

Экспериментальные исследования гидравлических характеристик дистанционирующих ячеистых решеток

© В.Г. Крапивцев, В.А. Гуров

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

Представлены результаты экспериментальных исследований и сравнительного анализа гидравлических характеристик дистанционирующих ячеистых решеток тепловыделяющих сборок реакторов ВВЭР. Приведено описание фрагментов используемых решеток, рабочего участка и аэродинамического стенда. Определен коэффициент гидравлического сопротивления дистанционирующих решеток с ячейками различных типов.

Ключевые слова: *вода-водяной энергетический реактор, тепловыделяющая сборка, тепловыделяющий элемент, дистанционирующая решетка, интенсификация теплообмена, статическое давление, коэффициент гидравлического сопротивления.*

В настоящее время в мировой энергетике в качестве энергетических ядерных реакторов широко применяют корпусные водо-водяные реакторы под давлением PWR. Аналогичные реакторы ВВЭР-440 и ВВЭР-1000, применяемые в России, обеспечивают до 50 % выработки электроэнергии на АЭС [1, 2]. Стратегия развития ядерной энергетики России строится на использовании усовершенствованных реакторов данного типа [3]. Усовершенствование реакторов ВВЭР, прежде всего, связано с повышением их мощности и эффективности использования ядерного топлива за счет достижения значительных глубин его выгорания, а также увеличения длительности топливной кампании. Достижение этих целей связано с повышением безопасности и эксплуатационной надежности используемого ядерного топлива и усовершенствованием элементов тепловыделяющих сборок (ТВС) реакторов ВВЭР. Одним из таких элементов в конструкции ТВС реакторов ВВЭР является дистанционирующая решетка, обеспечивающая надежное дистанционирование пучка тепловыделяющих элементов — твэлов — на весь период топливной кампании и интенсификацию теплообмена в нем. При этом гидравлические характеристики решетки должны быть минимизированы для снижения потерь давления потока теплоносителя в активной зоне реактора.

В предлагаемой работе приведены результаты экспериментальных исследований гидравлических характеристик ячеистых дистанционирующих решеток, обеспечивающих одновременно дистанционирование твэлов в пучке ТВС и перемешивание потока теплоносителя в объеме пучка. Перемешивание интенсифицирует теплосъем и спо-

способствует увеличению запаса до кризиса теплообмена. Существует достаточно много способов дистанционирования твэлов и конструктивных решений дистанционирующих решеток [4, 5]. Исследованию гидродинамических и перемешивающих характеристик решеток с различной конфигурацией ячеек посвящен ряд работ [6–9].

В данной работе приводятся результаты исследования гидравлических характеристик решеток. В экспериментальном исследовании использовали 19-ячеистые фрагменты

дистанционирующих решеток трех типов для реакторов ВВЭР, изготовленные ПАО «Машиностроительный завод». Решетки первого типа (рис. 1) выполнены из ячеек, дистанционирующие элементы которых — пуклевки — направлены вдоль потока теплоносителя. Решетки двух других типов сформированы из ячеек с наклонными к продольному направлению потока пуклевками (рис. 2). Причем в решетке типа Б пуклевки соседних рядов ячеек имеют разное направление, а в решетке типа В — одинаковое. Наклон пуклевок относительно продольного направления в ячейках обеспечивает лучшее перемешивание потока. Та-

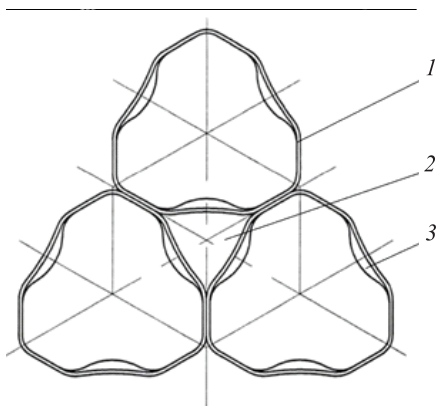


Рис. 1. Схема расположения ячеек центральной поля дистанционирующей решетки (тип А):

