



КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ И ОБМЕН ОПЫТОМ

УДК 553.601.1:536.224

А.Н. Мальцев, Э.Н. Сабуров

Северный (Арктический) федеральный университет

Мальцев Андрей Николаевич родился в 1984 г., окончил в 2007 г. Архангельский государственный технический университет, аспирант кафедры теплотехники Северного (Арктического) федерального университета. Имеет 5 научных статей в области численных исследований аэродинамики и конвективного теплообмена нагревательных устройств.

E-mail: aspMaltsev@yandex.ru



Сабуров Эдуард Николаевич родился в 1939 г., окончил в 1961 г. Архангельский лесотехнический институт, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой теплотехники Северного (Арктического) федерального университета, академик Российской и Международной инженерных академий, Российской академии естественных наук, заслуженный деятель науки и техники РФ, почетный работник высшего профессионального образования, почетный энергетик РФ. Имеет более 600 публикаций в области аэродинамики и конвективного теплообмена в сильно закрученных потоках, их использования для интенсификации процессов теплообмена в аппаратах различного технологического назначения.

E-mail: teplotech@agtu.ru



ФИЗИЧЕСКОЕ И ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ АЭРОДИНАМИКИ ЦИКЛОННО-ВИХРЕВОЙ КАМЕРЫ С РАСПРЕДЕЛЕННЫМ ВВОДОМ ГАЗА

Выполнено сопоставление результатов физического и численного экспериментов; установлено, что численное моделирование может быть использовано для исследования аэродинамики циклонно-вихревых камер с распределенным вводом газа.

Ключевые слова: аэродинамика, циклонно-вихревая камера, численное моделирование.

Распределенный по образующей рабочего объема циклонно-вихревой камеры многошлицевой ввод газа дает возможность легко регулировать процесс и широко используется в циклонных сушильных камерах, циклонных топках для сжигания древесных отходов [2, 3] и других устройствах [5], основой работы которых является их аэродинамика. Поэтому рассмотренные нами вопросы несомненно имеют определенный практический и теоретический интерес.

Цель статьи – на основе результатов физического и численного моделирования показать возможность использования программного комплекса CFX для определения аэродинамических характеристик циклонно-вихревых камер и дальнейшего совершенствования методики их аэродинамического расчета.

Физический эксперимент выполнен на модели циклонной топочной камеры со следующими геометрическими характеристиками: внутренний диаметр $D_k = 2R_k = 310$ мм, длина $L_k = 580$ мм, относительная длина $\bar{L}_k = L_k / D_k = 1,87$. Внутренняя поверхность рабочего объема камеры – технически гладкая с шероховатостью обычного стального проката. Подвод воздуха в камеру осуществлялся тангенциально с диаметрально противоположных сторон восьмью (по 4 с каждой стороны) входными каналами прямоугольного поперечного сечения – шлицами с внутренними размерами 20×44 мм, расположенными равномерно по высоте камеры. Ближайшие к глухим торцам рабочего объема шлицы находились на расстоянии z , равном 48 мм и 554 мм (z определяли по

оси координат, совпадающей с осью рабочего объема). Безразмерные координаты местоположения шлицев $\bar{z}_{\text{вх}} = z_{\text{вх}}/D_k$ с одной стороны камеры составляли 0,442; 0,884; 1,335; 1,72, с другой – 0,151; 0,536; 0,987; 1,429. Такое расположение шлицев создавало распределенную систему ввода воздуха. В опытах относительная площадь ввода воздуха $\bar{f}_{\text{вх}} = 4f_{\text{вх}}/\pi D_k^2 = 0,936$, а относительная высота шлицев $\bar{h}_{\text{вх}} = h_{\text{вх}}/D_k = 0,128$. Газ из камеры отводился через обычный плоский пережим. Сменные диафрагмы плоского пережима давали возможность изменить относительный диаметр выходного отверстия $\bar{d}_{\text{вых}} = d_{\text{вых}}/D_k$ в диапазоне 0,2...1,0. Воздух, выходящий из камеры, выбрасывался в атмосферу.

