

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ МОДЕЛИ КОРПУСНОГО РЕАКТОРА

Е.Ф. Авдеев*, И.А. Чусов*, В.А. Левченко, Ю.Д. Левченко***,
Ю.С. Юрьев*****

**Обнинский государственный технический университет атомной энергетики,
г. Обнинск*

***ЭНИМЦ «Моделирующие системы», г. Обнинск*

****ГНЦ РФ-Физико-энергетический институт им. А.И. Лейпунского, г. Обнинск*



В работе приводятся результаты экспериментального исследования гидравлических характеристик модели корпусного реактора на стенде "МР". Дано описание гидравлической модели двухпетлевой реакторной установки корпусного типа. Экспериментальные данные охватывают широкий диапазон рабочих параметров стенда, включая аварийные режимы работы модели реакторной установки с полным остановом одного из питательных насосов.

ВВЕДЕНИЕ

Одной из основных гидродинамических характеристик реакторной установки является гидравлическое сопротивление ее проточной части. Как правило, к проточной части реакторной установки корпусного типа относятся: вход в реакторную установку, опускной участок, нижний раздаточный коллектор, твэльный пучок, группа дистанционирующих устройств, верхний коллектор и выход из реакторной установки. Таким образом, общее сопротивление установки складывается из большого количества взаимовлияющих местных сопротивлений и сопротивлений трения по длине проточной части.

Точное установление величины полного гидравлического сопротивления реакторной установки или ее модели можно получить только экспериментально, путем проливки натурным или подходящим по теплофизическим свойствам теплоносителем, обеспечивающим получение характерных чисел Рейнольдса.

Настоящая работа ставит целью экспериментальное определение коэффициента гидравлического сопротивления модели и получения обобщенной зависимости этого коэффициента от числа Рейнольдса. При этом необходимо обеспечить на проточной части гидродинамической модели достижение максимально возможного числа Рейнольдса, приближающегося к значению числа Рейнольдса натурального реактора на номинальном режиме эксплуатации, соответствующего условиям гидравлического моделирования.

ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО СТЕНДА И МОДЕЛЬ РЕАКТОРНОЙ УСТАНОВКИ

Эксперименты были проведены на экспериментальном стенде «МР» ОИАТЭ. Общее описание гидравлического стенда «МР» приводится в работе [1].

Конструктивная схема гидравлической модели реакторной установки показана на рис. 1, там же – цилиндрический корпус с нижним днищем и верхней крышкой, бандажными наружными кольцами, рамой крепления корпуса. Корпус гидравлической модели имеет 4 пары входных и выходных патрубков (при проведении экспериментов были задействованы две пары патрубков, соответствующие двухпетлевой компоновке модели реакторной установки).

Каждая пара расположена в одной вертикальной плоскости: в стенке корпуса располагаются 6 отверстий со штуцерами и сальниковыми уплотнениями с наружной стороны для проходки ленточных зондов измерения скорости в каналах и в кольцевом зазоре между корпусом модели и корпусом активной зоны. В плане пары отверстий в стенке корпуса соответствуют углам 0° , 30° , 60° , 90° , 120° , 150° , причем 0° соответствует вертикальной плоскости расположения двух входных и выходных патрубков модели. Овальность днища натурного реактора моделируется внутренней конической вставкой – переходом от внутренней поверхности цилиндрического корпуса к плоскому дну нижнего коллектора. Место расположения отверстий и штуцеров соответствует фиксированному расстоянию от нижнего торца имитаторов ТВС (далее имитатор рабочего канала – ИРК). Штуцеры имеют уплотнение, в поперечном сечении совпадающее с сечением овального ленточного зонда скорости.

Основной частью внутрикорпусного устройства гидромодели является корпус активной зоны, который опирается на внутреннее кольцо корпуса модели и прикрепляется к нему винтами. Он содержит 151 цилиндрический канал – имитатор ТВС (ИРК) внутренним диаметром 20 мм и длиной 1037 мм.

