

В.Т. Калугин¹, С.В. Стрижак¹, С.П. Суцев²

Московский Государственный Технический Университет имени Н.Э. Баумана, Россия (1)

Центр исследований экстремальных ситуаций, Москва, Россия (2)

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ТЕПЛООБМЕНА НА ПОВЕРХНОСТИ ДИАГНОСТИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА “СКАНЛАЙНЕР”

АННОТАЦИЯ

В проведенном исследовании разработана математическая модель течения и теплообмена на поверхности диагностического комплекса “Сканлайнер”. Для решения уравнений Рейнольдса, замкнутых с помощью $k-\varepsilon$ модели турбулентности, используется метод контрольных объемов. Проведен анализ структуры течения. Представлены результаты расчета среднemasовой температуры и числа Нуссельта.

1. ВВЕДЕНИЕ

Результатом почти девятилетнего научного сотрудничества между ЦИЭС, МГТУ им. Н.Э. Баумана, ООО “СобиВидеоскан”, ОАО “Теплопроект” и ряда российских ТЭЦ стал диагностический комплекс “Сканлайнер”. Данный комплекс предназначен для обследования внутренних поверхностей труб без их остановки (рис. 1). В ходе проектирования спускаемого аппарата удалось решить ряд научно-технических задач. На основе экспериментальных работ, проведенных в аэродинамических установках, была предложена аэродинамическая компоновка в виде затупленного цилиндра с двумя дисками. Данная форма позволила заставить аппарат (в дальнейшем СА) в закрученном турбулентном потоке высокотемпературного газа [1]. Особенностью рабочей среды в дымовой трубе является закрутка потока, высокая температура, достигающая до 300 С, и наличие кислотосодержащих газов ($\text{SO}_2, \text{SO}_3, \text{NH}_3, \text{H}_2\text{O}$). Поэтому в ходе проектирования аппарата было предложено использовать термозащитный двухсекционный корпус, выполненный из нержавеющей стали, по типу сосуда Дьюара. Для охлаждения спускаемого аппарата в состав “Сканлайнера” была введена система термостабилизации на базе быстроразъемных капсул с диоксидом углерода и водой (в твердом состоянии), используемых в качестве хладагента. Суммарное время спуска и подъема аппарат в трубе ограничивается запасами хладагента. Было определено максимальное время нахождения аппарата в трубе, высотой $H=250$ метров, $T=3000$ секунд [2]. Целью данной работы является определение поля температуры и исследование распределения числа Нуссельта на поверхности модели спускаемого аппарата в зависимости от безразмерной координаты. Для решения данной задачи используются уравнения Рейнольдса, замкнутые с помощью стандартной $k-\varepsilon$ модели турбулент-

ности Лаундера-Сполдинга. На первом этапе рассматривается двумерная постановка задачи с целью получения предварительных результатов.

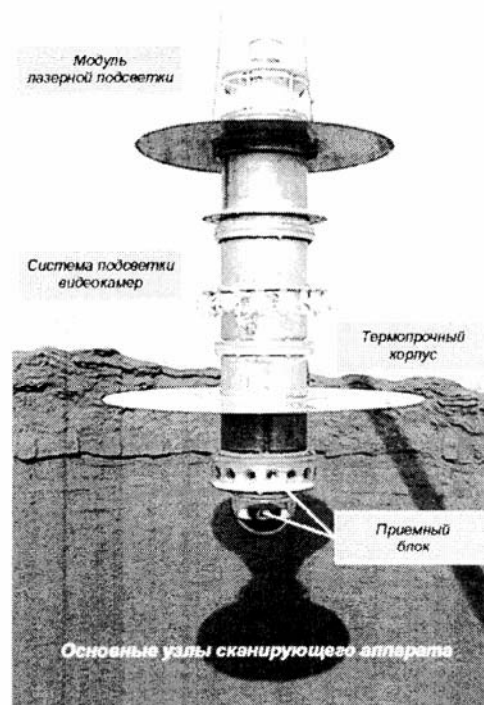


Рис. 1 Спускаемый аппарат

2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И МЕТОД РЕШЕНИЯ

При выборе компоновки СА требуется знание распределения тепловых нагрузок во всех областях течения, вблизи поверхности исследуемого тела, а также в местах крепления троса к СА. В работе рассматривается взаимодействие потока несжимаемого газа с выбранной моделью диагностического комплекса “Сканлайнер” (рис. 2).