Расход воздуха измеряли нормальным соплом, его температуру – ртутным термометром с ценой деления 1 °С. Во всех опытах поля скоростей и давлений подробно исследовали предварительно протарированными пятиканальными шаровыми зондами с диаметром шарика 5,0 мм, в отдельных опытах – цилиндрическим трехканальным зондом с диаметром насадка 2,6 мм. Относительные продольные координаты сечений замеров $\bar{z}_c = z_c/D_k = 0,442; 0,884; 1,335; 1,720$ находились в диаметральной плоскости, перпендикулярной тангенциальным шлицам. Вектор полной скорости, определяемой в каждой точке по радиусу камеры через 5,0 мм, разлагался на три составляющие: тангенциальную w_ϕ , осевую w_z и радиальную w_r . С помощью координатников перемещение зонда в радиальном направлении осуществлялось с точностью $\pm 0,5$ мм, определение угла вектора полной скорости по отношению к горизонтали – $\pm 1^\circ$.

Численный эксперимент выполнен при использовании комплекса CFX 10.0. В качестве базовой модели турбулентности была принята двухпара-

метрическая математическая модель k - ω , основанная на теории турбулентной вязкости [6] $\mu_t = \rho k / \omega$ (где ρ – плотность потока; k – турбулентная кинетическая энергия; ω – турбулентная частота). Математическая модель турбулентности представляет собой следующую систему уравнений:

$$\frac{\partial \langle k \rangle}{\partial t} + \nabla(\rho U k) = \nabla \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + P_k - \beta' \rho k \omega;$$

$$\frac{\partial \langle \omega \rangle}{\partial t} + \nabla(\rho U \omega) = \nabla \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega} \right) \nabla \omega \right] + \alpha \frac{\omega}{k} P_k - \beta \rho k \omega^2,$$

где U – скорость потока;

P_k – член, учитывающий генерацию турбулентности силами вязкости и выталкивающими силами.

Для замыкания системы использовали стандартный набор постоянных коэффициентов [6]: $\beta' = 0,09$; $\beta = 0,075$; $\alpha = 5/9$; $\sigma_k = 2$; $\sigma_\omega = 2$.

Первоначально проведенные численные исследования с применением нескольких моделей (Zero Equation (в основу модели заложена теория пути смешения Прандля), k - ε (двухпараметрическая модель, состоящая из системы уравнений турбулентной кинетической энергии в потоке и вихревой диссипации) и др.) показали предпочтительность модели k - ω , входящей в набор стандартных моделей, доступных в CFX 10.0.

На рис. 1 выполнено сопоставление опытных данных (точки) с расчетными распределениями безразмерной тангенциальной составляющей скорости потока $\bar{w}_\phi(\bar{r})$ ($\bar{w}_\phi = w_\phi/w_{\text{вх}}$; $w_{\text{вх}}$ – среднерасходная скорость потока в шлицах; $\bar{r} = r/R_k$; r – текущий радиус) при $\bar{z}_c = 1,720$, т. е. вблизи выходного торца рабочего объема (сплошные линии). Представленные данные показывают, что результаты физического

