

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
Физико-механический факультет
Кафедра гидроаэродинамики

Численное исследование течения в фильтре-циклоне
АВТОРЕФЕРАТ ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ МАГИСТРА
ПО НАПРАВЛЕНИЮ 010600 – ПРИКЛАДНЫЕ МАТЕМАТИКА И ФИЗИКА

Выполнил студент гр. 6054/11

Богданов Д.А.

Руководитель, к.ф.-м.н., с.н.с.

Поняев С.А.

Санкт-Петербург

2012

Содержание

Введение	2
Актуальность проблемы	2
Цели работы	4
1 Численное моделирование	5
1.1 Уравнения движения	5
1.2 Модель турбулентности	6
2 Результаты	8
2.1 Валидация модели турбулентности с поправкой на кри- визну линий тока	8
2.2 Расчёт циклона	13
Заключение	21

Введение

Актуальность проблемы

Задача очищения атмосферного воздуха от загрязняющих выбросов промышленных предприятий достаточно актуальна. Выбросы от стационарных источников вредных веществ в атмосферу городов и населенных пунктов, расположенных на территории северо-западного федерального округа, по данным Росстата за 2007 год, составили 2319000 тонн, в том числе твёрдых – 289400 тонн [1]. В некоторых отраслях промышленности доля выбросов пыли в атмосферу достигает 15% от общего числа получаемого продукта. Так, при изготовлении одной тонны цемента в воздух выбрасывается ≈ 160 кг цементной пыли [2].

Динамика изменения объёма выбросов твёрдых вредных веществ в атмосферу, согласно [1], (рисунк 1) имеет тенденцию к росту, что говорит о том, что решение проблемы инженерной защиты воздуха от вредных веществ останется актуальной и в ближайшем будущем.

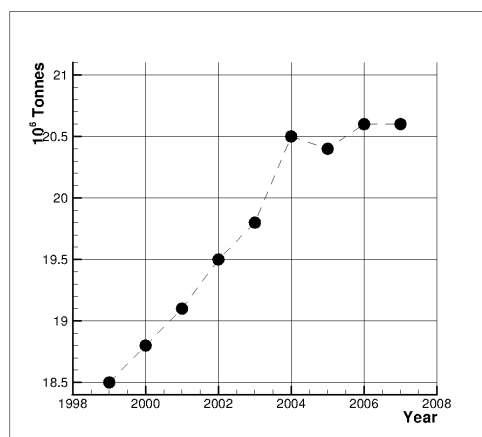


Рис. 1: Динамика выбросов твёрдых веществ в атмосферу

Для очищения воздуха от твёрдых примесей широкое распространение получили фильтры типа циклон. Циклон представляет собой инерционный пылеуловитель, в котором выделение частиц из воздуш-

ной среды происходит, в основном, под действием центробежной силы, возникающей при вращении воздушного потока в корпусе аппарата.

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.

Вследствие вращательного движения воздушного потока в центральной зоне циклона (в конусе, выхлопной трубе и пылесборном бункере) наблюдается пониженное давление.[3]

В силу высокой степени закрученности потока, необходимо введение поправок в модели турбулентности для учёта кривизны линий тока. Кроме того, учитывая высокую концентрацию частиц в потоке, в инженерных расчётах необходимо учитывать не только влияние потока на частицы, но также и обратное влияние частиц на поток.

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.

1 Численное моделирование

1.1 Уравнения движения

Уравнение баланса массы

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad (1)$$

Уравнение баланса импульса

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ijeff}}{\partial x_j} + S_{ui}, \quad (2)$$

где τ_{ijeff} - тензор вязких напряжений, выражаемый по формуле

$$\tau_{ijeff} = \mu_{eff} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \mu_{eff} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \delta_{ij} \quad \mu_{eff} = \mu + \mu_t \quad (3)$$

Уравнение баланса энтальпии

$$\frac{\partial \rho h}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j h) = \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left((\alpha + \alpha_t) \frac{\partial h}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial}{\partial t} \left(\rho \frac{\vec{V}^2}{2} \right) - \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\rho u_j \frac{\vec{V}^2}{2} \right) + S_h, \quad (4)$$

где α - коэффициент температуропроводности.

Уравнение состояния

При расчётах течений сжимаемой жидкости используется модель идеального газа:

$$\frac{p}{\rho} = \frac{R}{M} T, \quad M = 28.966 \frac{g}{mole} \quad (5)$$

1.2 Модель турбулентности

Формулировка SST-модели турбулентности, согласно [4] (но с учётом поправки на кривизну линий тока), следующая:

Уравнение баланса кинетической энергии турбулентности

$$\frac{\partial \rho k}{\partial t} + \frac{\partial \rho U_j k}{\partial x_j} = \tilde{P}_k f_{rot} - \beta^* \rho k \omega + \frac{\partial}{\partial x_j} (\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j}), \quad (6)$$

где f_{rot} - поправочный коэффициент Шура-Спалларта к генерации турбулентности, учитывающий криволинейность потока, определяемый в 1.2.

