

## Исследование процессов теплообмена в модели активной зоны ядерного реактора с гелиевым теплоносителем

*Рассмотрены перспективы многоцелевого использования высокотемпературных газовых (гелиевых) ядерных реакторов. Исследованы процессы гидродинамики и теплообмена в модели активной зоны высокотемпературного ядерного реактора с шаровыми тепловыделяющими элементами. Проанализировано влияние геометрических и режимных параметров на распределение температуры теплоносителя. Представлены результаты расчета нестационарного режима с уменьшением расхода теплоносителя в активной зоне реактора.*

*Ключевые слова:* ядерные реакторы, теплофизические исследования, гелиевый теплоноситель, шаровые тепловыделяющие элементы.

**А. О. Авраменко, М. М. Ковецкая, Н. П. Дмитренко,  
Ю. Ю. Ковецкая**

### Дослідження процесів теплообміну в моделі активної зони ядерного реактора з гелієвим теплоносієм

*Розглянуто перспективи багатопільового використання високотемпературних газових (гелієвих) ядерних реакторів. Досліджено процеси гідродинаміки і теплообміну в моделі активної зони високотемпературного ядерного реактора з кульковими тепловидільними елементами. Проаналізовано вплив геометричних та режимних параметрів на розподіл температури теплоносія. Наведено результати розрахунку нестационарного режиму зі зменшенням витрати теплоносія в активній зоні реактора.*

*Ключові слова:* ядерні реактори, теплофізичні дослідження, гелієвий теплоносіє, кулькові тепловидільні елементи.

Долгосрочные сценарии развития атомной энергетики в мире предусматривают расширение сферы применения ядерных энергетических установок в энергоемких отраслях промышленности для производства водорода, синтетического топлива, а также в теплоснабжении. Основными критериями выбора реакторов многоцелевого назначения являются их безопасность, экологичность и коммерческая привлекательность. Среди инновационных проектов ядерных энергоблоков, разрабатываемых в рамках программы GIF IV (Generation IV International Forum), очень привлекательны для многоцелевого использования проекты энергоблоков с высокотемпературными газовыми (гелиевыми) реакторами (ВТГР) [1–4].

Высокий уровень безопасности ВТГР достигается за счет сочетания свойств внутренне присущей безопасности и конструктивных решений:

- гелиевый теплоноситель не влияет на реактивность;
- графит, используемый в качестве замедлителя и конструкционного материала активной зоны, благодаря высокой теплоемкости аккумулирует теплоту, выделяемую в топливе;

- топливо на основе микрочастиц с термостойким покрытием надежно удерживает радиоактивные продукты деления;

- отрицательный коэффициент реактивности по температуре способствует уменьшению мощности реактора при росте температуры замедлителя.

Разрабатываются проекты энергоблоков с паровым циклом (температура теплоносителя на выходе из реактора 750 °С), с прямым газотурбинным циклом (температура на выходе 850 °С), для технологических производств (температура на выходе 950 °С). Успешная эксплуатация исследовательских ВТГР, начиная с 60-х годов прошлого столетия в Великобритании, США и Германии, показала их высокую надежность и безопасность, низкое радиационное загрязнение первого контура, возможность длительно и стабильно получать температуру гелия на выходе из реактора до 950 °С [5]. Внутренне присущие свойства безопасности исключают возможность расплавления активной зоны реактора при всех возможных аварийных ситуациях, в том числе при полной потере теплоносителя.

Возможность использования ВТГР для электротеплоснабжения и снабжения промышленного производства высокопотенциальной теплотой основывается на высоком уровне безопасности, что позволяет размещать энергоблоки в непосредственной близости от источников потребления теплоты. Кроме того, улучшаются экологические показатели промышленных производств, использующих для получения высокопотенциальной теплоты сжигание органического топлива.

Во многих странах начато или возобновлено проектирование и строительство модульных энергоблоков с ВТГР малой и средней мощности. Некоторые инновационные проекты энергоблоков с ВТГР малой и средней мощности, предусматривающие строительство демонстрационных установок до 2020 года, представлены в табл. 1.

Разрабатываются реакторы с призматической активной зоной и стержневыми твэлами, а также с насыпной активной зоной и шаровыми твэлами. В проектах энергоблоков предусматривается использование как прямого газотурбинного цикла, так и комбинации непрямого газо- и паротурбинного циклов. В США совместно с Россией при поддержке Франции и Японии создается проект энергоблока с модульным гелиевым реактором GT-MHR (Gas Turbine — Modular Helium Reactor) электрической мощностью 287 МВт для сжигания оружейного плутония [6, 7].

