

ГИДРОДИНАМИКА И ТЕПЛООБМЕН В ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ КАНАЛАХ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ГАЗОВЫХ РЕАКТОРОВ

Введение

Высокотемпературные газоохладяемые реакторы (ВТГР) как на быстрых, так и на тепловых нейтронах соответствуют требованиям программы GIF-IV по разработкам ядерных систем четвертого поколения [1, 2]. Ядерные энергетические системы IV-го поколения способны рециклировать большинство опасных составляющих ядерного топлива, существенно снижать количество высокоактивных отходов, подлежащих захоронению.

Возрастание интереса к ВТГР связано не только с вышеперечисленными преимуществами, а также с тем, что сейчас может возникнуть необходимость в высокотемпературной теплоте для производства водорода, газификации угля и производства синтетических газов. Реакторы с водяным и жидкометаллическим охлаждением в этих областях не могут составить конкуренцию ВТГР.

Для реализации вышеизложенных задач в США, Японии, Франции, России и других странах проводятся работы по созданию ВТГР, которые не прекращаются с 50 – х годов прошлого столетия.

Основными проблемами при создании ВТГР специалисты считают разработку замкнутого топливного цикла, создание конструкционных материалов для теплообменных устройств, которые смогли бы работать при температуре 1000°C, а также нахождение путей интенсификации теплообмена.

Одним из путей повышения эффективности ЯЭУ ВТГР является подбор теплоносителей, которые по своим теплофизическим и ядерным свойствам были бы оптимальными для обеспечения наивысшего КПД установки.

Газы практически не активируются, их коррозионная стойкость невелика, поэтому не требуются дорогостоящие материалы. Характерной их особенностью является то, что их можно использовать в качестве теплоносителя и рабочего тела ЯЭУ при высоких температурах, при этом достигается высокий КПД. Также они обладают малым сечением захвата нейтронов.

В качестве газовых теплоносителей используют углекислый газ (CO_2) гелий (He) и диссоциирующие газы. Использование водорода и воздуха ограничено из соображений техники безопасности.

CO_2 достаточно часто используют в реакторах на тепловых нейтронах, так как этот газ имеет малое сечение нейтронов, инертен при умеренных температурах, нетоксичен и, что не менее важно, приемлем с экологической точки зрения. В Великобритании накоплен большой опыт работы с CO_2 в качестве теплоносителя (20% электроэнергии производят реакторы AGR с газовым теплоносителем) [3].

Воздух как теплоноситель газоохладяемого 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.

Использование He в качестве теплоносителя на сегодняшний день является вне конкуренции если учитывать, что углекислый газ обладает химической активностью при высоких

температурах [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) и коэффициент теплоотдачи гелия 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°C КПД (нетто) достигает 45%, при 1000°C – 50% [2].

Получение температур гелия на выходе из реактора на уровне 1000°C позволит в энерготехнологических установках осуществить целый ряд энергоемких процессов, требующих высокопотенциальной теплоты. Имеется несколько возможностей использования гелия с температурой 1000°C в технологических процессах, например: для конверсии метана, получения 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 реакторах ВТГР дают возможность не использовать стали в качестве защитных покрытий. Это дает возможность применять керамическое монокарбидное ядерное топливо с пироуглеродным и арбидокремниевым или ванадиевым защитным покрытием.

Также к преимуществам применения гелия как теплоносителя можно отнести:

- возможность использования в качестве топлива карбида урана и плутония, что дает существенное увеличение коэффициента воспроизводства по сравнению с окисным топливом;
- нулевая активность гелия;
- отсутствие существенного замедления им быстрых нейтронов при прохождении через активную зону реактора;
- способность к удерживанию продуктов деления в микровзлах с керамическими защитными слоями при больших значениях глубины выгорания;
- возможность непосредственного охлаждения микровзлов газовым теплоносителем.

Основной недостаток гелиевого теплоносителя – трудности отвода тепла 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.

Математическая модель

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

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

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

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

где $\tau_{zz} = \mu_{\text{eff}} \left(\frac{\partial u_z}{\partial r} + \frac{\partial u_r}{\partial z} \right)$, $\tau_{rr} = (2\mu + \mu_r) \frac{\partial u_r}{\partial r}$, $\tau_{rz} = 2\mu_{\text{eff}} \frac{\partial u_z}{\partial z}$ – напряжения, которые входят в уравнения (2) и (3), $\mu_{\text{eff}} = \mu + \mu_t$.

