

УДК 5621.039.532.21

## ВЛИЯНИЕ ПРОНИЦАЕМОСТИ ШАРОВОЙ ЗАСЫПКИ НА ТЕПЛООБМЕН В АКТИВНОЙ ЗОНЕ ЯДЕРНОГО РЕАКТОРА С ГЕЛИЕВЫМ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕМ

Авраменко А.А., член-кор. НАН Украины, Дмитренко Н.П., к.т.н., Ковецкая М.М., к.т.н., Ковецкая Ю.Ю.

*Институт технической теплофизики НАН Украины, ул. Желябова, 2а, Киев, 03680, Украина*

Досліджено тепломасообмін в моделі активної зони ядерного реактора з шаровими тепловиділяючими елементами і гелієвим теплоносієм. Проаналізовано вплив проникливості зони кулькової засипки та геометричних параметрів на розподіл температури теплоносія в активній зоні реактора.

Исследован тепломассообмен в модели активной зоны ядерного реактора с шаровыми тепловыделяющими элементами и гелиевым теплоносителем. Проанализировано влияние проницаемости зоны шаровой засыпки и геометрических параметров на распределение температуры теплоносителя в активной зоне реактора.

Heat and mass transfer in a model of the core of a nuclear reactor with spherical fuel elements and a helium coolant was studied. The effect of permeability of the pebble bed zone and geometric parameters on the temperature distribution of the coolant in the reactor core is analyzed.

Библ. 13, рис. 5, табл. 1.

**Ключевые слова:** ядерные реакторы, теплофизические процессы, макропористая среда, гелиевый теплоноситель.

### Введение

Среди инновационных проектов ядерных энергоблоков, разрабатываемых в рамках программы GIF IV (Generation IV International Forum), очень привлекательными для многоцелевого использования являются проекты энергоблоков с высокотемпературными газовыми (гелиевыми) реакторами (ВТГР) [1-4].

Возможности использования ВТГР для электротеплоснабжения и снабжения промышленного производства высокопотенциальной теплотой основываются на:

- высоком уровне безопасности, что позволяет размещать энергоблоки в непосредственной близости от источников потребления теплоты;

- улучшении экологических показателей промышленных производств, использующих для получения высокотемпературного тепла сжигание органического топлива.

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, способность длительно и стабильно получать температуру гелия на выходе из реактора до 950 °С [5]. Внутренние присущие свойства безопасности исключают возможность расплавления активной зоны реактора при всех возможных аварийных ситуациях, включая полную потерю теплоносителя.

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 г. представлены в табл. 1. Разрабатываются

реакторы с призматической активной зоной и стержневыми твэлами и насыпной активной зоной с 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 разрабатывается проект энергоблока с модульным гелиевым реактором GT-MHR (Gas Turbine – Modular Helium Reactor) электрической мощностью 287 МВт для сжигания оружейного плутония [6,7]. Германия имеет успешный опыт эксплуатации ВТГР с температурой теплоносителя на выходе 950 °С. Основной сферой применения ВТГР в Германии предполагается газификация бурого и каменного углей 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 на его основе серию энергоисточников для [3]:

- 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;
- нефтехимического производства МГР-100НП.

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

Наибольших успехов в разработке и строительстве демонстрационной установки с гелиевым реактором НТР-PM достигли в Китае. В настоящее время началась загрузка активной зоны реактора шаровыми твэлами на блоке «Shidao Bay-1», запуск энергоблока предполагается в конце 2017 г [8].

Для усиления энергетической независимости Украины и решения проблемы обеспечения энергоресурсами целесообразно добавить в структуру атомной энергетики модульные высокотемпературные газоохлаждаемые реакторы малой и средней мощности. Это позволит создать в Украине производство синтетического углеводородного топлива путем паровой конверсии бурого угля, залежи которого имеются в

значительных количествах 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 энергоемких технологических процессах промышленных производств.

