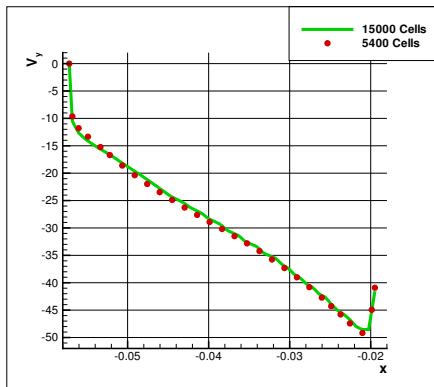


Рис. 4: Сравнение профилей  $V_y$  в сечении  $y = 0$  для разных сеток

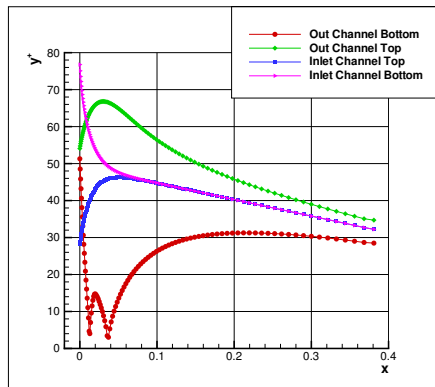


Рис. 5: Величина  $y^+$  первой пристенной ячейки на внешней и внутренней стенках



# Сравнение с экспериментами Монсона и моделированием в Fluent

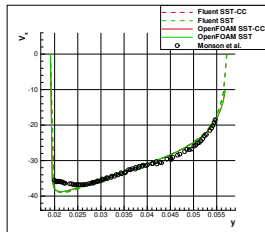


Рис. 6: Профиль  $V_x$  в сечении  $x/H = 0$  (верх)

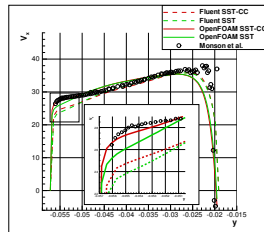


Рис. 7: Профиль  $V_x$  в сечении  $x/H = 0$  (низ)

