УСТАНОВКА ДЛЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ВЕРИФИКАЦИИ РЕЗУЛЬТАТОВ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ГИДРОДИНАМИКИ ОБТЕКАНИЯ ТЕЛ ВРАЩЕНИЯ ГАЗОВЫМИ ПОТОКАМИ

В.А. Климова, Ю.Е. Немихин, С.Е. Щеклеин

Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина
620002 Екатеринбург, ул. Мира, д. 19
Тел: (343) 375-95-08, e-mail: s.e.shcheklein@urfu.ru

Заключение совета рецензентов: 23.05.15 Заключение совета экспертов: 27.05.15 Принято к публикации: 31.05.15

В работе приведена постановка задачи компьютерного моделирования для исследования обтекания свободно взвешенных (левитирующих) шаровых элементов в канале потоком газа. Показана необходимость верификации результатов моделирования для развития модели. Приведены требования к методике экспериментальной верификации результатов моделирования. Даны результаты разработки экспериментального стенда и методик для исследования гидродинамики обтекания тел вращения газовыми потоками.

Ключевые слова: шаровые элементы, гидродинамика, бесконтактная диагностика, измерение поля скорости, трековая диагностика, «Полис».

THE FACILITY FOR EXPERIMENTAL VALIDATION OF HYDRODYNAMICS AND HEAT EXCHANGE SIMULATION OF THE GAS FLOW OVER THE SOLIDS OF REVOLUTION

V.A. Klimova, Yu.E. Nemikhin, S.E. Shcheklein

Urals Federal University named after the first President of Russia Boris Yeltsin
19 Mira str., Ekaterinburg, 620002, Russia
Tel.: (343) 375-95-08, e-mail: s.e.shcheklein@urfu.ru

Referred: 23.05.15 Expertise: 27.05.15 Accepted: 31.05.15

The paper gives the problem statement of the computer simulation for the investigation of the gas flux over the suspended (levitating) spherical elements in the channel. The necessity of the simulation results validation for the further model development is shown. The requirements for the methods of experimental validation of simulation results are formulated. Given are the results of the experimental facility and measurement methods preparation for the investigation of hydrodynamics of the gas flow over the solids of revolution.

Keywords: spherical elements, hydrodynamics, contactless diagnostics, velocity field measurement, track diagnostics, "Polis".

Виктория Андреевна
Климова
Viktoria A. Klimova

Сведения об авторе: ст. преподаватель кафедры «Атомные станции и возобновляемые источники энергии» УрФУ.

Награды и научные премии: Почетная грамота министерства энергетики и жилищно-коммунального хозяйства Свердловской области за активную работу со студентами по повышению энергоэффективности и развитию новых источников энергии (2011).

Образование: Уральский гос. технический университет – Уральский политехнический институт по специальности «Атомные электрические станции и установки» (2007).

Область научных интересов: ядерная энергетика и технологии, производство водорода, компьютерное моделирование теплогидравлических процессов.

Публикации: более 40, в том числе 7 в реферируемых журналах.

Information about the author: senior lecturer of Nuclear power plants and renewable energy sources department, UrFU.

Education: Nuclear power plants and units, Ural State Technical University (UrFU), 2007.

Research area: nuclear energy and technology, hydrogen production, computer simulation of hydrodynamics.

Publications: more than 40.

Юрий Евгеньевич
Немихин
Yurii E. Nemikhin

Сведения об авторе: ст. преподаватель кафедры «Атомные станции и возобновляемые источники энергии» УрФУ.

Награды и научные премии: Почетная грамота министерства энергетики и жилищно-коммунального хозяйства Свердловской области за многолетний добросовестный труд по подготовке кадров для энергетических предприятий страны (2011).

Образование: Уральский гос. университет им. А.М. Горького (УрГУ) (1971).

Область научных интересов: разработка физических основ нетрадиционных и возобновляемых источников энергии, методы компьютерной диагностики и мониторинга в энергетике.

Публикации: более 30, в том числе 5 в реферируемых журналах.

Information about the author: senior lecturer of Nuclear power plants and renewable energy sources department, UrFU.

Diploma of the Ministry of Energy and Housing and Utilities of the Sverdlovsk region for many years of hard work training for energy companies in the country (2011).

Education: Ural State University (1971).