Уравнение переноса теплоты представлено следующим образом:

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

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

Уравнение кинетической энергии турбулентности имеет вид:

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

Последнее уравнение для замыкания математической модели – уравнение для скорости

диссипации энергии:

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

где $G_k = \mu_r \left\{ 2 \left(\frac{\partial u_z}{\partial z} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial u_r}{\partial r} \right)^2 + 2 \left(\frac{u_z}{r} \right)^2 + \left(\frac{\partial u_z}{\partial r} + \frac{\partial u_r}{\partial z} \right)^2 \right\}$, $\sigma_k = 1,0$, $\sigma_\varepsilon = 1,3$, $C_1 = 1,40$,

$$C_2 = 1,95.$$

Турбулентная вязкость $k-\varepsilon$ - модели: $\mu = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$.

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

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

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

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

Уравнения состояния газов:

- для воздуха и углекислого газа - $\left(p + \frac{a}{v^2} \right) (v-b) = RT$;
- для гелия - $v = \frac{RT}{p} - a \left[10T_0 - T \left(1 - 11e^{b\sqrt{pT}} \right) \right]$, где a и b - константы, $T_0 = 273 \text{ K}$.

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 следующих численных значениях параметров: $Re = idem = 1500$, $u_{\text{возд}} = 0,1155 \text{ м/с}$, $u_{\text{He}} = 0,829 \text{ м/с}$, $u_{\text{CO}_2} = 0,055 \text{ м/с}$, $T_r = 20^\circ\text{C}$, $T_{\text{ст}} = 220^\circ\text{C}$. Разные скорости для разных газов обеспечивали постоянство числа Рейнольдса.

Результаты расчета профилей скорости по длине канала в трех его разных сечениях при ламинарном режиме течения получены на основе приведенной выше математической модели и показаны на рис.1. Как видно из приведенных рисунков по мере продвижения газового потока профили скоростей деформируются и становятся менее заполненными. Наименее деформируется профиль скорости при течении гелия. Это связано с тем, что численные величины его физических параметров существенно отличаются от этих же параметров воздуха и углекислого газа (особенно плотность при одинаковых условиях). В связи с вышесказанным для стабилизации профиля скорости гелия нужен более длинный разгонный участок.

Расчеты для турбулентного режима течения проводились при следующих численных значениях параметров: $Re = idem = 20000$, $u_{\text{возд}} = 0,77 \text{ м/с}$, $u_{\text{He}} = 5,68 \text{ м/с}$, $u_{\text{CO}_2} = 0,37 \text{ м/с}$, $T_r = 20^\circ\text{C}$, $T_{\text{ст}} = 220^\circ\text{C}$. Как и в случае ламинарного режима течения различные скорости для различных газов обеспечивали постоянство числа Рейнольдса.

На рис. 2 представлены аналогичные профили распределения скорости при турбулентном режиме течения. Эти данные также получены на основе приведенной математической модели. Характер изменения профилей скорости по длине цилиндрического канала при турбулентном

режиме течения для трех газов отличается незначительно, поскольку в данном случае на характер развития потока более сильное влияние оказывает турбулентная природа течения, а не свойства теплоносителя. Это приводит к тому, что зона стабилизации профиля скорости у различных газовых теплоносителей практически совпадает.

На рис.3а и 3б представлено распределение коэффициента теплоотдачи по длине канала при ламинарном и турбулентном режиме течения.

