

Расчёт гидродинамики потока в электроциклоне

Титов А.Г., Гильванова З.Р., Инюшкин Н.В., Аитова А.И., Щелчков И.П., Токарева Н.А., Маньков М.Г., Перфилов С.А.

ФГАОУ ВПО «УрФУ имени первого Президента России Б.Н.Ельцина», Кафедра «Процессы и аппараты химической технологии»; тел: (343) 375-48-53, 375-44-28; E-mail: paht@yandex.ru

Для анализа гидродинамики потока в электроциклоне применён компьютерный расчёт с использованием метода конечных элементов (МКЭ). Геометрия модели соответствует лабораторному электроциклону. Для расчётов использована $k-\epsilon$ -модель турбулентности. Система уравнений решается с помощью алгоритма SIMPLE. Результаты расчёта дают картину распределения скоростей потока и линий тока в различных сечениях. На основании результатов делается вывод о гидродинамике электроциклона.

Введение

Электроциклон – это аппарат, предназначенный для удаления из газового потока твердых и жидких частиц. Принцип работы заключается в осаждении частиц аэрозолей при совместном действии на них кулоновской и центробежной силы¹.

Ряд публикаций^{2,3} содержит данные о возможности применения электроциклона в химической технологии, металлургии и энергетике. Процесс осаждения частиц подробно рассмотрен авторами⁴ на основании анализа действующих на частицу сил в кольцевом канале электроциклона, но не учтено распределение скоростей в потоке и конструкция других узлов аппарата.

В настоящем исследовании авторами предпринята попытка проанализировать гидродинамику электроциклона с помощью метода конечных элементов.

Математическая модель

На рис. 1 показана схема электроциклона. Аэрозоль входит в электроциклон через от-

верстие в улитке, очищенный газ выходит через выхлопную трубу, а уловленный материал удаляется через нижнее отверстие в бункере.

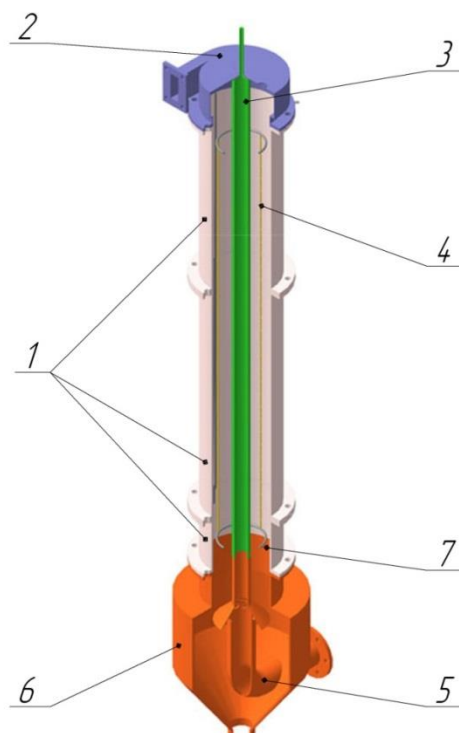


Рис. 1. Электроциклон: 1 – царги корпуса, 2 – улитка, 3 – центральный осадительный электрод,

4 – коронирующий электрод, 5 – выхлопная труба, 6 – бункер, 7 – изолятор

В электроциклоне поле потока, электрическое поле и траектории частиц связаны между собой. Для решения столь сложной проблемы должны быть сделаны некоторые допущения с целью упростить расчёт⁵. Поскольку скорость ионов намного больше, чем скорость воздуха в электроциклоне, предполагается, что электрическое поле не влияет на поле потока. Объемная доля частиц очень мала, следовательно, её влиянием на поле потока также можно пренебречь⁶.

Также исключим движение частиц, поскольку это тема другого большого исследования. Для расчётов принимаем к-ε-модель турбулентности. Уравнение Навье-Стокса и уравнение неразрывности для трехмерной несжимаемой жидкости записываются следующим образом:

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho_f \bar{u}_j \bar{u}_i) = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_j} \left[\mu_{\text{eff}} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \right] + \rho_f g_i, \quad (2)$$

Здесь u – скорость газа, ρ_f – плотность газа, p – давление газа, g – гравитационное ускорение и μ_{eff} – эффективная турбулентная вязкость.

Эти параметры связаны следующими уравнениями:

$$\mu_{\text{eff}} = \mu_f + \mu_t, \quad (3)$$

$$\mu_t = \rho_f C_\mu k^2 / \varepsilon, \quad (4)$$

Здесь μ_f – молекулярная динамическая вязкость жидкости и μ_t – турбулентная вязкость. Прочие константы для стандартной к-ε-модели турбулентности устанавливаются по умолчанию для течения воздуха при стандартных условиях.

Уравнения (1) и (2) решаются с помощью алгоритма SIMPLE на тетраэдрической сетке, показанной на рис. 2. Общее число элементов сетки 7574, сетка автоматическая, с регулируемым размером элементов, размер наименьшего тетраэдра 0,5 мм.

