МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
НИИ ПРИКЛАДНОЙ МАТЕМАТИКИ И МЕХАНИКИ
ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ
СОВЕТ МОЛОДЫХ УЧЁНЫХ

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ СОВРЕМЕННОЙ МЕХАНИКИ СПЛОШНЫХ СРЕД И НЕБЕСНОЙ МЕХАНИКИ (27–29 ноября 2013 г.)

III Всероссийская молодёжная научная конференция

Под редакцией М.Ю. Орлова

Томск
Издательский Дом Томского государственного университета
2014

(на рис.2 обозначен как СКИФ Cyberia1). Использовались узлы с двумя шестиядерными процессорами Intel Xeon X5670 2.93 Ггц и 24 Гб оперативной памяти.

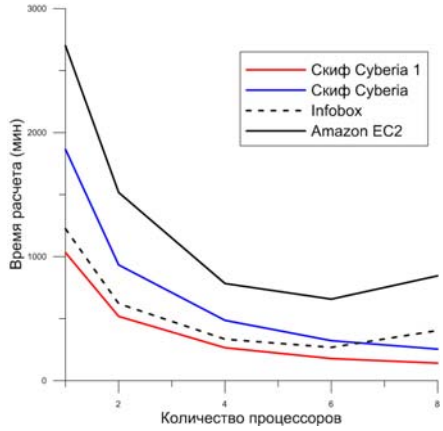


Рис. 2. Зависимость времени расчета от количества процессоров для разных вычислительных комплексов

Выбор в качестве инфраструктурного комплекса сервиса Облачных вычислений, например зарубежного сервиса EC2 или российского аналога Infobox, позволяет проводить расчеты, требующие больших вычислительных возможностей, не создавая при этом мощных суперкомпьютеров, требующих постоянного вложения средств.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Астанин А.В., Гранский А.А.* Численное моделирование взрывозащитных преград с использованием высокопроизводительных вычислений // Современные проблемы математики и механики: Материалы II Всероссийской молодежной научной конференции / под ред. А.И. Филькова. Томск: Изд-во Том. ун-та, 2011. 408 с.

2. *OpenFOAM – The open source CFD toolbox* [Электронный ресурс]. URL: http://www.openfoam.com

3. *Горбатов В.А., Игишев В.Г., Васенин И.М. и др.* Аналитическая инженерная методика оценки затухания ударных волн при их прохождении через защитные сооружения. Кемерово: Кузбассвузиздат, 2003. 40 с.

4. *Infobox* Cloud [Электронный ресурс]. URL: http://infobox.ru

5. *Ландау Л.Д., Лифшиц* Е.М. Теоретическая физика: учеб. пособие для вузов: в10 т. Т. VI Гидродинамика. 5-е изд., стереот. М.: Физматлит, 2001. 736 с.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЛАМИНАРНОГО ЗАКРУЧЕННОГО ТЕЧЕНИЯ В ВИХРЕВОЙ КАМЕРЕ

М.Ю. Попп, В.Л. Гойко

В работе рассматривается численное моделирование закрученного ламинарного течения вязкого газа в вихревой камере, которая используется для разделения тонкодисперсных порошков на мелкую и крупную фракцию по заданному размеру частиц.

MODELING OF LAMINAR SWIRLING FLOW IN THE VORTEX CHAMBER

M.Yu. Popp, V.L. Goiko

In this paper considered numerical modeling of swirling laminar viscous flow in the vortex chamber , which is used for the separation of fine powders in small and large fraction for a given particle size.

В настоящей работе для численного исследования аэродинамики классификатора в качестве прототипа выбрана вихревая камера [1], которая

представляет собой цилиндрическую область с не вращающимися стенками (рис. 1). В камере такого типа закрученный поток газа вместе с частицами через сечение А–А поступает в вихревую камеру и под действием перепада давления вместе с мелкой фракцией частиц выходит через сечение Е–Е. Крупная же фракция частиц, за счет действия на нее центробежной силы, которая преобладает над аэродинамической силой сопротивления частиц, отбрасывается на периферийную стенку классификатора и, оседая по ней, попадает в крупный продукт фракционного разделения. Известно, что вихревые камеры такого типа обладают достаточно большой производительностью по расходу несущей среды и твердой фазы. Однако эффективность фракционного разделения частиц по размерам существенно ниже, чем в воздушно-центробежных классификаторах [2–3]. С нашей точки зрения, одной из причин относительно низкой эффективности процесса фракционного разделения мелкодисперсных порошков является существенная неоднородность поля окружной скорости. Для ее выравнивания будем использовать дополнительное вращение стенок вихревой камеры с угловой скоростью вращения Ω_d.

