

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ РАСХОДОВ В КАНАЛАХ МОДЕЛИ ДВУХПЕТЛЕВОГО РЕАКТОРА

Е.Ф. Авдеев, И.А. Чусов

ИАТЭ НИЯУ МИФИ, г. Обнинск



Приводятся опытные данные по распределению расходов в имитаторах рабочих каналов экспериментального стенда «Модель исследовательского реактора» с двухпетлевой компоновкой. Изложены методики проведения экспериментов и обработки полученных опытных данных. На основании проведенных опытов сделан вывод о применимости полученных данных в обоснование безопасности двухпетлевой реакторной установки.

Ключевые слова: гидромодель, реактор, экспериментальный стенд, расход рабочего тела, модель активной зоны, турбулентность, картограмма распределения расходов, датчики давления, изотахи относительных скоростей.

Key words: hydromodel, reactor, experimental facility, working medium flowrate, core model, turbulence, flowrate distribution cartogram, pressure transducers, normalized velocity isotachs.

ВВЕДЕНИЕ

Проведение экспериментальных исследований, связанных с определением неравномерности распределения расходов теплоносителя в тепловыделяющих сборках реакторных установок, является трудоемкой и сложной задачей внутриреакторных измерений. Для исследований применялась частично искаженная модель активной зоны, поэтому возникла необходимость разработки специальных датчиков расходов и проведения массовых замеров расходов с соответствующей обработкой результатов опытов.

Основной целью работы являлось получение экспериментальных результатов по распределению расходов воды в имитаторах рабочих каналов (ИРК) с имитаторами ТВС модельной установки при максимально приближенных к реальным числах Рейнольдса. Опыты проводились на гидродинамическом стенде (ГДС) с моделью реактора, содержащей 151 ИРК и подачей расхода воды $\approx 285 \text{ м}^3/\text{с}$.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ДАТЧИКИ И СПОСОБЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СРЕДНЕРАСХОДНОЙ СКОРОСТИ В ИРК С ИМИТАТОРАМИ ТВС

Эксперименты по установлению распределения расходов по ИРК с имитаторами ТВС гидромодели реактора были проведены на экспериментальном стенде «Модель исследовательского реактора» (МИР) ИАТЭ НИЯУ МИФИ. Подробное описание стенда, его технические и геометрические характеристики, а также параметры гидродинамической модели (ГДМ) реакторной установки (РУ) приведены в работе [1]. Основным условием конструктивного исполнения ИРК было достижение одинаковости коэффициентов со-

© *Е.Ф. Авдеев, И.А. Чусов, 2013*

противления натурных рабочих каналов (РК) с ТВС и ИРК с имитаторами ТВС.

Измерения распределения расходов воды в ИРК проводилось двумя типами датчиков – коротким и длинным «ленточными» зондами в конструктивном исполнении ГНЦ РФ-ФЭИ [2] и «рамочным» зондом, конструкция которого разработана авторами статьи. Общий вид конструкции обоих типов ленточных зондов приведен на рис. 1. Ленточный зонд имеет в сечении две соприкасаемые спаянные трубки диаметром $2 \times 0,2$ мм. Для проведения измерений было изготовлено два коротких зонда длиной 1100 мм и два длинных зонда длиной 2200 мм.