Уравнение баланса удельной скорости диссипации

$$\frac{\partial \rho \omega}{\partial t} + \frac{\partial U_j \omega}{\partial x_j} = \frac{\gamma}{\nu_t} P_k f_{rot} - \beta \rho \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j} (\Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j}) + (1 - F_1) 2 \rho \sigma_{\omega_2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j}, \quad (7)$$

где

$$\Gamma_k = \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}, \quad \Gamma_\omega = \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega}, \quad P_k = \tau_{ij} \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \quad (8)$$

$$\tilde{P}_k = \min(P_k, c_1 \varepsilon), \quad \mu_t = \rho \frac{a_1 k}{\max(a_1 \omega, S \cdot F_2)}$$

Коэффициент ϕ в модели представляет собой функцию от F_1 : $\phi = F_1 \phi_1 + (1 - F_1) \phi_2$, где ϕ_1 и ϕ_2 соответственно коэффициенты для $k - \omega$ и $k - \varepsilon$ моделей.

$$\sigma_{k1} = 1.176, \quad \sigma_{\omega1} = 2.0, \quad \gamma_1 = 0.5532 \quad \beta_1 = 0.075, \quad \beta^* = 0.09, \quad c_1 = 10,$$

$$\sigma_{k2} = 1.0, \quad \sigma_{\omega2} = 1.168, \quad \gamma_2 = 0.4403 \quad \beta_2 = 0.0828, \quad \beta^* = 0.09, \quad \kappa = 0.41$$

$$\begin{aligned}
F_1 &= \tanh(\arg_1^4), \quad \arg_1 = \min \left[\max \left(\frac{\sqrt{k}}{\beta^* \omega y}, \frac{500\nu}{y^2 \omega} \right), \frac{4\rho\sigma_{\omega 2}k}{CD_{k\omega}y^2} \right] \\
CD_{k\omega} &= \max \left(2\rho\sigma_{\omega 2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j}, 10^{-10} \right) \\
F_2 &= \tanh(\arg_2^2), \quad \arg_2 = \max \left(2 \frac{\sqrt{k}}{\beta^* \omega y}, \frac{500\nu}{y^2 \omega} \right) \\
\tau_{ij} &= \mu_t \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \frac{\partial U_k}{\partial x_k} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij}
\end{aligned} \tag{9}$$

Поправка на кривизну линий тока

Согласно [5], формулировка поправочного члена, учитывающего кривизну линий тока, к модели Ментера следующая:

$$f_{r1}(r^*, \tilde{r}) = 2r^* \left(\frac{1 + C_{r1}}{1 + r^*} \right) [1 - C_{r3} \arctan(C_{r2}\tilde{r})] - C_{r1}, \tag{10}$$

$$\tilde{r} = 2\Omega_{ik}S_{kj} \frac{DS_{ij}}{Dt} \frac{1}{\Omega D^3}, \quad D^2 = \max(S^2, 0.09\omega^2), \tag{11}$$

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

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

2 Результаты

2.1 Валидация модели турбулентности с поправкой на кривизну линий тока

Эффективность поправки на кривизну линий тока к модели Ментера можно проверить, если сравнить результаты расчётов плоского течения в U-образном канале, выполненных при помощи модифицированной модели турбулентности, с экспериментальными данными Монсона и др., приведёнными в статье Монсона [6].

В *таблице 1* представлены геометрические параметры канала и граничные условия. Стенки полагаются адиабатическими, а на выходной границе задаётся постоянное статическое давление $P_{out} = 1.15atm$. На входной границе задаётся неоднородный профиль скорости и турбулентных характеристик, полученный из решения задачи о развитом турбулентном течении в плоском канале. При таких параметрах число Рейнольдса $Re = 10^5$.

Таблица 1: 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. 2: Геометрия канала

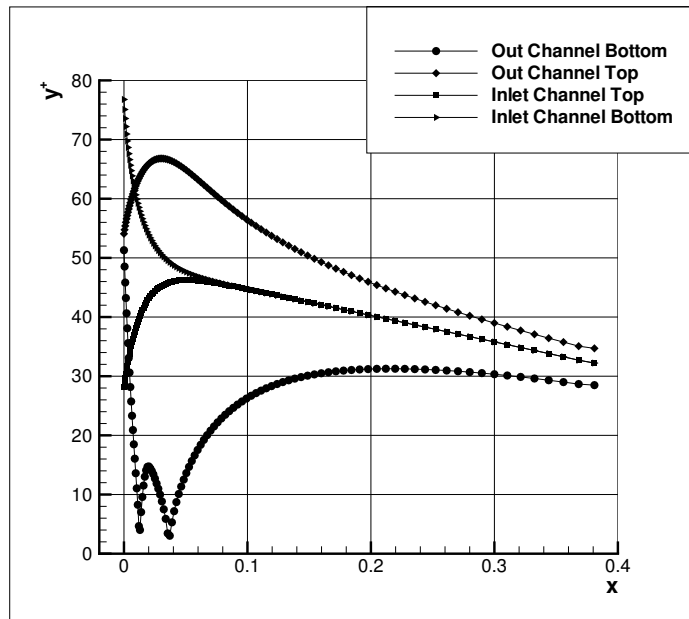


Рис. 3: Величина y^+ первой пристенной ячейки на внешней и внутренней стенках

Величина y^+ (рис. 3) для первой пристенной ячейки лежит в пределах $10 \div 80$, что вполне приемлемо для расчётов с использованием автоматических пристеночных функций.