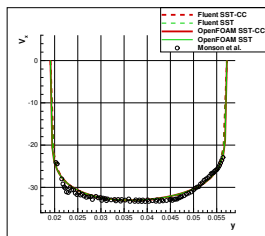


Рис. 8: Профиль  $V_x$  в сечении  $x/H = -1$

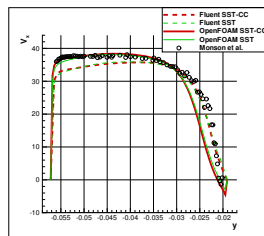


Рис. 9: Профиль  $V_x$  в сечении  $x/H = 1$

# 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, $B$	$0.36D$
Диаметр пылесборника, $D_d$	$0.75D$

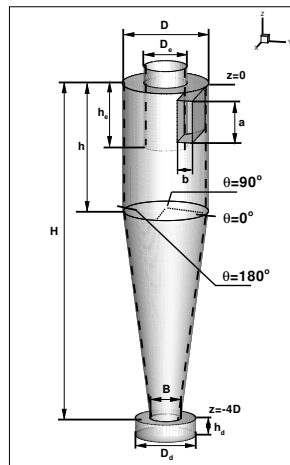


Рис. 10: Схема фильтра

# Постановка задачи

Средняя скорость на входе,  $U_{in} = 5, 10, 15$  и  $20 \text{ m/s}$

Температура воздуха на входе,  $T_{in} = 300 \text{ K}$

Тепловой поток на стенках,  $q_w = 0$

Давление в выходном сечении,  $p_{out} = 1 \text{ atm}$

Скорость частиц на входе,  $U_{p,in} = U_{in}$

Температура частиц на входе,  $T_{p,in} = T_{in}$

Диаметры частиц,  $d_p = \sim 10^{-5}, 10^{-6}, 10^{-7} \text{ m}$

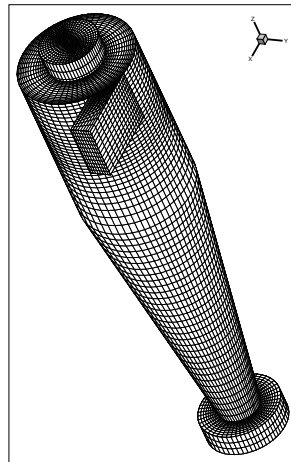


Рис. 11: Расчётная сетка

# Методические исследования

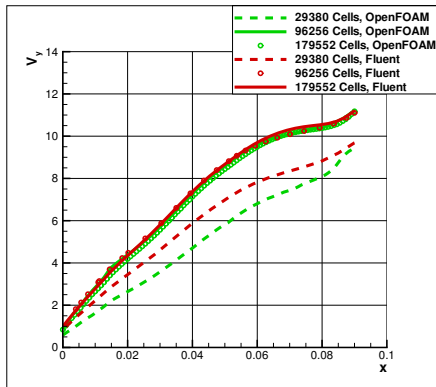


Рис. 12: Профили  $V_y$  вдоль прямой  $z = -0.3m$ ,  $y = 0$

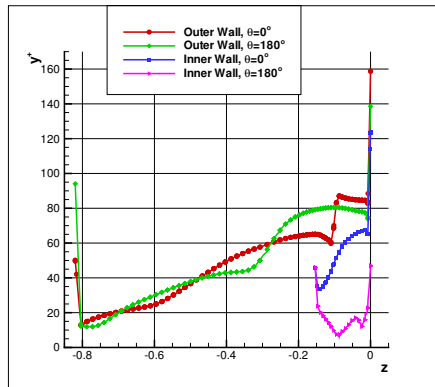


Рис. 13: Величина  $y^+$  первой пристенной ячейки на внешней и внутренней стенках циклона

# Влияние поправки на течение в циклоне

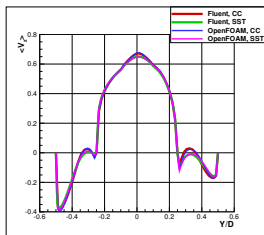


Рис. 14: Профили  $V_z/U_{in}$  вдоль прямой  $Z/D = -0.75, x = 0$

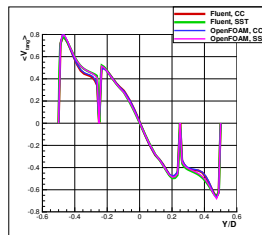


Рис. 15: Профили  $V_{tg}/U_{in}$  вдоль прямой  $Z/D = -0.75, x = 0$

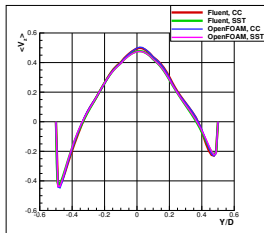


Рис. 16: Профили  $V_z/U_{in}$  вдоль прямой  $Z/D = -1, x = 0$

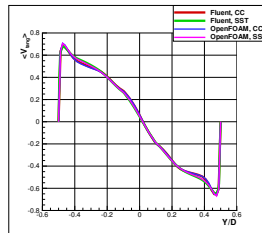


Рис. 17: Профили  $V_{tg}/U_{in}$  вдоль прямой  $Z/D = -1, x = 0$

# Модель частиц в OpenFOAM

Уравнение движения частицы в OpenFOAM:

$$m_p \frac{d\vec{V}_p}{dt} = \frac{1}{2} \rho |\vec{V} - \vec{V}_p| (\vec{V} - \vec{V}_p) \frac{d_p^2 \pi}{4} C_D + m_p \vec{g} + \vec{F}_{\nabla p} \quad (5)$$

$m_p$  – масса частицы

$\vec{V}_p$  – скорость частицы

$\vec{V}$  – скорость жидкости

$C_D$  – коэффициент сопротивления

$\rho$  – плотность жидкости

$\vec{F}_{\nabla p}$  – сила, обусловленная действием градиента давления

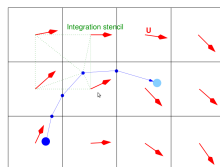


Рис. 18: Схема движения частиц

- Cell-to-face-to-cell tracking для траекторий частиц.
- Если необходимы более детальные траектории используются дополнительные циклы решения внутри ячеек.
- Для решения уравнения (5) используется встроенный в OpenFOAM ODE solver.