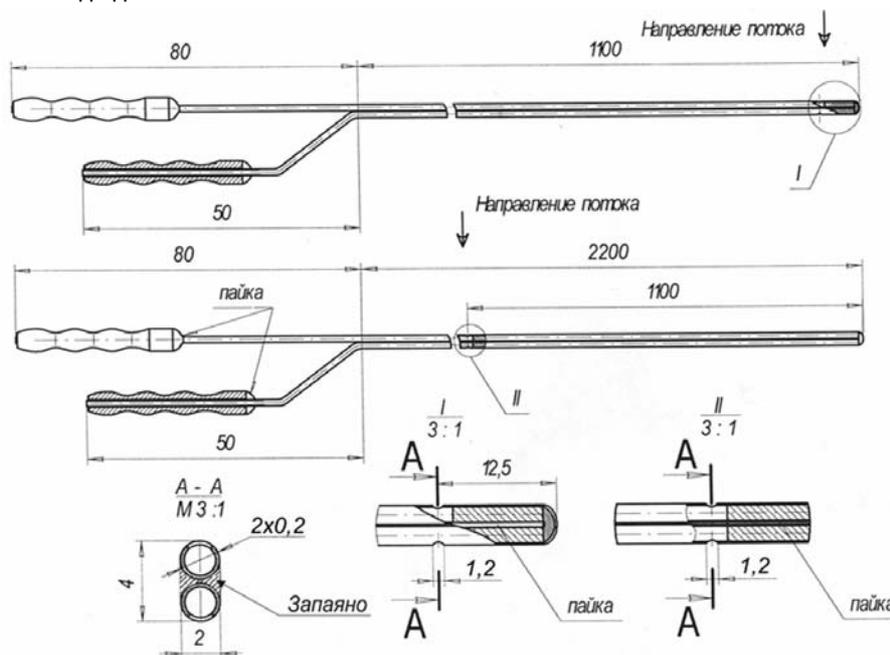


Рис. 1. Конструкция длинного и короткого ленточных зондов

С одной стороны трубки зондов запаяны, другой стороной они соединяются с импульсными трубками, по которым давление, воспринимаемое приемными отверстиями зонда, передается на прибор измерения давления. Приемные отверстия зонда с диаметром 1,2 мм находятся, по отношению к набегающему потоку, на передней и задней трубках зонда. Переднее отверстие воспринимает давление торможения, заднее – давление в задней точке овала зонда. Поскольку давление в задней точке овала зонда значительно меньше статического давления, ленточный зонд является устройством, увеличивающим измеряемый перепад давления. Это уменьшает относительную ошибку измерений и увеличивает точность определения скорости. Этой же цели служит и размещение приемных отверстий зонда в центральной (суженной) части профилированных сопел, установленных в каждом ИРК [1, 2]. При перемещении ленточного зонда по диаметальному направлению ГДМ приемные отверстия зонда фиксируются (с учетом расстояния между центрами ИРК) поочередно в центре каждого из каналов, и измеряется соответствующий перепад напоров на зонде.

Устройство рабочей части рамочного зонда аналогично ленточному зонду. Однако длина участка соприкасаемых спаянных трубок, где расположены приемные отверстия зонда, ограничивается диаметром канала, в который вводится зонд. Одни концы трубок, расположенные в данном датчике противоположно друг другу, запаяны, трубки изогнуты и образуют рамку с внешним размером 11 мм, что обусловлено диаметром 12 мм суженной части сопел ИРК, в которые устанавливается зонд. В отличие от ленточного

зонда, он не протягивается поочередно через ИРК, а устанавливается стационарно в любой ИРК. Рамочный зонд закреплен в винтовой пробке и совместно с ней ввинчивается в нарезные отверстия крышки ГДМ. Место крепления рамочного зонда в винтовой пробке подобрано таким образом, чтобы приемные отверстия зонда в рабочем положении находились в центральной суженной части сопел ИРК. Схемы установки рамочного и ленточного зондов показаны на рис. 2, фотографии этих зондов – на рис. 3.

