

УДК 532.5, 536.7

**ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАКРУЧЕННОГО ПОТОКА ГАЗА В ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ КАМЕРЕ  
НА ОСНОВЕ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ В STAR CMM+***И. А. Куксов, В. Д. Сарычев, С. П. Мочалов, В. И. Карпенюк***EXPLORING THE SWIRL GAS FLOW IN CYLINDRICAL CHAMBER  
BY NUMERICAL MODELING IN STAR-CCM+ SOFTWARE***I. A. Kuksov, V. D. Sarychev, S. P. Mochalov, V. I. Karpenok*

*Работа выполнена в рамках проекта № 2010-218-02-174 по Постановлению Правительства РФ от 09.04.2010 г. № 218 «О мерах государственной поддержки развития кооперации российских высших учебных заведений и организаций, реализующих комплексные проекты по созданию высокотехнологичного производства».*

*В статье представлена методология численного моделирования газодинамических процессов в вихревой камере, приведены характеристики расчетной сетки, описаны использованные физические модели. Приводятся результаты численного расчета закрученного течения газа, индуцированного двухрядным коллектором в цилиндрической камере.*

*The paper describes methodology for numerical simulation of gas-dynamics processes in swirl chamber. Characteristics of computational mesh and used physical models are provided. The paper provides results of numeric calculations for swirl gas flow in cylindrical chamber induced by two-row gas header.*

**Ключевые слова:** закрученные потоки, вихревая камера, моделирование газодинамики.

**Keywords:** swirl flows, vortex chamber, computational fluid dynamics.

В настоящее время появилось большое число работ, в которых приводятся результаты расчетов физико-химических процессов на фоне сложных гидродинамических течений [1 – 5]. Математическому моделированию течения в вихревых камерах посвящены работы [6 – 7], где использовались специфические для рассматриваемых там случаев геометрии и параметров. Для исследования процессов, происходящих при сжигании водо-угольного топлива, в условиях СибГИУ создана и используется адиабатическая вихревая камера, состоящая из цилиндрической емкости, коллектора – восьми сопел, собранных по четыре в ряд (рис. 1, а).

Цель данной работы заключается в определении трехмерного поля скоростей газа при заданном расходе через коллектор. Получение представления о характере течения в рабочем пространстве вихревой камеры важно, поскольку позволит выбрать параметры работы топки, обеспечивающие оптимальное перемешивание и подвод реагентов при сжигании в топке топлива.

Радиус внутреннего пространства камеры составляет 0,7 м. В коллектор воздух подается с расходом, изменяющимся в пределах от 600 до 900 м<sup>3</sup>/час. При диаметре сопла коллектора  $d = 29$  мм скорость на срезе входного канала составляет 40 м/с, а числа Рейнольдса  $Re = 10^4$  и Маха  $M = 0,13$ . Это означает, что из каналов коллектора истекают турбулентные дозвуковые струи.

Расчет газодинамических процессов, протекающих в вихревой камере, осуществлялся с помощью программного пакета STAR-CCM+ (версия 6.02), разработанного компанией CD-adapco. В расчетах применяются нестационарные осредненные, по Рейнольдсу, уравнения Навье-Стокса с  $k - \epsilon$  моделью турбулентности для вязкого совершенного газа.

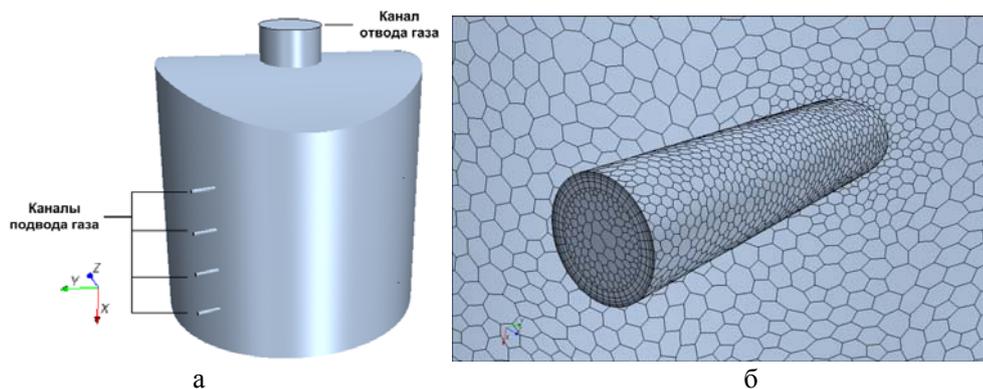


Рис. 1. К постановке задачи: а – схема вихревой камеры, б – фрагмент расчетной сетки

Граничные условия заданы в соответствии с параметрами вихревой камеры. На входной границе – срезах каналов коллектора, задан массовый расход и угол между направлением скорости и нормалью, равный  $75^\circ$ . Выходная граница для расчетной области – канал отвода продуктов горения, расположенный в верхней части камеры. Ось  $x$  направлена вдоль оси камеры (рис. 1, а), а оси  $y, z$  лежат в плоскости перпендикулярной вертикальной оси камеры.