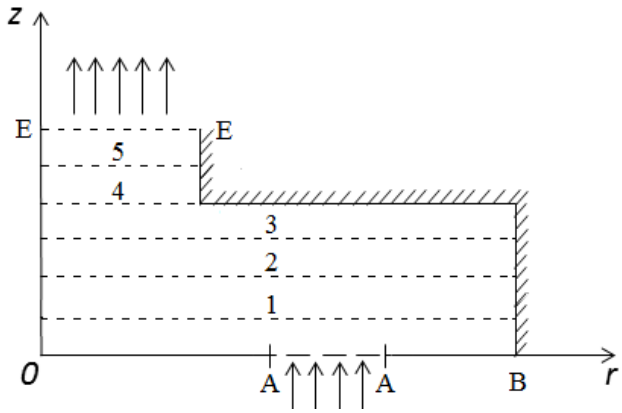


Рис. 1. Расчетная область

Таким образом, аэродинамику закрученного течения в зоне сепарации, показанной на рис. 1 будем проводить с учетом возможного вращения всех стенок вихревой камеры. Движение закрученного потока несущей среды описывается уравнениями Навье–Стокса, которые с учетом осевой симметрии в цилиндрической системе координат, в безразмерном виде можно представить в виде:

$$\frac{\partial u_r}{\partial \tau}+\frac{\partial\left(u_r^{\,2}\right)}{\partial r}+\frac{\partial\left(u_z u_r\right)}{\partial z}=-\frac{\partial p}{\partial r}+\frac{1}{\mathrm{Re}}\left[\frac{\partial^2 u_r}{\partial r^2}+\frac{\partial^2 u_r}{\partial z^2}+\frac{1}{r}\frac{\partial u_r}{\partial r}-\frac{u_r}{r^2}\right]+\frac{u_\varphi^{\,2}}{r}-\frac{u_r^{\,2}}{r}; \quad (1)$$

$$\frac{\partial u_z}{\partial \tau}+\frac{\partial\left(u_r u_z\right)}{\partial r}+\frac{\partial\left(u_z^{\,2}\right)}{\partial z}=-\frac{\partial p}{\partial z}+\frac{1}{\mathrm{Re}}\left[\frac{\partial^2 u_z}{\partial r^2}+\frac{\partial^2 u_z}{\partial z^2}+\frac{1}{r}\frac{\partial u_z}{\partial r}\right]-\frac{u_z u_r}{r}; \quad (2)$$

$$\frac{\partial u_\varphi}{\partial \tau}+\frac{\partial\left(u_r u_\varphi\right)}{\partial r}+\frac{\partial\left(u_z u_\varphi\right)}{\partial z}=-\frac{\partial p}{\partial r}+\frac{1}{\mathrm{Re}}\left[\frac{\partial^2 u_\varphi}{\partial r^2}+\frac{\partial^2 u_\varphi}{\partial z^2}+\frac{1}{r}\frac{\partial u_\varphi}{\partial r}-\frac{u_\varphi}{r^2}\right]-\frac{2u_r u_\varphi}{r}; \quad (3)$$

$$\frac{\partial u_r}{\partial r}+\frac{\partial u_z}{\partial z}+\frac{u_r}{\partial r}=0\,. \qquad (4)$$

Здесь безразмерная форма уравнений получена путём введения масштабов длины R (радиус вихревой камеры) и скорости U_0 (среднерасходное значение скорости на входе в вихревую камеру), $\tau=tU_0/R$ – безразмерное время, Re = = U_0R/ν – число Рейнольдса, h=H/R, где H – высота вихревой камеры. В силу небольших скоростей, плотность газа считается постоянной, и безразмерная форма давления определяется с помощью постоянной плотности и квадрата скорости U_0.

Для получения единственного решения ставятся следующие граничные условия. На стенках камеры радиальные и аксиальные составляющие вектора скорость равны нулю. На оси симметрии задаются условия Неймана для осевой составляющей скорости и равенство нулю для радиальной компоненты скорости. Определение граничных условий для окружной компоненты скорости на входе в вихревую камеру и на вращающихся стенках даёт два дополнительных критерия: $Rg=\Omega_g R/U_0$ и $Rd=\Omega_d R/U_0$. Здесь Ω_g – средняя угловая скорость вращения газа на входе в вихревую камеру и Ω_d – угловая скорость стенок зоны сепарации. Таким образом, закрученное течение в вихревой камере определяется тремя критериями: Re, Rg и Rd. Последние два критерия, по сути, есть обратные числа Россби.