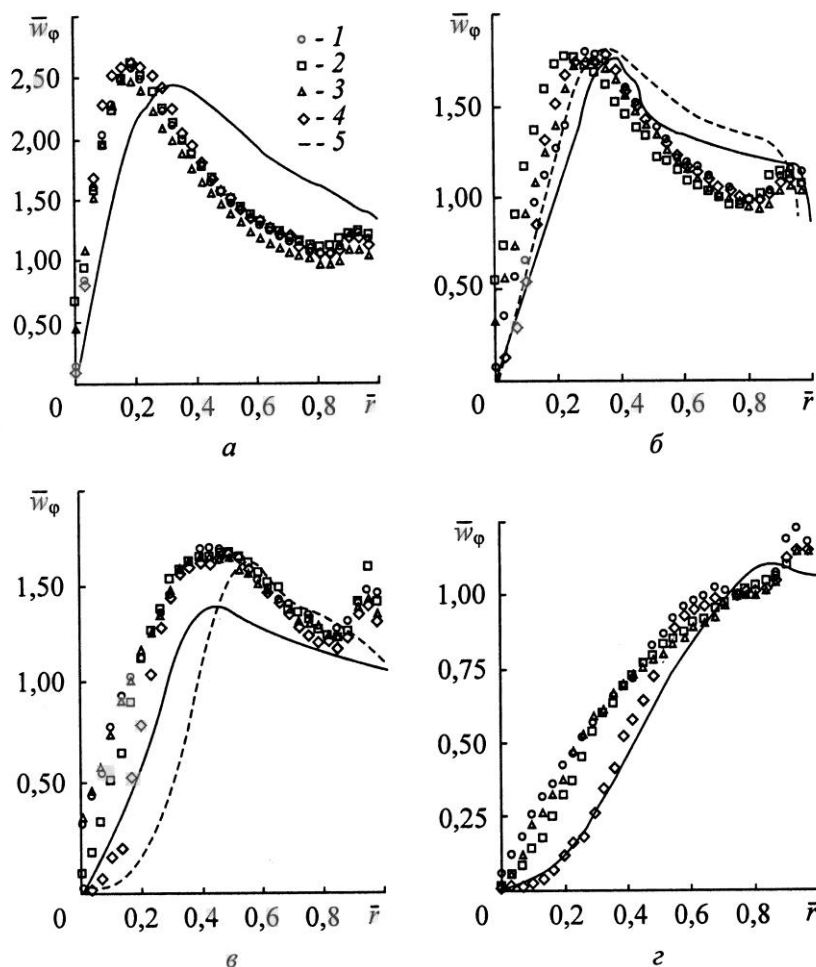


Рис. 1. Распределения опытных (1–4) и расчетных (5) значений \bar{w}_φ при различных $\bar{d}_{\text{вых}}$ и \bar{z}_c : а – $\bar{d}_{\text{вых}} = 0,3$; б – $0,4$; в – $0,5$; г – $0,7$; 1 – $\bar{z}_c = 0,442$; 2 – $0,884$; 3 – $1,335$; 4 – $1,720$

и численного экспериментов удовлетворительно соответствуют друг другу и правильно описывают характерные особенности влияния параметра $\bar{d}_{\text{вых}}$ на распределения \bar{w}_φ . С увеличением $\bar{d}_{\text{вых}}$ как опытные, так и расчетные безразмерные значения максимума вращательной составляющей скорости потока снижаются, положение максимума \bar{w}_φ смещается в область больших значений \bar{r} . Условная тангенциальная скорость $\bar{w}_{\varphi\text{К}} = w_{\varphi\text{К}} / w_{\text{вх}}$ на границе рабочего объема (граница пограничного слоя на боковой поверхности рабочего объема) в физическом и численном экспериментах при $\bar{d}_{\text{вых}} > 0,3$ практически не зависит от $\bar{d}_{\text{вых}}$. Следует отметить, что опытные распределения тангенциальной составляющей скорости по длине камеры практически не изменяются, в то время как расчетные

претерпевают значительные изменения. Перестройка по длине камеры расчетного профиля w_φ , вероятно, определяется условиями ввода газа в камеру, который поступает равномерно распределенными по высоте (практически в шахматном порядке) восьмью тангенциальными струями, по четыре с диаметрально противоположных сторон. Струи взаимодействуют между собой и с боковой поверхностью рабочего объема. В результате создается сложная схема течения, трудно воспроизводимая в численном эксперименте.

