

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 исследование течения в фильтре-циклоне  
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

<b>1</b>	<b>Введение</b>	<b>2</b>
1.1	Актуальность проблемы . . . . .	2
1.2	Цели работы . . . . .	3
<b>2</b>	<b>Обзор существующих исследований</b>	<b>4</b>
2.1	Экспериментальные исследования . . . . .	4
2.2	Теоретические исследования . . . . .	4
2.3	Численные исследования . . . . .	4
<b>3</b>	<b>Численное моделирование</b>	<b>5</b>
3.1	OpenFOAM . . . . .	5
3.2	Метод конечных объёмов [8] . . . . .	6
3.2.1	Дискретизация расчётной области . . . . .	6
3.2.2	Дискретизация уравнений . . . . .	6
3.3	Основные уравнения . . . . .	7
3.3.1	Уравнение баланса массы . . . . .	7
3.3.2	Уравнение баланса импульса . . . . .	7
3.3.3	Уравнение баланса энтальпии . . . . .	7
3.3.4	Уравнение состояния . . . . .	7
3.4	Зависимость вязкости от температуры . . . . .	7
3.5	Модель турбулентности . . . . .	8
3.5.1	Уравнение баланса кинетической энергии . . . . .	8
3.5.2	Уравнение баланса удельной скорости диссипации . . . . .	8
3.5.3	Пристеночные функции . . . . .	8
3.6	Поправка на кривизну линий тока . . . . .	9
<b>4</b>	<b>Результаты</b>	<b>10</b>
4.1	Валидация модели турбулентности с поправкой на кривизну линий тока . . . . .	10
4.2	Постановка задачи . . . . .	11

# 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 [3].

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  $\approx 160$  кг цементной пыли [4]. 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.

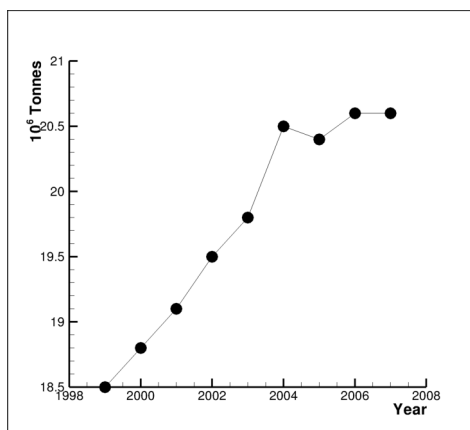


Рис. 1: Динамика выбросов твёрдых вредных веществ в атмосферу [3]

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.[6]

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. [2]. 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 [5]. В этой статье приведены данные для профилей скорости в нескольких сечениях фильтра для большого диапазона рабочих параметров. К сожалению!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!1

### **2.2 Теоретические исследования**

Среди теоретических исследований течения в циклонах особо выделим статью

### **2.3 Численные исследования**

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.[1] 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 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, дискретизации основных уравнений и методов решения алгебраических уравнений.

## **3.2 Метод конечных объёмов [8]**

### **3.2.1 Дискретизация расчётной области**

Суть метода конечных объёмов

### **3.2.2 Дискретизация уравнений**

Дискретизация уравнений преобразует уравнения в частных производных в систему алгебраических уравнений, которые обычно представляются в виде матричной форме:

$$[A][x] = [B], \quad (1)$$

где  $[A]$  - квадратная матрица,  $[x]$  - столбец неизвестных, а  $[B]$  -

### 3.3 Основные уравнения

#### 3.3.1 Уравнение баланса массы

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad (2)$$

#### 3.3.2 Уравнение баланса импульса

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ijeff}}{\partial x_j}, \quad (3)$$

где  $\tau_{ijeff}$  - тензор вязких напряжений, выражаемый по формуле

$$\tau_{ijeff} = \mu_{eff} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \mu_{eff} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \delta_{ij} \quad \mu_{eff} = \mu + \mu_t \quad (4)$$

#### 3.3.3 Уравнение баланса энтальпии

#### 3.3.4 Уравнение состояния

При расчётах течений сжимаемой жидкости используется модель идеального газа:

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

### 3.4 Зависимость вязкости от температуры

Зависимость вязкости от температуры выражается формулой Саттерленда для сильно неизотермических течений.

$$\mu = \mu_0 \frac{T_0 + C}{T + C_0} T^{\frac{3}{2}}, \quad \mu_0 = 1.73 \cdot 10^{-5} kg \cdot m/s, \quad T_0 = 273K, \quad C = 110K \quad (6)$$

Для течений, температура в которых меняется слабо, вязкость полагается постоянной.



