

УДК 621.186.1

ДМИТРЕНКО Н.П., АВРАМЕНКО А.А.

Институт технической теплофизики НАН Украины

КОНВЕКТИВНЫЙ ТЕПЛООБМЕН В КАНАЛАХ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ГАЗООХЛАЖДАЕМЫХ РЕАКТОРОВ

В статті проведено апробацію математичної моделі конвективного теплообміну в каналах високотемпературних газоохолоджувальних реакторів. Отримано розподіли температур та коефіцієнта тепловіддачі. Дано порівняльну характеристику газових теплоносіїв з точки зору ефективності їх використання.

В статье проведена апробация математической модели конвективного теплообмена в каналах высокотемпературных газоохлаждаемых реакторов. Получены распределения температур и коэффициента теплоотдачи. Дана сравнительная характеристика газовых теплоносителей с точки зрения эффективности их использования.

We carry out verification of the mathematical model of convective heat transfer in channels of high-temperature gas cooled reactors. The distribution of temperatures and heat transfer coefficients are obtained. A comparative characteristic of gas heat-carriers from the point of view of the efficiency of their using is presented.

c_p – теплоемкость при постоянном давлении;
 d – диаметр;
 G – генерация турбулентной энергии;
 k – кинетическая энергия турбулентности;
 l – характерная длина;
 p – давление;
 q – плотность теплового потока;
 r, z – цилиндрические координаты;
 R – газовая постоянная;
 T – температура;
 Tu – турбулентность;
 u – скорость;
 v – объем;
 α – коэффициент теплоотдачи;
 ε – скорость диссипации энергии;
 λ – коэффициент теплопроводности;
 μ – динамический коэффициент вязкости;
 ν – кинематический коэффициент вязкости;
 τ – касательное напряжение;
 ρ – плотность;
 ЯЭУ – ядерная энергетическая установка;

ВТГР – высокотемпературный газоохлаждаемый реактор.

Индексы:

' – пульсации;
 г – газ;
 ст – стенка;
 тр – труба;
 eff – эффективный параметр;
 m – ось;
 t – турбулентный параметр;
 w – стенка;
 0 – начальный параметр.

Комплексы:

$$Nu = \frac{\alpha l}{\lambda} \text{ – число Нуссельта;}$$

$$Pr = \frac{\mu c_p}{\lambda} \text{ – число Прандтля;}$$

$$Re = \frac{ud}{\nu} \text{ – число Рейнольдса.}$$

Введение

В настоящее время одним из направлений развития реакторостроения является создание высокотемпературных газоохлаждаемых реакторов модульной конструкции [1, 2]. Работы по созда-

нию и совершенствованию газоохлаждаемых реакторов не прекращались с 50-х годов прошлого века. ЯЭУ с модульными реакторами соответствуют требованиям международной программы "GIF-IV" по разработкам ядерных систем четвертого поколения. В связи с этим было отобра-

но шесть концепций реакторов нового поколения, в том числе и концепции газоохлаждаемых реакторов как на тепловых, так и на быстрых нейтронах.

Возрастание интереса к реакторам на быстрых нейтронах связано с возможностью их использования для решения задач минимизации радиоактивных отходов, создания замкнутого ядерного цикла и воспроизводства ядерного топлива. Кроме того, может возникнуть необходимость в высокотемпературной теплоте для производства водорода, газификации угля, производства синтетических газов. Реакторы с водяным и жидкометаллическим охлаждением в этих областях не могут составить конкуренцию ВТГР.

Большое значение приобретают задачи нахождения путей повышения эффективности высокотемпературных газоохлаждаемых реакторов. Одним из путей решения этих задач является поиск теплоносителей, которые по своим теплофизическим и ядерным свойствам могли бы обеспечить наивысший КПД установки.

Газовые теплоносители обладают хорошими ядерными (малое сечение захвата нейтронов) и теплофизическими (теплоемкость и теплопроводность) свойствами.