С учетом положительного опыта использования комплекса CFX 10.1 для расчета незагруженных циклонных камер с локальным двусторонним вводом газов [4, 5] распределенный ввод рассматриваемой камеры в одном из вариантов схемы был заменен на локальный тангенциальный двусторонний с диаметрально противоположных

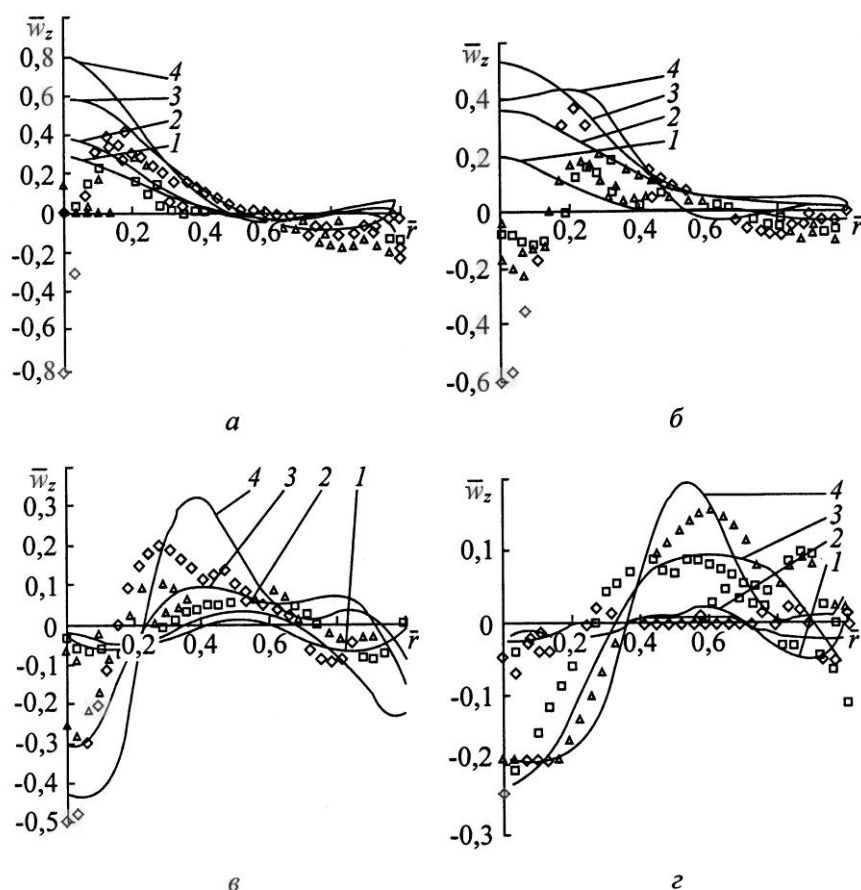


Рис. 2. Сопоставление опытных и расчетных распределений \bar{w}_z при различных значениях $\bar{d}_{\text{вых}}$ и \bar{z}_c (см. обозначения на рис. 1)

сторон с теми же суммарной площадью входа и высотой шлицев. При этом координата $\bar{z}_{\text{вх}} = 0,35$, а относительная длина шлицев $l_{\text{вх}}/D_{\text{к}} = 0,568$. Результаты расчетов безразмерных распределений тангенциальной скорости для принятой схемы ввода газа в камеру $\bar{d}_{\text{вых}} = 0,4$ и $0,5$ приведены на рис. 1 в виде графиков (штриховые линии). Представленные распределения не дают существенного уточнения расчетных распределений \bar{w}_φ , рассмотренных выше (рис. 1). Однако при принятой схеме ввода наблюдается намного меньшее расхождение расчетных значений \bar{w}_φ по длине рабочего объема, что соответствует физическому эксперименту.

По-видимому, большего согласования расчетных и опытных значений \bar{w}_φ можно достичь, если использовать в качестве базовой более современную и сложную модель турбулентности LES (Large Eddy Simulation)

[8, 11]. Однако в этом случае расчет нужно выполнять на более мощной и скоростной ЭВМ кластерного типа [7]. Попытка использовать для этих целей имеющийся у нас процессор Intel Pentium IV Duo T2300E не дала положительных результатов.