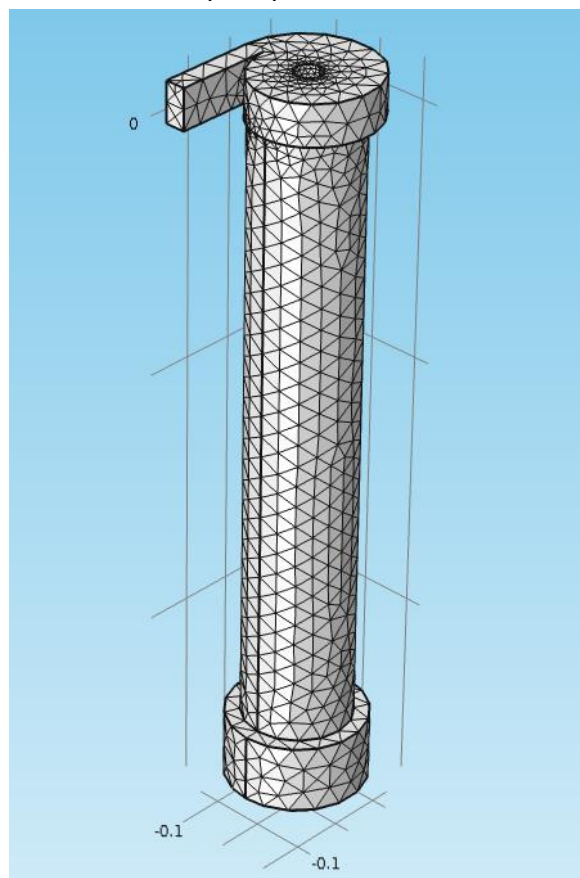


Рис. 2. Расчётная сетка

Граничные условия на входе – скорость потока воздуха 24 м/с при стандартных условиях. Стенки каналов жесткие, недеформируемые. Давление на выходе определяется в процессе решения.

Решение задачи потребовало 12 часов процессорного времени при характеристиках системы: процессор AMD i5 4 x 2,2 ГГц и ОЗУ 8 Гб.

Результаты и обсуждение

CFD (computational fluid dynamics), т.е. вычислительная гидродинамика позволяет наглядно и красочно визуализировать решение, поэтому еще одна расшифровка термина – colorful fluid dynamics – полностью оправдывает себя.

Постпроцессорная обработка позволила получить профиль скоростей в вертикальной и горизонтальных плоскостях, а также линии тока (рис. 3-5). На рис. 3 показана 1 плоскость, на рис. 4 - 15 параллельных плоскостей, цветом показана величина скорости, на рис. 5 – 40 линий с началом на входе аэрозоля.