Широкое использование в зарубежной практике получил углекислый газ (CO_2). Этот газ имеет малое сечение захвата нейтронов, инертен при умеренных температурах, нетоксичен и, что не менее важно, приемлем с экологической точки зрения. На английских газоохлаждаемых реакторах в течение многих лет используется CO_2 в качестве теплоносителя (20% электроэнергии производят реакторы AGR с газовым теплоносителем) [3].

Максимальная температура CO_2 как теплоносителя ограничена, это связано с тем, что, во-первых, при высоких температурах происходит реакция превращения CO_2 в CO при контакте с углеродом, во-вторых, происходит окисление углеродистых сталей при высоких температурах (выше 625 К).

Воздух как теплоноситель газоохлаждаемого реактора не находит широкого применения ввиду его агрессивности при высоких температурах, довольно высокого сечения поглощения нейтронов, возникновения наведенной активности при прохождении через активную зону реактора.

На сегодняшний день первое место в качестве теплоносителя занимает гелий [4]. Гелий как теплоноситель имеет по сравнению с другими газами ряд преимуществ: высокую теплоемкость и теплопроводность (теплопроводность гелия в 5...6 раз превышает теплопроводность большинства газов), коэффициент теплоотдачи к гелию при одинаковых Re в 5...6 раз выше, чем у других газов, термическую и радиационную стойкость, химическую стабильность и инертность к конструкционным материалам, минимальное сечение поглощения нейтронов.

Использование гелия как рабочего тела в гелиевых турбоустановках позволяет повысить КПД энергоустановки при дальнейшем повышении температуры гелия на выходе из реактора. Так, при температуре гелия 900 °С КПД (нетто) достигает 45%, при 1000 °С – 50% [2].

Получение температур гелия на выходе из реактора на уровне 1000 °С позволит в энерготехнологических установках осуществить целый ряд энергоемких процессов, требующих высокопотенциальной теплоты. Имеется несколько возможностей использования гелия с температурой 1000 °С в технологических процессах, например: для конверсии метана, получении чистого водорода, газификации бурых углей, крекинг процесса тяжелых фракций нефти, производства синтетических газов.

Химическая инертность гелия и возможность высокой степени его очистки от примесей в ВТГР дают возможность не использовать стали в качестве защитных покрытий. Это позволяет применять керамическое монокарбидное ядерное топливо с пироуглеродным и арбидокремниевым или ванадиевым защитным покрытием.

К преимуществам применения гелия как теплоносителя можно также отнести:

- возможность использования в качестве топлива карбида урана и плутония, что дает существенное увеличение коэффициента воспроизводства по сравнению с окисным топливом;
- нулевую активность гелия;
- отсутствие существенного замедления им быстрых нейтронов при прохождении через активную зону реактора;
- способность к удерживанию продуктов деления в микротрещинах с керамическими защитными

ми слоями при больших значениях глубины выгорания;

– возможность непосредственного охлаждения микротрещин газовым теплоносителем.

Все эти факторы позволяют ВТГР конкурировать с другими типами реакторов. Основным недостатком гелиевого теплоносителя – трудности отвода теплоты остаточного тепловыделения в аварийных ситуациях при потере герметичности основным контуром и трудность достижения высокой объемной плотности теплового потока при приемлемых затратах энергии на циркуляцию газового теплоносителя.

Целью данной статьи является апробирование математической модели гидродинамики и теплообмена при течении теплоносителей в цилиндрических каналах ВТГР.