Таблица 1. Проекты высокотемпературных газовых реакторов [1,4]

Название установки, страна разработчик	Мощность тепл./электр. МВт	Максим. температура гелия, оС	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
HTR-PM Китай	380/160 458/195	750	Шаровой Блочный	Произв. эл. энергии Демонстр. блок в 2017г
PBMR ЮАР	265/110	900	Шаровой	Использование в коммерческих целях
FAPIG-HTGR Япония	220/100	850	Шаровой	Многоцелевой
Modul Германия	200/80	700	Шаровой	Произв. эл. энергии Промышленность
МГР-100 Россия	215/100	850	Блочный	Многоцелевой

**Изложение основного материала**

Для оценки безопасности ядерных реакторов с насыпной активной зоной проведено исследование процессов теплообмена в модели активной зоны высокотемпературного газоохлаждаемого ядерного реактора с шаровыми твэлами. 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].

Рассматривается модель активной зоны ядерного реактора (рис. 1) в виде цилиндрического канала высотой 1,4 м, диаметром 4,6 м. В центральной части канала находится зона с шаровыми твэлами, которая отделена от зоны свободного течения проницаемой стенкой. Зону с шаровыми тепловыделяющими элементами можно рассматривать как макропористую среду и использовать для ее описания модель Дарси – Бринкмана – 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. При расчете стационарных режимов задавалось постоянное значение скорости гелия на входе в канал  $w = 5 \text{ м/с}$ . Плотность теплового потока тепловыделяющих элементов  $q = 2 \text{ МВт/м}^2$ , давление в активной зоне 4 МПа, температура гелия на входе 300 °С. На внешней стенке канала задается нулевой тепловой поток. Коэффициент проницаемости шаровой засыпки определяется по формуле [12]

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

где  $d = 0,06 \text{ м}$  – диаметр твэла,  $\varphi = 0,25$  – объемная пористость. Теплофизические характеристики гелия взяты из работы [13].

Исследовалось влияние ширины зазора между зоной шаровой засыпки и стенкой канала на распределение скорости и температуры в активной зоне. На рис. 2, 3 представлены распределения скорости и температуры по длине активной зоны при трех значениях ширины зазора и значении проницаемости шаровой засыпки  $K = 3,3 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2$ . Из рисунков видно, что ширина зоны свободного течения существенно влияет на распределение скорости и температуры в активной зоне реактора с шаровыми твэлами. Во всех вариантах наблюдается уменьшение скорости по длине канала в зоне шаровой засыпки и увеличение в зоне свободного течения. В этой зоне максимум профиля скорости смещается в сторону зоны шаровой засыпки (рис. 2). Это связано с тем, что плотность теплоносителя возле тепловыделяющей среды меньше, чем возле внешней стенки канала.

Величина зазора между насыпной зоной и стенкой канала существенно влияет на распределение температуры как в зоне шаровой засыпки, так и в зоне свободного течения. Увеличение ширины зоны свободного течения приводит к увеличению максимальной температуры теплоносителя на выходе зоны засыпки, а также к увеличению неравномерности температуры по сечению активной зоны, что является

нежелательным. При минимальной рассматриваемой ширине зоны свободного течения (рис. 3,в) наблюдается рост температуры внешней стенки канала, что также не желательно. Поэтому для рассматриваемых значений режимных параметров оптимальным, с точки зрения распределения температуры, значением ширины области свободного течения

может быть значение 0,7 м (рис. 3,б). Выбор оптимального значения ширины зоны свободного течения очень важен как для получения равномерного профиля температуры теплоносителя по сечению зоны шаровой засыпки и максимального значения температуры на выходе, так и надежного охлаждения внешней стенки канала.

