

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

Диссертация допущена к защите  
Зав. кафедрой, проф., д.ф.-м.н.  
\_\_\_\_\_ Е.М. Смирнов  
" \_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 2012г.

Численное моделирование фильтра циклон с помощью  
реализации в пакете численного анализа OpenFOAM модели  
турбулентности SST с поправкой на кривизну линий тока  
Диссертация на соискание ученой степени магистра по направлению  
010600 – Прикладные математика и физика

Выполнил студент гр. 6054/11  
Руководитель, к.ф.-м.н., доц.

Богданов Д.А.  
Поняев С.А.

Санкт-Петербург  
2012

## Содержание

1	Введение	2
1.1	Актуальность проблемы . . . . .	2
1.2	Цели работы . . . . .	3
2	Обзор существующих исследований	4
2.1	Экспериментальные исследования . . . . .	4
2.2	Теоретические исследования . . . . .	4
2.3	Численное моделирование . . . . .	4
3	Численное моделирование	5
3.1	OpenFOAM . . . . .	5
3.2	Поправка на кривизну линий тока . . . . .	6
3.3	Валидация модели турбулентности с поправкой на кривизну линий тока . . . . .	6
4	Решение	7
4.1	Постановка задачи . . . . .	7

# 1 Введение

## 1.1 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 [2].

По данным European Environment Agency выброс  $SO_2$  в европе (за исключением России) за 2010 год составил 8297000 тонн [3]. Динамика изменения объёма выбросов твёрдых вредных веществ в атмосферу (рис. 1) имеет тенденцию к росту, что говорит о том, что решение проблемы инженерной защиты воздуха от вредных веществ останется актуальной и в ближайшем будущем.

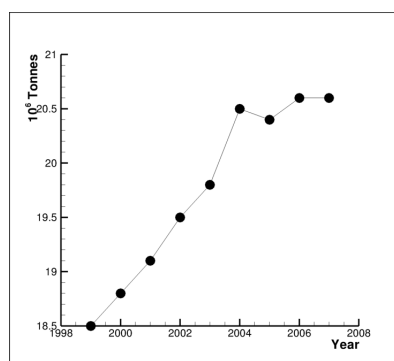


Рис. 1: Динамика выбросов твёрдых вредных веществ в атмосферу [2]

Для очищения воздуха от твёрдых примесей широкое распространение получили фильтры типа циклон. Циклон представляет собой инерционный пылеуловитель, в котором выделение частиц из воздушной 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.[5]

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.

## 1.2 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.

## 2 Обзор существующих исследований

### 2.1 Экспериментальные исследования

Существует большое количество работ по экспериментальному исследованию течения с криволинейными линиями тока. Среди них стоит выделить достаточно подробный эксперимент, приведённый в статье Monson et al. [1]. Авторы статьи проводят численное и экспериментальное исследование турбулентного течения воздуха в U-образном канале.

Экспериментальному моделированию циклонов также уделено немало внимания. Среди статей, приводящих экспериментальные данные по турбулентному течению в циклонах, нужно отметить детальное исследование течения в циклоне модели Stairmand, описанное в статье J. Dirgo, D. Leith [4]. В этой статье приведены данные для профилей скорости в нескольких сечениях фильтра для большого диапазона рабочих параметров.

### 2.2 Теоретические исследования

Среди теоретических исследований течения в циклонах особо выделим статью

### 2.3 Численное моделирование

Численному моделированию течения в циклонах посвящено очень много инженерных исследований.

## 3 Численное моделирование

### 3.1 OpenFOAM

OpenFOAM — свободно распространяемый инструментальный вычислительной гидродинамики для операций с полями (скалярными, векторными и тензорными). На сегодняшний день является одним из самых известных приложений с открытым кодом, предназначенных для FVM-вычислений. Код OpenFOAM, разработан в Великобритании в компании OpenCFD, Limited, и используется многими промышленными предприятиями более 12 лет. Свое название и идеологию построения код берет от предшественника FOAM (Field Operation And Manipulation), который является закрытым и продолжает развиваться параллельно с OpenFOAM. Первоначально, программа предназначалась для прочностных расчетов и в результате многолетнего академического и промышленного развития на сегодняшний момент позволяет решать следующие задачи:

- Прочностные расчеты;
- Гидродинамика сжимаемых и несжимаемых сред. Для моделирования турбулентных течений возможно использование RANS и LES - методов. Возможно решение дозвуковых, околосзвуковых и сверхзвуковых задач;
- Задачи теплопроводности в твёрдом теле;
- Течения многофазных сред;
- Течения химически реагирующих смесей;
- Задачи, связанные с деформацией расчётной сетки;
- Распараллеливание расчёта как в кластерных, так и многопроцессорных системах.