Математическая модель

Математическая модель, описывающая режимы течения в круглом канале формируется несколькими уравнениями: неразрывности, движения, переноса теплоты и энергии [5].

$$\frac{\partial}{\partial z}(ru_z) + \frac{\partial}{\partial r}(ru_r) = 0; \quad (1)$$

$$\rho \left(u_z \frac{\partial u_z}{\partial z} + u_r \frac{\partial u_z}{\partial r} \right) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r\tau_{rz}) + \frac{\partial}{\partial z}(\tau_{zz}); \quad (2)$$

$$\rho \left(u_z \frac{\partial u_r}{\partial z} + u_r \frac{\partial u_r}{\partial r} \right) = -\frac{\partial p}{\partial r} + \frac{\partial}{\partial r}(r\tau_{rr}) + \frac{\partial}{\partial z}(\tau_{rz}), \quad (3)$$

где $\tau_{rz} = \mu_{eff} \left(\frac{\partial u_z}{\partial r} + \frac{\partial u_r}{\partial z} \right)$, $\tau_{rr} = (2\mu + \mu_\tau) \frac{\partial u_r}{\partial r}$,

$\tau_{zz} = 2\mu_{eff} \frac{\partial u_z}{\partial z}$ – напряжения, которые входят в

уравнения (2) и (3), $\mu_{eff} = \mu + \mu_t$.

Уравнение переноса теплоты представлено следующим образом:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(\rho r u_r c_p T) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho u_z c_p T) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r q_r) + \frac{\partial}{\partial z}(q_z), \quad (4)$$

где $q_r = \lambda_{eff} \frac{\partial T}{\partial r}$, $q_z = \lambda_{eff} \frac{\partial T}{\partial z}$ – плотность теплового потока, $\lambda_{eff} = \lambda + \lambda_t$.

Уравнение кинетической энергии турбулентности имеет вид:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(\rho r u_r k) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho u_z k) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\mu_{eff}}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\mu_{eff}}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial z} \right) + G_k - \rho \varepsilon. \quad (5)$$

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

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(\rho r u_r \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho u_z \varepsilon) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\mu_{eff}}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\mu_{eff}}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} \right) + \frac{(C_1 \varepsilon G_k - C_2 \rho \varepsilon^2)}{k}, \quad (6)$$

где

$$G_k = \mu_t \left\{ 2 \left(\frac{\partial u_z}{\partial z} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial u_r}{\partial r} \right)^2 + 2 \left(\frac{u_r}{r} \right)^2 + \left(\frac{\partial u_z}{\partial r} + \frac{\partial u_r}{\partial z} \right)^2 \right\},$$

$$\sigma_k = 1,0, \quad \sigma_\varepsilon = 1,3, \quad C_1 = 1,40, \quad C_2 = 1,95.$$

Турбулентная вязкость k - ε – модели: $\mu_{(t)} = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$.

Уравнения состояния газов:

для воздуха и углекислого газа –

$$\left(p + \frac{a}{v^2} \right) (v - b) = RT;$$

для гелия – $v = \frac{RT}{p} - a \left[10T_0 - T \left(1 - 11e^{b \sqrt[4]{pT}} \right) \right],$

где a и b – константы, $T_0 = 273$ К.

Граничные условия для цилиндрического канала с внутренним радиусом r задаем следующим образом:

$$u_z = u_0, \quad u_r = 0, \quad T = T_0, \quad Tu = 5 \% \text{ при } z = 0;$$

$$u_r = u_z = 0, \quad T = T_{ст}, \quad k = 0, \quad \varepsilon = \mu \left(\frac{\partial u_z}{\partial r} \right)^2 \text{ при } r = r_{тр},$$

где $Tu = \frac{1}{u_0} \sqrt{k}$, $k = \frac{\overline{u_r'^2} + \overline{u_z'^2}}{2}$.

Табл. 1. Параметры реальных газов

Газ	a , кПа·дм ⁶ /моль ²	b дм ³ /моль
He	3,45	0,0237
CO ₂	363,7	0,0427
Воздух	135,8	0,0364