Таблица 1. Проекты реакторных установок с ВТГР [2, 4]

Название установки, страна-разработчик	Мощность тепловая/электрическая, МВт	Максимальная температура гелия, °С	Тип твэлов	Назначение
GT MHR, США, Россия	600/287	850	Блочный	Многоцелевое
GT HTR-300, Япония	600/274	850	Блочный	Демонстрационный блок в 2018 г.
ANTARES, Франция	600	850	Блочный	Многоцелевое
HTR-PM, Китай	380/160 458/195	750	Шаровой Блочный	Производство электроэнергии, демонстрационный блок в 2017 г.
PBMR, ЮАР	265/110	900	Шаровой	Коммерческое использование
FAPIG-HTGR, Япония	220/100	850	Шаровой	Многоцелевое
Modul, Германия	200/80	700	Шаровой	Производство электроэнергии Промышленность
MGR-100, Россия	215/100	850	Блочный	Многоцелевое

Наибольших успехов в строительстве демонстрационной установки с гелиевым реактором HTR-PM добился Китай. В настоящее время началась загрузка активной зоны реактора шаровыми твэлами на блоке «Shidao Bay-1»; запуск энергоблока предполагается в конце 2017 года [8].

Германия имеет успешный опыт эксплуатации ВТГР с температурой теплоносителя на выходе 950 °С. Там их планируют использовать главным образом в технологическом процессе газификации бурого и каменного угля для снижения зависимости от нефти и газа.

Исходя из прогнозов развития и потребностей энергорынка, в России выполнен проект прототипной коммерческой реакторной установки МГР с унифицированным модульным гелиевым реактором тепловой мощностью 200 МВт и серией энергоисточников для производства электроэнергии и теплоснабжения с прямым газотурбинным циклом Брайтона (МГР-100ГТ), производства электроэнергии и водорода методом высокотемпературного электролиза пара (МГР-100 ВЭП), производства водорода методом паровой конверсии метана (МГР-100ПКМ), для нефтехимического производства (МГР-100Н) [3].

В зависимости от типа производственного процесса, вероятности попадания радиоактивности в продукт технологического производства и загрязнения радиоактивными продуктами оборудования может применяться двух- или трехконтурная схема реакторной установки.

Модульные высокотемпературные газоохлаждаемые реакторы малой и средней мощности целесообразно добавить и в структуру атомной энергетики Украины для усиления ее энергетической независимости и решения проблемы обеспечения энергоресурсами. Это позволит запустить производство синтетического углеводородного топлива путем паровой конверсии бурого угля, залежи которого имеются в значительном количестве в Кировоградской, Днепропетровской и Харьковской областях [4]. Внедрение модульных ВТГР целесообразно также с точки зрения создания замещающих мощностей в энергетике и экономии органического топлива в энергоёмких технологических процессах промышленных производств.

*Цель статьи* — представить результаты изучения процессов теплообмена в модели активной зоны высокотемпературного ядерного реактора с шаровыми твэлами

и гелиевым теплоносителем. Исследования проведены с использованием трехмерной математической модели турбулентного течения и теплообмена на основе ренормализационно-группового подхода в описании нестационарных процессов и учета эффектов макропористой среды [9, 10]. Математическая модель не описывает кинетику активной зоны ядерного реактора.

Модель активной зоны ядерного реактора рассматривается в виде цилиндрического канала (рис. 1) высотой  $L=1,4$  м и диаметром  $D=4,6$  м. В центральной части канала находится зона с шаровыми твэлами, которая отделена от зоны свободного течения проницаемой стенкой. Зону с шаровыми твэлами можно рассматривать как макропористую среду и использовать для ее описания модель Дарси–Брикмана–Форхаймера [11].

Толщина проницаемой стенки мала по сравнению с диаметром зоны шаровой засыпки (2,6 м) и потому в расчетах не учитывается. Течение теплоносителя направлено сверху вниз, как показано на рис. 1.

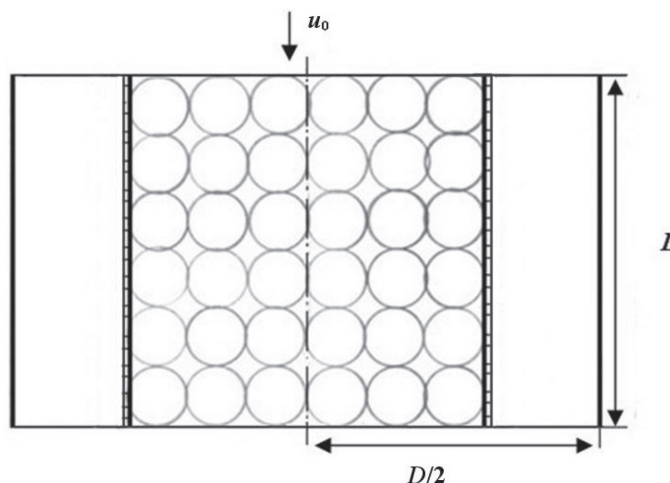


Рис. 1. Схематическое изображение модели активной зоны реактора с шаровой засыпкой (кружочками условно обозначена пористая среда с шаровой засыпкой, без учета масштабов твэлов и элементов конструкции активной зоны)