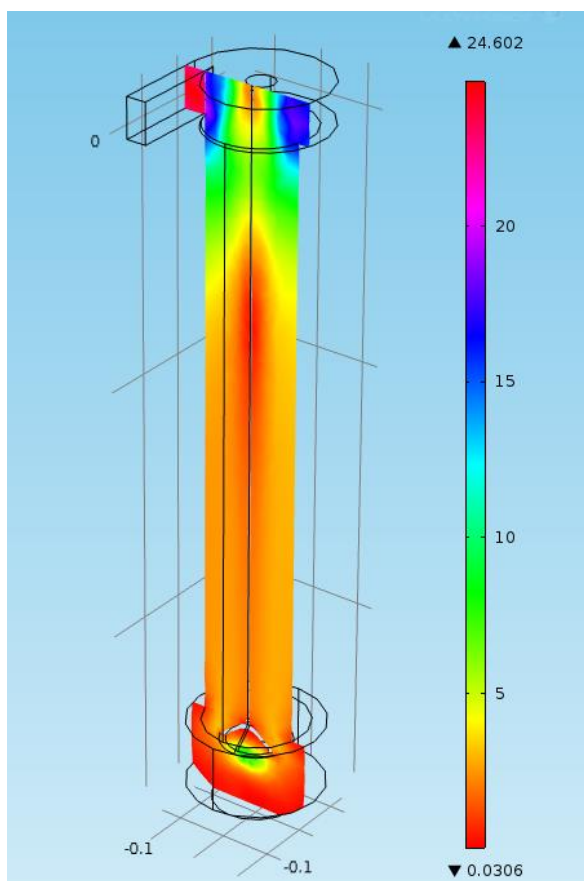


Рис. 3. Поле скоростей потока. Вертикальное сечение

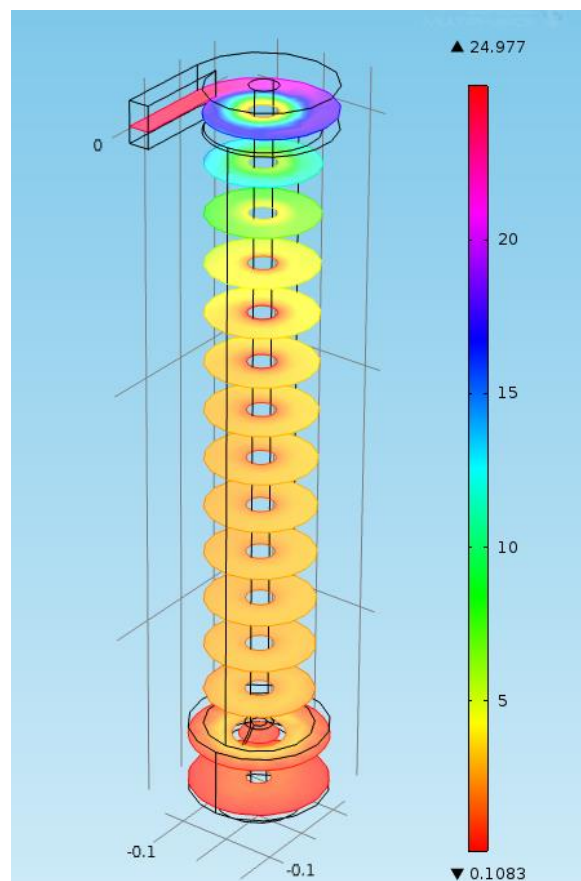


Рис. 4. Поле скоростей потока. Горизонтальные сечения

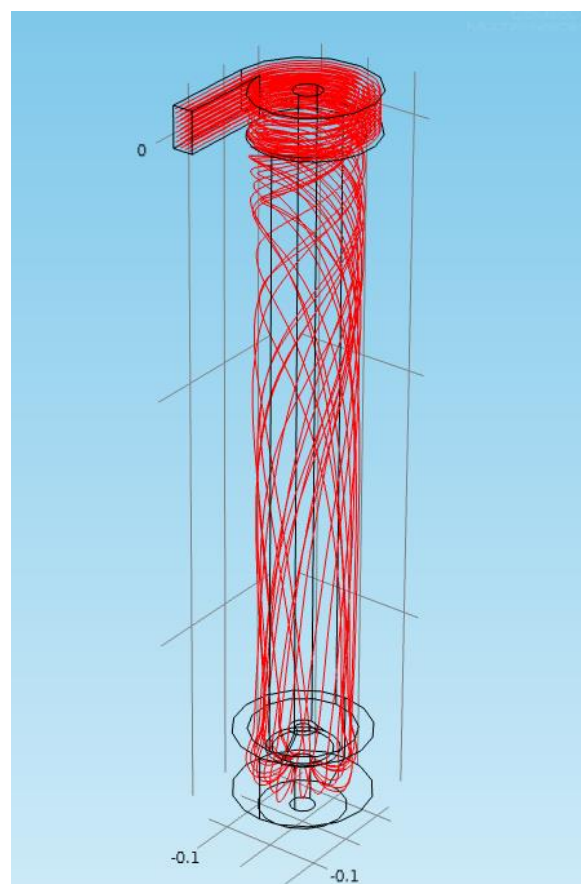


Рис. 5. Линии тока

Из рисунков 3 - 5 видно, что поток входит в электроциклон на высокой скорости (24 м/с), образуя интенсивный вихрь в улитке с углом закручивания около 90° относительно оси аппарата. После улитки поток попадает в активную зону, где угол закручивания уменьшается до 60°, а скорость (её результирующий вектор) падает до 10 - 15 м/с. Пройдя 20% длины активной зоны, поток имеет угол закручивания 45° при скорости 3 - 5 м/с. После 50% длины активной зоны вихрь затухает: угол закручивания всего 10°, скорость менее 4 м/с.

Интересным фактом является то, что в бункере электроциклона отсутствует вихревое движение, также нет развитого течения в области стенок, а ниже выхлопного отверстия скорость потока близка к 0. Это благоприятно сказывается на эффективности очистки, т.к. выходящий чистый газ не увлекает с собой осевшие частицы.

Выводы

1) Гидродинамика электроциклона может быть описана с помощью математической модели и рассчитана с помощью МКЭ.

2) Поток в электроциклоне, как и ожидалось, имеет закрученную структуру, угол закрутки зависит от длины активной зоны.

3) Конструкция бункера обеспечивает выход очищенного газа без вовлечения в него уловленных частиц.

Благодарности

Исследование проведено при финансовой поддержке молодых ученых УрФУ в рамках реализации программы развития УрФУ.

Библиографический список

1. Lim K.S., Kim H.S., Lee K.W. // Journal of Aerosol Sciences. **2004**. № 35. С. 103.
2. Инюшкин Н.В., Югай Ф.С., Гильванова З.Р., Титов А.Г., Ермаков С.А. // Известия ВУЗов. Химия и химическая технология. **2012**. № 10. Т. 55. С.104.
3. Инюшкин Н.В., Ермаков С.А., Титов А.Г., Гильванова З.Р., Новиков К.Л., Парамонов Д.А. // Инженерный вестник Дона. **2011**. №4. Дата обращения 17.06.13. Режим доступа: <http://ivdon.ru/magazine/archive/n4p1y2012/1271> (доступ свободный) – Загл. с экрана. – Яз.рус.
4. Петров В.А., Инюшкин Н.В., Ермаков С.А. // Вестник ТГТУ. **2010**. № 1. Т. 16. С.44.
5. Tsai R., Mills A. F. // Journal of Aerosol Science. **1995**. №2. С. 227.
6. Xiangrong Z., Lianze W., Keqin Z. // Journal of Electrostatics. **2005**. №60. С. 1071.