Каналы закрепляются в верхней трубной доске. Нижние концы ИРК не имеют жесткого соединения и вставлены в отверстия нижней трубной доски. Такое крепление ИРК позволяет при необходимости производить их выемку при снятой верхней крышке ГДМ. Коэффициент сопротивления имитатора рабочего канала подобран равным коэффициенту сопротивления натурной ТВС за счет установки внутри каждого ИРК двух шайб и сужающего сопла.

Верхняя крышка корпуса ГДМ имеет 151 отверстие, заглушенное винтовыми пробками, расположенными соосно выходам теплоносителя из ИРК.

С внутренней стороны к верхней крышке прикреплена фальшдоска, к которой приварены имитаторы приводов СУЗ – вытеснители, уменьшенные по диаметру в соответствии с геометрическим подобием натуре. По длине вытеснители на 3–4 мм не доходят до поверхности верхней трубной доски корпуса активной зоны. Некоторые геометрические характеристики гидродинамической модели реакторной установки приведены в табл. 1.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

В ходе проведения экспериментов измерялись следующие параметры: температура воды в четырех точках; давление на входе и выходе из гидравлической модели, на правой и левой петлях; расход на двух напорных и одной отводной линиях. Расход по второй отводной линии рассчитывался на основании баланса расхода по обеим петлям. Температура воды измерялась в обеих петлях в сечениях до и после гидродинамической модели реакторной установки с помощью хромель-копелевых термодпар КТХКУ 01.03-С10-И-5-100, которые подключались к универсальному вольтметру В7-21 с классом точности 0,1. Для компьютерной обработки результатов измерений,