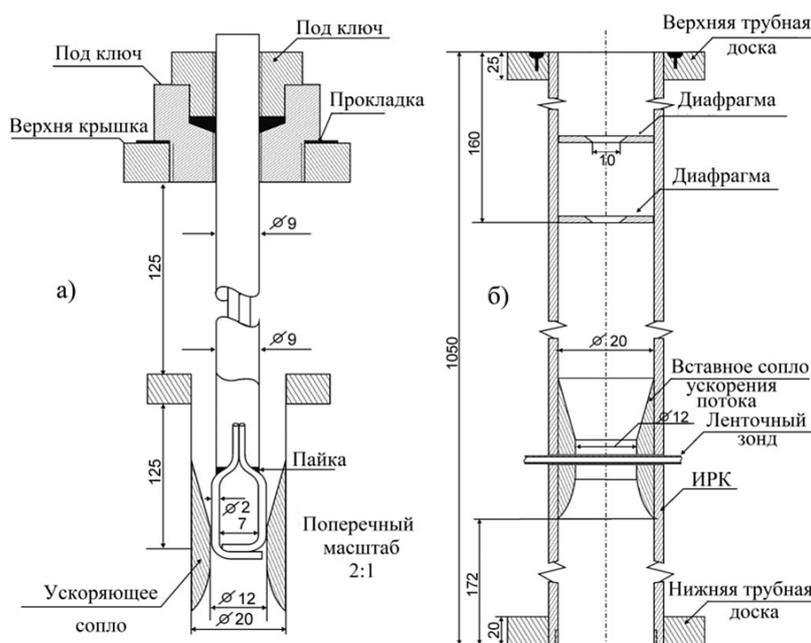


Рис. 2. Конструкция и установка рамочного и ленточного зондов в ИРК

В наиболее общем случае ленточный и рамочный зонды могут рассматриваться как датчики среднерасходной скорости в ИРК. Используя уравнение Д. Бернулли, нетрудно получить соотношение для средней скорости в ИРК:

$$V = \sqrt{K_z \frac{2\Delta P}{\rho_{f_ГДМ}}}$$

С учетом поправок на неполное заполнение трубок соединительных линий водой и температуры воздуха в них перепад давления в приемных отверстиях зонда определяется как

$$\Delta P = (\rho_f - \rho_g)g\Delta H,$$

где $\Delta H = (H_1 - H_2)$ – разность напоров в приемных отверстиях зонда [м]; g – ускорение свободного падения [м/с²]; ρ_f, ρ_g – плотность воды и воздуха в пьезометрических трубках [кг/м³]; $\rho_{f_ГДМ}$ – плотность воды в ГДМ, [кг/м³]; K_z – тарировочный коэффициент.

Тарировка ленточных зондов проводилась в ГНЦ РФ-ФЭИ в воздушном потоке, а тарировка рамочных – на стенде «Параллельные каналы» в потоке воды с использованием способа определения расхода, разработанного на кафедре теплофизики ИАТЭ НИЯУ МИФИ [3, 4]. Оба типа зондов показали линейную тарировочную характеристику со средними значениями тарировочного коэффициента $\langle K_z \rangle = 0,602$ – для ленточных зондов и $\langle K_z \rangle = 0,742$ – для рамочных зондов.

Сравнение расходов, полученных с помощью ленточных и рамочных зондов с дан-

ными, полученными на образцовых расходомерах, показали, что погрешность измерения расхода рамочным зондом не превосходит 1,1 %, а ленточным – 1,5 %. Общая погрешность проведения измерений с учетом погрешностей измерения температуры и расходов по петлям ГДС не превосходила 5,2 %.