Математическая модель гидродинамики и теплообмена в активной зоне включает систему уравнений сохранения массы, количества движения, энергии теплоносителя, уравнение кинетической энергии турбулентности и скорости диссипации энергии [11]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_n}{\partial x_n} = 0; \quad (1)$$

$$\left( \frac{\partial}{\partial t} + v \frac{\phi}{K} - J v \nabla^2 \right) u_n = f_n - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_n} - \frac{\partial u_n u_m}{\partial x_m} - H |\mathbf{V}| u_n; \quad (2)$$

$$\left( \frac{\partial}{\partial t} - a \nabla^2 \right) T + \phi \frac{\partial (T u_n)}{\partial x_n} = 0; \quad (3)$$

$$\left( \frac{\partial}{\partial t} + 2v \frac{\phi}{K} - J v \nabla^2 \right) k + \frac{1}{\rho} \frac{\partial (\rho u_n)}{\partial x_n} + \frac{\partial (k u_n)}{\partial x_n} G n - J \varepsilon - 2 H s_n u_n k; \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \left( \frac{\partial}{\partial t} + 2v \frac{\phi}{K} - J v \nabla^2 \right) \varepsilon = & -2v \frac{\partial u_n}{\partial x_l} \frac{\partial u_m}{\partial x_l} \frac{\partial u_n}{\partial x_m} - u_n \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_m} - \\ & -2v \frac{\partial u_n}{\partial x_l} \frac{\partial^2 p}{\partial x_n \partial x_l} - 2J v^2 \left( \frac{\partial^2 u_n}{\partial x_m \partial x_l} \right) - 2vH \frac{\partial u_n}{\partial x_m} \frac{\partial (s_n u_m^2)}{\partial x_m}, \quad (5) \end{aligned}$$

где  $\rho$  — плотность, кг/м<sup>3</sup>;  $t$  — время, с;  $u$  — компонента скорости теплоносителя, м/с;  $x$  — координата;  $v$  — кинематический коэффициент вязкости, м<sup>2</sup>/с;  $\phi$  — объёмная пористость шаровой засыпки;  $K$  — проницаемость, м<sup>2</sup>;  $J = \mu_e / \mu$  — отношение эффективного коэффициента динамической вязкости  $\mu_e$ , Па·с, к коэффициенту динамической вязкости  $\mu$ , Па·с;  $\nabla$  — оператор Лапласа;  $f_n$  — удельная сила, м/с<sup>2</sup>;

$p$  — давление, Па;  $H = \varphi^2 \frac{c_F}{\sqrt{K}}$ ;  $c_F$  — коэффициент Форхаймера, определяемый по формуле  $c_F = 0,55(1 - 5,5d/d_e)$  [12];

$d = 0,06$  м — диаметр твэла;  $d_e$  — эквивалентный диаметр зоны шаровой засыпки, м; для заданных значений геометрических параметров активной зоны  $c_F = 0,45$ ;  $\mathbf{V}$  — вектор скорости;  $a$  — коэффициент температуропроводности, м<sup>2</sup>/с;  $T$  — температура, °С;  $k$  — кинетическая энергия турбулентности, м<sup>2</sup>/с<sup>2</sup>;

$G n = \frac{v}{2} \left( \frac{\partial u_n}{\partial x_n} + \frac{\partial u_m}{\partial x_m} \right)^2$  — генерация турбулентной энергии [11];  $\varepsilon$  — скорость диссипации энергии, м<sup>2</sup>/с<sup>3</sup>;

$s$  — косинус угла между направлением течения потока и вертикальной осью. Индексы  $l, m, n$  в уравнениях (1) — (5) обозначают проекции параметров на оси координат.

На внешней стенке канала задается нулевой тепловой поток.

Проницаемость шаровой засыпки определяется по формуле Козени [12]

$$K = \frac{d^2 \phi^3}{180(1 - \phi^2)}, \quad (6)$$

где  $\phi = 0,25$  — значение, соответствующее кубической упаковке шаровых твэлов. Теплофизические характеристики гелия взяты из [13].

В результате ренормализационно-группового преобразования [14] получена система дифференциальных уравнений, которая решается методом контрольного объема [15].