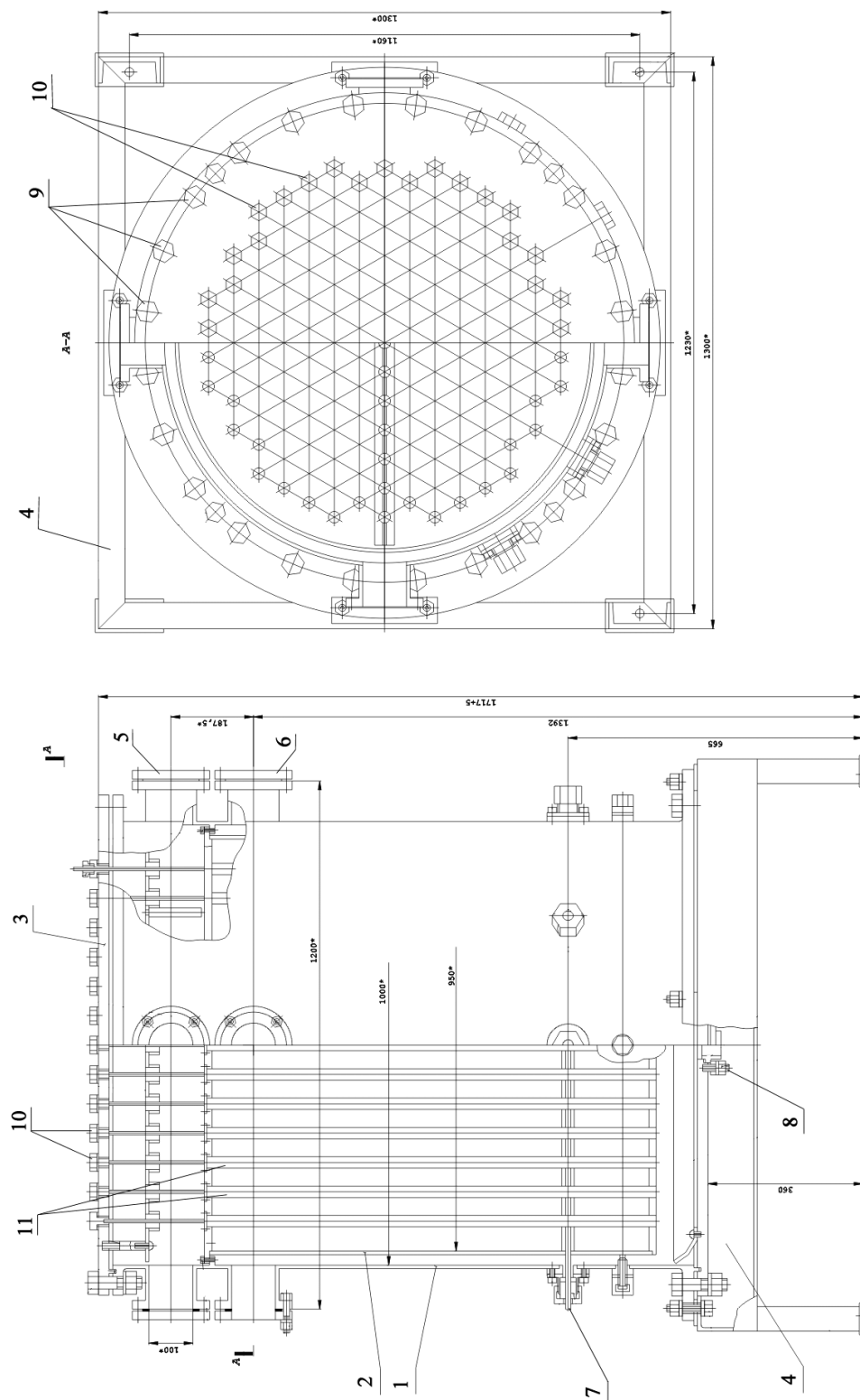


Рис. 1. Конструктивная схема экспериментальной ГДМ: 1 – обечайка ГДМ; 2 – обечайка активной зоны; 3 – верхняя крышка; 4 – рама; 5 – фланец линии отвода; 6 – фланец напорной линии; 7 – ленточный зонд; 8 – фланец линии слива; 9 – болты крепления верхней крышки; 10 – пробка ИРК; 11 – ИРК

Таблица 1

Основные геометрические параметры гидродинамической модели реактора

Внутренний диаметр корпуса	1000 мм
Наружный диаметр корпуса	1010 мм
Высота корпуса (с верхней и нижней крышками)	1357 мм
Внутренний диаметр корпуса активной зоны	950 мм
Наружный диаметр корпуса активной зоны	958 мм
Высота каландра (с верхней и нижней трубными досками)	1037 мм
Диаметр имитатора рабочего канала (ИРК)	20 мм
Длина имитатора рабочего канала	1037 мм
Количество имитаторов рабочих каналов	151
Число имитаторов СУЗ	27
Количество пар подводящих и отводящих патрубков	4

табличные данные из [2], были аппроксимированы полиномами с погрешностью аппроксимации $\sigma_n=0,0008$. Погрешность измерения температуры не превышала $0,2^\circ\text{C}$.

Измерение давления на напорных линиях осуществлялось с помощью образцовых манометров типа М011202, с классом точности 0,4. На отводных линиях использовались образцовые манометры М01227 с классом точности 0,15.

Измерение расхода воды в трубопроводах проводилось по способу, описанному в [3].

Максимальная величина расхождения расходов по правой и левой петлям при проведении экспериментов составляла 2,7%. Суммарный расход воды через гидродинамическую модель изменялся в пределах 21–253 т/ч.

ГИДРАВЛИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ МОДЕЛИ РЕАКТОРА

Потери давления от входного патрубка до выходного патрубка связаны с коэффициентом гидравлического сопротивления общей зависимостью

$$\Delta P = \zeta \frac{\rho V_{\text{cp}}^2}{2},$$

где ζ – полный коэффициент сопротивления, включающий как местные сопротивления, так и сопротивление трения; V_{cp} – средняя скорость движения теплоносителя на предварительно условленном участке. При одинаковых расходах по петлям модели реактора это может быть скорость, принятая в напорном патрубке. Однако отличающиеся расходы в напорных патрубках правой и левой петель приводят к неоднозначности определения ζ . Кроме того, возможны отклонения и в значениях перепада давления ΔP на разных петлях.