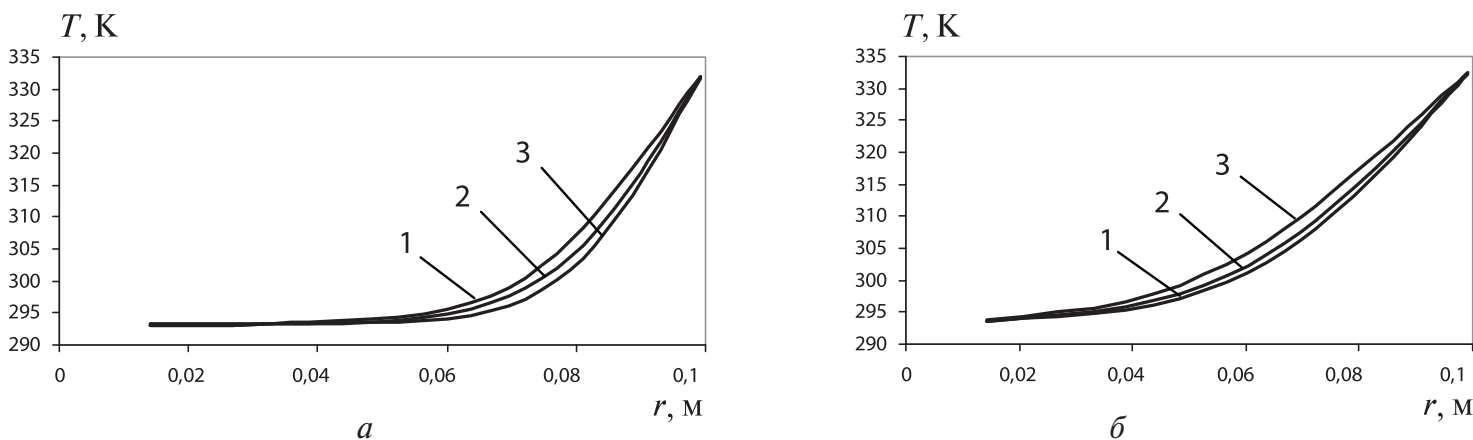


Рис. 1. Распределения температур при ламинарном режиме течения: а) $z = 1$ м, б) $z = 5$ м для разных газов: 1 – He, 2 – воздух, 3 – CO₂.

Метод расчета

Расчетным методом для данной задачи был выбран метод контрольного объема, который ближе к физике моделируемых процессов. Он базируется на физических законах макромира, а не на использовании абстракций математического аппарата непрерывных функций. И в этом его главное преимущество перед другими методами. В качестве алгоритма расчета был выбран алгоритм SIMPLER, описанный в работе [6]. Выбор этого алгоритма обусловлен следующими соображениями:

1. Решение, получаемое при реализации алгоритма, сразу является сходящимся.
2. SIMPLER строит поле давлений по заданному полю скоростей, а не использует предполагаемые давления.
3. В тех случаях, когда поле скоростей окажется точным, в алгоритме SIMPLER уравнение для давления дает точное поле давлений, и нет необходимости в дополнительных итерациях.

Результаты расчета

Расчеты для ламинарного режима течения проводились при таких численных значениях параметров:

$Re = idem = 1500$, $u_{возд} = 0,23$ м/с, $u_{He} = 1,658$ м/с, $u_{CO_2} = 0,111$ м/с, $T_{г} = 20$ °С, $T_{ст} = 220$ °С.

Результаты расчета профилей температур при ламинарном режиме течения, полученные на основе приведенной выше модели, показаны на рис. 1. Как видно из этого рисунка, по мере продвижения потока профили температур деформируются и становятся более пологими. Это обусловлено нарастанием температурных пограничных слоев. Наиболее быстрая деформация профилей температур наблюдается при течении гелия. Соответственно это приводит к тому, что профили температур на стенке имеют наибольшее значение. Это согласуется с поведением коэффициента теплоотдачи (смотри рис. 3, а).

Расчеты для турбулентного режима течения проводились при таких численных значениях параметров: $Re = idem = 20000$, $u_{возд} = 1,54$ м/с, $u_{He} = 11,36$ м/с, $u_{CO_2} = 1,48$ м/с, $T_{г} = 20$ °С, $T_{ст} = 220$ °С.