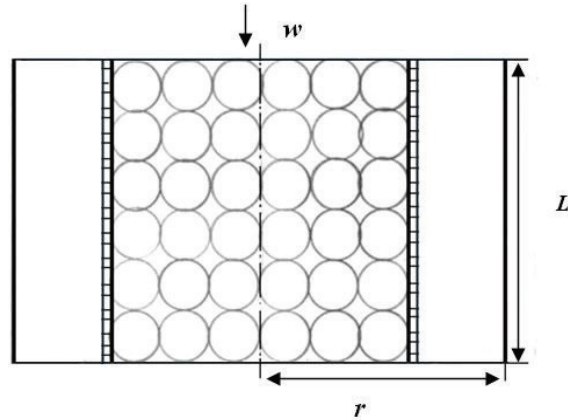


Рис. 1. Модель активной зоны реактора с шаровой засыпкой.

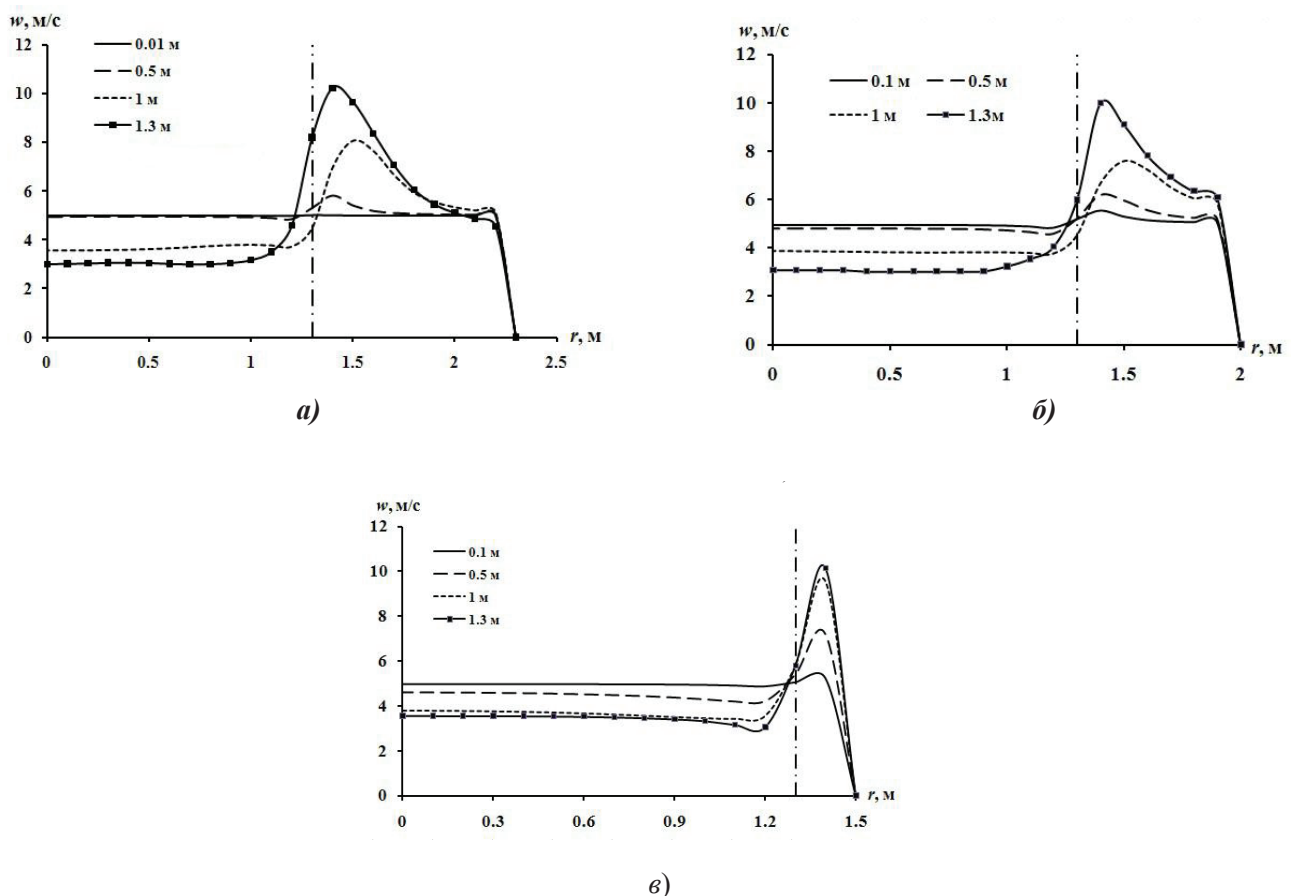


Рис. 2. Распределение скорости теплоносителя по радиусу активной зоны с разным размером внешнего зазора: а)  $r = 2,3$  м; б)  $r = 2$  м; в)  $r = 1,5$  м на расстоянии от входа: 0,01 м; 0,5 м; 1 м; 1,3 м.

