

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

*Уральский федеральный университет, 620002,  
Екатеринбург, ул. Мира, 19,  
кафедра процессов и аппаратов химической  
технологии. E-mail: paht@yandex.ru*

## **Расчет гидродинамики потока в электроциклоне\***

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

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

© Титов А. Г., Гильванова З. Р., Инюшкин Н. В., Аитова А. И., Щелчков И. П.,  
Токарева Н. А., Маньков М. Г., Перфилов С. А., 2014

### **Введение**

Электроциклон – это аппарат, предназначенный для удаления из газового потока твердых и жидких частиц. Принцип работы заключается в осаждении частиц аэрозолей при сов-

местном действии на них кулоновской и центробежной силы [1].

Ряд публикаций [2, 3] содержит данные о возможности применения электроциклона в химической тех-

нологии, металлургии и энергетике. Процесс осаждения частиц подробно рассмотрен авторами [4] на основании анализа действующих на частицу сил в кольцевом канале электроциклона, но не учтено распределение скоростей

### Математическая модель

На рис. 1 показана схема электроциклона. Аэрозоль входит в электроциклон через отверстие в улитке, очищенный газ выходит через выхлопную трубу, а уловленный материал удаляется через нижнее отверстие в бункере.

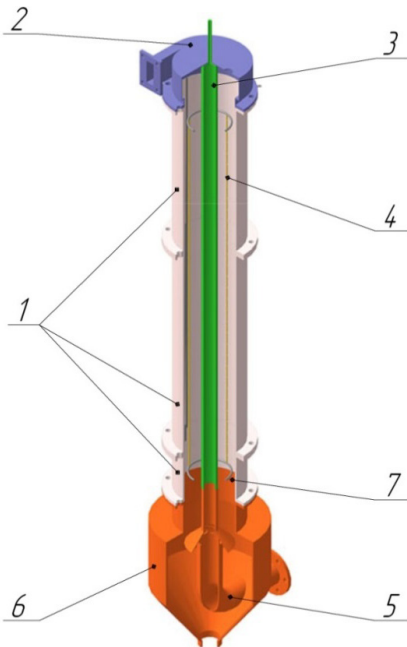


Рис. 1. Электроциклон:  
1 – царги корпуса, 2 – улитка,  
3 – центральный осадительный электрод,  
4 – коронирующий электрод,  
5 – выхлопная труба, 6 – бункер,  
7 – изолятор

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 расчет [5]. 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, ее влиянием на поле потока также можно пренебречь [6].

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

Также исключим движение частиц, поскольку это тема другого большого исследования. Для расчетов принимаем  $k$ - $\epsilon$ -модель турбулентности. Уравнение Навье – Стокса и уравнение неразрывности для трехмерной несжимаемой жидкости записываются следующим образом:

где  $u$  – скорость газа,  $\rho_f$  – плотность

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

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

газа,  $p$  – давление газа,  $g$  – гравитационное ускорение и  $\mu_{\text{eff}}$  – эффективная турбулентная вязкость.

Эти параметры связаны следующими уравнениями:

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

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

Здесь  $\mu_j$  – молекулярная динамическая вязкость жидкости и  $\mu_t$  – турбулентная вязкость. Прочие константы для стандартной k- $\epsilon$ -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.

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 × 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.

Из рисунков 3–5 видно, что поток входит в электроциклон на высокой скорости (24 м/с), образуя интенсивный вихрь в улитке с углом закручивания око-