На рис. 2, а и 2, б представлены аналогичные профили температур (но в безразмерном виде) при турбулентном режиме течения. Эти данные также получены на основе математической модели, представленной выше. Безразмерная температура имеет следующий вид: $\theta = \frac{T - T_m}{T_w - T_m}$.

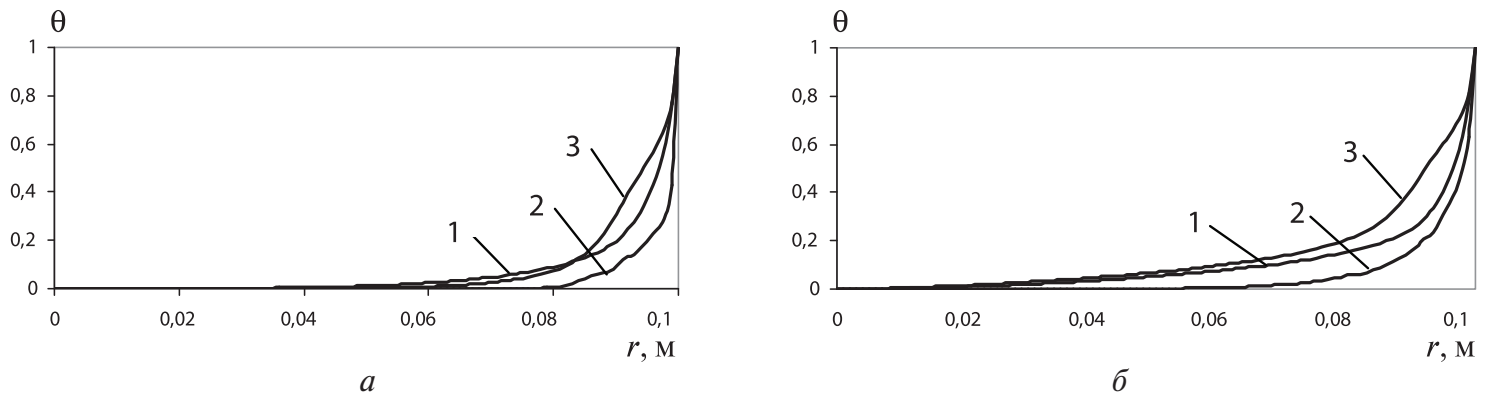


Рис. 2. Распределения температур в безразмерном виде при турбулентном режиме течения: а) $z = 1$ м, б) $z = 5$ м для разных газов: 1 – воздух, 2 – He, 3 – CO_2 .

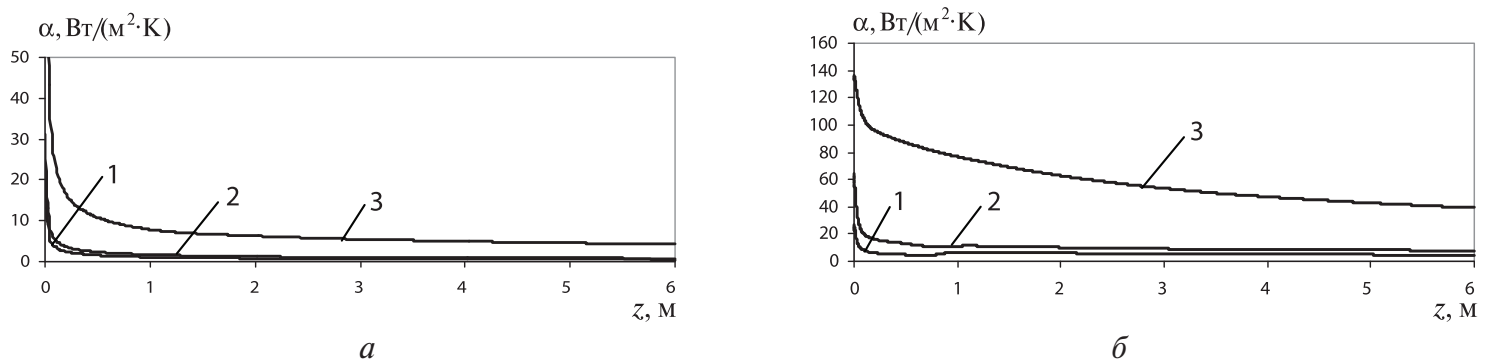


Рис. 3. Зависимости коэффициента теплоотдачи по длине цилиндрического канала при ламинарном (а) и при турбулентном (б) режимах течения для разных газов: 1 – воздух, 2 – CO_2 , 3 – He.