Геометрия модели представляла собой затупленный цилиндр, за головной частью которого на расстоянии $l_1 = 0,9$ располагался первый соосный диск с диаметром $d_1 = 3$. В качестве линейного масштаба принят диаметр основного цилиндра. Далее на расстоянии $l_2 = 3,9$ располагался второй соосный диск с меньшим диаметром $d_2 = 2$. Удлинение цилиндра λ выбиралось равным 6. Величина скорости и температура набегающего по-

тока выступают в качестве масштаба обезразмеривания.

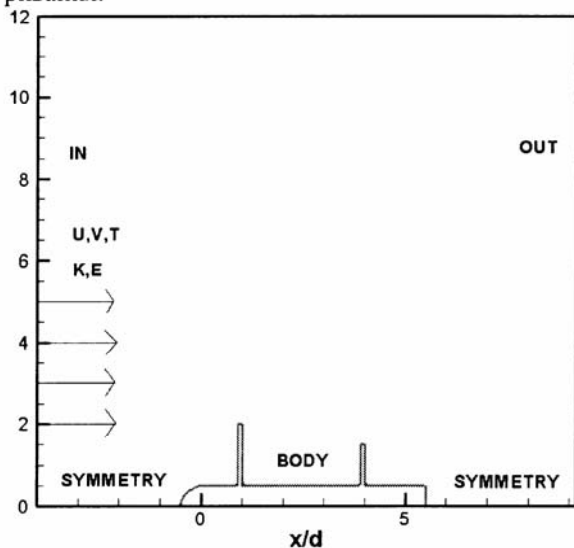


Рис. 2 Фрагмент расчетной области

Течение несжимаемого газа описывается системой дифференциальных уравнений, которая состоит из уравнения неразрывности, уравнений движения вязкой среды и энергии, а также уравнений, описывающих принятую для данных условий модель турбулентности. Для расчета обтекания модели СА используется метод контрольных объемов [3]. Уравнения записаны в цилиндрической системе координат, в безразмерном виде.

$$\frac{\partial(\rho\Phi)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u\Phi)}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial(\rho r u\Phi)}{\partial r} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \Gamma_{\Phi} \frac{\partial\Phi}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\Gamma_{\Phi} \frac{\partial\Phi}{\partial x} \right) + S_{\Phi} \quad (1)$$

$$\Phi = \{1, u, v, k, \varepsilon, h\}$$

Граничные условия принимаются в виде:

$$r = 0 \quad 0 < x < L$$

$$\frac{\partial u}{\partial r} = 0; \frac{\partial v}{\partial r} = 0; \frac{\partial T}{\partial r} = 0; \frac{\partial k}{\partial r} = 0; \frac{\partial \varepsilon}{\partial r} = 0;$$

$$\left(\frac{\partial T}{\partial r} \right)_w = 0;$$

$$r = H \quad 0 < x < L$$

$$\frac{\partial u}{\partial r} = 0; \frac{\partial v}{\partial r} = 0; \frac{\partial T}{\partial r} = 0; \frac{\partial k}{\partial r} = 0; \frac{\partial \varepsilon}{\partial r} = 0$$

$$x = 0 \quad 0 < r < H \quad u = 1; v = 0; T = 1;$$

$$k = 1.5E-04; \varepsilon = 1.8E-04$$

$$x = L \quad 0 < r < H$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} = 0; \frac{\partial T}{\partial x} = 0; \frac{\partial k}{\partial x} = 0; \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} = 0$$

Выражения для значений диффузионного и источника членов представлены в работе [4]. Константы для $k-\varepsilon$ модели турбулентности определялись стандартным образом. Для задания