С целью проверки адекватности используемой RNG  $k$ - $\varepsilon$  модели турбулентности в пористой среде проведены расчеты течения и теплообмена в канале, полностью

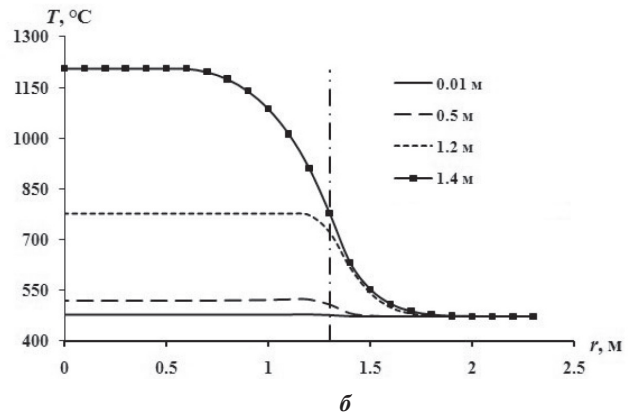
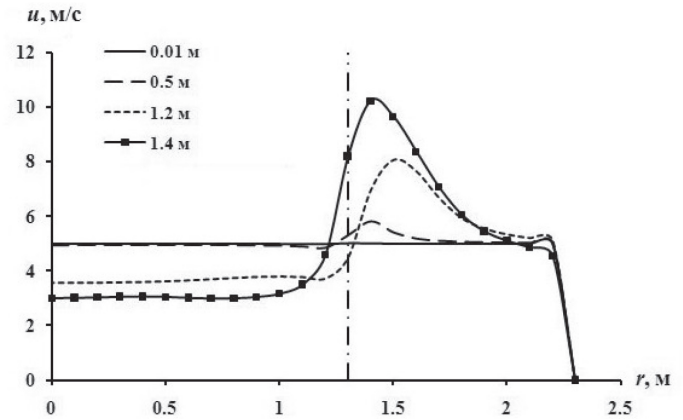


Рис. 2. Распределение скорости (а) и температуры (б) теплоносителя по радиусу  $r$  активной зоны в сечениях на расстоянии от входа 0,01 м; 0,5 м; 1,2 м; 1,4 м (штрих-пунктиром обозначена стенка, разделяющая зону шаровой засыпки и зону свободного течения)

заполненном пористой средой [11]. Сравнение полученных профилей скорости с данными, представленными в [9], показало их удовлетворительное согласование. Это свидетельствует о возможности использования выбранной методики для решения поставленной задачи.

Исследовалось влияние проницаемости зоны шаровой засыпки на течение и теплообмен в рассматриваемой модели активной зоны реактора. При расчете стационарных режимов задавались постоянные значения скорости гелия на входе в канал  $u_0 = 5$  м/с, плотности теплового потока твэлов  $q = 2$  МВт/м<sup>2</sup>, давления в активной зоне 4 МПа, температуры гелия на входе 300 °С.

Распределение скорости и температуры теплоносителя по радиусу и длине активной зоны при  $K = 3,3 \cdot 10^{-7}$  м<sup>2</sup> (значение, рассчитанное по формуле (6)) представлено на рис. 2.

На рис. 2 видно, что в зоне, заполненной шаровой засыпкой (от 0 до 1,3 м), скорость теплоносителя уменьшается, а в зоне свободного течения — в зазоре между насыпной зоной и стенкой канала (от 1,3 м до 2,6 м) — увеличивается. Максимум профиля скорости расположен в зоне свободного течения и сдвинут в сторону стенки, разделяющей зону свободного течения и зону шаровой засыпки (рис. 2, а). Это связано с тем, что плотность теплоносителя возле тепловыделяющей среды меньше, чем возле внешней стенки канала.

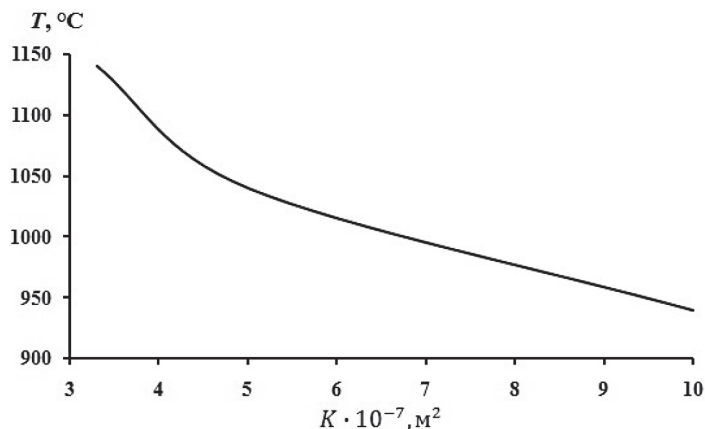


Рис. 3. Зависимость максимальной температуры теплоносителя на выходе из активной зоны от проницаемости шаровой засыпки

Распределение температуры (рис. 2, б) показывает равномерное прогревание теплоносителя по мере его продвижения по каналу. Однако профиль температуры неравномерный по сечению зоны шаровой засыпки. Расчеты показывают, что максимальная температура гелия на выходе активной зоны существенно зависит от проницаемости среды и величины зазора между насыпной зоной и стенкой канала. С уменьшением ширины зоны свободного течения уменьшается максимальная температура на выходе в зоне шаровой засыпки и ее неравномерность по сечению, но увеличивается температура внешней стенки канала. Проведенные расчеты с изменением ширины зоны свободного течения для рассматриваемых значений режимных параметров показали, что оптимальной шириной зоны свободного течения (как с учетом допустимого уровня температуры теплоносителя, так и с учетом надежного охлаждения внешней стенки канала) может быть ширина 0,7 м.