Исследовано влияние проницаемости шаровой засыпки на распределение скорости и температуры по сечению активной зоны реактора для оптимального варианта ширины зоны свободного течения 0,7 м. На рис. 4 представлено

распределение скорости (рис. 4,а) и температуры (рис. 4,б) гелия на выходе из активной зоны реактора при различной проницаемости зоны с шаровой засыпкой.

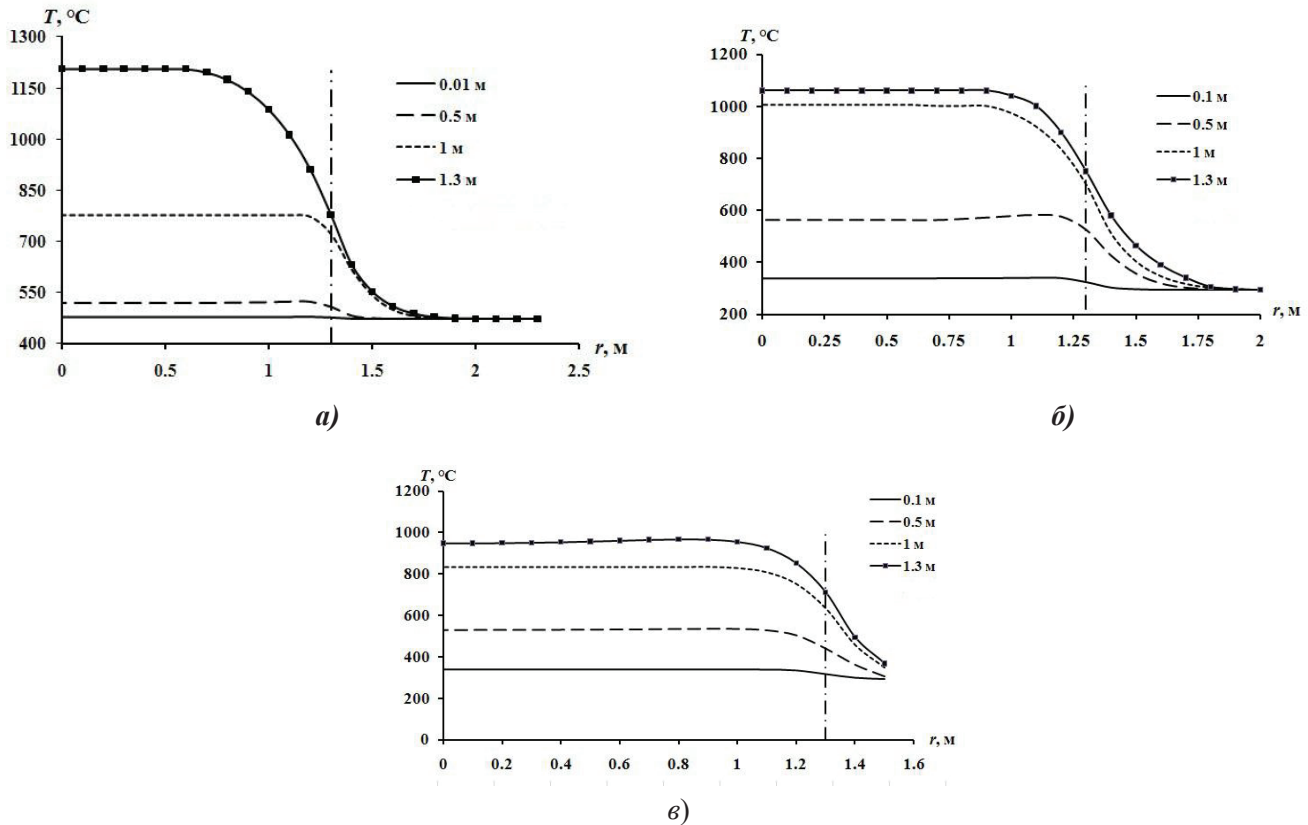


Рис. 3. Распределение температуры по радиусу активной зоны с разным размером внешнего зазора: а)  $r = 2,3 \text{ м}$ ; б)  $r = 2 \text{ м}$ ; в)  $r = 1,5 \text{ м}$  на расстоянии от входа: 0,1 м; 0,5 м; 1 м; 1,3 м. 1,3 м.

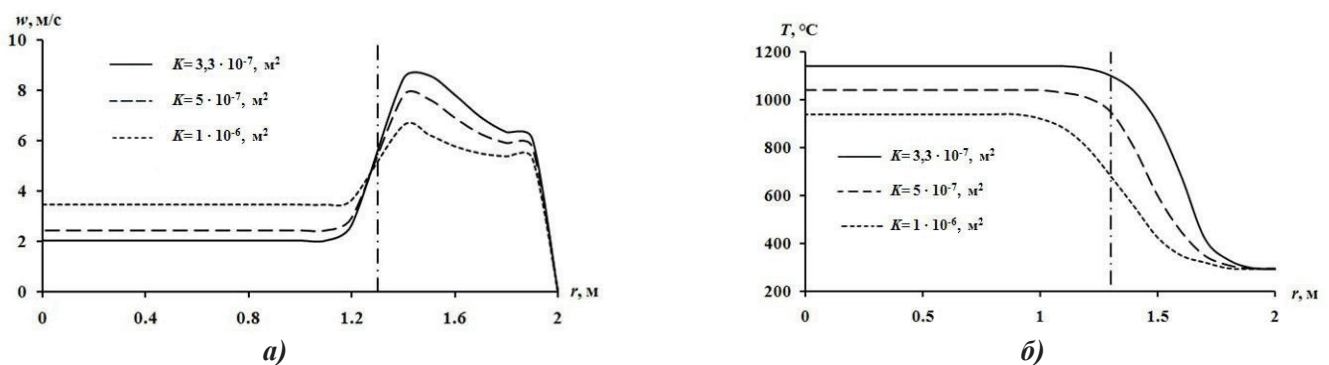


Рис. 4. Распределение скорости (а) и температуры (б) гелия на выходе активной зоны при разной проницаемости среды:  $K = 3,3 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2$ ;  $5 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2$ ;  $10^{-6} \text{ м}^2$ .

На рис. 5 показано влияние проницаемости шаровой засыпки на максимальную температуру теплоносителя на выходе из активной зоны для ширины зоны свободного течения 0,7 м. Уменьшение проницаемости приводит к уменьшению скорости течения теплоносителя и следовательно к увеличе-

нию 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, когда температура теплоносителя достигнет проектного предельно допустимого значения  $1200 \text{ } ^\circ\text{C}$ .

### Выводы

Для исследования процессов теплообмена в модели активной зоны высокотемпературного газового (гелиевого) ядерного реактора с шаровыми твэлами использована математическая модель в приближении пористого тела. Показана зависимость максимальной температуры гелия на выходе активной зоны от проницаемости зоны шаровой засыпки и ширины зоны свободного течения.

С уменьшением проницаемости зоны шаровой засыпки при  $K < 5 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2$  максимальная температура теплоносителя на выходе активной зоны резко возрастает, что может повлиять на безопасность реактора.

Выбор оптимального значения ширины зоны свободного течения очень важен, как для достижения равномерной температуры гелия по сечению зоны шаровой засыпки и максимальной температуры на выходе, так и надежного охлаждения внешней стенки канала.