Перейдём теперь непосредственно к сравнению результатов расчёта с экспериментами Монсона и решением в Fluent с использованием встроенной в него поправки к модели Ментера для учёта кривизны линий тока. Для сравнения выбрано 5 поперечных сечений канала - $x/H = -1$, $x/H = 1$, $x/H = 0$ (верхний канал), $x/H = 0$ (нижний канал) и $y/H = 0$.

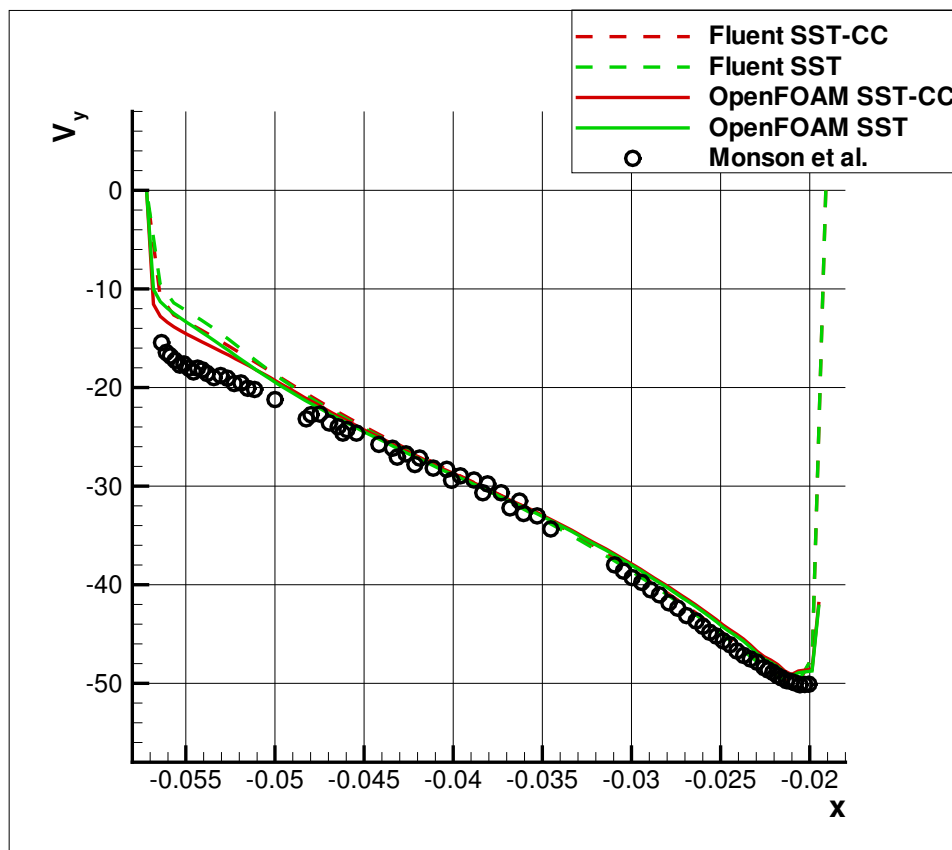


Рис. 4: Профиль поперечной скорости в сечении $y/H = 0$

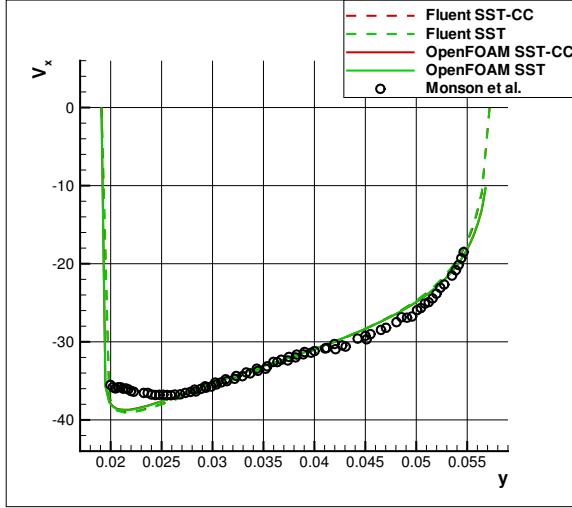


Рис. 5: Профиль продольной скорости в сечении $x/H = 0$ (верхний канал)

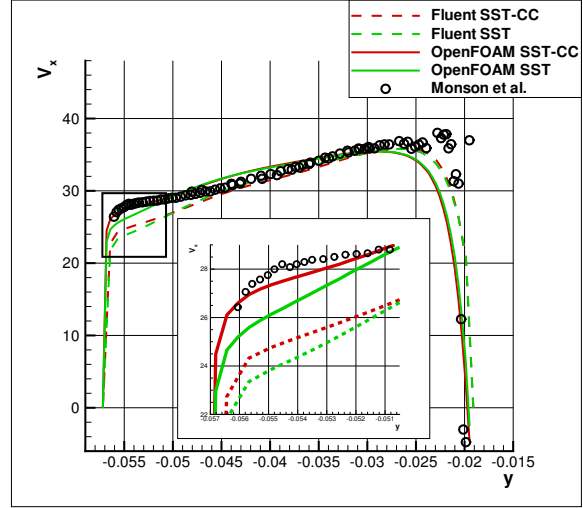


Рис. 6: Профиль продольной скорости в сечении $x/H = 0$ (нижний канал)