Для численного решения поставленной математической задачи используется метод конечного объема, который является основным в пакете STAR CMM+. Шаг по времени для данного расчета выбран равным 0,01 с. Метод расчета – неявный. Параметры расчетной сетки следующие: сетка многогранная; базовый размер ячейки сетки – 0,005 м; количество пристеночных призматических слоев – 2; коэффициент сжатия пристеночных слоев – 1,5; количество ячеек объемной сетки – 1 272 732. Построение расчетной сетки и разбиения на ячейки происходит автоматически. Как показал дальнейший расчет, выбранные параметры сетки (базовый размер, количество пристеночных слоев и т. д.) являются достаточными для получения стационарного решения поставленной газодинамической задачи. Фрагмент сеточного разбиения приведен на рис. 1,б, где представлены призматические слои вблизи внутренней поверхности подводящего канала.

Для контроля сходимости к стационарному решению использовалась проверка закона сохранения массы путем сравнения массовых расходов газа на входных и выходной границах. Закон сохранения массы при общем массовом расходе (через 8 сопел) равном 0,26 кг/с выполнялся с абсолютной ошибкой равной 0,0062 кг/с и относительной ошибкой 2,4 %.

Кроме того, анализировались невязки полной энергии и компонентов вектора импульса в норме  $L_2$ . Для нормализации невязок использовался встроенный в пакет STAR-CCM+ механизм автоматической нормализации, который вычисляет коэффициент нормализации на основании максимальной величины измеряемого параметра за первые 5 итераций. Величина относительной невязки по энергии составила 0,1 %, максимальная невязка по модулю импульса не превышала 0,5 %.

На рис. 2 изображены изолинии модуля скорости в вертикальном сечении, которое перпендикулярно линии, соединяющей пары противоположащих сопел. Как видно из рисунка, наибольшие значения модуля скорости достигаются по ходу струй.

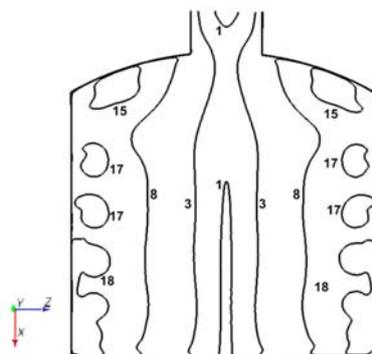
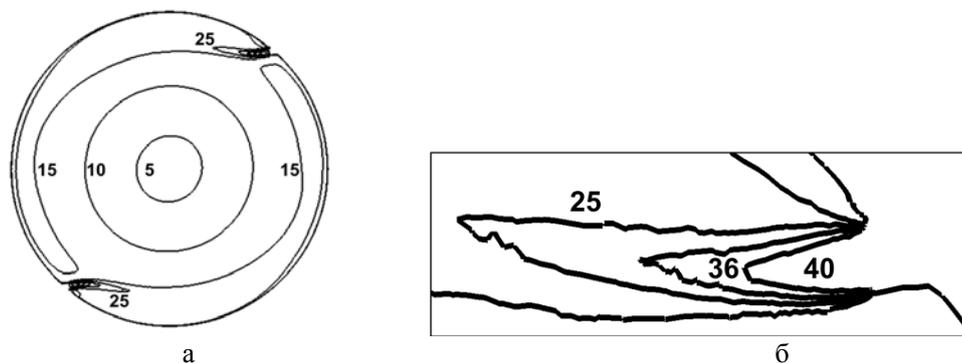


Рис. 2. Изолинии модуля скорости в осевом (вертикальном) сечении, м/с

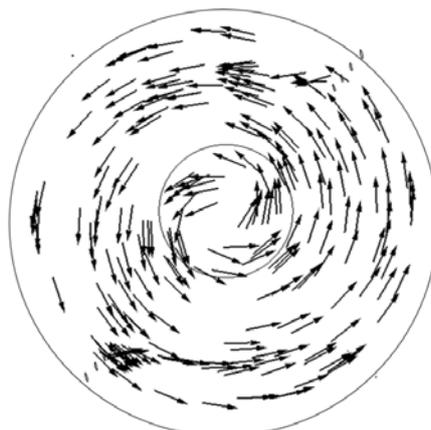
На рис. 3,а представлены изолинии модуля скорости в плоскости  $y, z$  (плоскость сечения проходит через нижнюю пару сопел). Направление тангенциального потока – против часовой стрелки. Максимальные значения скорости (40 м/с) достигаются на срезе сопел (область вблизи входного отверстия представлена на рис. 3, б).