граничных условий на твердых поверхностях использовался метод пристеночных функций [5,6]. Характеристики турбулентности соответствовали условиям проведения физических экспериментов в аэродинамической трубе для случая $Tu_{\infty} = 1\%$. Конвективные члены уравнений движения вязкой среды аппроксимировались с помощью гибридной схемы, а диффузионные члены – центральными разностями. Разностная схема имела второй порядок точности по времени и пространственным координатам. Для решения задачи использовался подход, основанный на неявном методе контрольных объемов, представляющий разновидность SIMPLE алгоритмов. Полученная в результате система линейных алгебраических уравнений решалась методом Стоуна [5]. Внешние границы расчетной области выбирались на значительном удалении от поверхности тела, исходя из условий пренебрежимо малого влияния условий на характер течения. В результате выбирался вариант расчетной области соответственно 20, 24, 18 безразмерных калибров слева, справа и вверх от тела. Расчет проводился на неортогональной, неравномерной сетке. Сетка соответствовала типу H, с совмещенном расположением узлов. Расчетная область разбивалась в продольном направлении на одиннадцать отдельных участков. Количество ячеек для дисков выбиралось в соответствии с рекомендацией работы [7]. В расчетах использовались сетки, которые содержали различное количество ячеек (контрольных объемов). Для сетки с числом разбиения ячеек 128x68 дальнейшее увеличение количества контрольных объемов не влияло на результаты расчета коэффициента лобового сопротивления C_{xH} . Решение задачи для случая этой сетки получено в среднем за 800-1000 итерационных шагов для различных моделей, при этом критерием сходимости служила малость приращений характеристик турбулентности на итерационном шаге. Тестирование и апробация метода проводилась на примере решения задачи об обтекании диска для числа $Re = 6 \cdot 10^5$ [8]. Погрешность расчета коэффициента лобового сопротивления C_{xH} составила 1%.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

Для многих инженерных задач, таких как обтекание турбулентным потоком пучка труб [6,10], системы сферических лунок [9], течения в трубе с ребрами и перегородкам [10] проводился расчет процесса теплообмена. В данной работе проведены расчеты для выбранной формы СА при следующих параметрах: $Re = 2 \cdot 10^5$ и $Pr_T = 0,9$.

В результате решения системы уравнений с граничными условиями найдены поля скоростей, давления, температуры, характеристик турбулентности. Расчет одного варианта на ПК составил три минуты. Визуализация данных проведена для случая установившегося решения.

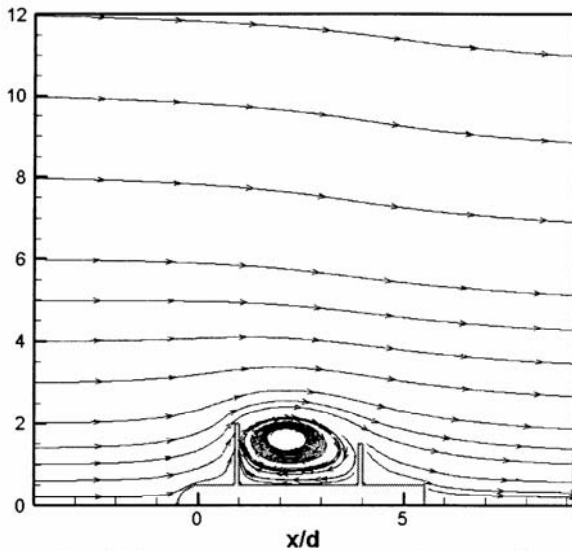


Рис. 2 Фрагмент картины линий тока у СА

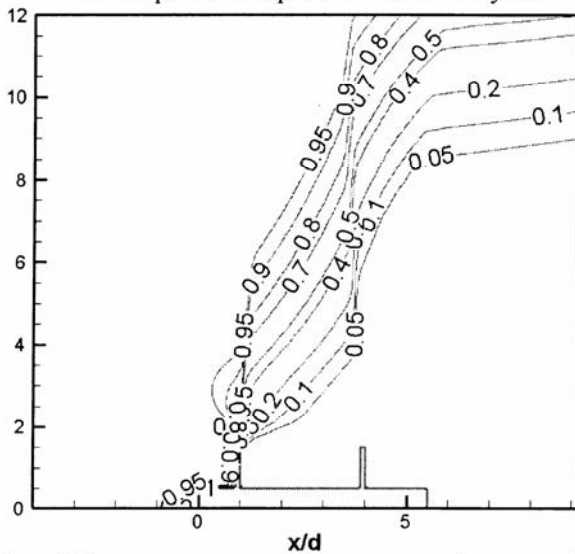


Рис. 3 Эволюция температурного поля (изотермы)