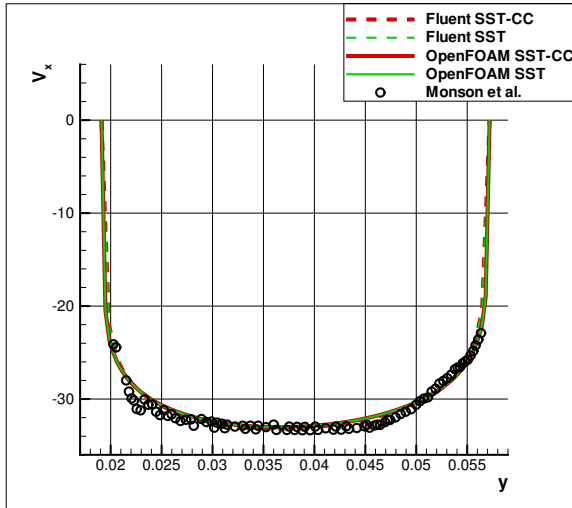


Рис. 7: Профиль продольной скорости в сечении $x/H = -1$

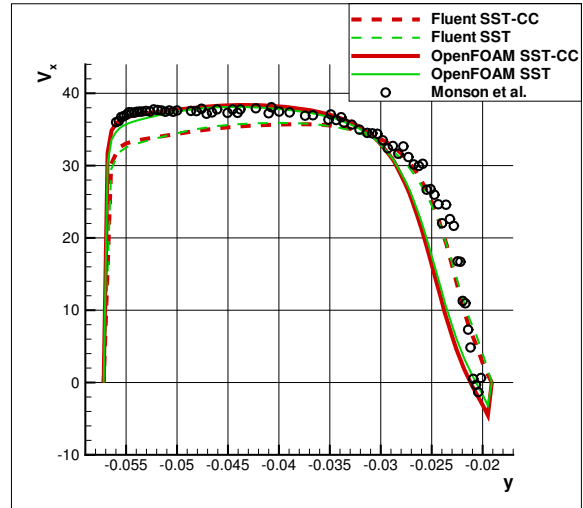


Рис. 8: Профиль продольной скорости в сечении $x/H = 1$

Для начала, стоит сказать, что профили продольной скорости на участке перед поворотом (*рисунки 5 и 7*), полученные в Fluent и OpenFOAM совпадают с точностью до толщины линии и очень хорошо соответствуют экспериментальному течению. Это говорит о том, что базовая модель Ментера, выбранная для введения поправки, правильно предсказывает течение на прямолинейном участке канала.

Из *рисунков 4, 6 и 8* видно, что профили скорости, полученные с использованием модифицированной модели Ментера гораздо ближе к экспериментальным данным в пристеночной области криволинейной части канала, чем решение, полученное с использованием стандартной модели. Поправка, при этом, как и следовало ожидать, не влияет на прямолинейное течение в зоне перед поворотом (*рисунки 5, 7*).

Влияние поправки сильнее всего заметно на выпуклой внутренней стенке, генерация турбулентности на которой в немодифицированной модели Ментера занижена. Надо заметить, что результаты, полученные с использованием OpenFOAM при этом лучше согласуются с экспериментами Монсона, чем результаты расчётов в Fluent. Это, однако же, несправедливо для вогнутой внешней стенки. Здесь результаты расчётов в Fluent, наоборот, ближе к экспериментальному профилю. Видно также, что на вогнутой стенке ни в Fluent, ни в OpenFOAM поправка практически не влияет на течение.

В целом, очевидно достаточно сильное положительное влияние введённой поправки, учитывающей кривизну линий тока, на результаты расчётов.

2.2 Расчёт циклона

Постановка задачи

В задаче рассматривается турбулентное течение вязкого газа с дисперсными включениями в циклоне модели Stairmand с учётом влияния дисперсной фазы на исходное течение. Геометрические параметры циклона представлены в *таблице 2*.

Таблица 2: 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, B	$0.36D$
Высота пылесборника, h_d	$0.25D$
Диаметр пылесборника, D_d	$0.75D$

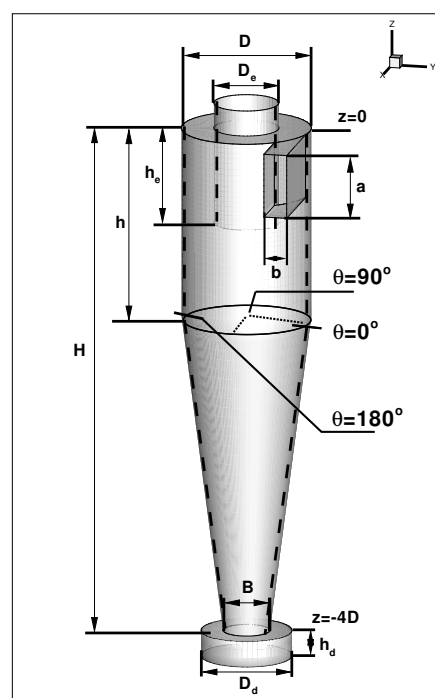


Рис. 9: Схема фильтра

Течение исследуется для 4 различных скоростей на входе, а также для трёх разных порядков величины диаметра частиц. Граничные условия для задачи описаны в *таблице 3*, а на *рисунке 10* показана сетка расчётной области.