Влияние проницаемости шаровой засыпки на максимальную температуру теплоносителя на выходе из активной зоны в области свободного течения шириной 0,7 м показано на рис. 3.

Уменьшение проницаемости приводит к уменьшению скорости течения теплоносителя и, следовательно, к увеличению его температуры. При  $K < 5 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2$  максимальная температура теплоносителя на выходе активной зоны резко возрастает с уменьшением проницаемости, что может повлиять на безопасность реактора.

Для обоснования безопасности ядерной энергетической установки большое значение имеет моделирование нестационарных и аварийных режимов. Разработанная математическая модель течения и теплообмена в каналах с макропористой средой позволяет выполнять расчеты нестационарных режимов. Исследован нестационарный режим с уменьшением расхода теплоносителя на входе в активную зону реактора в результате останова газодувки. В нестационарном режиме предполагается несрабатывание аварийной защиты по сигналу останова газодувки. Плотность теплового потока на стенках твэлов постоянна и равна 2 МВт/м<sup>2</sup>. Расчет выполнен при  $K = 5 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2$ . Скорость теплоносителя на входе изменяется по экспоненциальному закону  $u = u_0 \exp(-0,02t) \text{ м/с}$ , где  $u_0 = 5 \text{ м/с}$  — начальная скорость;  $t$  — время. Изменение во времени скорости и температуры теплоносителя в разных сечениях по длине активной зоны представлено на рис. 4 и 5.