Достоверность результатов и выводов, представленных в работе, основывается на тестовых расчетах, а также на сопоставлении численных решений, полученных в переменных вихрь – функция тока – окружная составляющая скорости и в переменных скорость – давление.

Решение системы уравнений в переменных вихрь–функция тока и в переменных скорость-давление можно привести к решению системы нестационарных скалярных уравнений переноса, которые решаются эволюционным методом до установления по времени. Для каждого скалярного уравнения переноса в системе уравнений вихрь-функция тока и скорость-давление используется обобщенный неявный метод переменных направлений в дельта форме, который имеет второй порядок точности по времени [6]. Представим нестационарное уравнение переноса субстанции Ф в операторной форме

$$\frac{\partial\Phi}{\partial\tau}=\Lambda_r(\Phi)+\Lambda_z(\Phi)+W\,;$$

$$\Lambda_r(\Phi)=\frac{\partial}{\partial r}\left(A\frac{\partial\Phi}{\partial r}\right)-\frac{\partial}{\partial r}\left(u_r\Phi\right);\qquad \Lambda_z(\Phi)=\frac{\partial}{\partial z}\left(A\frac{\partial\Phi}{\partial z}\right)-\frac{\partial}{\partial z}\left(u_z\Phi\right).$$

В результате расщепления задача сводится к решению системы уравнений:

$$\frac{\delta\Phi^{*}}{\delta\tau}-\frac{1}{2}\Lambda_r(\delta\Phi^{*})=f^{n}\,;$$

$$\frac{\delta\Phi^{**}}{\delta\tau}-\frac{1}{2}\Lambda_z(\delta\Phi^{**})=\frac{\delta\Phi^{*}}{\delta\tau}\,;$$

$$\Phi^{n+1}=\Phi^{n}+\delta\Phi^{**},$$

где

$$f^n = \Lambda_r(\Phi^n) + \Lambda_z(\Phi^n) + W .$$

Достоверность получаемых решений определялась тестовыми исследованиями на сеточную сходимость, а также сравнением численных решений полученных с использованием двух подходов: вихрь–функция тока и скорость-давление. На рис. 2 показано сравнение радиальной, окружной и осевой составляющих вектора скорости в среднем сечении 2 (рис. 2, а) и в выходном сечении Е–Е вихревой камеры (рис. 2, б). На рис. 2 сплошные кривые соответствуют методу решения в переменных вихрь-функция тока, а точками показано решение в переменных скорость-давление.

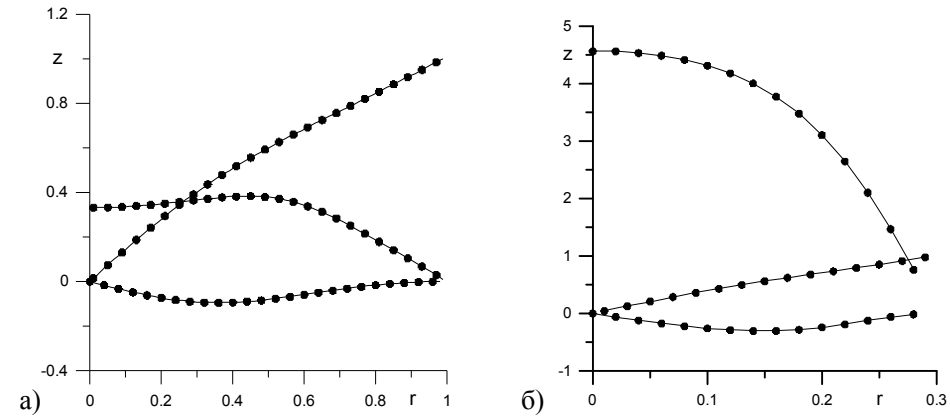


Рис. 2. Сравнение результатов численного решения двумя подходами: вихрь–функция тока и скорость – давление при параметрах закрученного течения Re=10, Rg=1, Rd=1, h=1.5

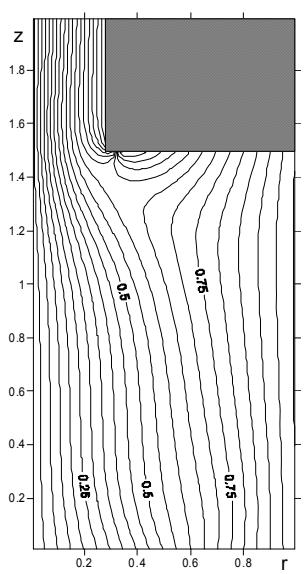


Рис. 3. Изолинии окружной составляющей скорости в вихревой камере при параметрах Re=10, Rg=1, Rd=1, h=1.5