Таблица 3: Граничные условия

Скорость на входе, $U_{in} = 5, 10, 15, 20 m/s$
Температура на входе, $T_{in} = 300 K$
Температура частиц, $T_{pin} = T_{in}$
Скорость частиц на входе, $U_{pin} = U_{in}$
Давление на выходе, $P_{out} = 1 atm$
Тепловой поток на стенках, $q_w = 0$
Диаметр частиц, $d_p \sim 10^{-5} m, 10^{-6} m, 10^{-7} m$

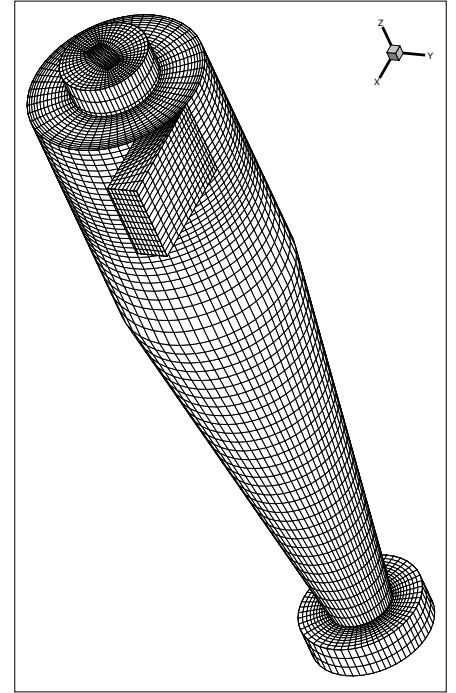


Рис. 10: Сетка расчётной области

Решение, полученное с использованием OpenFOAM достаточно хорошо согласуется с решением, полученным в Fluent как для стандартной модели Ментера, так и для модели с поправкой на кривизну линий тока, что можно видеть по сопоставленным на *рисунках 11 - 14* распределениям безразмерных осевой и тангенциальной составляющих скорости. Влияние поправки, как видно из первых двух рисунков, особенно сильно сказывается на течении вдоль выпуклых стенок выходной трубы. Такого результата и следовало ожидать в силу того, что модифицированная модель Ментера занижает генерацию турбулентности в этой области. Видно также, что решение с использованием по-

правки несколько изменило профили скорости вблизи границы ядра циклона и в его центре.

Расчёт течения при наличии частиц в циклоне (как, собственно, и предыдущие расчёты) выполнен с использованием имплементированного в OpenFOAM солвера, учитывающего влияние дисперсных включений на несущую фазу. Надо сказать, что анализ результатов (*рисунок 15*) показал, что для рассматриваемой задачи дисперсные включения слабо влияют на основной поток.