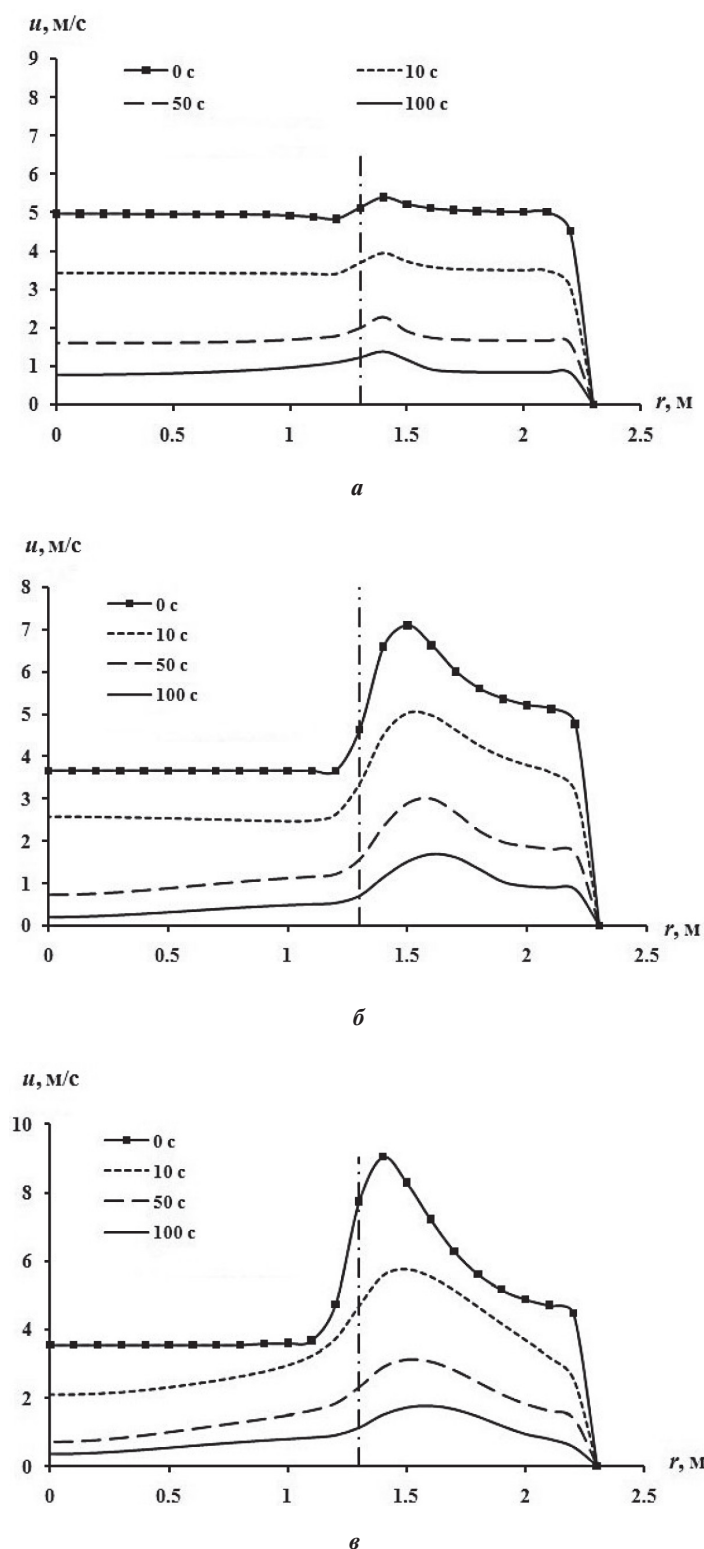


Рис. 4. Распределение скорости теплоносителя в сечениях активной зоны в разные моменты времени на расстоянии от входа: а — 0,01 м; б — 0,5 м; в — 1,4 м

Длительность нестационарного процесса составляет 100 с. Из рисунков видно, что в конце переходного процесса скорость теплоносителя существенно уменьшается, а профиль скорости становится более равномерным по сечению активной зоны.

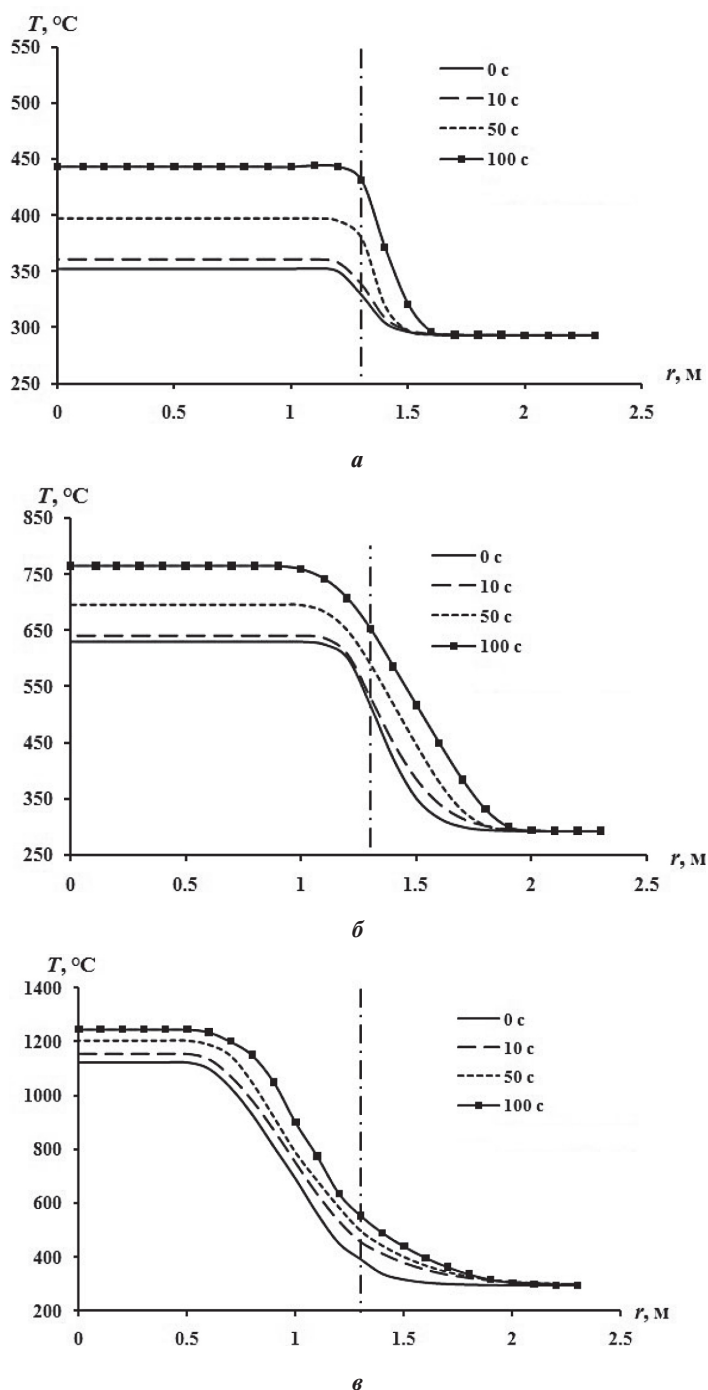


Рис. 5. Распределение температуры теплоносителя в сечениях активной зоны в разные моменты времени на расстоянии от входа: а — 0,01 м; б — 0,5 м; в — 1,4 м

По мере падения расхода максимальная температура теплоносителя увеличивается приблизительно на 100 °С в конце процесса и достигает постоянного предельного значения 1250 °С в выходном сечении активной зоны. В результате переходного процесса длительностью 100 с достигается новое стабильное состояние с теплоотводом.

Отметим, что результаты получены при значении проницаемости насыпной зоны  $K = 5 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2$ . С уменьшением проницаемости максимальная температура на выходе активной зоны в конце нестационарного процесса увеличивается и при  $K = 2,8 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2$  достигает 1400 °С.