Поэтому в настоящей работе при определении ζ средняя скорость определялась по расходу в ИРК, полученного путем деления общего расхода через гидродинамическую модель реактора (измеренного расходомерами) на общее число ИРК – 151.

Число Рейнольдса (Re_{20}) рассчитывалось по внутреннему диаметру ИРК.

В этом случае исключается неоднозначность в определении коэффициента ζ , т.к. один и тот же расход через проточную часть гидромодели может быть получен при отличающихся расходах в напорных патрубках разных петель.

Поскольку при работе двух петель измеряемые перепады давления на петлях могли незначительно отличаться, расчетная зависимость при определении коэффициента

сопротивления принята в виде:

$$\zeta_{20}^{\text{II}} = \frac{(\Delta p_1 + \Delta p_2) \sigma_{\text{ИРК}}^2}{\rho Q_{\text{ИРК}}^2},$$

где Δp_1 – перепад давления на модели по одной петле; Δp_2 – по другой петле; $Q_{\text{ИРК}}$ – объемный расход в одном ИРК; $\sigma_{\text{ИРК}}$ – площадь поперечного сечения ИРК. Индексы «II» и «20» означают диаметр $d_{\text{ИРК}} = 20$ мм и одновременную работу двух петель.

При подаче расхода одним насосом только через одну петлю циркуляции коэффициент сопротивления определялся по зависимости:

$$\zeta_{20}^{\text{I}} = \frac{2\Delta p \sigma_{\text{ИРК}}^2}{\rho Q_{\text{ИРК}}^2},$$

где Δp – измеренное значение перепада давления на гидромодели по одной петле (верхний индекс I).

Результаты измерений при двух работающих насосах и двух петель приведены на рис. 2. Эксперименты по измерению полного коэффициента гидравлического сопротивления проводились при различных расходах и различных температурах воды. Из рисунка видно, что коэффициент сопротивления всей проточной части корпуса гидравлической модели можно считать не зависящим от числа Рейнольдса в диапазоне чисел Рейнольдса $Re_{20} \approx (30-70) \cdot 10^3$.

Результаты испытаний в диапазоне чисел Рейнольдса ($2 \cdot 10^4 \leq Re_{20} \leq 7 \cdot 10^4$) аппроксимированы аналитическим выражением:

$$\zeta_{20}^{\text{II}} = 152 + 832 \exp\left(-\frac{Re_{20}}{5870}\right) \pm 5\%.$$

График зависимости коэффициента сопротивления гидравлической модели при работе только правой или только левой петли приведен на рис. 3. При проведении испытаний насос отсеченной петли был выключен, задвижки на напорной и отводной линиях были перекрыты. Из графика следует, что коэффициенты сопротивления по правой и левой петлям отличаются друг от друга на 8%.

Результаты испытаний показывают, что коэффициенты сопротивления гидродинамической модели при работе только одной петли $\zeta_{20}^{\text{I}}(Re_{20})$ относятся к более низким числам Re_{20} и качественно согласуются с зависимостью для $\zeta_{20}^{\text{II}}(Re_{20})$. Заметны и некоторые расхождения.

Расхождения можно объяснить рядом физических причин: увеличением пути движения теплоносителя в проточной части гидравлической модели при работе одной петли; несимметричным течением теплоносителя в части опускного кольцевого участка, возникновением вторичных вихрей в кольцевом зазоре опускного участка; дополнительным сопротивлением при обтекании теплоносителем всей системы стержней – имитаторов каналов СУЗ и других каналов в верхнем коллекторе.

