

МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРОГАЗОДИНАМИКИ И ТЕПЛООБМЕНА В КАНАЛАХ СОПЛОВОГО УСТРОЙСТВА ВОДОРОДНОЙ ЭНЕРГОУСТАНОВКИ

А.А. Пригожин, И.Н. Лазаренко, Д.П. Шматов, И.Г. Дроздов

Статья посвящена моделированию гидрогазодинамики и теплообмена в каналах соплового устройства водородной энергоустановки. Предложено несколько вариантов конструкций каналов охлаждения и выбран наиболее предпочтительный вариант эффективного способа охлаждения. Моделирование работы системы охлаждения проводилось с помощью программного комплекса ANSYS CFX

Ключевые слова: водородная энергоустановка, каналы охлаждения, моделирование, гидродинамика

Паротурбинная энергоустановка представляет собой высокотемпературный кислородно-водородный парогенератор, на выходе из которого установлен турбонасосный агрегат, включающий турбину и электрогенератор. Вал турбины и электрогенератора кинематически связаны между собой. При работе установки в камере сгорания парогенератора образуется высокотемпературный парогаз, который разгоняется в сопле-распылителе с последующим смещением с балластировочной водой. В камере испарения происходит дробление и испарение капель. Далее перегретый пар с требуемыми параметрами поступает на турбину.

Наиболее теплонапряженной частью парогенератора является сопло-распылитель, в котором происходит течение парогаса с последующим взаимодействием с водяными струями (балластировочной водой). Параметры парогаса - температура $T = 2600\text{K}$ и скорость $v = 460\text{ м/с}$. Водяные струи формируются в каналах охлаждения сопла-распылителя с расходом $m = 4\text{ кг/с}$.

При проектировании сложных технических систем математическое моделирование является единственным средством, позволяющим на этапе проектирования рассмотреть поведение конструктивных элементов в реальных условиях эксплуатации. Применение численных методов облегчается благодаря использованию специализированных расчетных комплексов, предназначенных для численного интегрирования уравнений движения жидкости в заданной пользователем расчетной области.

В работе рассмотрено несколько вариантов сопловых устройств парогенератора:

- с осевыми каналами охлаждения переменного сечения (рис. 1);
- с осерадиальными каналами охлаждения переменного сечения (рис. 2);

– с осерадиальными каналами охлаждения постоянного сечения и кольцевыми коллекторами (рис. 3).

Аналитические решения задач о движении жидкости в сложных системах удается получать только для ламинарных течений, поэтому основной способ решения таких задач заключается в использовании численных методов. Наиболее широкое применение получили модели на основе метода сеток.

Сущность метода сеток заключается в том, что искомая непрерывная функция аппроксимируется набором приближенных значений в некотором множестве точек, называемых узлами. Совокупность узлов, определенным образом между собой связанных, называется сеткой, которая, в свою очередь, становится дискретной моделью области определения искомой функции.

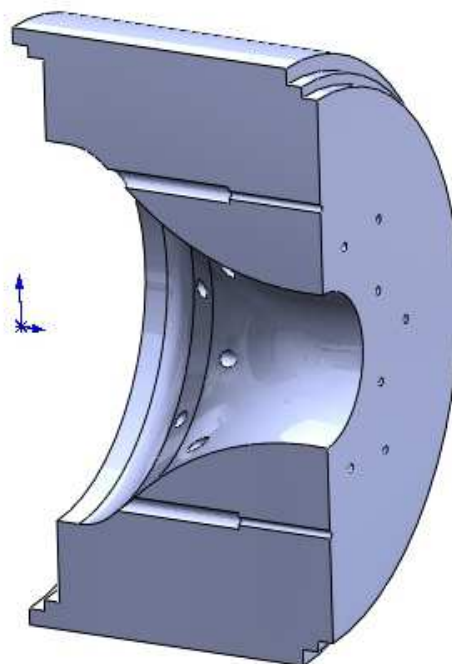


Рис. 1. Сопло-распылитель с осевыми каналами охлаждения переменного сечения

Пригожин Антон Александрович – ВГТУ, аспирант, тел. (473) 277-27-55, e-mail: rd@vgtu.ru

Лазаренко Игорь Николаевич – ВГТУ, аспирант, тел. (473) 277-27-55, e-mail: rd@vgtu.ru

Шматов Дмитрий Павлович – ВГТУ, аспирант, тел. (473) 277-27-55, e-mail: rd@vgtu.ru