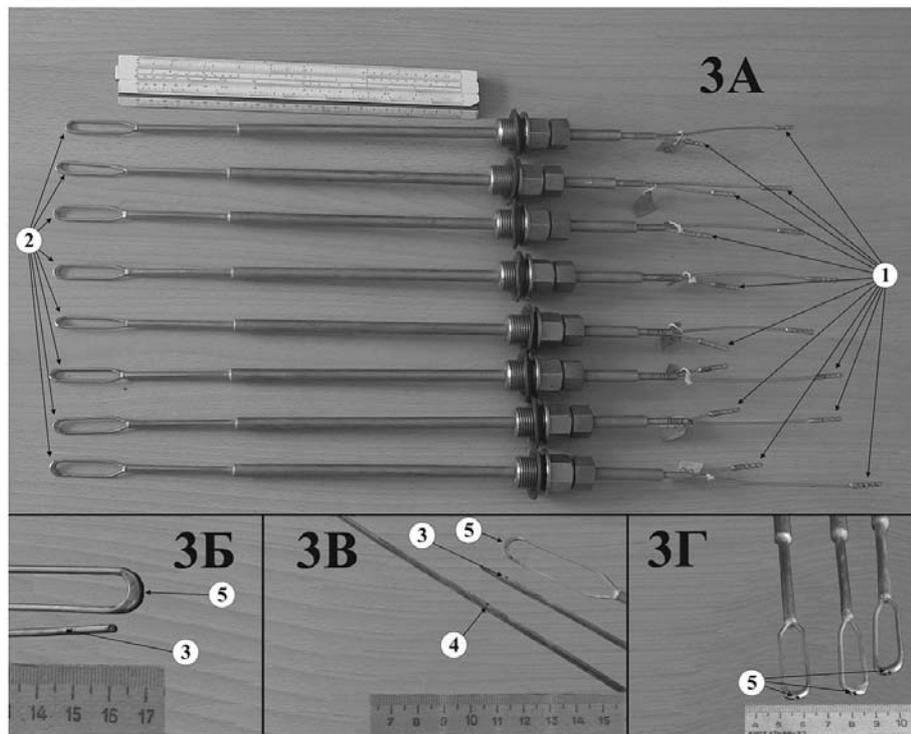


Рис. 3. Общий вид рамочного и ленточного зондов:
 3А – рамочные зонды; 3Б – рабочая часть рамочного и короткого ленточного зондов; 3В – общий вид рабочих частей всех измерительных зондов; 3Г – рабочая часть рамочного зонда с приемными отверстиями; 1 – трубки отвода измеренного перепада давления; 2 – рабочая часть рамочного зонда; 3 – приемное отверстие короткого ленточного зонда; 4 – приемное отверстие длинного ленточного зонда; 5 – приемное отверстие рамочного зонда

В ходе проведения экспериментов было выполнено 126 серий измерений средних скоростей в ИРК ГДМ ленточными и рамочными зондами. Эксперименты проводились при температуре воды 20 – 62 °С для случаев: 1) одинаковый расхода по обеим петлям; 2) подача воды только по левой петле; 3) подача воды только по правой петле. Расход воды через ГДМ варьировался в диапазоне 114,1 – 285,6 т/ч.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

Для получения достоверных данных о распределении расходов по ИРК ГДМ было предложено провести измерения в каналах, расположенных в наиболее характерных зонах. Вся область расположения каналов разделена на 12 секторов, образуемых углами по 30°. Отсчет углов производится от диаметрального направления, совпадающего с направлением расположения напорных и выходных патрубков, считая от канала номер 82 против часовой стрелки (рис. 4).

Первоначально рамочные зонды устанавливались в каналы, расположенные на диаметральных направлениях 90, 60 и 30°, затем 30 и 150°. Поскольку на направлениях 30, 90, и 150° число каналов равно шести, оставшиеся два зонда устанавливались в смежные периферийные каналы. Далее рамочные зонды устанавливались в каналы, расположенные на двух параллельных направлениях, смежных с диаметральным направлением 0°.