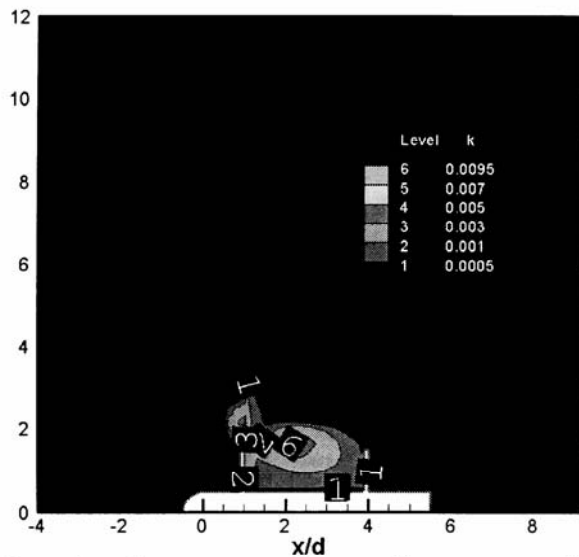


Рис. 4 Значения турбулентной кинетической энергии

На рис. 2 представлен фрагмент расчета линий тока. Можно отметить извилистый характер по-

тока, огибающий первый диск. Между двумя дисками формируется обширный, крупномасштабный вихрь, и все тело находится в отрывной зоне. На рис. 3 представлены результаты расчета температуры для случая с адиабатической стенкой. Из расчета видно, что головная часть СА и первый диск нагреты более интенсивно. Уровень турбулентности между дисками превышает уровень турбулентности в проточной части в 15 раз (рис. 4). Также между дисками образуется область с пониженным давлением, и первый диск испытывает подсосывающее воздействие со стороны второго диска (рис. 5).

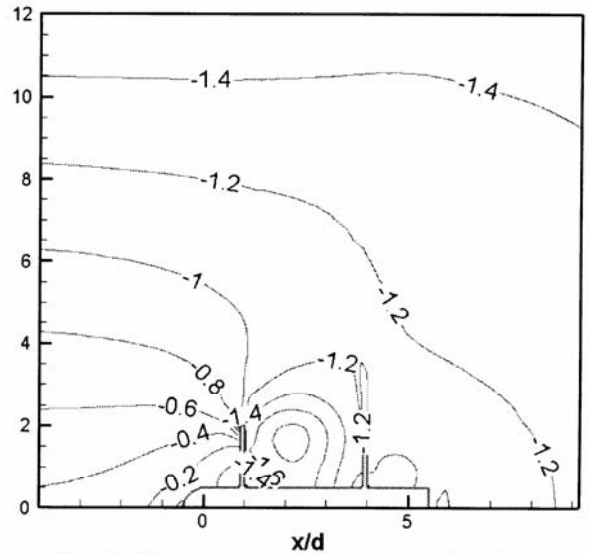


Рис. 5 Эволюция поля давления (изобары)

Для анализа процесса теплообмена на поверхности СА целесообразно провести исследование по распределению числа Nu по длине СА. Среднюю температуру газа в заданном поперечном сечении находим в виде среднemasсовой температуры, которая определяется выражением [9,10]:

$$T_b = \frac{\iint \rho c_p w T dA}{\iint \rho c_p w dA} \quad (2)$$

Интегрирование проводится по всему сечению расчетной области. Для постоянных ρ и c_p выражение упрощается и имеет вид:

$$T_b = \frac{\iint w T dA}{\bar{w} A} \quad (3)$$

Средняя скорость \bar{w} в поперечном сечении канала определяется так, чтобы объемный расход через канал был равен $\bar{w} A$. Согласно работе [10]:

$$\bar{w} = \frac{\iint w dA}{\iint dA} \quad (4)$$

Среднее число Нуссельта определим как:

$$Nu = \frac{Q_w D_H}{(T_w - T_b) \lambda_f} \quad (5)$$

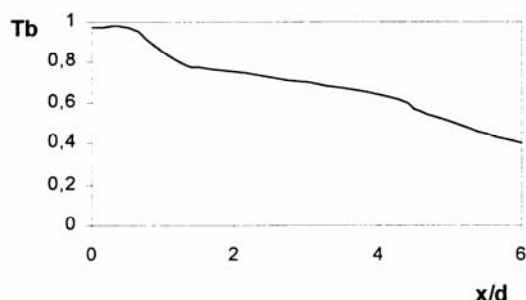


Рис. 6 Зависимость распределения среднemasовой температуры T_b от продольной безразмерной координаты x/d