Тангенциальная скорость, как показывают физический и численный эксперименты, значительно превышает осевую составляющую скорости потока (рис. 2). Представленные на рис. 2 опытные и расчетные данные находятся в удовлетворительном соответствии при всех рассмотренных значениях $\bar{d}_{\text{вых}}$. Расчетные значения $\bar{w}_z = w_z/w_{\text{вх}}$ в приосевой зоне правильно отражают тенденцию снижения мощности обратного течения по мере его продвижения к глухому торцу камеры.

Полученные в работе численные значения радиальной составляющей скорости $\bar{w}_r = w_r/w_{\text{вх}}$ (рис. 3) подтверждают мнение о том, что радиальная компонента полной скорости в циклонном

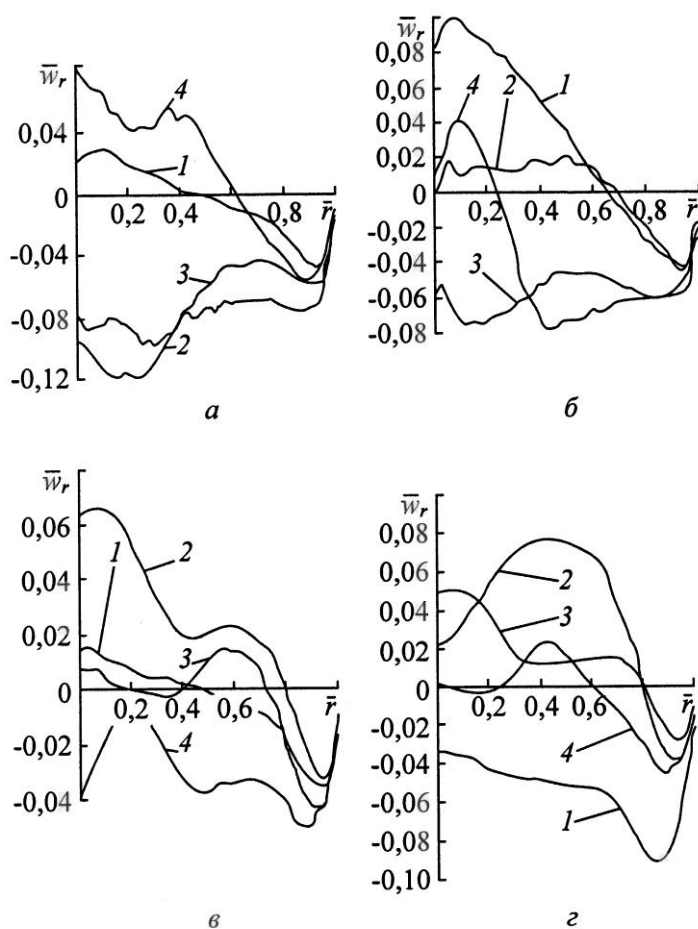


Рис. 3. Расчетные распределения \bar{w}_r при различных значениях $\bar{d}_{\text{вых}}$ и \bar{z}_c : а – $\bar{d}_{\text{вых}} = 0,3$; б – $0,4$; в – $0,5$; г – $0,7$; 1 – $\bar{z}_c = 0,442$; 2 – $0,884$; 3 – $1,335$; 4 – $1,720$

потоке значительно меньше не только тангенциальной, но и осевой [1–5].

Направления осевой и радиальной составляющих скорости в значительной степени зависят от координаты рассматриваемой точки рабочего объема. Это подтверждается и расчетными распределениями проекций вектора полной скорости на поверхность диаметрального сечения, перпендикулярного осям входных шлицев (рис. 4).

Представленные данные показывают, что поток в циклонной камере отличается высокой сложностью, даже большей, чем это представлялось ранее [2, 3, 5]. Возникновение вихревых структур и циркуляционных зон определяется не только непосредственно геометрией рабочего объема (местоположение шлицев, их расстояние от торцов камеры, значение $\bar{d}_{\text{вых}}$ и т. п.), но и конфигурацией выходного вихря.