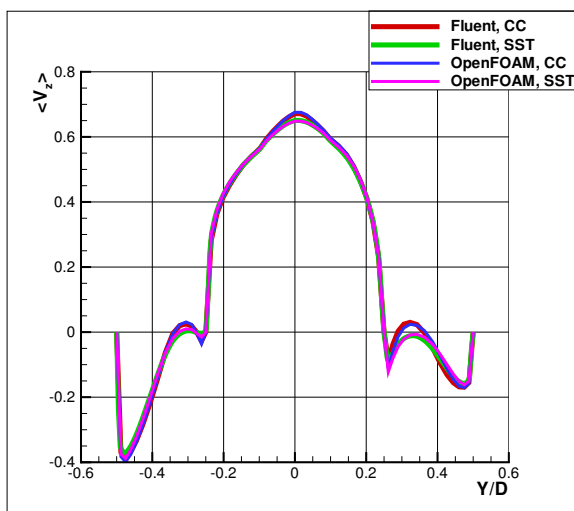


Рис. 11: Профили $\langle V_z \rangle$ вдоль прямой $Z/D = -0.75, x = 0$

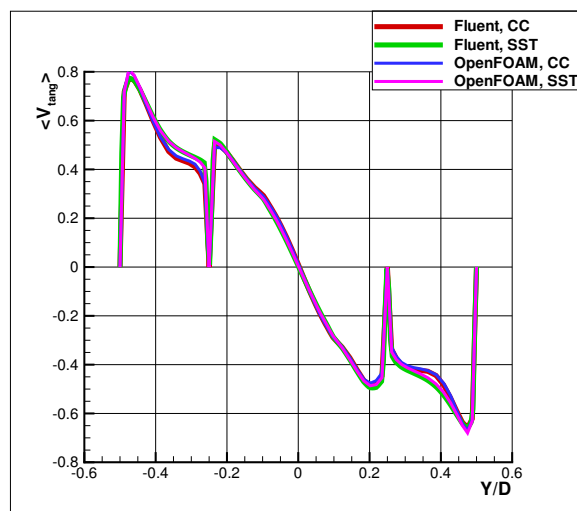


Рис. 12: Профили $\langle V_{tang} \rangle$ вдоль пр. $Z/D = -0.75, x = 0$

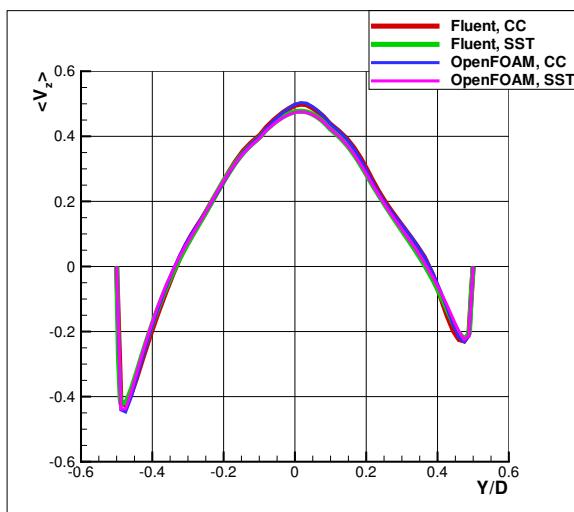


Рис. 13: Профили $\langle V_z \rangle$ вдоль прямой $Z/D = -1, x = 0$

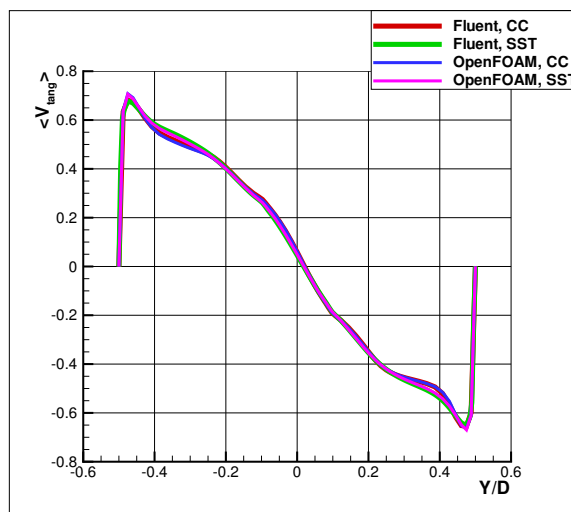


Рис. 14: Профили $\langle V_{tang} \rangle$ вдоль пр. $Z/D = -1, x = 0$

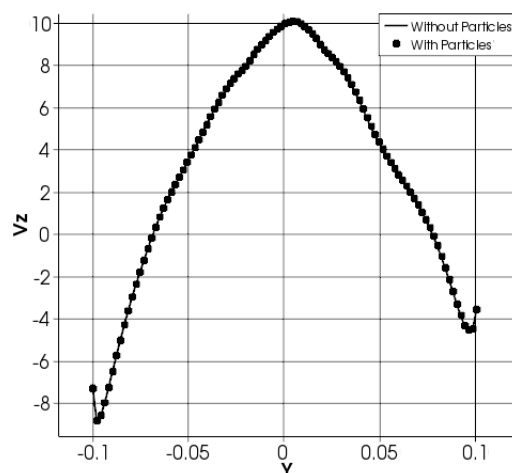


Рис. 15: Влияние частиц на основное течение

Исследование эффективности циклона

На *рисунках 16-19* показано распределение частиц в циклоне для разных диаметров частиц и разных входных скоростей потока через секунду после запуска. За это время в циклон поступило, при различных условиях задачи, от одного миллиона до двух миллионов частиц. По интенсивности распределения частиц в выходной трубе можно судить, что эффективность для частиц диаметром порядка $10^{-5}m$ практически 100%, для частиц диаметром $\sim 10^{-6}m$ она несколько меньше, а частицы диаметром $\sim 10^{-7}m$ в очень большом количестве вылетают из циклона. Кроме того, на *рисунке 20* показано распределение частиц диаметром $\sim 10^{-6}m$ в циклоне для 10 моментов времени. Можно видеть, что течение за 1с становится практически установившимся.

Эффективность, рассчитанная из отношения количества вылетевших и запущенных частиц в численном эксперименте, для различных параметров представлена в сравнении с экспериментальными данными Диргоу и Лейта [7] в *таблице 4*. Можно заключить, что полученные с использованием написанного солвера результаты достаточно хоро-

шо согласуются с экспериментальными данными Диргоу и Лейта для степени очистки.

Очевидно, при уменьшении диаметра частиц, эффективность циклонов падает. При диаметре $\sim 10^{-7}m$ почти три четверти частиц вылетают через выходную трубу вместе с потоком. При уменьшении скорости, эффективность фильтра так же падает, так как уменьшается центробежная сила, и, следовательно, частицы медленнее относятся к стенке и не отсоединяются от основного потока. При уменьшении скорости график зависимости степени очистки от диаметра частиц смещается в сторону больших диаметров, что подтверждается как теорией и экспериментами, так и численными расчётами.

Описанные выше результаты говорят в пользу правильности имплементированного в OpenFOAM солвера, позволяющего рассчитывать турбулентные течения сжимаемого теплопроводящего газа с учётом обратного влияния частиц на основной поток.