Research area: development of the physical foundations of non-conventional and renewable sources of energy, methods of computer diagnostics and monitoring in the energy sector.

Publications: more than 30, including 5 in refereed journals.

Сергей Евгеньевич
Щеклеин
Sergey E. Shcheklein

Сведения об авторе: д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Атомные станции и возобновляемые источники энергии» УрФУ.

Научный руководитель ряда реализованных инновационных проектов, в т. ч. «Энергоэффективный дом для села», «Системы солнечного энергоснабжения автономных потребителей специального назначения», «Солнечные системы охранной сигнализации» и др.

Член редколлегии журнала «Известия вузов. Ядерная энергетика», сборника трудов УГТУ-УПИ «Теплофизика ядерных энергетических установок», научно-технического журнала «Энергоэффективность и анализ». Заслуженный энергетик России, действительный член Международной энергетической академии.

Образование: Уральский политехнический институт (УГТУ-УПИ) (1972).

Область научных интересов: термодинамика ядерных энергетических установок, проблемы атомной энергетики и теплофизики двухфазных потоков, продление ресурса и повышение надежности оборудования АЭС, солнечная энергетика, ветровая энергетика, биоэнергетика, энергосбережение, энергоэффективность.

Публикации: более 450, в том числе 6 монографий и учебников, 28 изобретений.

Information about the author: doctor of technical science, professor, Urals State Technical University "Atomic Stations and Renewable Energy Sources" Department head.

A scientific director of several realized innovation projects, including "The energoefficient house for the village", "Special systems of individual consumer solar energy supply", "The solar systems for the guarding alarm" etc.

A member of the editorial board of "Institute of Higher Education News. Nuclear Power" magazine, "Nuclear power units heat engineering" USTU article collection, "Energoeffectiveness and analysis" scientific magazine. A Honoured power engineering specialist of Russian Federation, a member of International Energy Academy.

Education: Urals Polytechnic Institute (1972).

Research area: nuclear power units thermodynamics; questions of nuclear energy and thermophysics of the two-phase flows; NPP equipment lifetime enduring and reliability increasing; solar, wind and bioenergetics, energy conservation, energy efficiency.

Publications: more than 450 scientific works, including 6 monographs and textbooks, 28 inventions.

Введение

Высокотемпературные газоохлаждаемые реакторы (ВТГР) являются одним из перспективных направлений развития ядерной энергетики, так как могут служить источником энергоснабжения многих технологических процессов. Такие реакторы способны поставлять высокопотенциальную тепловую энергию (с температурой до 900-1000 °C) и обеспечивать значительную долю промышленных потребителей. К настоящему моменту разработано много вариантов конструкции ВТГР, однако для промыш-

ленных целей наибольшим потенциалом обладают реакторы с шаровыми тепловыделяющими элементами (ТВЭлами) [1–2]. Рассматриваются варианты использования таких ТВЭлов в каналах и в виде шаровых засыпок.

Шаровые засыпки, применяемые в аппаратах, обычно представляют собой плотный дисперсный слой. Плотным называется слой, в котором частицы соприкасаются между собой, хотя через слой и продвигается газ. В зонах контакта шаров происходит резкое ухудшение условий теплоотвода, возникает неравномерность температур по поверхности шара,

способная в ряде случаев привести к повреждению вследствие возникновения термомеханических напряжений [3]. Канальное размещение твэлов сохраняет все вышеуказанные недостатки, хотя и имеет ряд технологических преимуществ.

Альтернативой шаровой засыпке является гидродинамический подвес шаров в каналах со специально организованным потоком газа (аналогия парадокса Даламбера-Эйлера). В этом случае шары не имеют точек соприкосновения и находятся в состоянии интенсивного вращения в потоке, что приводит к образованию вихревых потоков, срыву пограничного слоя и радикально повышает интенсивность теплообмена при отсутствии неравномерности распределения тепловыделения по поверхности шара.

Однако экспериментальные исследования гидродинамических эффектов при обтекании шаров в таких условиях крайне затруднены, так как практически полностью исключают возможность применения контактных методов.

Основной целью данной работы является разработка компьютерной модели для исследования гидродинамики и теплообмена при обтекании свободно взвешенных (левитирующих) шаровых элементов в газовом потоке, движущемся в цилиндрическом канале. Процесс создания модели подразумевает этап экспериментальной верификации, которая призвана доказать адекватность и точность моделирования.