**Рис. 3. Изолинии модуля скорости в сечении, перпендикулярном оси  $x$ , м/с (а – общий вид, б – увеличенный фрагмент вблизи сопла)**

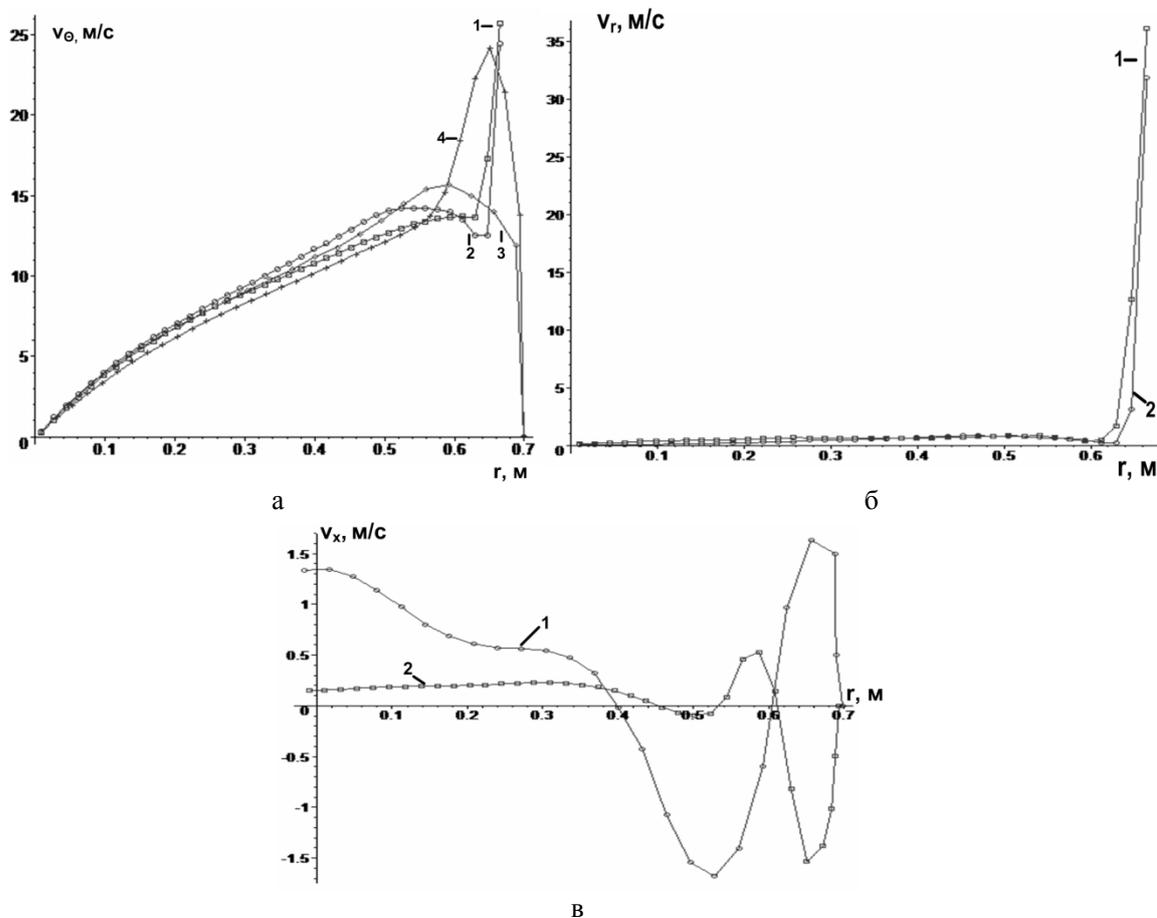
На рис. 4 изображено векторное поле скоростей в горизонтальном сечении, проходящем через нижнюю пару сопел.

Как видно из представленных рисунков, в камере, благодаря тангенциальному подводу воздуха, образуется вертикальный вихрь, ось которого проходит через центр основания камеры.



**Рис. 4. Векторное поле скоростей**

Для более детального описания течения в вихревой камере необходимо обратиться к распределению скоростей вдоль радиуса. Зависимости распределения скоростей от радиуса вдоль различных направлений (в горизонтальных плоскостях, проходящих через сопла) представлены на рис. 5. В описании графиков используется нумерация противоположащих пар сопел снизу вверх (нижнему ряду присвоен номер 1 и т. д.).