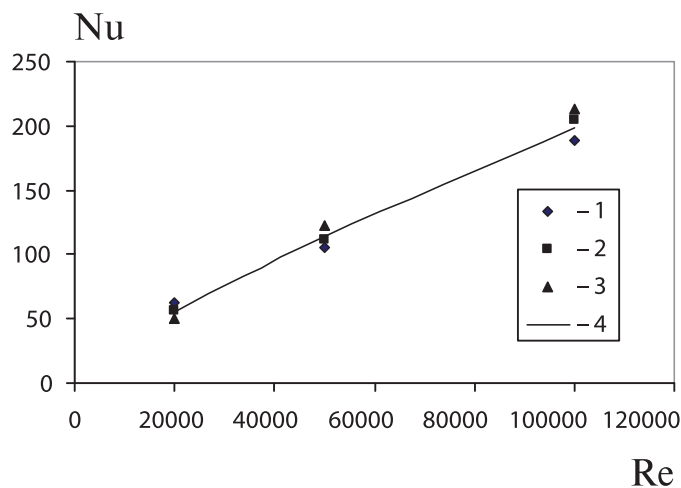


Рис. 4. Зависимость $Nu = f(Re)$ при турбулентном режиме течения разных газов: 1 – воздух, 2 – CO_2 , 3 – He, 4 – эксперимент.

Характер изменения профилей температуры по длине канала подобен поведению профилей температуры при ламинарном режиме течения, однако заполненность профилей при турбулент-

ном режиме течения намного выше. Наиболее заполненную форму имеют профили температур в случае течения гелия.

На рис. 3, а и 3, б представлены распределения коэффициентов теплоотдачи по длине канала при ламинарном и турбулентном режиме течения.

Эти распределения находятся в соответствии с динамикой распределений температур – значения величин коэффициентов теплоотдачи при ламинарном режиме течения ниже, чем при турбулентном, что обусловлено градиентами температур на стенке. Особенно это проявляется в случае течения гелия.

Обобщение результатов расчетов коэффициентов теплоотдачи для турбулентного режима течения с хорошей точностью может быть представлено следующим уравнением [7]:

$$Nu = 0,023 Re^{0,8} Pr^{0,43} \quad (7)$$

На рис. 4 представлены экспериментальные точки, обобщенные кривой ур. 7. Эти данные по-

лучены на высокотемпературном газодинамическом стенде ИТТФ НАНУ.

Выводы

Проведенные расчеты показывают, что с теплофизической точки зрения наиболее оптимальным теплоносителем (из исследованных) является гелий, а также подтверждают тот факт, что гелий занимает доминирующее положение при использовании его в качестве рабочего тела в ВТГР. Его использование в ВТГР позволяет достигать КПД установки в пределах 45...50%.

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. *В.И. Субботин, М.Х. Ибрагимов, П.А. Ушаков и др.* Гидродинамика и теплообмен а атомных энергетических установках. – М.: Атомиздат, 1975. – 408 с.

5. *А.А. Халатов, А.А. Авраменко, И.В. Шевчук.* Теплообмен и гидродинамика в полях центробежных сил. – К., 2000. – 476 с.

6. *Патанкар С.* Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 152 с.

7. *В.П. Исаченко, В.А. Осипов, А.С. Сукомел.* Теплопередача. – М. – Л.: Энергия, 1965. – 428 с.

Получено 14.07.2008 г.