Для рассматриваемых значений режимных параметров оптимальной шириной области свободного течения, как для допустимого уровня температуры теплоносителя, так и надежного охлаждения внешней стенки канала, может быть величина 0,7 м.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Денисевич К.Б., Ландау Ю.А., Нейман В.А., Сулейманов В.Н., Шляев Б.А. Энергетика: история, настоящее и будущее. Книга 4. Развитие атомной энергетики и объединенных энергосистем. 2012–2013.
2. Гребенник В.Н., Кухаркин Н.Е., Пономарев-Степной Н.Н. Высокотемпературные газоохлаждаемые реакторы – инновационное направление развития атомной энергетики. М.: Энергоатомиздат. «2008. « 135с.
3. Столяревский А.Я., Кодочипов Н.Г., Васяев А.В., Головко В.Ф., Ганин М.Е. Применение высокотемпературных модульных гелиевых реакторов для теплоснабжения энергоемких производств [электронный ресурс] / Столяревский А.Я., Кодочипов Н.Г., Васяев А.В., Головко В.Ф., Ганин М.Е. // www.

rosteplo.ru/Tech\_stat/nie\_2434.htm

4. Зеленский В.Ф. Современное состояние работ по высокотемпературным газоохлаждаемым реакторам (ВТГР) в мире и перспективы их применения в Украине / Зеленский В.Ф., Одейчук Н.П., Яковлев В.К., Гурин В.А. // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение. «2009. « №4 – 2(94). – С.247–255.

5. Преображенская Л.Б. Конструкции и проекты высокотемпературных реакторов / Преображенская Л.Б. // Атомная техника за рубежом. –2010. –№12. – С.3–16.

6. Pioro I., Kirillov P. Generation IV Nuclear Reactors as a Basis for Future Electricity Production in the World. [electronic resource] /Pioro I., Kirillov P.// <http://www.formatex.info/energymaterialbook/book/>. –2013. – p.818– 830.

7. Бронников В.А. ЯЭУ на основе модуля газовая турбина-реактор с гелиевым (GT-MHR) теплоносителем / Бронников В.А. // Атомная техника за рубежом. – 2003. – №6. – С.20 – 22.

8. [www.atomic-energy.ru/news/2017/04/10/74629](http://www.atomic-energy.ru/news/2017/04/10/74629)

9. Avramenko A.A. Renormalization Group Model of Large-Scale Turbulence in Porous Media / Avramenko A.A., Kuznetsov A.V // 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 / Авраменко А.А., Дмитренко Н.П., Блинов Д.Г. //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. Виданично-поліграфічний центр «ЕКСПРЕС». –2013. –300с.

12. Nield 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.

**EFFECT OF PERMEABILITY OF PEBBLE BED ON HEAT TRANSFER IN THE CORE OF NUCLEAR REACTOR WITH HELIUM COOLANT**

**Avramenko A.A., Dmitrenko N.P., Kovetskaya M.M., Kovetskaya Yu.Yu.**

Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine,  
st. Zhelyabova, 2a, Kyiv, 03680 Ukraine

To study the heat transfer processes in the model of core of a high-temperature gas (helium) nuclear reactor with ball fuel elements, a renormalization group model of turbulence is used. This model taking into account the porosity of the medium. The dependence of the maximum helium temperature at the outlet of the core on the permeability of the pebble bed zone and the width of the free flow zone is presented.

In the paper we consider cases with different values of the width of the free-flow zone. This geometric dimension is very important, both to achieve an even distribution of the helium temperature over the cross-section of the pebble bed zone and the maximum exit temperature, and for reliable cooling of the outer wall of the channel. For the considered values of the regime parameters, the optimum width of the free flow region, both for the permissible level of the coolant temperature and for the reliable cooling of the outer wall of the channel, can be 0.7 m. References 13, tables 1, fig. 5.