Схемы осевых и радиальных движений потока (рис. 4) значительно различаются в зависимости от диаметра выходного отверстия камеры. При $\bar{d}_{\text{вых}} = 0,3$ характерным является образование нескольких вихревых зон в рабочем объеме камеры. Причем три из них расположены в нижней части, в области ввода газа в камеру. Выходной вихрь начинает формироваться у глухого торца и имеет криволинейную ось, напоминающую синусоиду. При перемещении он четыре раза меняет радиальное направление движения. Мощность его увеличивается по мере приближения к выходному отверстию. Осевое обратное течение отсутствует. Общая структура потока предопределяет высокий уровень перемешивания и турбулентности, особенно, в приосевой области рабочего объема. При $\bar{d}_{\text{вых}} = 0,4$ движение потока становится более упорядоченным. Выходящие из шлицев струи газа формируют

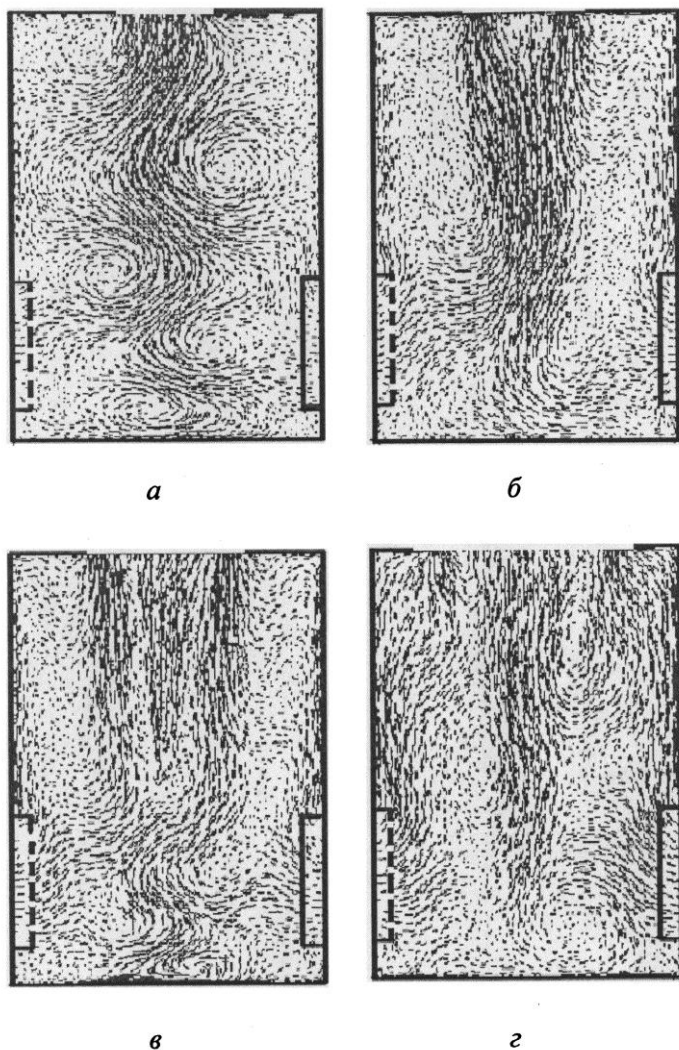


Рис. 4. Схемы осевых и радиальных движений потока при различных значениях $\bar{d}_{\text{вых}}$: а – 0,3; б – 0,4; в – 0,5; г – 0,7

периферийный выходной вихрь. В области глухого торца зарождается выходной вихрь, близкий к осесимметричному. Появляется осевой обратный ток, занимающий значительную часть рабочего объема вблизи выходного отверстия. Истечение газов из камеры с внешней стороны осуществляется по кольцу, ограниченному выходным отверстием, а с внутренней – зоной формирования осевого обратного тока. С увеличением $\bar{d}_{\text{вых}}$ влияние осевого обратного тока в камере становится больше как с точки зрения влияния на выходной вихрь, так и с точки зрения условий его формирования в нижней части рабочего объема. При $\bar{d}_{\text{вых}} = 0,7$ осевой обратный ток проникает до глухого торца камеры.