Математическая модель и основные моменты численной методики

В настоящее время развитие компьютерных методов моделирования позволяет достаточно детально исследовать вихревые структуры, образующиеся вблизи поверхности шаров, а также их взаимодействие с основным потоком газа в межшаровом пространстве.

Для моделирования обтекания шаровых элементов потоком газа в данной работе использовался пакет Flow Simulation, являющийся компонентом системы автоматизированного проектирования Solid Works.

В Flow Simulation используется математическая модель, в основе которой лежат уравнения Навье – Стокса [4], включающие

– уравнение неразрывности

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho \mathbf{v}) = 0, \quad (1)$$

где ρ – плотность; $\mathbf{v}$ – вектор скорости; t – время;
– уравнение переноса импульса

$$\frac{\partial \rho \mathbf{v}}{\partial t} + \nabla(\rho \mathbf{v} \cdot \mathbf{v}) = -\nabla p + \nabla(\tau_{ij} + \tau_{ij}^R) + S_i, \quad (2)$$

где p – давление в жидкости; τ и τ^R – тензор вязких напряжений; S – внешняя сила; индексы i и j используются для суммирования по трем осям координат;

– уравнение переноса энергии

$$\frac{\partial \rho H}{\partial t} + \nabla(\rho \mathbf{v} H) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[u_j (\tau_{ij} + \tau_{ij}^R) + q_i \right] + \frac{\partial p}{\partial t} - \tau_{ij}^R \frac{\partial v_i}{\partial x_j} + S_i v_i + Q_H, \quad (3)$$

где $H = h + v^2/2$; h – энтальпия среды; q_i – тепловой поток; Q_H – приток или отток теплоты на единицу объема.

Система уравнений замыкается уравнениями состояния текучей среды и эмпирическими зависимостями теплофизических свойств от температуры и давления. Для жидкости или газа пользователь определяет плотность, вязкость, теплопроводность и удельную теплоемкость.

Для расчета потока вблизи стенки и описания перехода от ламинарного течения к турбулентному и наоборот используется модель ламинарного и турбулентного пограничного слоя, которая основана на так называемом приближении приведенной функции стенки. В рамках этой модели рассчитываются точные граничные условия по скорости и температуре, которые затем применяются в приведенных выше уравнениях сохранения.

Для расчета турбулентных течений используется метод RANS (усредненные по Рейнольдсу уравнения Навье – Стокса). При этом в системе уравнений появляются добавочные члены (напряжения Рейнольдса) [4]:

$$\tau_{ij}^R = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \frac{\partial u_l}{\partial x_l} \delta_{ij} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij}, \quad (4)$$

где $\delta_{ij} = 1$ при $i = j$, $\delta_{ij} = 0$ при $i \neq j$ – дельта-функция Кронекера; μ_t – коэффициент вязкости турбулентных вихрей; k – кинетическая энергия турбулентности. Для расчета ламинарных и турбулентных течений используется одна и та же система уравнений, но при ламинарном течении k и $\mu_t = 0$. В рамках k - ϵ модели турбулентности, где ϵ – скорость диссипации,

$$\mu_t = f_\mu C_\mu \rho k^2 / \epsilon, \quad (5)$$

где f_μ – комплекс, учитывающий турбулентную вязкость.

К настоящему моменту проведено большое количество численных исследований обтекания шара или круглого цилиндра потоком газа при разных числах Рейнольдса. Для расчета турбулентных течений используются разные методики, самые распространенные из которых – DNS (Direct numerical simulation – прямое численное моделирование), LES (Large eddy simulation – моделирование больших вихрей) и уже упомянутое RANS. В работе [5] проведено сравнение методик LES и RANS и нескольких моделей турбулентности применительно к исследованию поля потока и механизма теплообмена в активной зоне реактора PBMR – высокотемпературного газоохлажда-

мого реактора с шаровой засыпкой. Эти исследования показали, что методика RANS адекватно моделирует поведение потока в слое шаровых элементов.