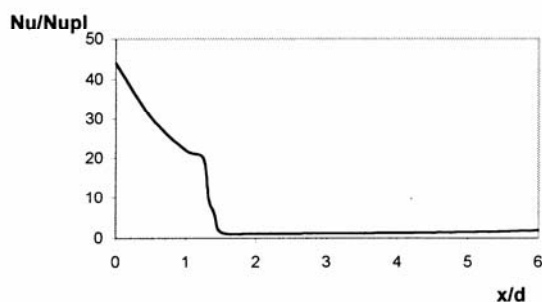


Рис. 7 Зависимость распределения локальной относительной теплоотдачи Nu/Nu_{pl} от продольной безразмерной координаты x/d

С увеличением безразмерной продольной координаты среднemasовая температура имеет тенденцию к уменьшению (рис. 6). При этом можно отметить, что более высокие значения числа Нуссельта на переднем диске вызваны натеканием горячего потока жидкости. Циркуляция потока между дисками и в донной части СА приводит к намного меньшим значениям числа Нуссельта (рис. 7).

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании численного моделирования можно сделать следующие выводы. Математическая модель, основанная на решении уравнений Рейнольдса, замыкаемых с помощью $k-\varepsilon$ модели турбулентности, позволяет с достаточной для инженерных расчетов точностью рассчитывать турбулентное течение и процесс теплообмена на поверхности СА.

СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

ЦИЭКС – Центр исследований экстремальных ситуаций;

ТЭЦ – теплоэлектростанция;

in, out, symmetry – вход, выход, ось симметрии;

u, v – составляющие скорости вдоль оси $0x, 0y$, м/с;

ρ – плотность, кг/м³;

T – температура, К;

h – энтальпия, Дж/кг;

k – турбулентная кинетическая энергия, м²/с²;

ε – скорость диссипации турбулентной энергии, м²/с³;

Γ_Φ – обобщенный коэффициент диффузии;

S_Φ – обобщенный источниковый член;

t – время, с;

d, d_1, d_2 – диаметр цилиндра, диаметр первого диска, диаметр второго диска, м;

l, λ – длина цилиндра, м; удлинение цилиндра;

C_{x1} – коэффициент лобового сопротивления;

A – площадь поперечного канала сечения, м²;

T_b – среднemasовая температура, К;

T_w – локальная температура стенки, К;

\bar{w} – средняя продольная скорость, м/с;

c_p – удельная изобарная теплоемкость, Дж/(кг·К);

λ_t – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К);

Q_w – средняя плотность теплового потока, Вт/м³

D_H – гидравлический диаметр канала, м;

Tu_∞ – степень турбулентности набегающего потока;

Re – число Рейнольдса;

Pr_T – турбулентное число Прандтля;

Nu – среднее число Нуссельта;

Nu_{pl} – число Нуссельта для пластины;

Индексы:

w – стенка;

pl – пластина;

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Беляков В.Н., Калугин В.Т., Сушев С.П., Суслон А.А., Ларионов В.И., Акатьев В.А.** Диагностический комплекс “Сканлайнер” для обследования футеровки дымовых труб без остановки технологических процессов. // Конверсия в машиностроении. 2002. №1. С. 60-66.
2. **Акатьев В.А., Сушев С.П.** Технология и параметры автономного аппарата для контроля футеровки функционирующей дымовой трубы. // Безопасность жизнедеятельности. 2005. № 3. С. 32-44.
3. **Патанкар С.** Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости. М.: Энергоатомиздат, 1984. 152 с.
4. **Гупта А., Лилли Д., Сайред Н.** Закрученные потоки. М.: Мир, 1987. 588 с.
5. **Ferziger J.H., Peric M.** Computational Methods for Fluid Dynamics. Springer-Verlag, 1997. 364 p.
6. **Белов И.А., Кудрявцев Н.А.** Теплопередача и сопротивление пакетов труб. Л.: Энергоатомиздат, 1987. 223 с.
7. **Исаев С.А.** Численное исследование механизма снижения лобового сопротивления тела с передней срывной зоной. // ИФЖ. 1995. Т.68. № 6. С. 975-982.
8. **Горлин С.М.** Экспериментальная аэромеханика. М: Высшая Школа, 1970. 423 с.
9. **Быстров Ю.А., Исаев С.А., Кудрявцев Н.А., Леонтьев А.И.** Численное моделирование вихревой интенсификации теплообмена в пакетах труб. СПб.: Судостроение, 2005. 392 с.
10. **Патанкар С.В.** Численное решение задач теплопроводности и конвективного теплообмена при течении в каналах. М.: Издательство МЭИ, 2003. 312 с.