Рассмотренная схема осевых и радиальных движений потока соответствует расчетным и опытным распределениям осевой $\bar{w}_z(\bar{r})$ и радиальной $\bar{w}_r(\bar{r})$ компонент полной скорости потока.

Полученные опытные и расчетные распределения $\bar{w}_\varphi(\bar{r})$ позволили определить и сопоставить между собой и другие характеристики, важные с точки зрения аэродинамики камеры. В частности такие, как относительная максимальная тангенциальная скорость $\bar{w}_{\varphi m} = w_{\varphi m} / w_{\text{вх}}$ и радиус $\bar{r}_{\varphi m} = r_{\varphi m} / R_{\text{к}}$, характеризующий ее положение.

На основании результатов физического эксперимента получены следующие расчетные формулы для

определения $\bar{w}_{\phi m}$ и $\bar{r}_{\phi m}$ при различных $\bar{d}_{\text{вых}}$:

$$\bar{w}_{\phi m} = 0,507 \bar{d}_{\text{вых}}^{-1,3571}; \quad (1)$$

$$\bar{r}_{\phi m} = 1,050 \bar{d}_{\text{вых}} - 0,033. \quad (2)$$

Аналогичные формулы получены и по результатам численного эксперимента:

$$\bar{w}_{\phi m} = -1,767 \ln \bar{d}_{\text{вых}} + 0,117; \quad (3)$$

$$\bar{r}_{\phi m} = 0,943 \bar{d}_{\text{вых}} - 0,017. \quad (4)$$

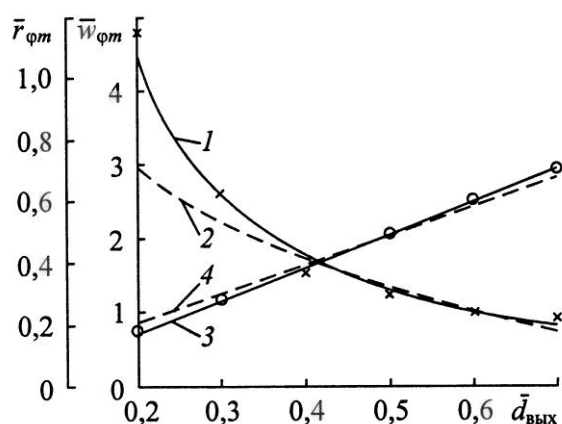


Рис. 5. Графики, построенные на основании физического (1, 2) и численного (3, 4) экспериментов: 1, 3 — $\bar{w}_{\phi m}$; 2, 4 — $\bar{r}_{\phi m}$

На рис. 5 эти зависимости (1) и (3), (2) и (4) графически сопоставлены между собой, а также непосредственно с результатами физического эксперимента (обозначено \times и o). Сопоставление показало, что при $0,3 < \bar{d}_{\text{вых}} \leq 0,7$ формулы, полученные по опытным и расчетным данным, дают близкие результаты, соответствующие опытным значениям характеристик. Это позволяет рекомендовать пакет CFX 10.1 для расчета этих характеристик в отмеченном диапазоне $\bar{d}_{\text{вых}}$. Вероятно, этот вывод можно распространить и на циклонно-вихревые камеры с другими геометрическими характеристиками, близкими рассмотренной.

Выводы

Представленные в статье результаты позволяют сделать следующие выводы.

1. Программный комплекс CFX 10.0 может быть использован для расчетов аэродинамических характеристик циклонно-вихревых камер и дальнейшего совершенствования методик их аэродинамического расчета. Однако необходимая точность расчетов с помощью $k-\omega$, $k-\epsilon$ и RSM-моделей турбулентности, вероятно, может быть достигнута лишь в определенных диапазонах геометрических и режимных характеристик камер. Интервал диапазонов зависит от их технологического назначения и может быть определен сопоставлением результатов численного и физического экспериментов.