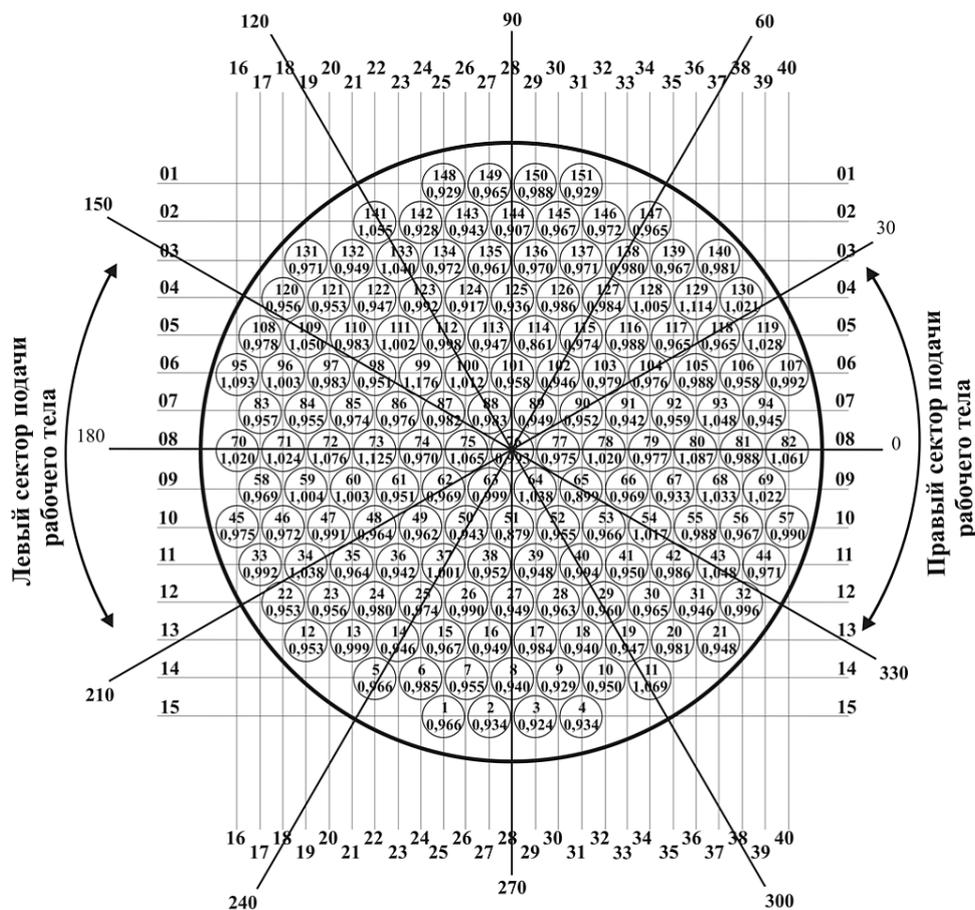


Рис. 4. Картограмма распределений относительных скоростей в ИРК

Чтобы охватить каналы, расположенные внутри секторов, рамочные зонды устанавливались в четырех периферийных каналах каждого сектора. Таким образом, средние скорости (расходы) были измерены в 106 каналах, по которым можно получить полное представление о характере распределения расходов по ИРК ГДМ.

Картограмма результатов измерения относительных скоростей (расходов) воды по каналам ИРК двухпетлевой ГДМ приведена на рис. 4 (указаны значения скоростей по отношению к скорости, рассчитанной по полному расходу через ГДМ). Из картограммы хорошо видно, что в секторах 330 – 30°, 150 – 210°, т.е. в областях входа рабочего тела в нижний раздаточный коллектор, наблюдается локальное повышение относительного расхода. Последнее обстоятельство объясняется непосредственной близостью упомянутых выше секторов к напорным линиям петель ГДС.

Анализ картограммы (рис. 4) показал, что относительный расход составил в секторе 30 – 150° $Q_{30-150} = 0,964^{+0,11}_{-0,085}$; в секторе 150 – 210° $Q_{150-210} = 1,0^{+0,12}_{-0,049}$; в секторе 210 – 330° $Q_{210-330} = 0,976^{+0,2}_{-0,115}$; в секторе 330 – 30° $Q_{330-30} = 1,003^{+0,12}_{-0,049}$.

Как показано в работе [5], разброс в значениях величин относительных расходов по ИРК ГДМ объясняется, во-первых, влиянием неравномерности подачи воды в ГДМ за счет разницы в подаче питательных насосов, а во-вторых, отклонением геометрии проточной части ГДМ от проектной за счет принятых в промышленности допусков и отклонений.

Необходимо принять во внимание наличие байпасных перетечек через собственно каландр, так как в его конструкции есть отверстия для травления воздуха из межтрубного пространства при заполнении ГДМ водой [1, 2]. Отметим, что величина расхода через отверстия для травления воздуха из ГДМ в натурном реакторе соответствует суммарной величине расхода теплоносителя через каналы СУЗ.

Минимальное значение расхода воды было получено в каналах, расположенных примерно на середине радиуса активной зоны. Пониженные значения расходов теплоносителя в реакторе, особенно в центральной его части, могут стать причиной снижения запаса до температуры кипения воды в ТВС. В случае вскипания воды в ТВС может проявляться эффект изменения коэффициента реактивности, что нежелательно.