Результаты испытаний для правой и левой петель циркуляции в диапазоне чисел Рейнольдса ($0,6 \cdot 10^4 \leq Re_{20} \leq 1,8 \cdot 10^4$) аппроксимированы аналитическими выражениями:

$$\text{для левой петли } \zeta_{20}^{\text{I}} = 230 + 4320 \exp\left(-\frac{Re_{20}}{1940}\right) \pm 5\%; \quad (1)$$

$$\text{для правой петли } \zeta_{20}^{\text{I}} = 181 + 351 \exp\left(-\frac{Re_{20}}{5780}\right) \pm 5\%. \quad (2)$$

Общая погрешность во всех экспериментах составила $\approx 6\%$.

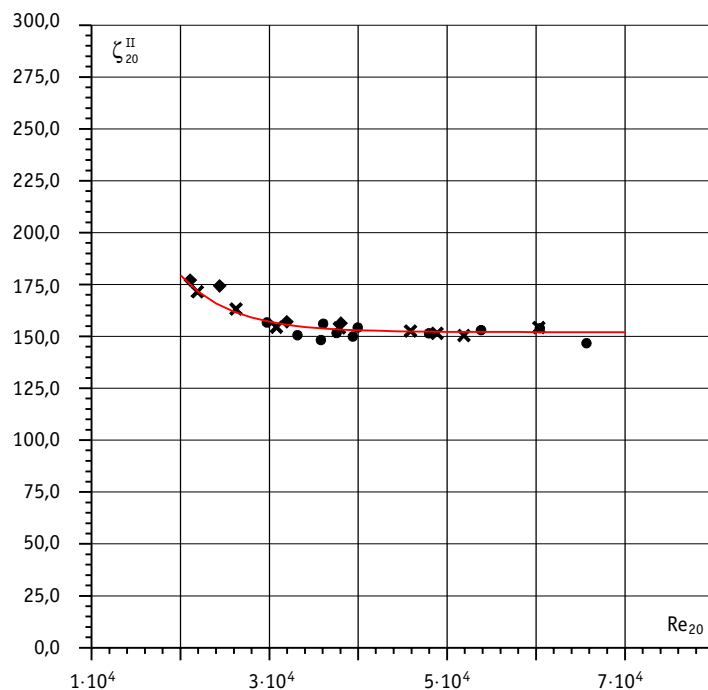


Рис. 2. Зависимость коэффициента сопротивления гидромодели от числа Рейнольдса: ● – $T = 22,1 \pm 30,5^\circ\text{C}$; + – $T = 27,3 \pm 29,1^\circ\text{C}$; ◆ – $T = 38,0 \pm 44,2^\circ\text{C}$; × – $T = 33 \pm 59,5^\circ\text{C}$