В разрабатываемых проектах энергоблоков с ВТГР температура топлива может достигать 1200 °С [16]. В проекте реактора НТР-РМ (Китай) тепловой мощностью 450 МВт максимальная рабочая температура топлива равна 1035 °С, максимальная температура при авариях — 1471 °С. В настоящее время в США, Франции, Германии, России ведутся работы по усовершенствованию конструкции шаровых твэлов, повышению прочности их защитной оболочки, способной оставаться герметичной при повышении температуры до 1600 °С [1].

## Выводы

Разработана  $k$ - $\epsilon$  математическая модель турбулентности с учетом пористости среды, которая позволяет исследовать процессы теплообмена в активной зоне ВТГР с шаровыми твэлами. Исследованы процессы гидродинамики и теплообмена в модели активной зоны высокотемпературного ядерного реактора с гелиевым теплоносителем. Показана зависимость максимальной температуры гелия на выходе активной зоны от проницаемости зоны шаровой засыпки. При  $K < 5 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2$  максимальная температура теплоносителя на выходе активной зоны резко возрастает с уменьшением проницаемости, что может повлиять на безопасность реактора.

Рассмотрен вызванный остановкой газодувки нестационарный режим с уменьшением расхода теплоносителя, без учета срабатывания аварийной защиты. Для заданных геометрических и режимных параметров модели активной зоны и при значении проницаемости зоны шаровой засыпки  $K = 5 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2$  остановка газодувки приводит к увеличению максимальной температуры гелия на 100 °С через 100 с от начала процесса. В результате переходного процесса длительностью 100 с достигается новое стабильное состояние с предельным значением температуры теплоносителя на выходе активной зоны реактора 1250 °С. Дальнейшее изменение во времени тепловых и гидродинамических параметров не наблюдается.

С уменьшением проницаемости максимальная температура на выходе активной зоны в конце нестационарного процесса увеличивается и при  $K = 2,8 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2$  достигает 1400 °С, что может привести к нарушению герметичности оболочек твэлов.

## Список использованной литературы

1. Piro I. Handbook of Generation IV Nuclear Reactors. Technology Engineering. 2016. 940 p. URL: <https://books.google.com.ua/books?isbn=0081001622>
2. Денисевич К. Б., Ландау Ю. А., Нейман В. А., Сулейманов В. Н., Шилев Б. А. Энергетика: история, настоящее и будущее. Развитие атомной энергетики и объединенных энергосистем. 2013. 304 с. URL: <http://energetika.in.ua/ru/books/book-3>
3. Столяревский А. Я., Кодочипов Н. Г., Васяев А. В., Головкин В. Ф., Ганин М. Е. Применение высокотемпературных модульных гелиевых реакторов для теплоснабжения энергоемких производств. *Новости теплоснабжения*. 2011. № 2. С. 39–43.
4. Зеленский В.Ф., Одейчук Н.П., Яковлев В. К., Гуринов В. А. Современное состояние работ по высокотемпературным газохлаждаемым реакторам (ВТГР) в мире и перспективы их применения в Украине. *Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение*. 2009. № 4–2(94). С. 247–255.