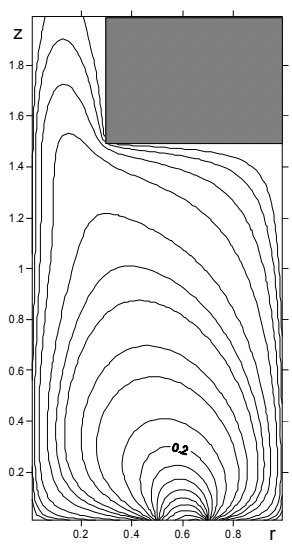


Рис. 4. Изолинии окружной составляющей скорости в вихревой камере при параметрах Re=10, Rg=1, Rd=0, h=1.5

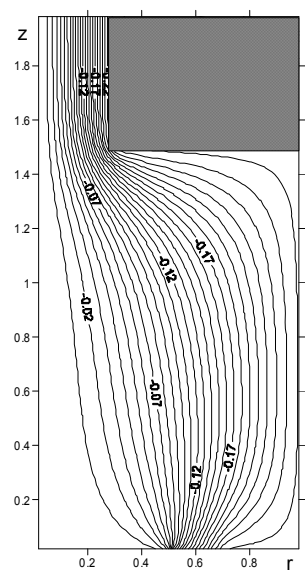


Рис. 5. Распределение линий тока в вихревой камере при параметрах потока Re=10, Rg=1, Rd=1, h=1,5

Численные исследования поля окружной скорости показали, что вблизи стенок вихревой камеры образуются существенные градиенты окружной скорости при отсутствии вращения стенок, что может стать причиной попадания крупных частиц в мелкий продукт процесса фракционного разделения. В случае же вращения стенок камеры поле окружной скорости существенно выравнивается не только вблизи стенок аппарата, но также во всей области (примерно при r>0,4), где собственно и происходит сепарация крупных частиц. Для иллюстрации сказанного на рис. 3 показано распределение изолиний окружной скорости при вращающихся стенках камеры, а на рис. 4 – без вращения стенок при тех же параметрах потока. На рис. 5 показано распределение линий тока в вихревой камере.

При уменьшении в 2 раза высоты вихревой камеры показаны аналогичные распределения изолиний окружной скорости при вращении стенок камеры (рис. 6) и без вращения стенок (рис. 7), а также распределение линий тока (рис. 8) при тех же параметрах закрученного течения.

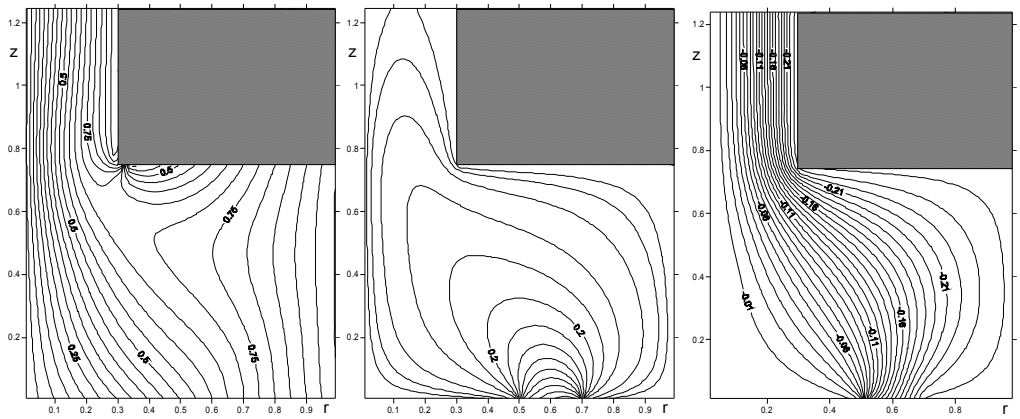


Рис. 6. Изолинии окружной составляющей скорости в вихревой камере. Re=10, Rg=1, Rd=1, h=0,75

Рис. 7. Изолинии окружной составляющей скорости в вихревой камере. Re=10, Rg=1, Rd=0, h=0,75