Для нахождения численного решения поставленной задачи непрерывная нестационарная математическая модель физических процессов дискретизируется как по пространству, так и по времени (в случае стационарной задачи процессы моделируются как установившиеся во времени). Расчетная область покрывается трехмерной расчетной сеткой, грани ячеек которой параллельны координатным плоскостям. Поскольку в Flow Simulation используется метод конечных объемов [4], значения независимых переменных рассчитываются в центрах ячеек сетки. Процесс построения расчетной сетки начинается с построения базовой сетки. Число ячеек базовой сетки задается пользователем в виде числа ячеек вдоль каждой из координатных осей. Для разрешения расчетной сетки относительно небольших геометрических особенностей расчетной модели используется локальное дробление ячеек базовой сетки, т.е. каждая базовая ячейка в области контакта твердого тела и текучей среды делится на 8 одинаковых дочерних ячеек. Flow Simulation поддерживает 7 уровней дробления. Аналогично разрешаются области с большими градиентами физических параметров текучей среды или температуры твердого тела. Дробление производится как до начала, так и во время расчета.

Разработка компьютерной модели

Компьютерная модель представляет собой канал, в котором расположен шаровой элемент. Кроме того, в канале могут быть расположены вкладки различной геометрии, которые турбулизируют поток газа и позволяют получить лучшие аэродинамические и теплообменные характеристики. Шаровой элемент может быть источником теплоты.

Рис. 1. Распределение скорости по сечению канала:
а – $Re = 10^4$; б – $Re = 4000$

Fig. 1. Velocity cut plot: а – $Re = 10^4$; б – $Re = 4000$

На входе в канал задается скорость газового потока, по которой определяется число Рейнольдса (как произведение скорости на диаметр канала, отнесенный к коэффициенту динамической вязкости газа). В качестве результатов моделирования рассматриваются картины в сечении, показывающие распределение скоростей потока (рис. 1), траектории потока, а также некоторые интегральные расчетные характеристики (например, сила, действующая на шар со стороны потока). На рис. 1 приведен пример для изотермического течения воздуха в канале без вкладок; диаметр канала равнялся 70 мм, диаметр шара – 40 мм.

При разработке компьютерной модели очень важным этапом является верификация результатов моделирования. Следовательно, нужно поставить эксперимент, в котором воспроизводятся условия одного из вариантов компьютерной модели, а затем сравнить экспериментально полученные данные и результаты моделирования.

Изучение особенностей сложной пространственной структуры турбулентных потоков в условиях присутствия нестационарных вихревых процессов, связанных как со структурой воздушного потока, так и с формированием и срывом пограничного слоя с вращающегося шара, предъявляет требования высокой пространственной и временной разрешающей способности методики измерения мгновенных значений скорости в разных точках потока. Задача дополнительно осложняется наличием низкочастотных прецессионных колебаний шарового элемента в потоке воздуха.

Для верификации результатов математического моделирования в рамках данной задачи рассматривалось несколько методик с точки зрения возможности получения требуемого объема и точности результатов. Это

- метод теневых исследований Теплера;
- фотографический метод стробоскопической визуализации;
- метод лазерной доплеровской анемометрии (ЛДА);
- метод цифровой трассерной визуализации (particle image velocimetry, PIV).

Из рассмотренных методов только последний удовлетворял требованиям поставленной задачи.

Экспериментальный стенд и методика исследований

Для верификации результатов моделирования необходимо экспериментальное исследование структуры течения в цилиндрическом канале со свободно взвешенными (левитирующими) в потоке шаровыми элементами. Измерение аэродинамических характеристик пространственного турбулентного течения проводилось на изотермической лабораторной модели диаметром 80 и длиной 1200 мм, изготовленной из монолитного поликарбоната толщиной 3 мм. Основными элементами экспериментального стенда

являются: автоматизированный комплекс регулирования подачи сжатого воздуха; изотермическая лабораторная модель технологического канала; контролируемые приборы. Стенд подключен к сети сжатого воздуха и системе вентиляции, оснащен устройством засева потока трассерами (генератор тумана Martin Magnum 1800). Установка позволяет проводить исследования режимов течения при числе Рейнольдса 10^4 – 10^6 , что обеспечивает применимость полученных результатов для анализа аэродинамики установок реального масштаба [6, 7]. Диагностика вихревого течения осуществлялась методом цифровой трассерной визуализации (PIV). Метод PIV – полевой оптический метод измерения полей скорости жидкости и газа. Для измерения полей скорости в интересующих сечениях модели применялась PIV-система «Полис», разработанная в ИТ СО РАН [8, 9]. Система позволяет измерять две компоненты вектора скорости одновременно во всем заданном сечении (320×320 мм).

«Полис» включает в себя: двойной импульсный Nd:YAG-лазер Quantel EVG с энергией в импульсе 145 мДж; объектив для формирования лазерного ножа; цифровую кросскорреляционную камеру Видеоскан 4021 с разрешением 2048×2048 пикселей; широкоугольный объектив Nikon 28mm F/2.8D; синхронизирующий процессор; персональный компьютер с программным обеспечением Actual Flow.

Принцип метода PIV состоит в следующем [6, 10–12]. Импульсный лазер создает тонкий световой нож и освещает мелкие частицы (трассеры), взвешенные в исследуемом потоке. Положения частиц в момент двух последовательных вспышек лазера регистрируются на два кадра цифровой камеры. Локальная скорость потока определяется расчетом перемещений частиц за время между вспышками лазера. Определение перемещения основано на применении корреляционных методов к трассерным картинкам с использованием регулярного разбиения на элементарные подобласти. Варьирование времени задержки между лазерными вспышками позволяет измерять скорость в диапазоне от долей миллиметра в секунду до сверхзвуковых значений. В качестве трассеров в экспериментах использовались микрокапли специальной жидкости на основе глицерина, создаваемые дымогенератором. Подача трассеров осуществлялась через трубу Вентури, установленную в канал основного потока до входа в модель. Их концентрация регулировалась уровнем мощности дымогенератора. Малая инерционность микрокапель (характерный размер 1–5 мкм) обеспечивает соответствие их скорости параметрам потока воздуха. Экспериментальные исследования поля скорости течения должны проводиться при следующих условиях: рабочая среда – сжатый воздух; число Рейнольдса, рассчитанное по диаметру экспериментального канала. Измерения должны проводиться в 5 сечениях, захватывающих характерные точки шарового элемента (лобовая часть, 1/4а, 1/2, 3/4 диаметра

и кормовая часть). Принципиальная схема рабочего канала с шаровыми элементами и размещение оптического тракта измерительного оборудования показаны на рис. 2.

Рис. 2. Схема рабочего канала с шаровыми элементами и размещение оптического тракта измерительного оборудования: 1 – сепаратор трассера; 2 – рабочий канал; 3 – скоростная телекамера; 4 – импульсный лазер; 5 – шаровые элементы; 6 – телескопическая опора оптической системы; 7 – система ввода трассера

Fig. 2. The diagram of the channel with spherical elements and the arrangement of optical tract and measurement equipment: 1 – tracer separator; 2 – working channel; 3 – high-speed camera; 4 – pulsed laser; 5 – spherical elements; 6 – optical system telescopic strut; 7 – tracer input system

Общая схема включения оборудования PIV системы «Полис» приведена на рис. 3.

Источником световых импульсов в данной схеме является лазер, который состоит из излучателя и системного блока [13]. В излучателе расположены: 2 лазерных резонатора, 2 квантрона с активным веществом и лампой накачки, система сведения лучей, преобразователь частоты лазерного излучения и оптический attenuатор. В системном блоке располо-

жены: источник питания импульсных ламп накачки лазера, система охлаждения лазера и блок управления работой лазера. Излучатель и системный блок через разъем соединены между собой гибким рукавом, в котором размещены шланги системы охлаждения, кабели силового питания и сигнальные кабели.

Рис. 3. Общая схема включения оборудования PIV системы «Полис»

Fig. 3. "Polis" system connection scheme

Локализация светового импульса в измерительную область осуществляется с помощью оптической насадки (создания лазерного ножа и системы регулирования его толщины). Фокусное расстояние оптической системы может меняться от 0,3 до 0,6 м. При этом толщина лазерного ножа меняется от 0,5 до 3 мм.

Регистрация отраженных оптических импульсов осуществляется кросскорреляционной камерой, которая предназначена для двукратной регистрации трассерных картин в потоке и может работать как в двухкадровом, так и в однокадровом режиме. Временная задержка между вспышками лазера при двухкадровом режиме регистрации кадров может варьироваться от 10 мкс до 259 мс.

Программное обеспечение

Программное обеспечение Actual Flow, поставляемое с системой, используется для автоматизации процесса проведения эксперимента, хранения и обработки данных; визуализации экспериментальных и рассчитанных данных, а также предоставляет удобные механизмы управления данными.

Программное обеспечение состоит из следующих основных модулей:

- менеджер базы данных предназначен для управления данными: их хранения, записи, удаления, импорта/экспорта;
- менеджер эксперимента позволяет пользователю программировать параметры работы синхронизатора и управлять процессом эксперимента;
- менеджер обработки данных позволяет проводить обработку данных алгоритмами, зарегистрированными в программном обеспечении.

Рис. 4. Экранное меню программы обработки оптических сигналов Actual Flow

Fig. 4. Optical signals treatment program Actual Flow on-screen menu

Вид экранного меню системы с примером обработки поля скоростей приведен на рис. 4.

Организация совместной работы лазера и камеры осуществляет синхронизирующий процессор, предназначенный для отсчета временных интервалов и генерации синхроимпульсов через заданные промежутки времени. Процессор имеет восемь идентичных каналов отсчета временных интервалов, имеется вход для обеспечения синхронизации по внешнему импульсу и сигнальные светодиоды, имеется возможность управления процессором от персонального компьютера.

Разработчиками предусмотрена возможность расширения количества регистрирующих видеокамер для получения информации, достаточной для построения 3-D изображений вихревых образований в исследуемых потоках. На рис. 5 приведены данные тестовых исследований системы.

Рис. 5. Томографические 3D изображения вихревых структур в газовой струе

Fig. 5. Tomographic 3D view of vortex structures in the gas flow

Выводы

1. Разработана модель, выполнено математическое моделирование и получены теоретические значения и распределения полей скорости и давления при обтекания шарового элемента в цилиндрическом канале в условиях гидродинамического подвеса.

2. Для экспериментальной верификации результатов моделирования разработан экспериментальный стенд и введена в эксплуатацию оптическая лазерная система, основанная на технологии импульсной визуализации частиц микротрассеров (PIV-система),

позволяющая проводить исследование аэродинамической микроструктуры газового потока вблизи поверхности обтекаемого тела.

3. Система оптического измерения гидроаэродинамических характеристик обтекания шаровых элементов газовыми потоками (PIV-метод) позволит получить распределения скоростей в различных зонах взаимодействия газа с поверхностью, достоверно определить условия вихреобразования и возникновения отрывных течений, что позволит провести верификацию расчетных моделей, примененных при решении задачи математического моделирования процесса.

Список литературы

1. Лозовецкий В.В. Развитие высокотемпературных газовых реакторов // Атомная техника за рубежом. 2002. № 7. С. 8-12.
2. Kazuhiko Kunitomi, Xing Yan, Shusaku Shiozawa, Nozomu Fujimoto. GTHT300C For Hydrogen Cogeneration // 2nd International topical meeting on high temperature reactor technology. Beijing, China, September 22-24, 2004.
3. Богоявленский Р.Г. Гидродинамика и теплообмен в высокотемпературных ядерных реакторах с шаровыми твэлами. М.: Атомиздат, 1978.
4. Solid works flow simulation 2012 technical reference. Solid Works, 2012.
5. Jung-Jae LEE a, Su-Jong YOON a, Goon-Cherl PARK a & Won-Jae LEE. Turbulence-induced heat transfer in PBMR core using LES and RANS // Journal of Nuclear Science and Technology. 2007. Vol. 44, No. 7. P. 985.
6. Маслов А.А., Миронов С.Г. Экспериментальное исследование обтекания полужамкнутой цилиндрической полости гиперзвуковым потоком низкой плотности // Изв. РАН. МЖГ. 1996. № 6. С. 155–160.
7. Scarano F. Overview of PIV in supersonic flows. Particle Image Velocimetry / Ed. by A. Schroeder, C.E. Willert. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2008. P. 445–463.
8. Токарев М.П., Маркович Д.М., Бильский А.В. Адаптивные алгоритмы обработки изображений частиц для расчета мгновенных полей скорости // Вычислительные технологии. 2007. Т. 12, № 3. С. 109–131.
9. Алексеенко С.В., Бильский А.В., Маркович Д.М. Применение метода цифровой трассерной визуализации для анализа турбулентных потоков с периодической составляющей // Приборы и техника эксперимента. 2004. Т. 47. № 5. С. 703–710.

References

1. Lozoveckij V.V. Razvitie vysokotemperaturnykh gazovykh reaktorov // Atomnaâ tehnika za rubežom. 2002. № 7. S. 8-12.
2. Kazuhiko Kunitomi, Xing Yan, Shusaku Shiozawa, Nozomu Fujimoto. GTHT300C For hydrogen cogeneration // 2nd International topical meeting on high temperature reactor technology. Beijing, China, September 22-24, 2004.
3. Bogoâvlenskij R.G. Gidrodinamika i teploobmen v vysokotemperaturnykh âdernykh reaktorah s šarovymi tvêlami. M.: Atomizdat, 1978.
4. Solid works flow simulation 2012 technical reference. Solid Works, 2012.
5. Jung-Jae LEE a, Su-Jong YOON a, Goon-Cherl PARK a & Won-Jae LEE. Turbulence-induced Heat transfer in PBMR core using LES and RANS // Journal of Nuclear Science and Technology. 2007. Vol. 44, No. 7. P. 985.
6. Maslov A.A., Mironov S.G. Èksperimental'noe issledovanie obtekanîâ poluzamknutoj cilindričeskoj polosti giperzvukovym potokom nizkoj plotnosti // Izv. RAN. MŽG. 1996. № 6. S. 155–160.
7. Scarano F. Overview of PIV in supersonic flows. Particle Image Velocimetry / Ed. by A. Schroeder, C.E. Willert. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2008. P. 445–463.
8. Tokarev M.P., Markovič D.M., Bil'skij A.V. Adaptivnye algoritmy obrabotki izobraženij častic dlâ račeta mgnovennykh polej skorosti // Vyčislitel'nye tehnologii. 2007. T. 12, № 3. S. 109–131.
9. Alekseenko S.V., Bil'skij A.V., Markovič D.M. Primenenie metoda cifrovoj trassernoj vizualizacii dlâ analiza turbulentnykh potokov s periodičeskoj sostavlâûšej // Pribory i tehnika èksperimenta. 2004. T. 47. № 5. S. 703–710.

10. Пузырев Л.Н., Ярославцев М.И. Стабилизация параметров газа в форкамере гиперзвуковой аэродинамической трубы // Изв. СО АН. Серия техническая. 1990. Вып. 5. С. 135–139.

11. Scarano F. Overview of PIV in supersonic flows. Particle image velocimetry / Ed. by A. Schroeder, C.E. Willert. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2008. P. 445–463.

12. Миронов С.Г., Цырюльников И.С. Исследование волнового поля контролируемых периодических возмущений двух источников // Теплофизика и аэромеханика. 2005. Т. 12, № 3. С. 379–386.

13. Ахметбеков Е.К., Бильский А.В., Маркович Д.М., Маслов А.А., Поливанов П.А., Цырюльников И.С., Ярославцев М.И. Применение лазерного измерительного комплекса «ПОЛИС» для измерений полей скоростей в сверхзвуковом потоке в аэродинамических трубах // Теплофизика и аэромеханика. 2009. Т. 16, № 3. С. 343–352.

10. Puzyrev L.N., Âroslavcev M.I. Stabilizaciã parametrov gaza v forkamere giperzvukovoj aërodinamičeskoj truby // Izv. SO AN. Seriã tehničeskaã. 1990. Vyp. 5. S. 135–139.

11. Scarano F. Overview of PIV in supersonic flows. Particle image velocimetry / Ed. by A. Schroeder, C.E. Willert. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2008. R. 445–463.

12. Mironov S.G., Cyrûl'nikov I.S. Issledovanie volnovogo polã kontroliruemyh periodičeskih vozmušenij dvuh istočnikov // Teplofizika i aëromehanika. 2005. T. 12, № 3. S. 379–386.

13. Ahmetbekov E.K., Bil'skij A.V., Markovič D.M., Maslov A.A., Polivanov P.A., Cyrûl'nikov I.S., Âroslavcev M.I. Primenenie lazernogo izmeritel'nogo kompleksa «POLIS» dlã izmerenij polej skorostej v sverhzvukovom potoke v aërodinamičeskih trubah // Teplofizika i aëromehanika. 2009. T. 16, № 3. S. 343–352.

Транслитерация по ISO 9:1995