В основе кода лежит набор библиотек, предоставляющих инструменты для решения систем дифференциальных уравнений в частных производных. Рабочим языком кода является C++. В терминах данного языка большинство математических дифференциальных и тензорных операторов в программном коде уравнений может быть представлено в удобочитаемой форме, а метод дискретизации и решения для каждого оператора может быть выбран уже пользователем в процессе расчёта. Таким образом, в коде полностью инкапсулируются и разделяются понятия расчетной сетки (метод дискретизации), дискретизации основных уравнений и методов решения алгебраических уравнений.

### 3.2 Поправка на кривизну линий тока

Уравнение переноса кинетической энергии:

$$\frac{\partial \rho k}{\partial t} + \nabla(\rho \vec{V} k) = P_k f_{rot} + \beta^* \rho k \omega + \nabla[(\mu + \mu_t) \nabla k], \quad (1)$$


---

Уравнение переноса удельной скорости диссипации:

$$\frac{\partial \rho \omega}{\partial t} + \nabla(\rho \vec{V} \omega) = \alpha \frac{\rho P_k}{\mu_t} f_{rot} - D_\omega + C d_\omega + \nabla[(\mu + \mu_t) \nabla \omega], \quad (2)$$


---

Поправка на кривизну линий тока:

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

### 3.3 Валидация модели турбулентности с поправкой на кривизну линий тока

## 4 Решение

### 4.1 Постановка задачи

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

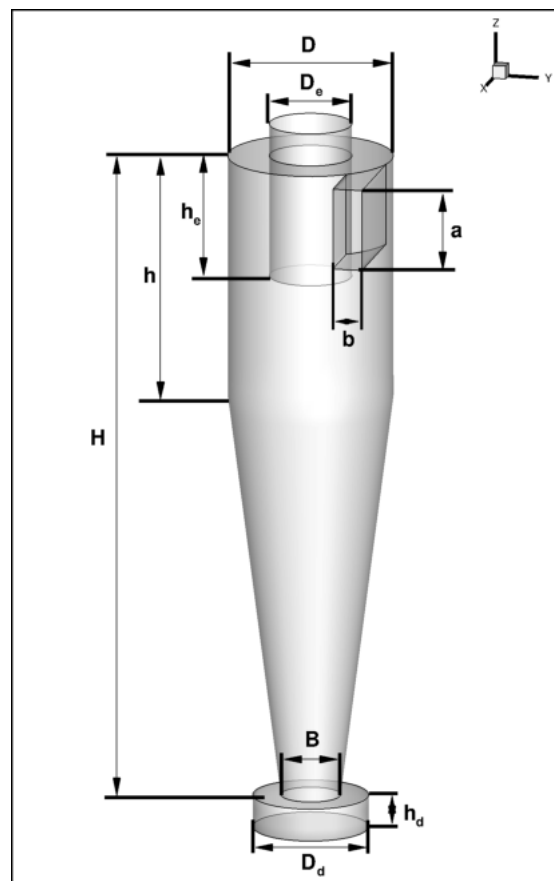


Рис. 2: Схема фильтра



## Список литературы

- [1] Monson, D. J., Seegmiller, H. L., Mc Connaughey, P. K., 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 No. 90-1484, 1990.
- [2] Загрязнение окружающей среды в субъектах РФ  
<http://protown.ru/information/hide/2659.html>
- [3] European Environment Agency  
<http://www.eea.europa.eu/data-and-maps>
- [4] J. Dirgo, D. Leith, Cyclone collection efficiency: comparison of experimental results with theoretical predictions, Aerosol Sci. Tech. 4 410–415, 1985.
- [5] Спросить название этих "указаний"