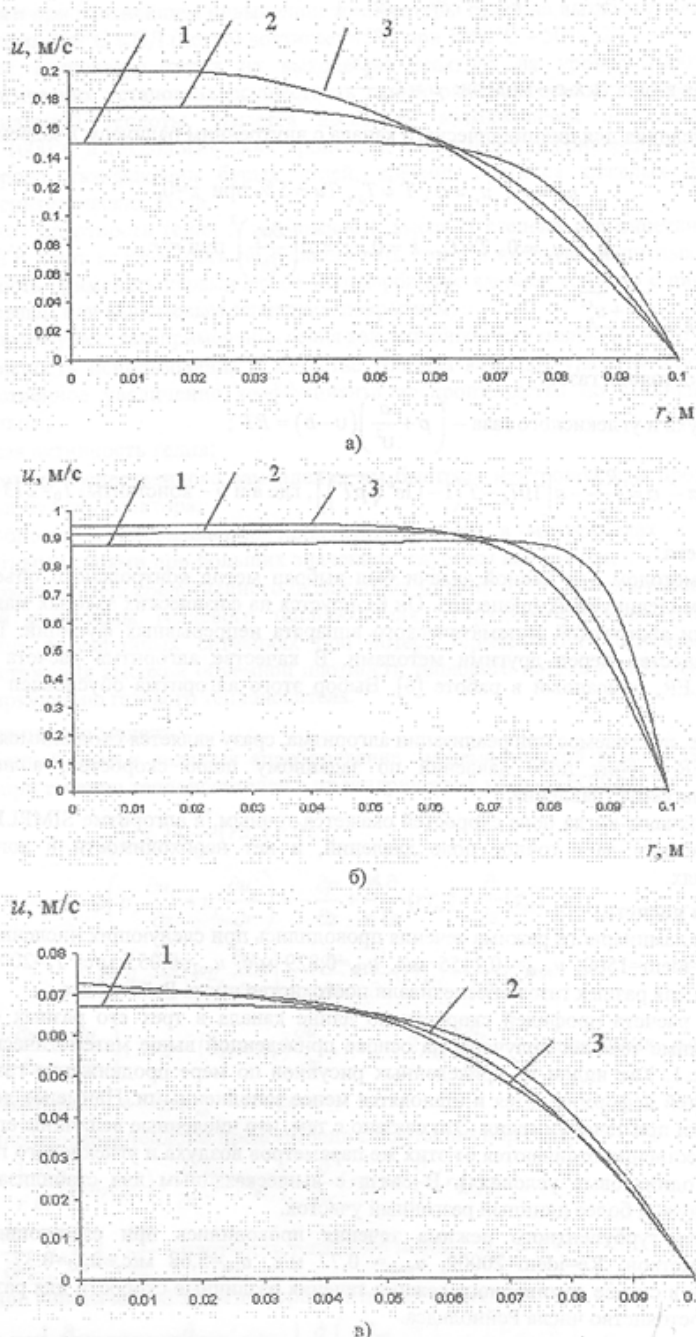


Рис.1. Распределение профилей скорости при ламинарном режиме течения: а) – воздух, б) – He, в) – CO₂ в разных сечениях канала: 1) $z=1$ м, 2) $z=3$ м, 3) $z=5$ м

Как и следовало ожидать, значения величин коэффициентов теплоотдачи при ламинарном режиме течения меньше, чем при турбулентном. Это обусловлено динамикой изменения градиента температур на стенке. Особенно это заметно в случае течения гелия.

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

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

что согласуется с известным критериальным соотношением [7].