### 3.5 Модель турбулентности

В качестве базовой модели турбулентности, в которую вводится поправка на кривизну линий тока используется  $k - \omega$  SST модель Ментера для течений сжимаемых сред, предложенная в [7].

#### 3.5.1 Уравнение баланса кинетической энергии

$$\frac{\partial \rho k}{\partial t} + \nabla(\rho \vec{V} k) = P_k f_{rot} + \beta^* \rho k \omega + \nabla[(\mu + \mu_t) \nabla k], \quad (7)$$

#### 3.5.2 Уравнение баланса удельной скорости диссипации

$$\frac{\partial \rho \omega}{\partial t} + \nabla(\rho \vec{V} \omega) = \alpha \frac{\rho P_k}{\mu_t} f_{rot} - D_\omega + C d_\omega + \nabla[(\mu + \mu_t) \nabla \omega], \quad (8)$$

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

#### 3.5.3 Пристеночные функции

### 3.6 Поправка на кривизну линий тока

$$f_{r1}(r^*, \tilde{r}) = 2r^* \left( \frac{1 + C_{r1}}{1 + r^*} \right) [1 - C_{r3} \arctan(C_{r2} \tilde{r})] - C_{r1}, \quad (9)$$

$$\tilde{r} = 2\Omega_{ik} S_{kj} \frac{DS_{ij}}{Dt} \frac{1}{\Omega D^3}, \quad D^2 = \max(S^2, 0.09\omega^2), \quad (10)$$

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

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

## 4 Результаты

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

## 4.2 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, $D_d$	$0.75D$

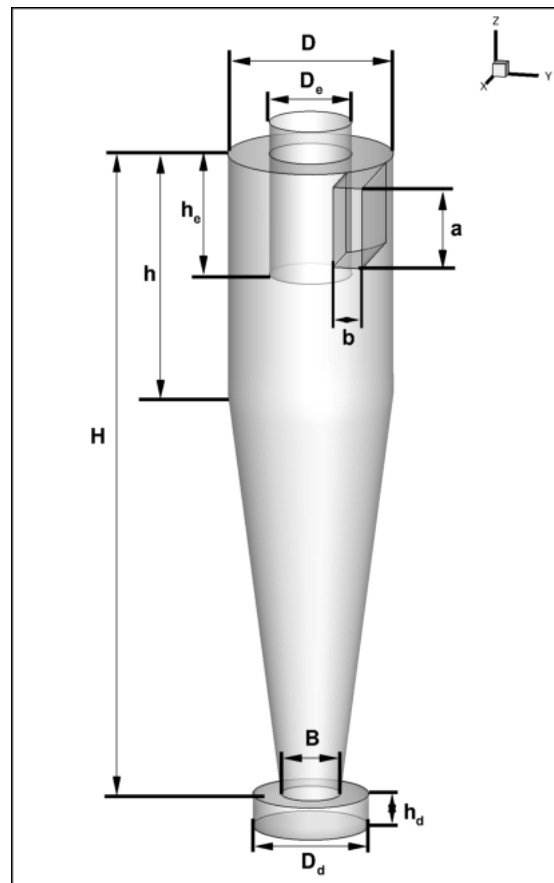


Рис. 2: Схема фильтра

## Список литературы

- [1] Официальный сайт OpenFOAM, <http://www.openfoam.com>
- [2] 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.
- [3] Загрязнение окружающей среды в субъектах РФ, <http://protown.ru/information/hidden/2659.html>
- [4] A. Wilson, “Cement and Concrete: Environmental Considerations”, EBN Volume 2, No. 2, 1993
- [5] J. Dirgo, D. Leith, “Cyclone collection efficiency: comparison of experimental results with theoretical predictions”, Aerosol Sci. Tech. 4 410–415, 1985.
- [6] Ужов В.Н. Циклоны НИИОГАЗ. Руководящие указания по проектированию, изготовлению, монтажу и эксплуатации. Ярославль, 1970
- [7] Menter, F., Esch, T. “Elements of Industrial Heat Transfer Prediction”, 16th Brazilian Congress of Mechanical Engineering (COBEM), Nov. 2001
- [8] OpenFOAM Programmer’s Guide, 2011