Таблица 4: Результаты для эффективности циклонов

Параметры течения	η , численное исследование	η , 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%

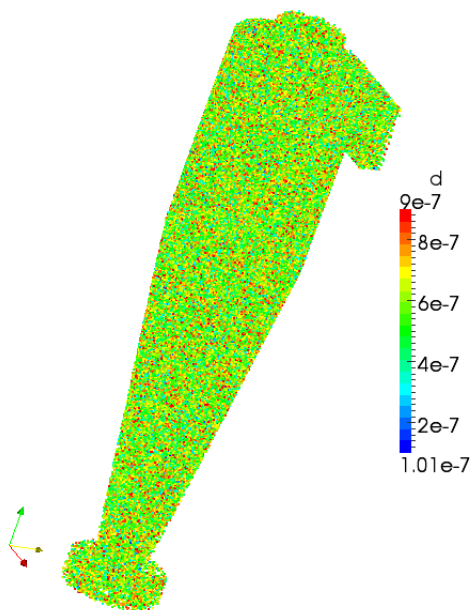


Рис. 16: Распределение частиц в циклоне для $d \sim 10^{-7}$ и $U_{in} = 20 \text{ m/s}$

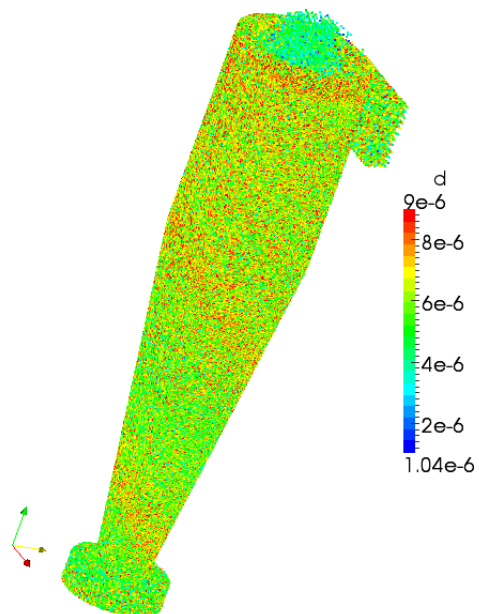


Рис. 17: Распределение частиц в циклоне для $d \sim 10^{-6}$ и $U_{in} = 20 \text{ m/s}$

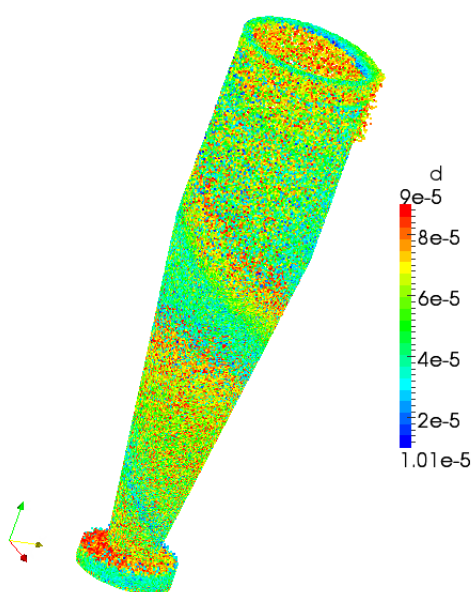


Рис. 18: Распределение частиц в циклоне для $d \sim 10^{-5}$ и $U_{in} = 20 \text{ m/s}$

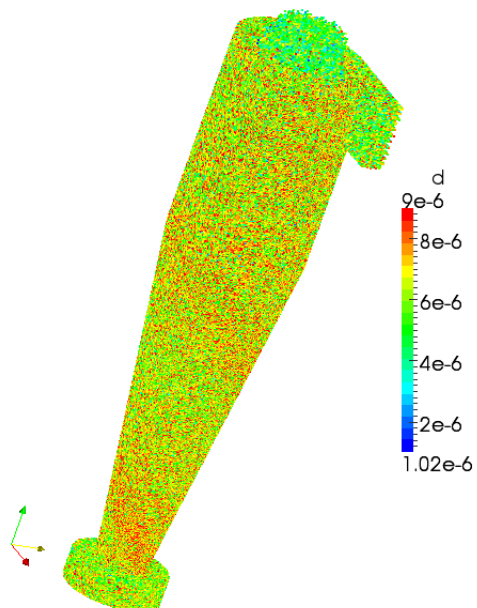


Рис. 19: Распределение частиц в циклоне для $d \sim 10^{-5}$ и $U_{in} = 10 \text{ m/s}$