5. Авраменко А. А., Ковецкая М. М., Кравчук А. В., Ковецкая Ю. Ю. Перспективные исследования инновационных технологий ядерных энергетических установок. *Промышленная теплотехника*. 2016. Т. 38, № 4. С. 45—60.
6. Pioro I., Kirillov P. Generation IV Nuclear Reactors as a Basis for Future Electricity Production in the World. 2013. P. 818—830. URL: <http://www.formatex.info/energymaterialbook/book/>
7. Бронников В.А. ЯЭУ на основе модуля газовая турбина-реактор с гелиевым (GT—MHR) теплоносителем. *Атомная техника за рубежом*. 2003. № 6. С. 20—22.
8. На китайском ВТГР началась загрузка шаровых твэлов. URL: [www.atomic-energy.ru/news/2017/04/10/74629](http://www.atomic-energy.ru/news/2017/04/10/74629)
9. Avramenko A. A., Kuznetsov A. V. Renormalization Group Model of Large-Scale Turbulence in Porous Media. *Transport in Porous Media*. 2006. № 63. P. 175—193.
10. Авраменко А. А., Дмитренко Н. П., Блинов Д. Г. Ренормализационный анализ нестационарной турбулентности в макропористых средах. *Промышленная теплотехника*. 2010. Т. 32, № 2. С. 19—30.
11. Авраменко А. А., Басок Б. И., Дмитренко Н. П., Ковецкая М. М., Тыринов А. И., Давыденко Б. В. Ренормализационно групповой анализ турбулентности : Монография. К. : ТОВ «Виданично-поліграфічний центр «Експрес», 2013. 300 с.
12. Niedl D. A., Bejan F. Convection in porous media. [3rd ed.]. New York : Springer, 2006. 640 p.
13. Цеберберг Н. В., Попов В. Н., Морозова Н. А. Термодинамические и теплофизические свойства гелия. М. : Атомиздат, 1969. 275 с.
14. Авраменко А. А., Дмитренко Н. П., Тыринов А. И. Ренормгрупповой анализ устойчивости турбулентных потоков в пористых средах. *Инженерно-физический журнал*. 2016. Т. 89, № 3. С. 580—594.
15. Роуч П. Вычислительная гидродинамика. Пер. с англ. М. : Мир, 1980. 616 с.
16. Преображенская Л. Б. Концепции и проекты высокотемпературных реакторов. *Атомная техника за рубежом*. 2010. № 12. С. 3—16.
4. Zelenskii, V.F., Odeichuk, N.P., Yakovlev, V.K., Gurin, V.A. (2009). “Current State of Activities on High-Temperature Gas-Cooled Reactor” [Sovremennoie sostoianie rabot po vysokotemperaturnym gazookhlazhdaemym reaktoram (VTGR) v mire i perspektivy ikh primeneniia v Ukraine], *Problems of Atomic Science and Technology, Physics of Radiation Effects and Radiation Materials Science*, No. 4—2(94), pp. 247—255. (Rus)
5. Avramenko, A.A., Kovetska, M.M., Kravchuk, A.V., Kovetska, Yu. Yu. (2016), “Promising Studies of Innovative Technologies of Nuclear Power Installations” [Perspektivnyie issledovaniia innovatsionnykh tekhnologii yadernykh energeticheskikh ustanovok], *Industrial Heat Engineering*, V. 38, No. 4, pp. 45—60. (Rus)
6. Pioro, I., Kirillov, P. (2013), “Generation IV Nuclear Reactors as a Basis for Future Electricity Production in the World”, pp. 818—830, URL: <http://www.formatex.info/energymaterialbook/book/>
7. Bronnikov, V.A. (2003), “Nuclear Installation, Gas Turbine Modular Helium Reactor (GT—MHR)” [YaEU na osnove modul'ia gazovaia turbina-reaktor s geliyevym (GT—MHR) teplonositelem], *Nuclear Engineering Abroad*, No. 6, pp. 20—22. (Rus)
8. “Loading of Spherical Fuel Assemblies Started at Chinese High-Temperature Gas Cooled Reactors” [Na kitaiskom VTGR nachalas zagruzka sharovykh tvelov], URL: [www.atomic-energy.ru/news/2017/04/10/74629](http://www.atomic-energy.ru/news/2017/04/10/74629). (Rus)
9. Avramenko, A.A., Kuznetsov, A.V. (2006), “Renormalization Group Model of Large-Scale Turbulence in Porous Media”, *Transport in Porous Media*, No. 63, pp. 175—193.
10. Avramenko, A.A., Dmitrenko, N.P., Blinov, D.G. (2010), “Renormalization Analysis of Non-Stationary Turbulence in Macroporous Media” [Renormalizatsionnyi analiz nestatsionarnoi turbulentsii v makroporistykh sredakh], *Industrial Heat Engineering*, Vol. 32, No. 2, pp. 19—30. (Rus)
11. Avramenko, A.A., Basok, B.I., Dmitrenko, N.P., Kovetska, M.M., Tyrinov, A.I., Davydenko, B.V. (2013), “Renormalization Group Analysis of Turbulence” [Renormalizatsionno gruppovoi analiz turbulentsii], Monography, Kyiv, Express Editorial Center, 300 p. (Rus)
12. Niedl, D.A., Bejan, F. (2006), “Convection in Porous Media”, 3rd ed., New York, Springer, 640 p.
13. Tseberberg, N.V., Popov, V.N., Morozova, N.A. (1969), “Thermodynamic and Thermophysical Properties of Helium” [Termodinamicheskie i teplofizicheskie svoystva geliia], Moscow, Atomizdat, 275 p. (Rus)
14. Avramenko, A.A. (2016), Dmitrenko, N.P., Tyrinov, A.I. “Renormalization Group Analysis of Stability of Turbulence Flows in Porous Media” [Renormgruppovoi analiz ustoychivosti turbulentnykh potokov v poristykh sredakh], *Engineering and Physical Journal*, V. 89, No. 3, pp. 580—594. (Rus)
15. Rouch, P. (1980), “Computational Fluid Dynamics” [Vychislitelnaia gidrodinamika], translated from English, Moscow, Mir, 616 p. (Rus)
16. Preobrazhenskaia, L.B. (2010), “Concepts and Designs of High-Temperature Reactors” [Kontseptsii i proekty vysokotemperaturnykh reaktorov], *Nuclear Engineering Abroad*, No. 12, pp. 3—16. (Rus)

## References

Получено 01.08.2017.