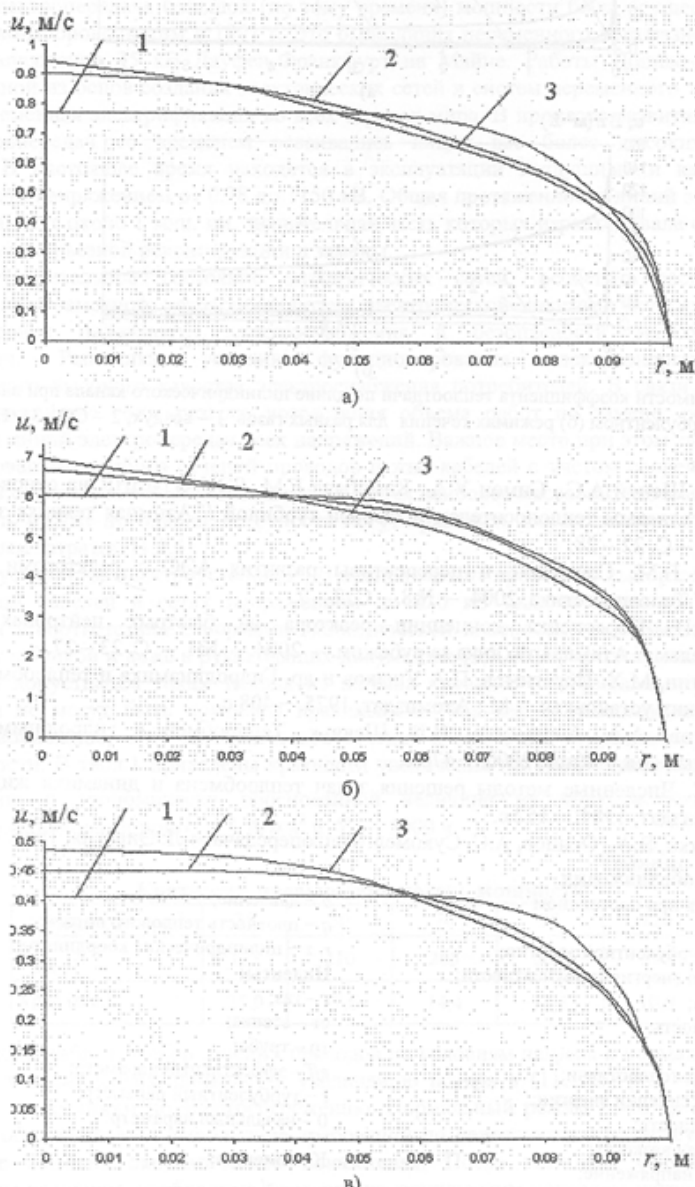


Рис.2. Распределение профилей скорости при турбулентном режиме течения:

а) – воздух, б) – He, в) – CO₂ в разных сечениях канала: 1) $z=1$ м, 2) $z=3$ м, 3) $z=5$ м

Выводы

В данной статье проведено апробацию математической модели теплообмена и гидродинамики в каналах ВТГР, что позволило провести сравнительную оценку использования разных газов в качестве теплоносителей с точки зрения их эффективности. Проведенное

исследование подтверждает тот факт, что гелий является наиболее оптимальным теплоносителем (из рассмотренных) для ВТГР.

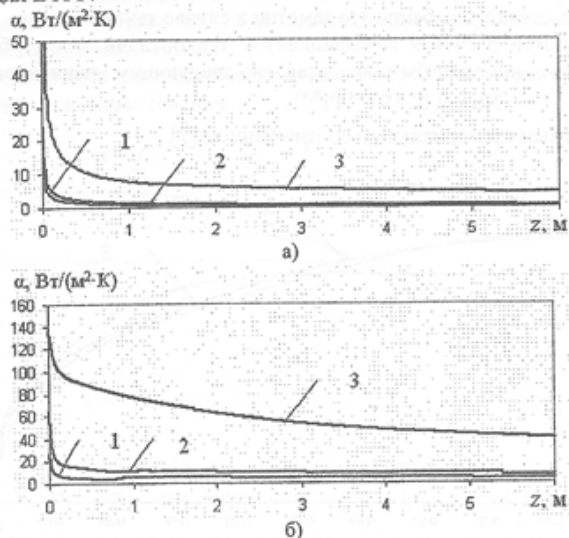


Рис. 3. Зависимости коэффициента теплоотдачи по длине цилиндрического канала при ламинарном (а) и при турбулентном (б) режимах течения для разных газов: 1 – воздух, 2 – CO₂, 3 – He.

Література

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 в 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. – Киев, 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. – Л.: Энергия, 1965. – 428 с.

Условные обозначения

c_p – теплоемкость при постоянном давлении;
 G – генерация турбулентной энергии;
 k – кинетическая энергия турбулентности;
 T – температура;
 T_i – турбулентность;
 u – скорость;
 α – коэффициент теплоотдачи;
 ϵ – скорость диссипации энергии;
 λ – теплопроводность;
 μ – динамическая вязкость;
 τ – касательное напряжение;
 ρ – плотность;
 v – объем;
 ЯЭУ – ядерная энергетическая установка;
 ВТГР – высокотемпературный газоохладительный реактор

p – давление;
 q – плотность теплового потока;
 r, z – цилиндрические координаты;

Индексы:
 $г$ – газ;
 $ст$ – стенка;
 $тр$ – труба;
 eff – эффективный параметр;
 t – турбулентный параметр;
 0 – начальный параметр.

Комплексы:
 $Nu = \frac{\alpha l}{\lambda}$ – число Нуссельта;
 $Pr = \frac{\mu c_p}{\lambda}$ – число Прандтля;
 $Re = \frac{ud}{\nu}$ – число Рейнольдса