**Рис. 5. Зависимости распределения скоростей от радиуса:**  
 а) зависимость тангенциальной скорости от радиуса для различных направлений: 1, 2 – вдоль линий, соединяющих первую пару сопел (1) и третью пару сопел (2); 3, 4 – вдоль линий, перпендикулярных линиям, соединяющим первую пару сопел (3) и третью пару сопел (4);  
 б) зависимость радиальной скорости от радиуса: 1 – вдоль линии, соединяющей первую пару сопел; 2 – вдоль линии, соединяющей третью пару сопел;  
 в) зависимость осевой скорости от радиуса для различных направлений: 1 – вдоль линии, соединяющей третью пару сопел; 2 – вдоль линии, перпендикулярной линии, соединяющей третью пару сопел.

На рис. 5, а приведена серия зависимостей тангенциальной скорости от радиуса, относящихся к линиям, проведенным через сопла (1, 2), и вне сопел (3, 4) на разных расстояниях от дна камеры. Из приведенных зависимостей следует, что в пределах изменения радиальной координаты от нуля до  $\sim 0,6$  м тангенциальные скорости изменяются одинаково вдоль различных сечений. В пределах изменения радиуса от  $0,6$  до  $0,7$  м характер зависимости тангенциальной скорости от радиуса меняется: в сечениях через сопла (1,2) скорости становятся равными  $\sim 25$  м/с, а скорости в сечениях вне сопел (3,4) обращаются в ноль, что соответствует условию прилипания.

Зависимости радиальной скорости от радиуса вдоль линий, проходящих через сопла, показаны на рис. 5, б. Из этих зависимостей видно, что эти скорости близки нулю вплоть до радиуса  $0,6$  м, а вблизи стенки камеры возрастают до  $35$  м/с.

Зависимости осевой скорости (вдоль вертикальной оси камеры) от радиуса для различных направлений указаны на рис. 5, в (на данном графике положительное направление оси ординат совпадает с направлением от дна камеры к выходному каналу в ее своде). Эти зависимости имеют сложный характер, поскольку присутствуют возвратные течения. Вблизи оси камеры течение направлено вверх, что позволяет говорить о наложении вращательного и осевого течения.

## Литература

1. Волков, К. Н. Моделирование крупных вихрей в расчетах турбулентных течений / К. Н. Волков, В. Н. Емельянов. – М.: Физматлит, 2008. – 368 с.
2. Ахметов, В. К. Численное моделирование вязких вихревых течений для технических приложений / В. К. Ахметов, В. Я. Шкадов. – М.: Изд-во АСВ, 2009. – 176 с.
3. Юн, А. А. Теория и практика турбулентных течений с теплообменом, смешением, химическими реакциями и двухфазных течений. – М.: URSS, 2009. – 272 с.
4. Бубенчиков, А. М. Численные модели динамики и горения аэродисперсных смесей в каналах / А. М. Бубенчиков, А. В. Старченко. – Томск: Изд-во ТГУ, 1998. – 236 с.
5. Митрофанова, О. В. Гидродинамика и теплообмен закрученных потоков в каналах ядерно-энергетических установок. – М.: Физматлит, 2010. – 288 с.
6. Бутырев, А. Е. Математическое моделирование течения газа в вихревых камерах с тангенциальным вдувом / А. Е. Бутырев, М. П. Галанин, В. Г. Гнеденко [и др.] // Препринты Института прикладной математики. – 2007. – № 85. – 27 с.
7. Анохина, Е. С. Моделирование стационарных вихревых структур в модельной камере сгорания // Труды XVIII Всероссийской научной конференции студентов-физиков и молодых ученых ВНКФС-18. – Красноярск, 2012.

## Информация об авторах:

**Куксов Игорь Анатольевич** – младший научный сотрудник Управления научных исследований СибГИУ, т.: 8-905-908-12-17, [saget@inbox.ru](mailto:saget@inbox.ru)

**Kuksov Igor Anatolievich** – junior researcher at the Office of Scientific Research of Siberian State Industrial University.

**Сарычев Владимир Дмитриевич** – кандидат технических наук, доцент кафедры физики СибГИУ, т.: 8-951-597-35-31, [sarychev\\_vd@physics.sibsiu.ru](mailto:sarychev_vd@physics.sibsiu.ru)

**Sarychev Vladimir Dmitrievich** – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor at the Department of Physics of Siberian State Industrial University.

**Мочалов Сергей Павлович** – доктор технических наук, профессор, ректор СибГИУ, т.: (3843) 46-35-02 [rector@sibsiu.ru](mailto:rector@sibsiu.ru)

**Mochalov Sergey Pavlovich** – Doctor of Technical Sciences, Professor, Rector of Siberian State Industrial University.

**Карпенко Виктор Иванович** – старший научный сотрудник Управления научных исследований СибГИУ, т.: 8-961-717-74-19, [vkarpенок@mail.ru](mailto:vkarpенок@mail.ru)

**Karpenok Viktor Ivanivich** – senior researcher at the Office of Scientific Research of Siberian State Industrial University.