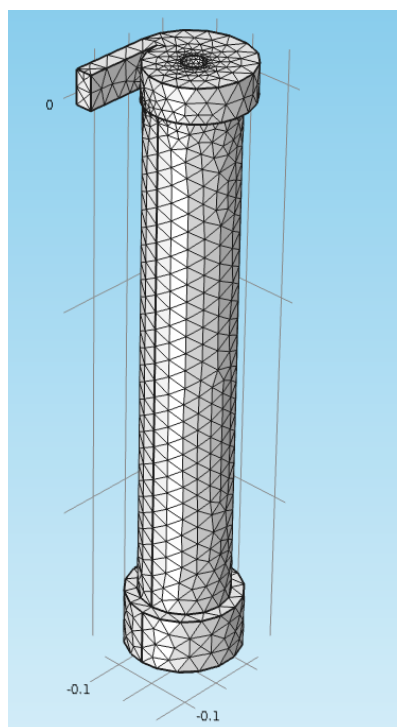


Рис. 2. Расчетная сетка

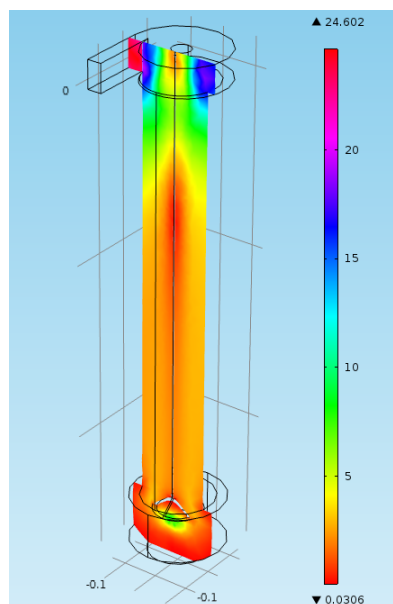


Рис. 3. Поле скоростей потока. Вертикальное сечение

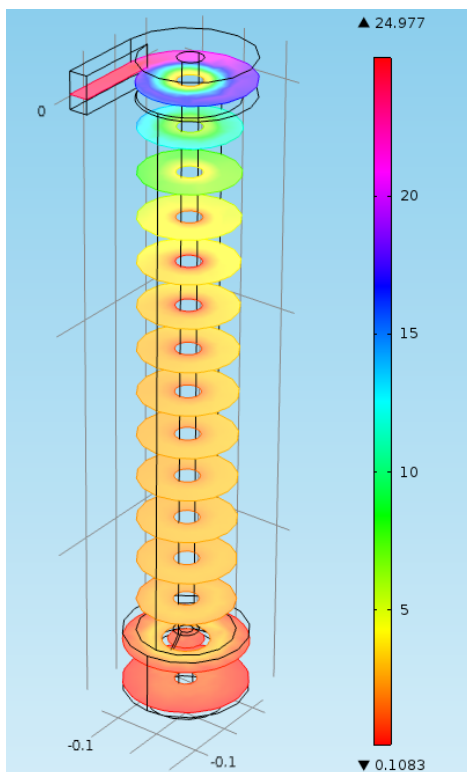


Рис. 4. Поле скоростей потока.  
Горизонтальные сечения

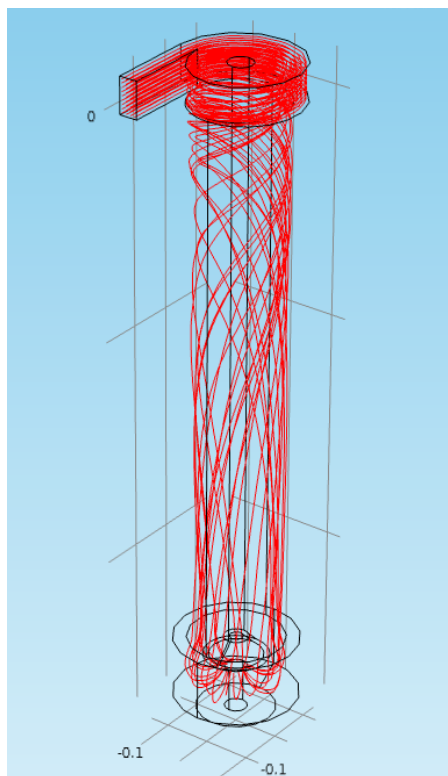


Рис. 5. Линии тока

ло  $90^\circ$  относительно оси аппарата. После улитки поток попадает в активную зону, где угол закручивания уменьшается до  $60^\circ$ , а скорость (ее результирующий вектор) падает до 10–15 м/с. Пройдя 20 % длины активной зоны, поток имеет угол закручивания  $45^\circ$  при скорости 3–5 м/с. После 50 % длины активной зоны вихрь затухает: угол закручивания всего  $10^\circ$ , скорость – менее 4 м/с.

### 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 струк-

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.

туру, угол закрутки зависит от длины активной зоны.

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

1. Lim K. S., Kim H. S., Lee K. W. *J. Aerosol Sciences*, 2004, № 35, 103.
2. Inyushkin N. V., Yugay F. S., Gilvanova Z. R., Titov A. G., Ermakov S. A. *Chem. Chem. Technol.* 2012, 55, 104 [Инюшкин Н. В., Югай Ф. С., Гильванова З. Р., Титов А. Г., Ермаков С. А. *Известия ВУЗов. Химия и химическая технология.* 2012, 55, 104].
3. Inyushkin N. V., Ermakov S. A., Titov A. G., Gilvanova Z. R., Novikov K. L., Pframonov D. A. *Inzhenern. Vestnik Dona*, 2011, N 4, 1271 [Инюшкин Н. В., Ермаков С. А., Титов А. Г., Гильванова З. Р., Новиков К. Л., Парамонов Д. А. // *Инжен. вестник Дона*, 2011, №4, 1271] <http://ivdon.ru/magazine/archive/n4p1y2012/1271>.
4. Petrov V. A., Inyushkin N. V., Ermakov S. A. *Vestnik TGTU*, 2010, 16, 44 [Петров В. А., Инюшкин Н. В., Ермаков С. А. // *Вестник ТГТУ.* 2010. Т. 16, № 1. 44].
5. Tsai R., Mills A. F. *J. Aerosol Science*, 1995, № 2, 227.
6. Xiangrong Z., Lianze W., Keqin Z. *J. Electrostatics*, 2005, 1071.



**A. G. Titov, Z. R. Gilvanova, N. V. Inushkin,  
A. I. Aitova, I. P. Shhelchkov, N. A. Tokareva,  
M. G. Mankov, S. A. Perfilov**

*Ural Federal University,  
19 Mira street, 620002, Ekaterinburg.  
E-mail: paht@yandex.ru*

## **Elektrocyclone hydrodynamic flow computation**

To analyze the elektrocyclone flow hydrodynamic computer calculation using the finite element method (FEM) is applied. The geometry of the model corresponds to the laboratory elektrocyclone. The k- $\epsilon$ -turbulence model is used for the computation. The system of equations is solved by the SIMPLE algorithm. The calculation results give a pattern of the flow velocity distribution and the flow lines in the different sections. There is conclusion based on the results about the elektrocyclone flow hydrodynamic. Is elicited the fact that in the bunker of an elektrocyclone there is no whirl, also there is no developed current in the field of walls, and below an exhaust opening the speed of a stream is close to 0.