Рис. 8. Распределение линий тока в вихревой камере. Re=10, Rg=0, Rd=1, h=0,75

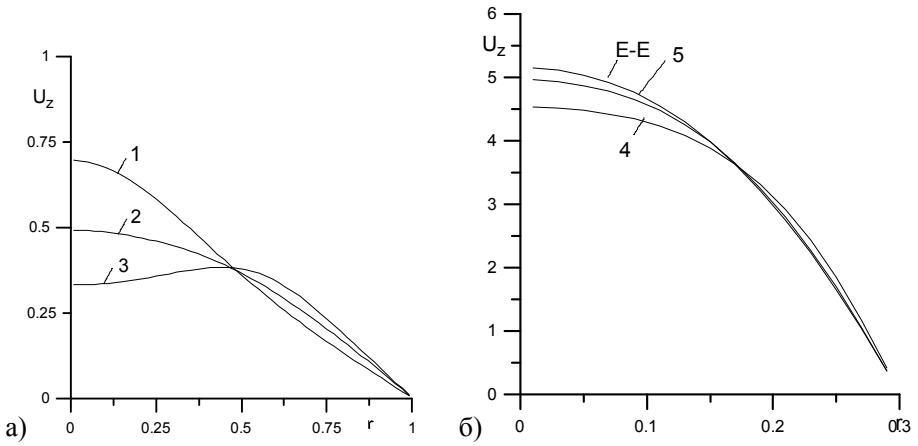


Рис. 9. Изменение вертикальной составляющей вектора скорости в *а* – средних сечениях расчетной области; *б* – в выходной части вихревой камеры. Re=10, Rw=1, Rd=1, h=1.5

На рис. 9, *а, б* показано изменение осевой составляющей вектора скорости в сечениях 1, 2, 3 (рис. 9, *а*) вихревой камеры и в сечениях Е–Е, 4, 5 (рис. 9, *б*), местоположение сечений показано на рис.1. Из рис. 9, *а* хорошо видно, что в области сепарации, т.е. примерно при r>0,4, распределение осевой скорости существенно не меняется, а значение радиальной скорости существенно меньше осевой. Таким образом, добиваясь стабильности окружной составляющей скорости за счет вращения стенок камеры, получаем в области сепарации постоянное поле скорости, что, несомненно, должно привести к повышению эффективности процесса фракционного разделения частиц.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Ушаков С.Г.*, *Зверев Н.И.* Инерционная сепарация пыли. М.: Энергия. 1974. 166 с.

2. *Патент* РФ № 2407601, ПК B07B7/083. Способ воздушно-центробежной классификации порошков и устройство для его осуществления / Зятиков П.Н., Росляк А.Т., Васенин И.М., Шваб А.В., Демиденко А.А., Садретдинов Ш.Р. // опубл. Б.И. №36, 27.12.2010.

3. *Шваб А.В., Хайруллина В.Ю*. Исследование закрученного турбулентного течения между вращающимися профилированными дисками // Теоретические основы химической технологии. 2011. Т. 45, №5. С. 557–565

4. *Роуч П*. Вычислительная гидромеханика. М.: Мир,1977. 618 с.

5. *Патанкар С., Петухов Б.С.* Численные методы решения задач теплообмена. М.: Энергоатомиздат,1984. 124 с.

6. *Андерсон Д., Таннехилл Дж., Плетчер Р*. Вычислительная гидромеханика и теплообмен. М.: Мир, 1990. Т. 2. 337 с.

АНАЛИЗ ПРОЦЕССА ИСПАРЕНИЯ КАПЕЛЬ ВОДЫ ПРИ ИНЖЕКТИРОВАНИИ В ПОТОК ПАРА, ДВИЖУЩЕГОСЯ ПО КАНАЛУ ПОСТОЯННОГО СЕЧЕНИЯ

Н.С. Федотова, Е.А. Маслов

Актуальность данной работы заключается в поиске новых путей моделирования энергосберегающих и материалосберегающих технологий. Проводится параметрический анализ испарения капель воды в паровоздушной смеси в канале круглого сечения.

ANALYSIS BOILING-OFF PROCESS OF WATER DROPLETS IN THE STEAM INJECTED INTO THE FLOW MOVING THROUGH THE CHANNEL OF CONSTANT SECTION

N.S. Fedotova, E.A. Maslov

The relevance of this work is to find new ways of simulation energy-saving technology and material-saving technology. Conducted a parametric analysis of evaporation of water droplets in the air-steam mixture in the channel round cross-section.

В технических процессах, связанных с теплоэнергетикой, многофазные потоки наблюдаются в котельных установках при сжигании твердого и жидкого топлива в топках, при движении пылегазовых выбросов в системах вентиляции. Все эти потоки объединяет то, что они состоят из сплошной среды и дисперсной фазы. Объектом исследования являются каналы теплоэнергетического оборудования.

Целью настоящей работы является численный анализ процесса испарения капель воды с различными начальными координатами, размерами, скоростями, температурами при инжектировании в поток насыщенного или перегретого пара движущегося по цилиндрическому каналу с постоянным массовым расходом. Схема области решения представлена на рис. 1.