Дроздов Игорь Геннадьевич – ВГТУ, д-р техн. наук, доцент, тел. (473) 277-27-55, e-mail: rd@vgtu.ru

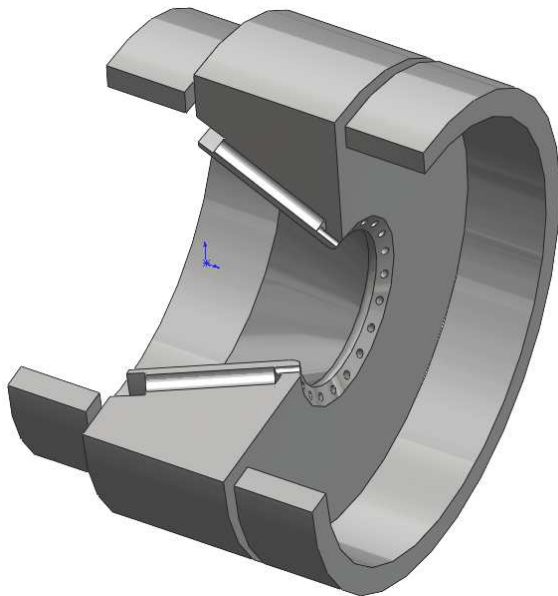


Рис. 2 Сопло-распылитель с осерадальными каналами охлаждения переменного сечения

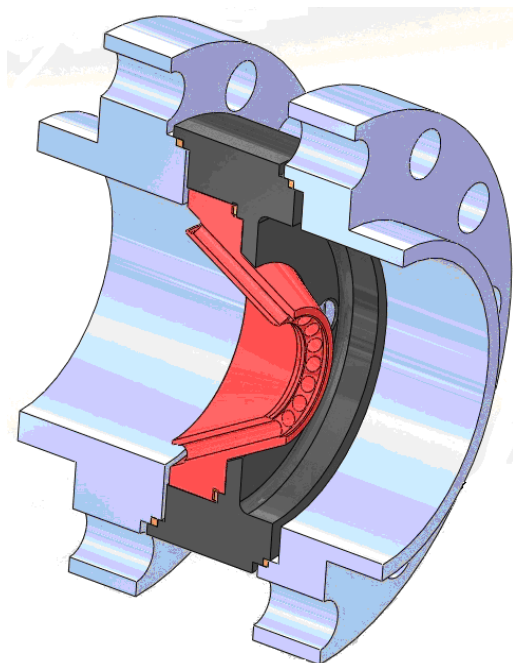


Рис. 3. Сопло-распылитель с осерадальными каналами охлаждения постоянного сечения и кольцевыми коллекторами

При построении математической модели работы системы охлаждения был принят ряд допущений:

- рабочий агент считается вязкой несжимаемой средой (вода);
- течение потока трехмерное стационарное;
- теплофизические свойства потока принимаются постоянными и равными средним значениям в исследуемом интервале температур;
- на входе в расчетную область имеется полностью развитое течение с изотропной турбулентностью;

- теплообмен с окружающей средой отсутствует (на внешней стороне выполняется условие адиабатности);

Исходными уравнениями для описания движения вязкой несжимаемой жидкости являются:

- уравнение Рейнольдса:

$$\rho \frac{du}{dt} = \text{grad}(p) + [\mu + \mu_t] \cdot \nabla^2 u,$$

- уравнение турбулентной кинетической энергии:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho \kappa) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \kappa u_i) &= \\ &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\kappa} \right) \frac{\partial \kappa}{\partial x_j} \right] + G_\kappa - \rho \epsilon + S_\kappa, \end{aligned}$$

уравнение диссипации турбулентной кинетической энергии:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \epsilon u_j) &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + \\ &+ C_1 \rho S_\epsilon - C_2 \rho \frac{\epsilon^2}{\kappa + \sqrt{\nu \epsilon}} + S_\epsilon \end{aligned}$$

-уравнение энергии:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \frac{\partial}{\partial x_i} [u_i (\rho E + p)] &= \\ &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left(k_{eff} \frac{\partial T}{\partial x_j} + u_i (\tau_{ij})_{eff} \right) + S_h, \end{aligned}$$

Записанные уравнения образуют систему, замыкание которой происходит уравнением связи турбулентной вязкости с диссипацией энергии и турбулентной кинетической энергией:

$$\mu_t = \rho \cdot C_\mu \cdot \frac{\kappa^2}{\epsilon}.$$

В качестве условий однозначности для системы уравнений задаются условия, соответствующие условиям натурального эксперимента:

- на входе в расчетную область задается расход теплоносителя;

- на выходе из расчетной области задаются «мягкие» граничные условия (условие продолжения решения);

- на всех боковых поверхностях условия прилипания для уравнения движения и неразрывности;

Схематично процесс решения задачи можно представить следующим образом.