**Key words:** nuclear power plant, thermophysical processes, macroporous medium, helium coolant.

1. *Denisevich K.B., Landay Yu.A., Neyman V.A., Cyleimanov V.N., Shilyaev B.A.* Tsergetika: istoria, nastoyashee i buduyeshee. Kniga 4. Razvitie atomnoy energetiki i obedyonnykh energosistem. [Energy: history, present and future. Book 4. Development of nuclear power and integrated power systems]. 2012 – 2013. (Rus)

2. *Grebennik K.V., Kuharkin N.E., Ponomarev-Stepnoy N.N.* Vusokotemperaturnue gazoolagdaemue reaktoru – innivatsionnoe napravlenie razvitiya atomnoy energetiki. [High-temperature gas-cooled reactors innovative direction of development of nuclear energy]. M: Energoatomizdat, 2008, 135 p. (Rus)

3. *Stoliarevskiy A. Ya., Kodochipiv N.G., Vasyaev A.V., Golovko D.F., Ganin M.E.* Primenenie vusokotemperaturnykh modulnykh geliyevykh reaktorov dlya teplosnabgeniya energoemkikh

proizvodstv. [Application of high-temperature modular helium reactors for heat supply of energy-intensive industries], [electronic recourse]: [www.rosteplo.ru/Tech\\_stat/nie\\_2434.htm](http://www.rosteplo.ru/Tech_stat/nie_2434.htm) (Rus)

4. *Zelenskiy V.F., Odeychuk N.P., Yakoblev V.K., Gurin V.A.* Sovremennoe sostoyanie rabot po vusokotemperaturnum gazoolagdaemum reaktoram (VTGR) v mire i perspektivu ih ispolzovania v Ukraine. Voprosu atomnoy nauki i tehniki. Seriya: Fizika radiatsionnykh povregdeniy i radiatsionnoe materialovedenie. [Current state of work on high-temperature gas-cooled reactors (HTGR) in the world and prospects for their use in Ukraine]. 2009, №4, 2(94), pp. 247 – 255. (Rus)

5. *Preobrazhenskaya L.B.* Konstruktsii i proektu vusokotemperaturnykh reaktorov. [Designs and projects of high-temperature reactors]. Atomnaya tehnika za rubezhom [Nuclear technology abroad]. 2010, №12, pp. 3– 16. (Rus)

6. *Piolo I., Kirillov P.* Generation IV Nuclear Reactors as a Basis for Future Electricity Production in the World. [electronic resource]: <http://www.formatex.info/energymaterialbook/book/>. 2013. pp. 818 – 830.

7. *Bronnikov B.A.* YaEU na osnove modulya gazovaya turbine-generator s geliyevum (GT-MHR) teplonositelem. [Nuclear power unit based on gas turbine-reactor module with helium (GT-MHR) coolant]. Atomnaya tehnika za rubezhom [Nuclear technology abroad]. 2003, №6, pp. 20–22. (Rus)

8. [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, pp. 75–193.

10. *Avramenko A.A., Dmitrenko N.P., Blinov D.G.* Renormalizatsionnyy analiz nestatsionarnoy turbulentnosti v makroporistuh sredah. [Renormalization analysis of nonstationary turbulence in macroporous media]. Promyshlennaya teplotekhnika [Industrial Heat Engineering], 2010, T. 32, №2, pp. 19–30. (Rus)

11. *Avramenko A.A., Basok B.I., Dmitrenko N.P., Kovetskaya M.M., Tyrinov A.I., Davudenko B.V.* Renormalizatsionno grupovoy analiz turbulentnosti. [Renormalization-group analysis of turbulence]. Vudavnucho poligrafichnuy tsentr “EKSPRES”. 2013. – 300 p. (Rus)

12. *Niedl D.A., Bejan F.* Convection in porous media. [3rd ed.] New York: Springer. 2006. 640 p.

13. *Tsederberg N.V., Popov B.N., Morozova H.A.* Termodinamicheskie s teploaszhicheskie svoystva gelia. [Thermodynamic and thermophysical properties of helium]. M. Atomizdat. 1969. 275 p. (Rus)

Получено 13.07.2017

Received 13.07.2017