Для подтверждения достоверности полученных экспериментальных данных была рассчитана функция распределения относительных скоростей (расходов) воды в каналах имитаторов ТВС. Для этого диапазон изменения относительных скоростей по ИРК ТВС $V_i/V_{151} = 0,86 - 1,18$ (V_{151} – средняя скорость в каналах, рассчитанная по суммарному расходу в обеих напорных петлях ГДМ; V_i – средняя скорость воды в i -ом канале) был равномерно разбит на поддиапазоны шириной $V_i/V_{151} = 0,08$. Для каждого поддиапазона было найдено количество каналов с соответствующими значениями измеренных скоростей. Результаты предварительного анализа представлены в виде гистограммы на рис. 5.

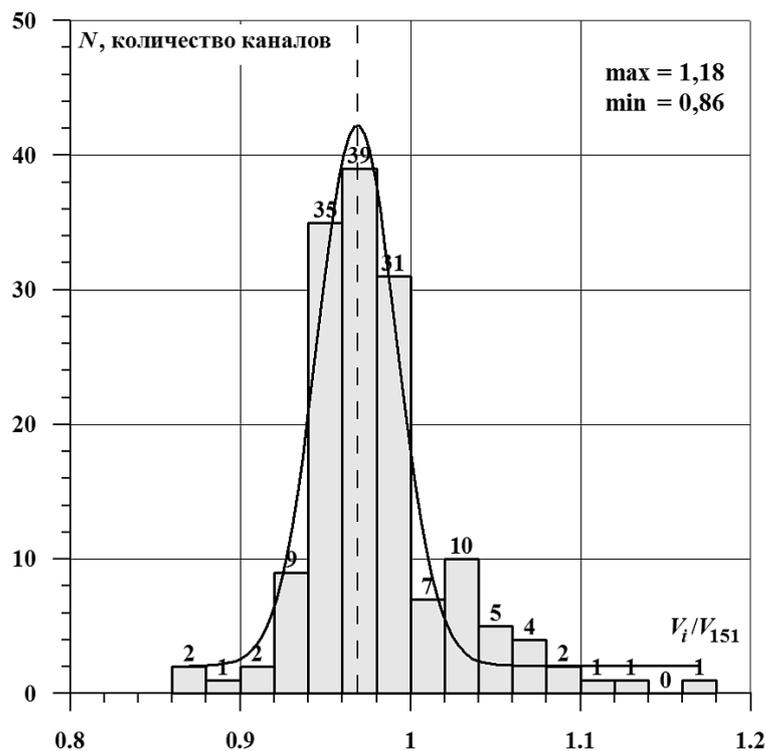


Рис.5. Гистограмма распределений относительных скоростей по ИРК

В заключение отметим, что относительная скорость в части ИРК (секторы диаметрально противоположные секторам напорных патрубков) значительно отличается от среднего значения. Это обстоятельство указывает на необходимость проведения гидравлического профилирования модели активной зоны, а при переносе опытных данных на натурную реакторную установку – и гидравлического профили-

рования натурального реактора.

ВЫВОДЫ

По полученным и представленным в работе результатам опытов можно сделать следующие выводы:

- предложенная конструкция рамочного зонда явилась удобным инструментом для измерения среднерасходной скорости в многоканальных измерениях;
- средняя неравномерность распределения расходов по ИРК ГДМ при работе двух петель с одинаковыми максимальными расходами не превышает $\pm 6\%$ от среднего значения, относительная погрешность измерений при проведении опытов составила $\pm 6,2\%$;
- максимальные скорости (расходы) получены в ИРК, расположенных в области входных и выходных патрубков.

Авторы выражают признательность инженерному персоналу кафедры «Теплофизика» ИАТЭ НИЯУ МИФИ за помощь в проведении экспериментальных работ.