На первом этапе осуществляется построение расчетной области исследуемого объекта (рис. 4-6); декомпозиция расчетной области (разбивка области на подобласти) построение сетки; постановка граничных условий.

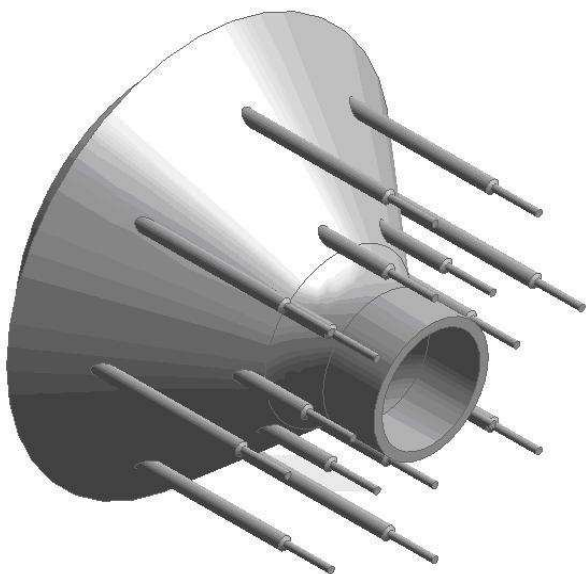


Рис. 4. Расчетная область с осевыми каналами охлаждения переменного сечения

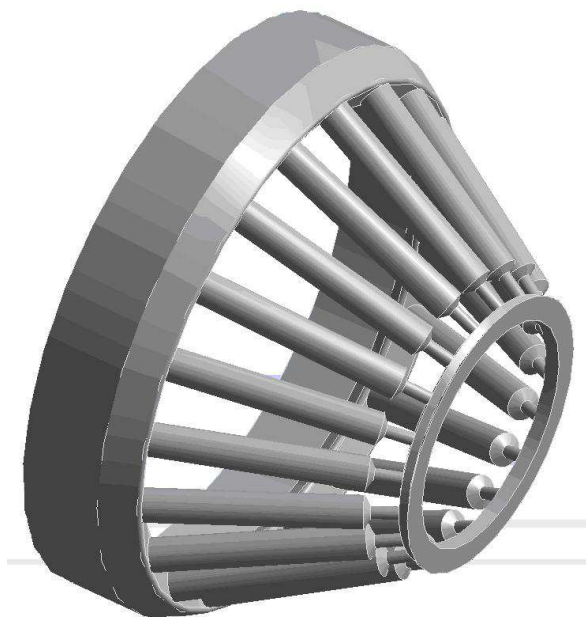


Рис. 5. Расчетная область с осерасидальными каналами охлаждения переменного сечения

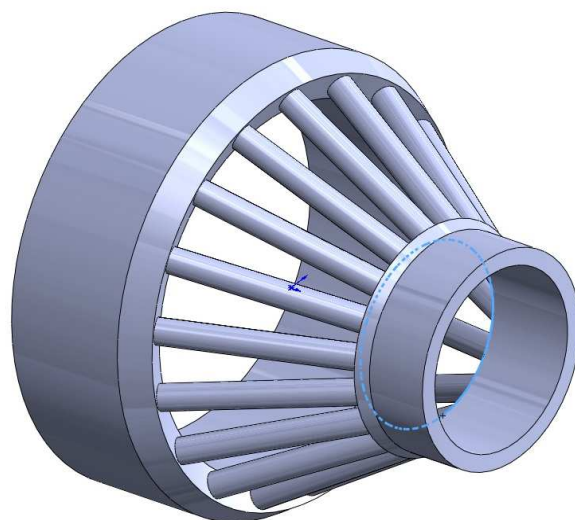


Рис. 6. Расчетная область с осерасидальными каналами охлаждения постоянного сечения и кольцевыми коллекторами

Граничные условия для заданной задачи следующие:

- на входе в расчетную область задается постоянный расход: $V(\vec{r}) = V_0$, степень начальной турбулентности 5 %;

- на всех боковых поверхностях задаются условия прилипания: $u_i(\vec{r}) = 0$;

- для турбулентных величин предполагают равенство нулю турбулентной энергии и нормальной производной скорости диссипации на стенках канала: $k = \partial \epsilon / \partial n = 0$;

- с внутренней стороны соплового аппарата со стороны парогаса задаются граничные условия 3-го рода: температура газового потока $T = 2600K$,

коэффициент теплоотдачи $\alpha = 7000 \frac{Bm}{m \cdot K}$.

На втором этапе построенная сеточная модель передается в решатель, после чего производится выбор настроек расчета (задание параметров расчета, свойств материалов, выбор дополнительных моделей (для моделирования турбулентности, горения и т.п.), и производится собственно решение поставленной краевой задачи.

Построение регулярной сетки для данной задачи не представляется возможным, поэтому был использован автоматический генератор сеток. Чем мельче ячейки сетки, тем более физическую картину можно ожидать от расчета. Однако создание мелкой сетки по всему объему расчетной области не является рациональным и может перегрузить оперативную память компьютера. Была построена сетка:

- вариант 1: тип сетки - тетрагональная, общее количество элементов 4702732 штук;

- вариант 2: тип сетки - тетрагональная, общее количество элементов 1022725 штук;

- вариант 3: тип сетки – тетрагональная, общее количество элементов 1230000 штук.

В результате расчета были получены поля давления, скорости и температуры охладителя при течении в каналах критического сечения для 3-х вариантов (рис. 7-15).

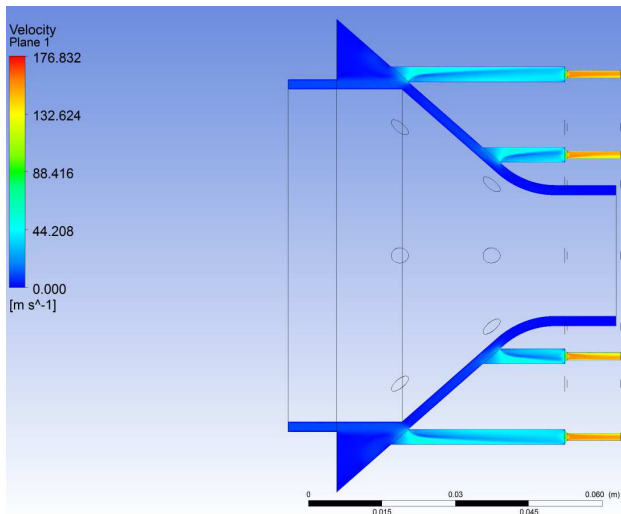


Рис. 7. Поле скоростей (с осевыми каналами охлаждения переменного сечения)

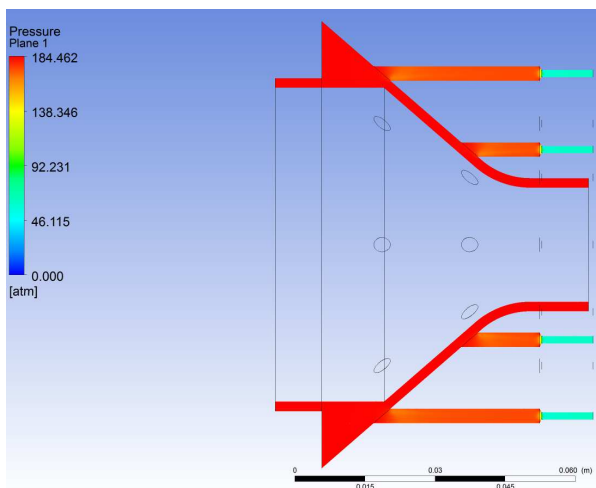


Рис. 8. Поле давлений (с осевыми каналами охлаждения переменного сечения)

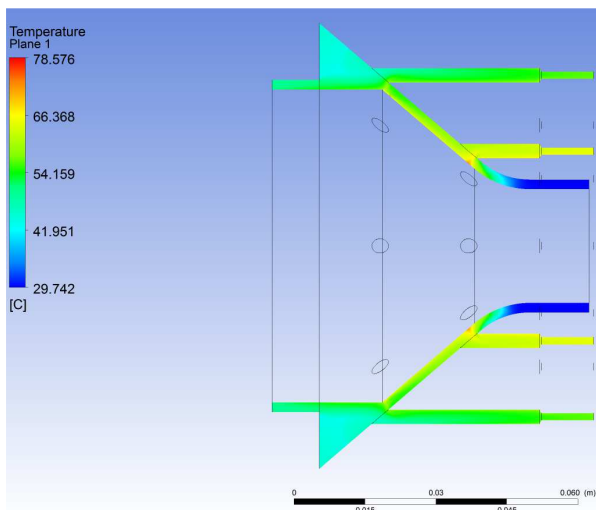


Рис. 9. Поле температур (с осевыми каналами охлаждения переменного сечения)

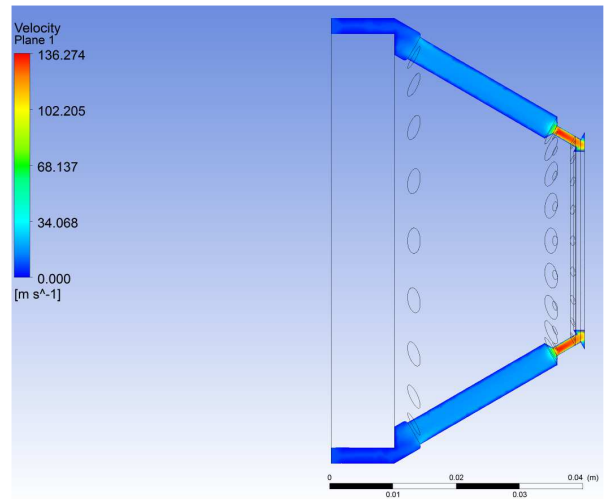


Рис. 10. Поле скоростей (с осерадальными каналами охлаждения переменного сечения)

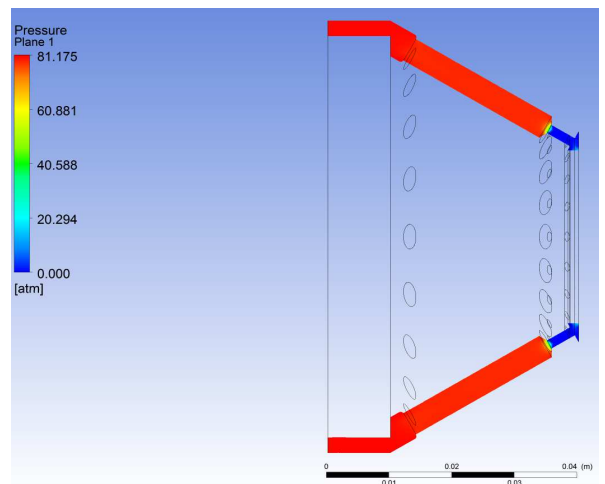


Рис. 11. Поле давлений (с осерадальными каналами охлаждения переменного сечения)

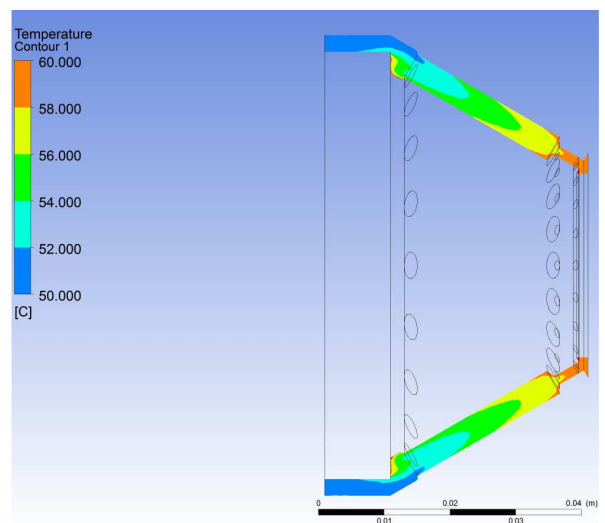


Рис. 12. Поле температур (с осерадальными каналами охлаждения переменного сечения)

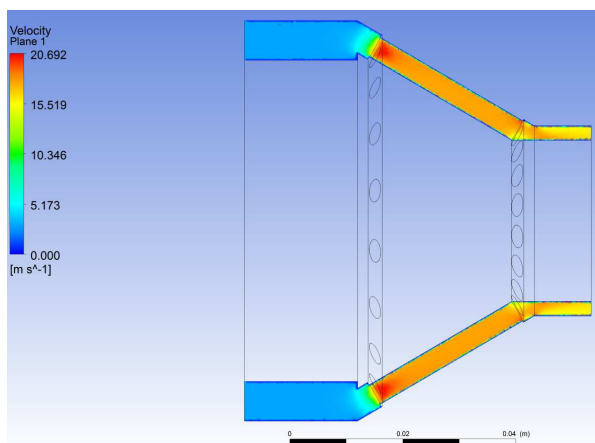


Рис. 13. Поле скоростей (область с осерadiальными каналами охлаждения постоянного сечения и кольцевыми коллекторами)

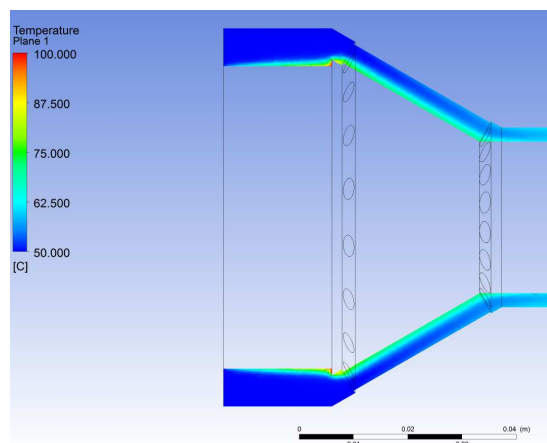


Рис. 15. Поле температур (область с осерadiальными каналами охлаждения постоянного сечения и кольцевыми коллекторами)

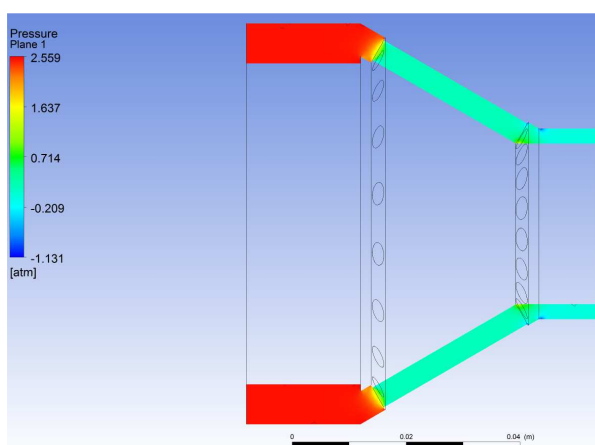


Рис. 14. Поле давлений (область с осерadiальными каналами охлаждения постоянного сечения и кольцевыми коллекторами)

Исходя из анализа полученных гидродинамических картин течения балластировочной воды, было принято решение о наиболее предпочтительном варианте – с осерadiальными каналами охлаждения постоянного сечения и кольцевыми коллекторами. Такие каналы обладают наименьшим гидравлическим сопротивлением.

Кольцевые коллекторы обеспечивают равномерный сбор и распределение воды. Расположение каналов под углом к оси потока обеспечивает наилучшую степень смешения с парогазом.

Работа выполнена в рамках ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы, Г.К. № 14.740.11.0152, при программно-технической поддержке НОЦ «Водородная энергетика» и ОАО КБХА г. Воронеж.

Литература

1. И.Г. Дроздов, С.В. Дахин, Н.Н. Кожухов, Д.П. Шматов, Э.Р. Огурцова. Моделирование гидродинамики и теплообмена высокоскоростного потока в камере испарения высокотемпературного водородного парогенератора // Вестник ВГТУ, 2008, Том 4, № 11. – С. 114–119.
2. Андерсон Д., Таннехилл Дж., Плетчер Р. Вычислительная гидромеханика и теплообмен: В 2 томах/ Пер. с англ. – М.: Мир, 1990. – 728 с.
3. Menter F.R., Esch T. Advanced Turbulence Modelling in CFX // CFX Update – Spring 2001. – No. 20. – P. 4-5.

Воронежский государственный технический университет

HYDRAULIC GAS DYNAMICS AND HEAT TRANSFER MODELLING IN CHANNELS NOZZLE THE DEVICE OF HYDROGEN POWER PLANT

A.A. Prigozhin, I.N. Lazarenko, D.P. Shmatov, I.G. Drozdov

Article is devoted hydraulic gas dynamics and heat exchange modeling in channels nozzle the devices of hydrogen power installation. Offered some variants designs of cooling channels and the most preferable variant is chosen. Modeling system of cooling was spent by means of program complex ANSYS CFX

Key words: hydrogen power installation, cooling channels, modeling, hydrodynamics