1 — ячейка; 2 — канал для прохода теплоносителя между ячейками; 3 — элемент крепления твэла (пуклевка)

ким образом, эти решетки являются не только дистанционирующими, но и обеспечивающими интенсификацию процесса теплообмена.



a



б

Рис. 2. Внешний вид ячеек дистанционирующей решетки с перемешивающими свойствами:

a — тип Б; *б* — тип В

Каждый из трех типов фрагментов решетки выполнен из 19-ти штампованных ячеек с толщиной стенки 0,25 мм, в которых с шагом 12,75 мм размещены имитаторы твэлов диаметром 9,15 мм. Фрагмент каждого типа имеет внешний размер «под ключ» 57 мм. Высота ячеек фрагмента типа А — 35 мм, а двух других типов — 20 мм.

Для проведения исследований изготовлены рабочие участки, состоящие из твэльного пучка, исследуемого фрагмента дистанционирующей решетки и двух концевых решеток, обеспечивающих дистанционирование имитаторов твэлов в пучке и крепление его в шестигранном чехле аэродинамического стенда (рис. 3). Конструкции участков различаются тем, что для фрагмента решетки типа А использованы имитаторы твэлов длиной 1 186 мм при длине канала (чехла), имеющего разъем в средней части, 1 200 мм, а для фрагментов типов Б и В — длиной 1 000 мм при длине неразъемного канала 1 040 мм. Исследуемый фрагмент решетки фиксировался в пучке на расстоянии 550 мм от входа в пучок.

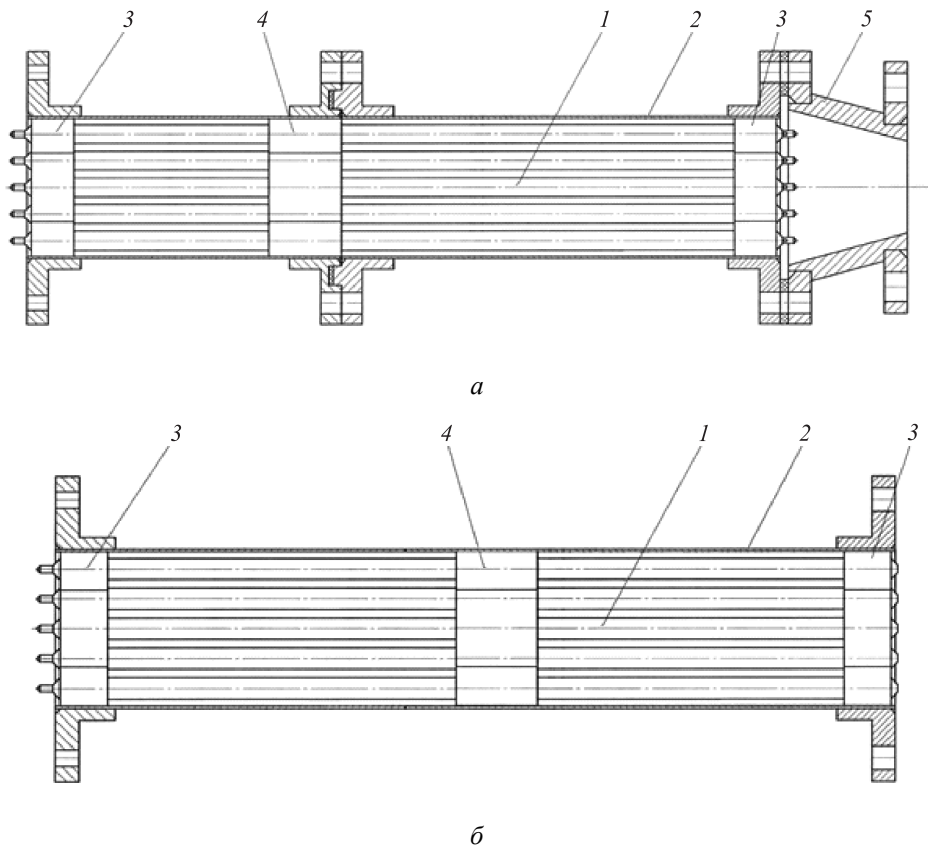


Рис. 3. Конструктивные схемы рабочих участков для исследования гидравлических характеристик фрагмента дистанционирующей решетки типа А (а) и типов Б и В (б): 1 — имитатор твэла; 2 — чехол; 3 — концевая решетка; 4 — исследуемая решетка; 5 — выходное устройство

Шестигранный канал в сборе устанавливали в аэродинамический стенд. Схема стенда приведена на рис. 4.

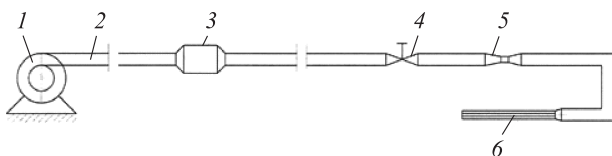


Рис. 4. Схема аэродинамического стенда:
1 — воздуходувка; 2 — напорный трубопровод; 3 — бак-ресивер; 4 — шибер; 5 — сопло Вентури; 6 — рабочий участок с моделью ТВС

Стенд представляет собой открытый контур подачи модельной среды (воздуха) к исследуемому твэльному пучку с фрагментом дистанционирующей решетки. Четырехступенчатая воздуходувка обеспечивает подачу воздуха в напорные трубопроводы стенда с массовым расходом до 1 кг/с и напором до 0,02 МПа. Регулирование расхода воздуха в контуре осуществляется шибером и контролируется расходомером, выполненным в виде трубы Вентури. Для устранения пульсаций расхода (помпажа) воздуходувки на входном участке напорного трубопровода установлен бак-ресивер объемом примерно 20 м³.

При проведении экспериментов измеряли следующие параметры потока:

- расход воздуха G , кг/с, через фрагмент твэльного пучка;
- распределение статического давления $p_{ст}$, Па, в потоке воздуха по длине твэльного пучка до и после исследуемого фрагмента дистанционирующей решетки;
- температуру воздуха T , °С, в потоке;
- атмосферное давление $p_{атм}$, Па.

Расход воздуха определяли по тарировочной зависимости расходомерного устройства — трубы Вентури, полученной в предварительных тарировочных испытаниях:

$$G = 0,0212\sqrt{\Delta p_{в}\rho_{в}}, \quad (1)$$

где G — массовый расход воздуха; $\Delta p_{в}$, $\rho_{в}$ — перепад давления и плотность потока воздуха в трубе Вентури.

Перепад давления потока воздуха на расходомерном устройстве измеряли с помощью водяного U -образного манометра с ценой деления 1 мм. Для определения плотности воздуха в потоке посредством барометра-анероида с ценой деления шкалы 133,32 Па измеряли атмосферное давление, температуру воздуха — электронным термометром WT-388 с ценой деления 0,1 °С.

Коэффициент гидравлического сопротивления фрагментов решеток определяли по формуле [10]

$$\zeta = \frac{2\Delta p}{\rho v^2}, \quad (2)$$

где Δp — перепад статического давления на исследуемом фрагменте; $2/\rho v^2$ — динамический напор, определенный по параметрам потока перед исследуемым фрагментом решетки; v — скорость потока.

Для определения перепада статического давления на исследуемом фрагменте решетки измеряли распределения статического давления в потоке теплоносителя в межत्वальном пространстве. Для фиксации статического давления в потоке на одной из граней шестигранного чехла выполнены отверстия с шагом 50 мм для отбора давления диаметром 1 мм. В канале для исследования фрагмента типа А — 22 отверстия, а в канале для фрагментов типов Б и В — 19 отверстий. К отверстиям отбора статического давления через штуцеры на грани канала с помощью капиллярных трубок подсоединен датчик измерения давления «Сапфир». Измеряемое значение отображается на панели датчика.

Распределения статического давления перед исследуемым фрагментом и за ним аппроксимировались прямыми линиями (рис. 5). По перепаду давления на фрагменте определяли значение потерь давления Δp при трех режимах (см. рис. 5, 1–3) течения потока, характеризующихся соответствующими значениями чисел Рейнольдса Re .

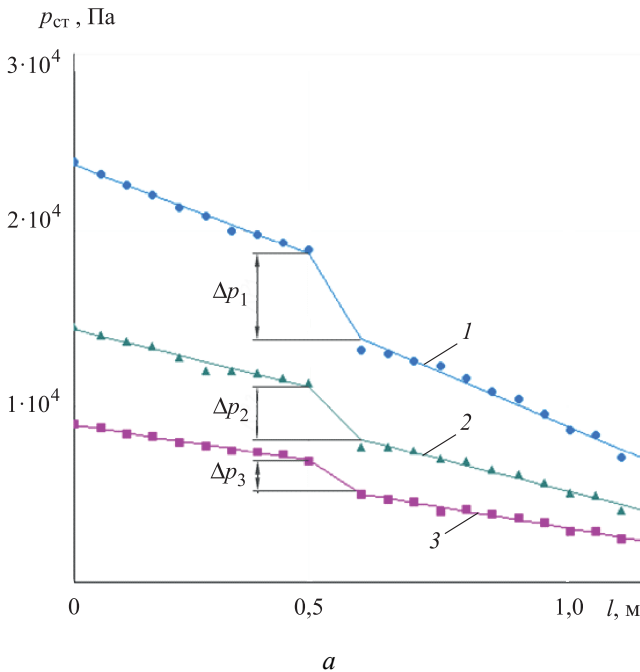


Рис. 5 (Начало). Распределения статического давления по длине рабочих участков с фрагментами дистанционирующей решетки различных типов

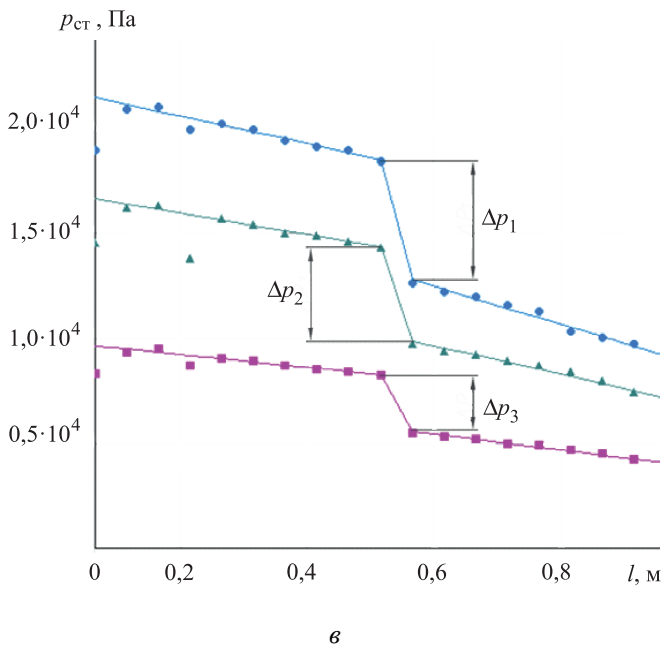
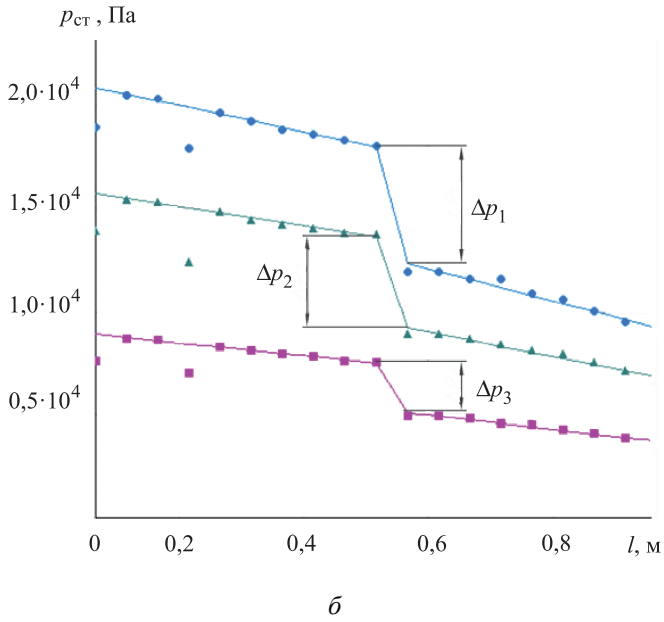


Рис. 5 (Окончание). Распределения статического давления по длине рабочих участков с фрагментами дистанционирующей решетки различных типов:

a — тип А: *l*-3 — Re равно $4,48 \cdot 10^4$, $3,37 \cdot 10^4$ и $2,58 \cdot 10^4$; *б* — тип Б: *l*-3 — $3,76 \cdot 10^4$, $3,05 \cdot 10^4$ и $2,15 \cdot 10^4$; *в* — тип В: *l*-3 — $3,76 \cdot 10^4$, $3,27 \cdot 10^4$ и $2,44 \cdot 10^4$

Числа Рейнольдса определяли по среднерасходной скорости потока в межтвэльном пространстве канала. Основные параметры режимов испытаний фрагментов дистанционирующих решеток типов А, Б, В приведены в таблице.

Таблица

Параметры режимов испытаний

Параметр	Тип А			Тип Б			Тип В		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Номер режима	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Расход, кг/с	0,15	0,115	0,089	0,127	0,104	0,074	0,127	0,112	0,084
Среднерасходная скорость, м/с	80,3	62,8	48,8	61,1	50,9	36,5	61,1	54,4	41,4
Средняя температура, °С	20,5	25,5	27,6	18,6	22,4	24,9	19,0	22,8	25,3
Число Рейнольдса, $Re \cdot 10^4$	4,48	3,37	2,58	3,76	3,05	2,15	3,76	3,27	2,44
Перепад давления на фрагменте, Па	4699	2879	1835	5625	4407	2413	5705	4487	2670
Коэффициент гидравлического сопротивления	1,21	1,24	1,32	2,52	2,89	3,1	2,56	2,57	2,67

Значения коэффициентов гидравлических сопротивлений получены расчетным путем по формуле (2). На рис. 6 представлены графические зависимости коэффициентов гидравлических сопротивлений $\zeta = f(Re)$ для исследованных решеток.

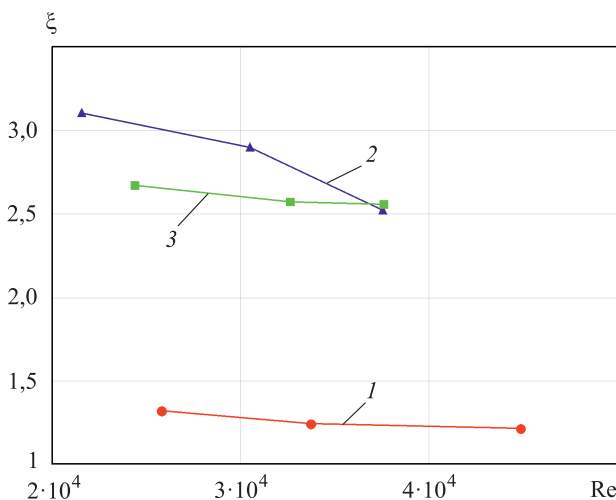


Рис. 6. Зависимости коэффициентов гидравлических сопротивлений фрагментов дистанционирующих решеток от числа Рейнольдса:

1–3 — решетки типов А, Б и В соответственно

Аппроксимация распределений $\zeta = f(\text{Re})$ по методу наименьших квадратов позволила получить следующие зависимости для решеток типов А, Б и В:

$$\zeta_A(\text{Re}) = 6,2\text{Re}^{-0,154};$$

$$\zeta_B(\text{Re}) = 106,9\text{Re}^{-0,353};$$

$$\zeta_B(\text{Re}) = 7,7\text{Re}^{-0,104}.$$

Среднеквадратическое отклонение аппроксимации σ_a составило соответственно для решеток типов А, Б и В 0,016; 0,617 и 0,011 %.

Анализ полученных результатов по коэффициентам гидравлических сопротивлений фрагментов ячеистых дистанционирующих решеток показывает, что фрагмент решетки типа А, создающий на выходе продольное течение потока теплоносителя, имеет наименьшие значения коэффициентов гидравлического сопротивления. Фрагменты дистанционирующих решеток типов Б и В, имеющие наклонные к оси ячейки пуклевки, создают на выходе из решетки закрутку потока, что приводит к возникновению поперечной составляющей скорости и способствует увеличению параметров перемешивания. Появление трехмерности потока при обтекании ячеек исследуемых фрагментов вызывает увеличение их гидравлического сопротивления. Из сопоставления полученных значений коэффициентов гидравлического сопротивления в диапазоне чисел Рейнольдса $(2,15...4,48)10^4$ следует, что гидравлическое сопротивление фрагментов дистанционирующих решеток с перемешивающими свойствами (типы Б и В) приблизительно в 2 раза больше, чем у фрагментов дистанционирующей решетки типа А.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Денисов В.П., Драгунов Ю.Г. *Реакторные установки ВВЭР для атомных электростанций*. Москва, ИздАТ, 2002, 480 с.
- [2] Адамов Е.О., ред. *Машиностроение. Энциклопедия. Машиностроение ядерной техники*. Москва, Машиностроение, 2005, т. IV–XXV, кн. 1, 960 с.
- [3] *Стратегия развития атомной энергетики России в первой половине XXI в. Протокол № 17 от 25.05.2000 г.*
- [4] Перепелица Н.И. Дистанционирующие решетки с локальными завихрителями для тепловыделяющих сборок PWR. *Атомная техника за рубежом*, 2006, № 1, с. 3–7.
- [5] Перепелица Н.И. Дистанционирующие решетки со смесительными лопатками для тепловыделяющих сборок PWR. *Атомная техника за рубежом*, 2006, № 2, с. 3–9.
- [6] Марков П.В., Солонин В.И. Моделирование течения в пучке цилиндрических твэлов реактора ВВЭР, дистанционированных сотовой решет-

кой. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2011, № 3, с. 17–29.

- [7] Крапивцев В.Г., Солонин В.И., Цирин С.И. Организация конвективного переноса в пучке твэлов за сотовыми решетками для водо-водяных энергетических реакторов. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2011, № 4, с. 7–12.
- [8] Марков П.В. Интенсификация перемешивания в ТВС водоохлаждаемых реакторов сотовыми перемешивающими решетками. *Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика*, 2012, № 1, с. 117–125.
- [9] Гетя С. И., Крапивцев В.Г., Марков П.В., Солонин В.И., Цирин С.И. Моделирование температурных неоднородностей в пучке твэлов ТВС ВВЭР-1000. *Атомная энергия*, 2013, т. 114, № 1, с. 55–57.
- [10] Кириллов П.Л., ред., Юрьев Ю.С., Бобков В.П. *Справочник по теплогидравлическим расчетам (ядерные реакторы, теплообменники, парогенераторы)*. Москва, Энергоатомиздат, 1984, 296 с.

Статья поступила в редакцию 30.05.2015

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Крапивцев в.Г., Гуров В.А. Экспериментальные исследования гидравлических характеристик дистанционирующих ячеистых решеток. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2015, вып. 6.

URL: <http://engjournal.ru/catalog/pmce/nre/1410.html>

Крапивцев Вениамин Григорьевич родился в 1949 г., окончил МВТУ им. Н. Э. Баумана в 1972 г. по специальности «Энергетические машины и установки», канд. техн. наук, доцент кафедры «Ядерные реакторы и установки» МГТУ им. Н. Э. Баумана. Область деятельности и научных интересов: расчетно-экспериментальные исследования процессов гидродинамики в реакторах ВВЭР, разработки в области совершенствования конструкции ядерного топлива реакторов ВВЭР, РБМК и БРЕСТ.
e-mail: hkloh@mail.ru

Гуров Владислав Алексеевич родился в 1992 г., студент кафедры «Ядерные реакторы и установки» МГТУ им. Н. Э. Баумана. Область деятельности и научных интересов: решение прикладных задач механики жидкости и газа для обеспечения точности измерений на экспериментальных стендах при испытании моделей перспективных ядерных энергетических установок и обосновании характеристик улучшенных элементов существующих конструкций.
e-mail: vladislavguroff@yandex.ru

Experimental study of hydraulic characteristics of honeycomb type spacer grids

© V.G. Krapivtsev, V.A. Gurov

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russia

This article presents experimental studies of hydraulic characteristics of honeycomb type spacer grids, applied in fuel assemblies of PWR reactors. We examine the fragments of the gratings used, work area and aerodynamic stand. According to the procedures described above, we give results of measurements and determine the hydraulic resistance of the studied types of spacer grids. We conduct a comparative analysis of hydraulic characteristics of the spacer grids with cells of various types.

Keywords: PWR, fuel assembly, fuel rod, spacer grid, heat exchange intensification, static pressure coefficient, hydraulic resistance.

REFERENCES

- [1] Denisov V.P., Dragunov Yu.G. *Reaktornye ustanovki VVER dlya atomnykh elektrostantsiy* [Pressurized-water reactor systems for nuclear power plants]. Moscow, Izdat Publ., 2002, 480 p.
- [2] Adamov E.O., ed. *Mashinostroenie. Entsiklopediya. Mashinostroenie yadernoy tekhniki* [Mechanical Engineering. Encyclopaedia. Engineering in nuclear technologies]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2005, vol. IV-25, book 1, 960 p.
- [3] *Strategiya razvitiya atomnoy energetiki Rossii v pervoy polovine XXI* [Strategy for the nuclear energy development in Russia in the first half of the XIX century]. Approved by the RF Government. Proceed. no.17, 25 May 2000.
- [4] Perepelitsa N.I. *Atomnaya tekhnika za rubezhom — Atomic Energy Technology Abroad*, 2006, no. 1, pp. 3–39.
- [5] Perepelitsa N.I. *Atomnaya tekhnika za rubezhom — Atomic Energy Technology Abroad*, 2006, no. 2, pp. 3–9.
- [6] Markov P.V., Solonin V.I. *Vestnik MGTU. Ser. Mashinostroenie — Herald of Bauman Moscow State Technical University. Ser. Mechanical Engineering*, 2011, no. 3, pp. 17–29.
- [7] Krapivtsev V.G., Solonin V.I., Tsirin S.I. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroenie — Proceedings of the higher educational institutions. Mechanical Engineering*, 2011, no. 4, pp. 7–12.
- [8] Markov P.V. *Yadernaya energetika — Proceedings of Universities. Nuclear power*, 2012, no. 1, pp. 117–125.
- [9] Getya S.I., Krapivtsev V.G., Markov P.V., Solonin V.I., Tsirin S.I. *Atomnaya energiya — Atomic Energy*, 2013, vol. 114, no. 1, pp. 55–57
- [10] Kirillov P.L., Yurev Iu.S., Bobkov V.P. *Spravochnik po teplogidravlicheskim raschetam (Yadernye reaktory, teploobmenniki, parogeneratory)* [Handbook of thermal-hydraulic calculations (Nuclear reactors, heat exchangers, steam generators)]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1984, 296 p.

Krapivtsev V.G. (b. 1949) graduated from Bauman Moscow State Technical University in 1972. Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Professor of “Nuclear reactors and facilities” Department at Bauman Moscow State Technical University. Scientific interests include computational and experimental studies of hydrodynamic processes in reactors PWR, development in improving the design of nuclear fuel in pressurized-water reactor, high-power channel-type reactor. e-mail: hykloh@mail.ru

Gurov V.A. (b. 1992), a student of "Nuclear reactors and facilities" Department at Bauman Moscow State Technical University. Scientific interests include solution of the applied problems in fluid mechanics to ensure the accuracy of measurements on experimental stands when testing the models of advanced nuclear power plants and improving the existing structures performance. e-mail: vladislavguroff@yandex.ru