# Развитие течения дисперсных включений во времени

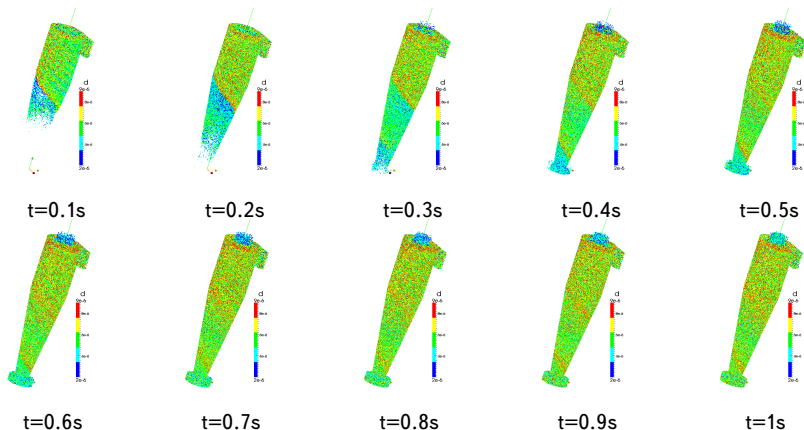


Рис. 19: Распределение дисперсных включений по диаметрам частиц для  $U_{in} = 20 m/s$ ,  $d_p \sim 10^{-6}$

# Распределение частиц для разных скоростей и диаметров

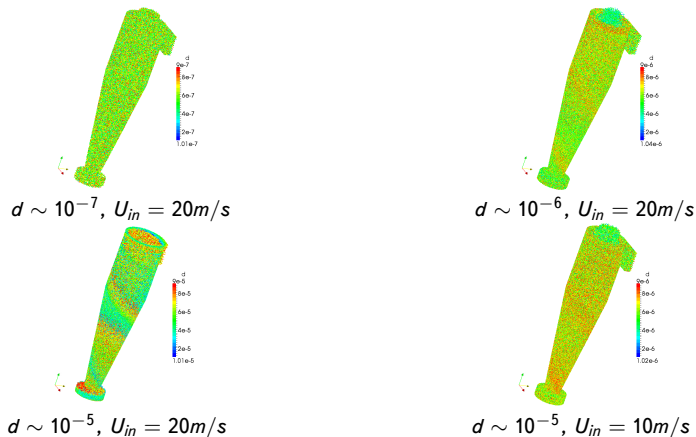


Рис. 20: Распределение дисперсных включений по диаметрам частиц в момент времени  $t = 1\text{s}$



# Сравнение результатов расчётов для эффективности циклонов с экспериментами Диргоу и Лейта

Параметры течения	$\eta$ , численное исследование	$\eta$ , эксперимент
$U_{in} = 20m/s, d = 5 \cdot 10^{-5}m$	100%	100%
$U_{in} = 20m/s, d = 5 \cdot 10^{-6}m$	93%	90%
$U_{in} = 20m/s, d = 5 \cdot 10^{-7}m$	27%	10%
$U_{in} = 15m/s, d = 10^{-5}m$	80%	90%
$U_{in} = 10m/s, d = 10^{-5}m$	72%	85%
$U_{in} = 5m/s, d = 10^{-5}m$	75%	80%

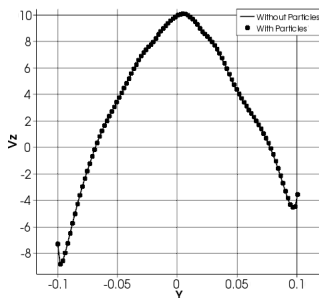


Рис. 21: Распределение  $V_z$  для задачи с частицами и без вдоль прямой  $z = -1.5D, y = 0$

## Закключение

- В SST - модель турбулентности OpenFOAM был имплементирован поправочный коэффициент Шура-Спалларта для учёта влияния кривизны линий тока на турбулентные характеристики. Сравнение результатов расчётов с экспериментальными данными Монсона показало заметное улучшение по сравнению с немодифицированной SST - моделью.
- Сравнение результатов расчётов циклона, выполненных при помощи модифицированного солвера OpenFOAM и Fluent показало отличное соответствие решений друг другу. Анализ влияния дисперсных включений на основной поток позволил заключить, что этим влиянием в исследуемой задаче, по большому счёту, можно пренебречь.
- Проведено сравнение результатов расчётов с экспериментальными данными Диргоу и Лейта для степени очистки, которое показало хорошее согласие как с экспериментами, так и с теорией, которую эти эксперименты подтверждают.
- Показана эффективность циклонов для очищения газа от твёрдых частиц диаметром  $\sim 10^{-6}m$ . Выявлено, что при уменьшении скорости течения, эффективность рассматриваемой конфигурации циклона заметно снижается. Такая же закономерность имеет место и при уменьшении диаметра частиц.
- Выяснено, что для фильтрации частиц, диаметром меньше  $\approx 10^{-7}m$ , циклон непригоден так как степень очистки при этом становится меньше 30%.