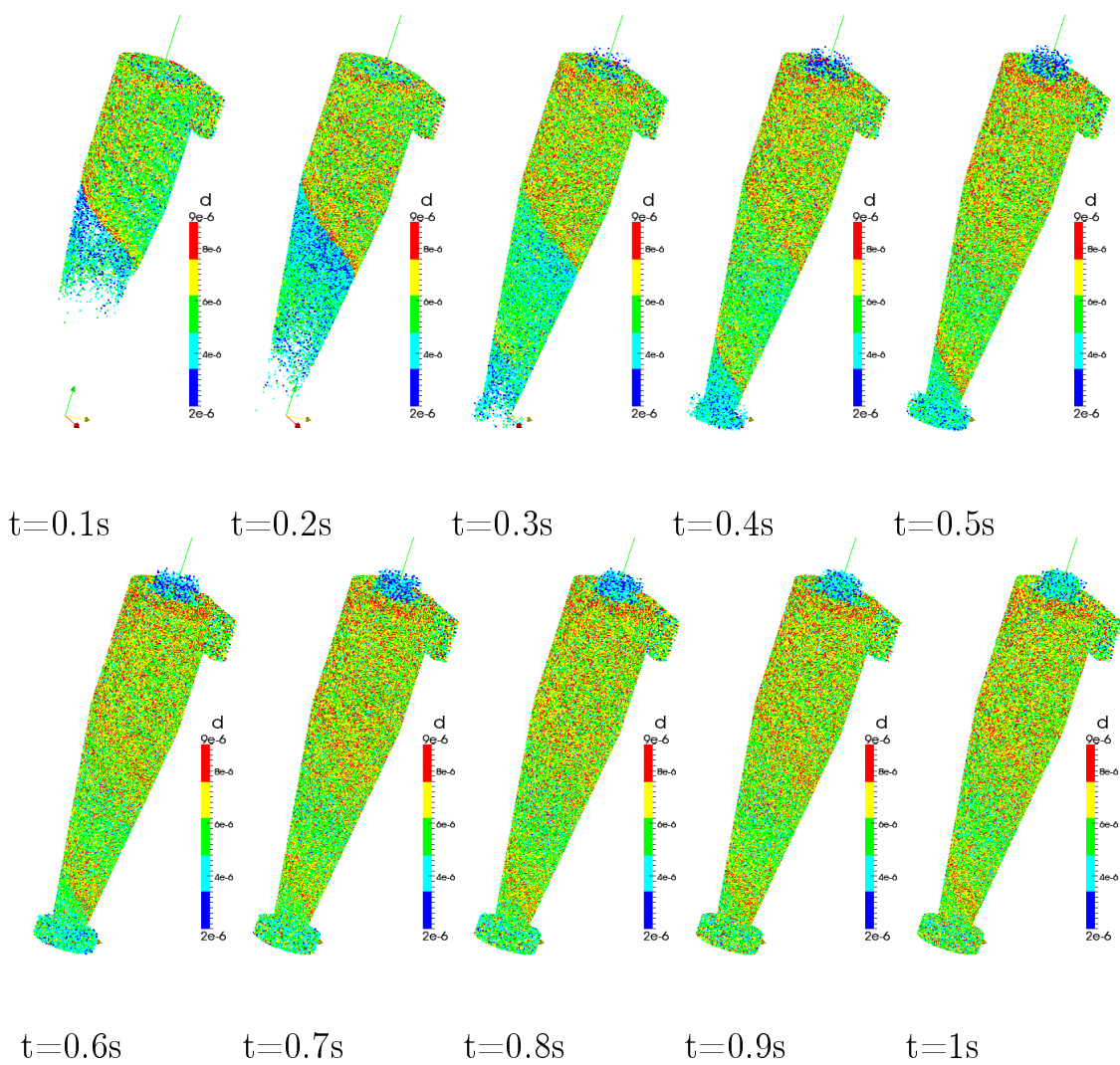


Рис. 20: Развитие течения дисперсных включений

Заключение

В ходе исследования была рассмотрена задача о турбулентном течении газа с дисперсными включениями в фильтре-циклоне при разных значениях скорости потока и различных диаметрах частиц.

Для проведения расчётов в OpenFOAM был имплементирован поправочный коэффициент Шура-Спалларта для учёта влияния кривизны линий тока на турбулентные характеристики. Верификация модели производилась на задаче о турбулентном течении воздуха в U-образном канале и показала явный положительный эффект на результаты расчётов по сравнению с немодифицированной SST-моделью. Результаты расчётов хорошо согласуются с экспериментальными данными Монсона.

Расчёт циклона также показал положительное влияние введённой поправки на профили скорости.

Сравнение результатов расчётов, выполненных при помощи введённого в OpenFOAM солвера 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 понижается. 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%.

Список литературы

- [1] Росстат. Загрязнение окружающей среды в субъектах РФ. <http://protown.ru/information/hide/2659.html>.
- [2] Wilson A. Cement and concrete: Environmental considerations. *EBN*, 2(2), 1993.
- [3] Ужов В.Н. Циклоны НИИОГАЗ. Руководящие указания по проектированию, изготовлению, монтажу и эксплуатации. *Ярославль*, 1970.
- [4] Esch T. Menter F. Elements of industrial heat transfer prediction. *16th Brazilian Congress of Mechanical Engineering (COBEM)*, Nov. 2001.
- [5] Menter F.R. Smirnov P.E. Sensitization of the sst turbulence model to rotation and curvature by applying the spalart–shur correction term. *Journ. of Turbomachinery*, 131(4), 2009.
- [6] McConnaughet P.K. Monson D.J., Seegmiller H.L. and Chen Y.S. Comparison of experiment with calculations using curvature-corrected zero and two equation turbulence models for a two-dimensional u-duct. *AIAA Paper*, 21(90-1484), 1990.
- [7] Leith D. Dirgo J. Cyclone collection efficiency: comparison of experimental results with theoretical predictions. *Aerosol Sci. Tech.*, 4:410–415, 1985.