Литература

1. Авдеев Е.Ф., Чусов И.А., Устюжанин А.Я. и др. Гидравлический стенд для испытаний моделей ядерных реакторов. // Известия вузов. Ядерная энергетика. – №4. – 2004. – С. 70 – 83.
2. Авдеев Е.Ф., Чусов И.А., Левченко В.А. и др. Экспериментальное исследование гидравлического сопротивления модели корпусного реактора. // Известия вузов. Ядерная энергетика. – №4. – 2005. – С. 77 – 85.
3. Авдеев Е.Ф., Большунова В.В. Способ определения расхода в трубопроводе. / Патент №2169905. от 27 июня 2001 г.
4. Авдеев Е.Ф., Карташов К.В. Верификация способа определения расхода при турбулентном течении в трубах. / Труды IV Российской национальной конференции по теплообмену. – М.: 2006. – Т.8. – С. 33-34.
5. Юрьев Ю.С., Левченко Ю.Д., Чусов И.А. и др. Влияние отклонений геометрии тракта двухпетлевой гидравлической модели на неопределенность общего коэффициента гидросопротивления. // Известия вузов. Ядерная энергетика. – №3. – 2005. – С. 81 – 86.

Поступила в редакцию 08.05.2013

УДК 621.039.052

Numerical simulation of the coolant flow in the porous body model of a fast breeder reactor \ Leskin S.T., Slobodchuk V.I., Shelegov A.S., Yaurov S.V., Chistozvonova E.A., Sorokin A.P., Opanasenko A.N., Kalyakin S.G., Zaryugin D.G.; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica» (Communications of Hier Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2013. – 8 pages, 8 illustrations. – References, 5 titles.

The results of numerical simulation of the coolant flow in the model of a fast breeder reactor are presented. 3D-model of an experimental facility is developed and the simulation is carried out with ANSYS CFD code. The porous body approach is used for simulation of complicated elements of the reactor model such as heat exchangers, reactor core. The numerical results of thermohydraulic characteristics for the case of the coolant forced circulation as well as for the case of emergency cooling are presented. The numerical results are in qualitative agreement with the experimental data. The performance capability of a passive emergency cooling system with self-contained heat exchangers is confirmed.

УДК 53.072.8

Conception design of intensive nonreactor neutron source based on hydrogen ion accelerator \ Kononov O.E., Kononov V.N., Bokhovko M.V., Gremiachkin D.E.; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica» (Communications of Hier Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2013. – 9 pages, 7 illustrations. – References, 3 titles.

Creation of intensive neutron source for various types of neutron therapy is discussed. The way to generate intensive neutron beams and they ability is described. Shown that accelerator with 3 MeV beam energy it is possible to create neutron facility for oncology clinic.

УДК 621.039.526.034+621.039.546.8:536.24

Experimental analysis of flowrates distribution features in double-loop reactor channels \ Avdeev E.F., Chusov I.A.; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica» (Communications of Hier Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2013. – 7 pages, 5 illustrations. – References, 5 titles.

Experimental data on the flowrate distribution in working channels dummies of «Research reactor model» experimental facility with double-loop configuration are provided. The procedures of experiments performance and received experimental data processing are provided in detail. Based on the fulfilled experiments, the conclusion was made on applicability of the obtained data for the reactor plant safety analysis.

УДК 532.5

The equations and algorithms for the calculation of temperature fields of shells of revolution in aerodynamic flow considering dependence of its material properties on the temperature \ Rozman L.S.; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica» (Communications of Hier Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2013. – 7 pages, 4 illustrations. – References, 6 titles.

Due to the rapid development of space exploration programs using rockets with nuclear facilities there was a necessity to quickly and efficiently calculate temperature fields of head part of missile to ensure safe transport of nuclear installations to orbit. We consider the formulation and solving algorithms of the non-stationary problem for calculation of temperature fields of shell of revolution in high-temperature aerodynamic flow with known temperature. We propose and consider the physical model and calculation of temperature fields in the frontal part and in circle sections of the shell of revolution. The proposed physical model of shell heat transfer with the ablation of material will predict the ability to perform the targeting of the shell by calculating the temperature fields and the total thickness of entrained layers for different possible values of the parameters defining the ablation parameters for shell material.

УДК 621.039.516

The comparison analyses of VVER REMIX-fuel characteristics when multiple recycling were made \ Dekusar V.M., Kagramanyan V.S., Kalashnikov A.G., Kapranova E.N., Korobitsyn V.E., Puzakov A.Yu.; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica»