

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА И ГИДРОДИНАМИКИ В ТЕПЛО ВЫДЕЛЯЮЩЕЙ СБОРКЕ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ГАЗООХЛАЖДАЕМЫХ РЕАКТОРОВ В УСЛОВИЯХ НЕСТАЦИОНАРНОСТИ

Проведено числене дослідження теплообміну та гідродинаміки турбулентного потоку в шестигранній тепловиділяючій збірці з сімома стержнями високотемпературних газоохолоджувальних реакторів. Отримано розподіли температур та швидкостей в різні моменти часу.

Проведено численное исследование теплообмена и гидродинамики турбулентного потока в шестигранной тепловыделяющей сборке с семью стержнями высокотемпературных газоохлаждаемых реакторов в условиях нестационарности. Получено распределения температур и скоростей в разные моменты времени.

The investigation of hydrodynamic and heat transfer of turbulent flow in fuel assembly assembly with seven cores of gas cooled fast reactor in unsteady condition is carried out. Distributions of temperatures and velocities are obtained.

c_p – изобарная теплоемкость;
 D – полный дифференциал;
 k – кинетическая энергия турбулентности;
 l – длина;
 p – давление;
 Q – расход;
 q – плотность теплового потока;
 T – температура;
 t – время;
 u – скорость;

ε – скорость диссипации энергии;
 λ – теплопроводность;
 ν – кинематический коэффициент вязкости;
 Π – тензор напряжений;
 ρ – плотность.

Индексы:

g – газ;
 tv – тепловыделяющий элемент;
 i, j – компоненты координат.

Программы INPRO и GIF-IV созданы для решения важных проблем в атомной энергетике, связанных с повышением безопасности, сокращением радиоактивных отходов, улучшением эксплуатационных свойств и с обеспечением нераспространения атомного оружия. Активными участниками этих программ являются наиболее развитые страны мира такие как: США, Япония, Франция, Германия, Россия и другие [1, 2, 3]. Украина тоже включена в состав участников программы INPRO. Данные проекты рассматривают несколько концепций инновационных ядерных энергетических установок, среди которых есть и высокотемпературные газоохлаждаемые реакторы (ВТГР) с гелиевым теплоносителем.

Современная ядерная энергетика ориентирована не только на производство электроэнергии, а и на решение задач связанных с дефицитом органического топлива, такого как нефть и при-

родный газ, основными потребителями которых является металлургическая, химическая и другие отрасли промышленности. ВТГР способны обеспечить потребности промышленности, как в технологическом тепле, так и в электроэнергии.

Конструкция данного типа ядерных установок имеет ряд особенностей и требует осуществления широкого спектра научно-исследовательских работ, связанных с обеспечением безопасной эксплуатации активной зоны, потому что безотказная эксплуатация АКЗ ядерного реактора является одним из главных требований безопасной работы ядерного энергоблока в целом.

В данной статье рассмотрена модель шестигранной семистержневой ТВС активной зоны ВТГР. На рис.1 показана схема исследуемой области с гелием в качестве рабочего тела.

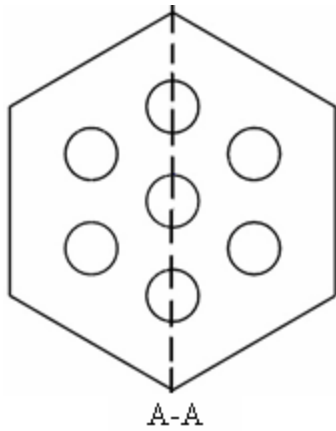


Рис. 1. Шестигранная семистержневая тепловыделяющая сборка.

Математическая модель

В настоящей работе численное исследование процессов гидродинамики и теплообмена в тепловыделяющей сборке проводилось на основе k - ε RNG модели турбулентности [4]. Указанная модель включает уравнения:

движения:

$$\rho \frac{D\vec{V}}{Dt} = \rho \left[\frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + (\vec{V} \cdot \nabla) \vec{V} \right] = -\text{grad}(p) + \text{div}(\Pi), \quad (1)$$

где Div – тензорная дивергенция, вектор \vec{V} имеет координаты (u, v, w) ,

неразрывности:

$$\text{div}(\rho \vec{V}) = 0, \quad (2)$$

энергии:

$$\rho c_p \frac{DT}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\lambda_{\Sigma} \frac{\partial T}{\partial x_i} \right), \quad (3)$$

кинетической энергии турбулентности:

$$\frac{\partial k}{\partial t} + u_i \frac{\partial k}{\partial x_i} = 2\nu S_{ij}^2 - \varepsilon + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\nu_t}{k_k} \frac{\partial k}{\partial x_i} \right), \quad (4)$$

где $k_k = 0,7179$, S_{ij} определяется по формуле:

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$$

Последнее уравнение для замыкания математической модели – уравнение для скорости диссипации энергии:

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + u_i \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} = 2C_{1\varepsilon} \nu \frac{\varepsilon}{k} S_{ij}^2 - C_{2\varepsilon} \frac{\varepsilon^2}{k} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\nu_t}{k_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right), \quad (5)$$

где $k_z = k_k$, $C_{1z} = 1,42$ и $C_{2z} = 1,68$.

Результаты расчета

Расчеты проводились при следующих численных значениях параметров: $T_r = 20^\circ\text{C}$, $T_{\text{ТВ}} = 800^\circ\text{C}$, длина сборки $l = 2,8$ м. Расчеты проводились на сетке, которая разбита на 984760 ячеек. Время расчета вариантов три часа. Закон массового расхода теплоносителя имеет вид:

$$Q = 1,165 e^{0,02t}$$

u , м/с

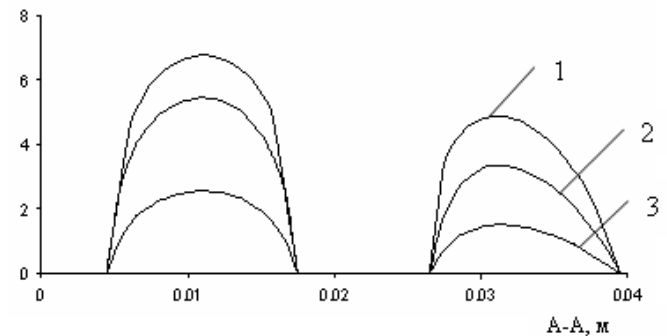


Рис. 2. Распределение профилей скорости в половине сечения А-А на расстоянии 1 м от входа: 1 – начальный момент времени; 2 – через 50 секунд; 3 – через 90 секунд.

На рис. 2 представлены профили распределения скорости для сечения А-А в условии нестационарности. На динамику изменения формы данного профиля оказывает сильное влияние нарастания пограничных слоев и распределение температур (рис. 3). На участке от 0,04 до 0,027 профиль имеет перекося в сторону тепловыделяющего элемента. Это связано с тем, что температура теплоносителя возле тепловыделяющего элемента выше, чем возле внешней стенки и поэтому возле стержня поток движется быстрее за счет уменьшения вязкости. Также из рисунка видно, что скорость теплоносителя увеличивается с истечением времени. Это тоже связано с влиянием тепловыделения на физические свойства теплоносителя.

На рис. 3 представлено динамику распределения температур в половине разреза А-А. Как видно из рисунка, по мере истечения времени поток постепенно прогревается и профиль становится более пологим. В области, которая ближе к внешней стенке (от 0,04 до 0,027) температура выше, чем в области возле центрального стержня (от 0,0045 до 0,017), но при истечении 90 с они становятся одинаковыми.

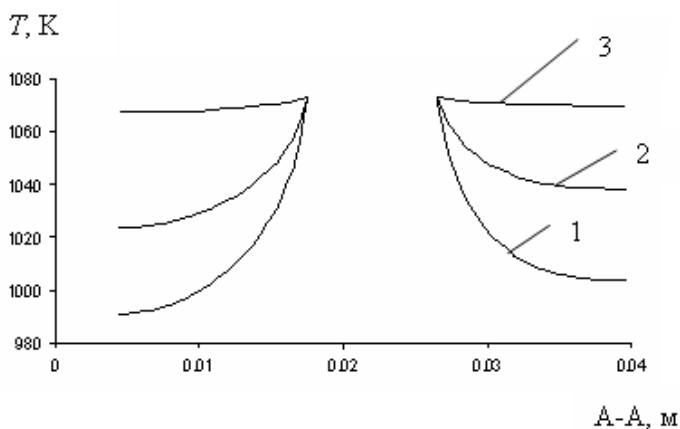


Рис. 3. Распределение профилей температуры в половине сечения А-А на расстоянии 2,5 м от входа: 1 – начальный момент времени; 2 – через 50 секунд; 3 – через 90 секунд.

Выводы

В данной статье изложено результаты численного исследования процессов гидродинамики и теплообмена в шестигранной тепловыделяющей сборке с семью тепловыделяющими элементами на основе RNG $k-\epsilon$ модели турбулентности в условии нестационарности. Эта модель позволяет получить ряд локальных гидроди-

намических и теплофизических характеристик потока теплоносителя. Анализ результатов распределения теплогидравлических параметров гелия в пучке стержней позволяет выявить наличие межканальных перетечек и зон с наиболее интенсивной турбулентностью газового потока, обуславливающих тепло- и массообмен в активной зоне ВТГР.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лабар М.П., Шеной А.С., Симон У.А., Кэмпбэлл Е.М. ЯЭУ GT-MHR на основе модульного реактора с гелиевым теплоносителем и газовой турбиной // Атомная техника за рубежом. – 2005. – №1. – С. 22 - 28.
2. Поплавский В.М. Состояние и перспективы развития АЭС с реакторами на быстрых нейтронах // Теплоэнергетика. – 2004. – №8. – С. 2 - 9.
3. Грэттон К.П. Переоценка концепции реактора на быстрых нейтронах с газовым теплоносителем // Атомная техника за рубежом. – 2004. – №1. – С. 23 - 27.
4. Авраменко А.А., Б.И. Басок Б.И., Кузнецов А.В. Групповые методы в теплофизике. – Киев: Наукова думка, 2003. – 483 с.

Гринченко В.Т.², Воропаев Г.А.², Исаев С.А.¹, Воскобойник В.А.², Розумнюк Н.В.², Воскобойник А.В.²

¹Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации

²Институт гидромеханики НАН Украины

УПРАВЛЕНИЕ ФОРМИРОВАНИЕМ ВИХРЕЙ АСИММЕТРИЕЙ ОБТЕКАЕМОГО УГЛУБЛЕНИЯ

Одним из перспективных направлений управлением пограничным слоем для повышения тепло- и массопереноса, а также снижения гидродинамического сопротивления и гидроакустического шума является искусственное формирование и развитие когерентных вихревых систем, которые имеют контролируемые характеристики. Генерация таких вихревых структур успешно осуществляется с помощью организации луночных рельефов на обтекаемой поверхности, определенной формы, размеров и расположения в ансамбле, которые оптимальным образом проектируются под соответствующие режимы обтекания для получения максимальной эффективности. Это наиболее актуально в нынешних условиях, когда во всем мире раз-

рабатываются и внедряются энергосберегающие комплексы и технологии. Установлено, что перспективной формой локального углубления является асимметричная лунка, в которой генерируются устойчивые когерентные крупномасштабные вихревые системы.

В докладе представлены результаты экспериментальных исследований формирования вихревого течения внутри овальной лунки, расположенной на плоской поверхности, для ламинарного режима ее обтекания различными методами визуализации потока. Эксперименты проводились в гидродинамическом канале со свободной поверхностью воды. Овальная лунка в виде двух соприкасающихся сферических лунок, объединенных цилиндрической вставкой,