2. На данном этапе (при моделировании, проведенном с учетом заданных программно коэффициентов замыкания в математической модели, а также исходной расчетной схемы) при использовании CFX 10.1 в расчетах аэродинамики рабочего объема, вероятно, следует ориентироваться на распределение тангенциальной скорости потока вблизи выходного торца — в сечении, расположенном вблизи осевой границы приторцевого пограничного слоя.

3. Численный эксперимент с использованием CFX 10.0 позволяет исследовать структуру вторичных течений циклонного потока, что сложно сделать существующими методами. Для исследования структуры вторичных течений в циклонно-вихревых камерах с распределенным вводом можно использовать предложенную нами схему условного локального ввода.

4. Программный комплекс CFX 10.1 позволяет с достаточной точностью рассчитывать такие важные характеристики циклонного потока, как относительная максимальная тангенциальная скорость потока и ее поло-

жение в наиболее важном для практики диапазоне относительного диаметра выходного отверстия циклонной камеры ($0,3 < \bar{d}_{\text{вых}} \leq 0,7$).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Балугев Е.Д., Троянкин Ю.В. Исследование аэродинамической структуры газового потока в циклонной камере // Теплоэнергетика. 1967. № 1. С. 63–65.
2. Сабуров Э.Н. Аэродинамика и конвективный теплообмен в циклонных нагревательных устройствах. Л.: Изд-во ЛГУ, 1982. 240 с.
3. Сабуров Э.Н. Циклонные нагревательные устройства с интенсифицированным конвективным теплообменом. Архангельск: Сев.-Зап. кн. из-во, 1995. 341 с.
4. Сабуров Э.Н., Мальцев А.Н. Численное исследование аэродинамики и вихревой структуры потока в циклонно-вихревой камере с односторонним вводом и выводом газов // Сб. «Наука – Северному региону». Архангельск. 2008. Вып. 76. С. 150–157.
5. Сабуров Э.Н., Мальцев А.Н. Численное исследование аэродинамики и вихревой структуры потока циклонно-вихревой камеры с разносторонним вводом-выводом газов // Сб. «Наука – Северному региону». Архангельск. 2008. Вып. 76. С. 142–150.
6. ANSYS® CFX® - 10.0™ Users Guide.
7. Bernardo S., Peres A.P., Mori M. Computational Study of Cyclone Flow Fluid Dynamics using a Different Inlet Section Angle // Thermal Engineering. 2005.N 4. P. 18.
8. Hoekstra A.J., Derksen J.J., Akker Van Den. An experimental and numerical study of turbulent swirling flow in gas cyclones // Chem. Eng. Sci. 1999. N 54. P. 2055–2065.
9. Gimbin J., Chuah T. G., Fakhru'l-Razi A. The influence of temperature and inlet velocity on cyclone pressure drop: A CFD study // Chem. Eng. Prog. 2005. N 44. P. 7–12.
10. Gong A.L., Wang L.-Z. Numerical study of gas phase flow in cyclones // Aero. Technol. 2004. N 38. P. 506–512.
11. Griffiths W.D., Boysan F. Computational Fluid Dynamics (CFD) and Empirical Modeling of the Performance of a Number of Cyclone Samplers // Journal of Aerosol Science. 1996. N 2. P. 281–304.
12. Zhu Y., Lee K. Experimental study on small cyclones operating at high flow rates // Aero. Sci. 1999. N 30. P. 1303–1315.

Поступила 28.12.09

A.N. Maltsev, E.N. Saburov

Northern (Arctic) Federal University

Physical and Numerical Simulation of Cyclone-Vortex Chamber Aerodynamics with Distributed Gas Inlet

The comparison of results of physical and numerical simulation experiments is carried out. It is established that numerical simulation could be applied for study of aerodynamics of cyclone-vortex chambers with the distributed gas inlet.

Keywords: aerodynamics, cyclone-vortex chamber, numerical modeling.