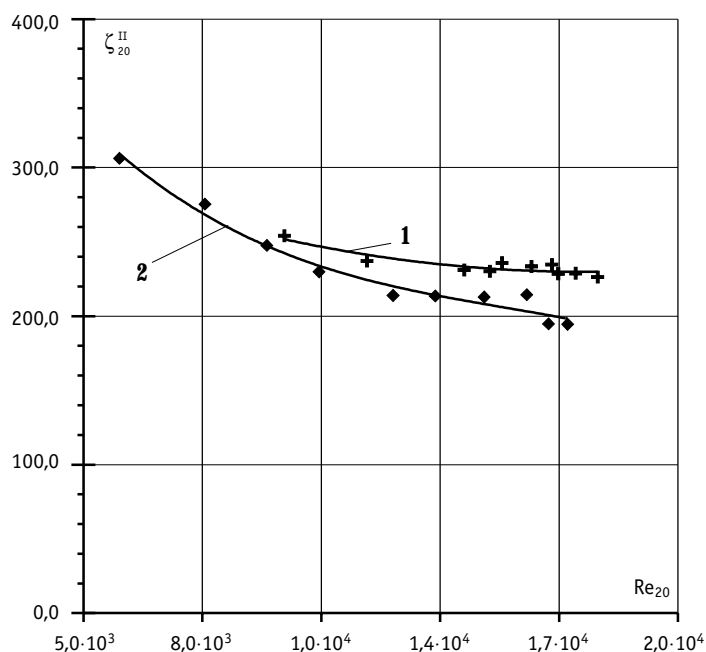


Рис. 3. Зависимость коэффициента сопротивления гидромодели от числа Рейнольдса при работе только одной петли иркуляции (I): 1 – работает только левая петля; 2 – работает только правая петля; ◆ – экспериментальные точки при работе правой петли; + – экспериментальные точки при работе правой петли

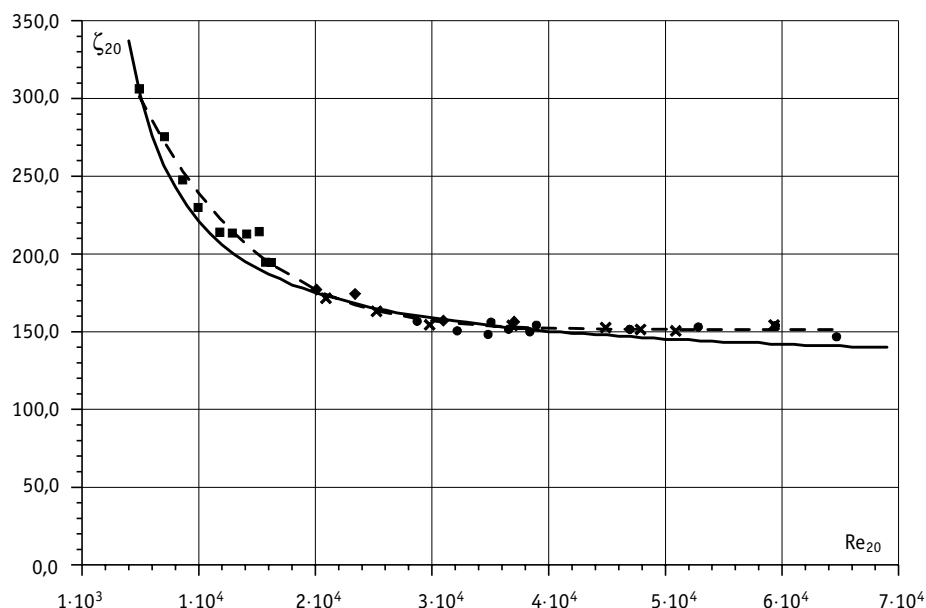


Рис. 4. Зависимость коэффициента сопротивления гидромодели от числа Рейнольдса

Сопоставление результатов экспериментальных испытаний позволяет сделать вывод, что данные для коэффициента сопротивления по одной петле ζ_{20}^I относятся к более низким числа Рейнольдса и удовлетворительно «продолжают» зависимость ζ_{20}^{II} . Вместе с тем заметны и некоторые расхождения.

Аппроксимируя результаты испытаний для двух и одной работающих петель можно получить обобщающую формулу для коэффициента сопротивления ζ_{20} в виде:

$$\zeta_{20} = 125 \left(1 + \frac{8,5 \cdot 10^3}{Re_{20}} \right)^{\pm 20\%}_{-10\%}. \quad (3)$$

Формула (3) применима в диапазоне чисел Рейнольдса ($0,6 \cdot 10^4 \leq Re_{20} \leq 7,0 \cdot 10^4$).

Сопоставление экспериментальных данных, полученных при работе только одной петли и двух петель, и аппроксимирующей их зависимости (3) приведено на рис. 4.

Более точно полученные экспериментальные данные в исследуемом диапазоне чисел Рейнольдса описывает обобщенная зависимость вида:

$$\zeta_{20} = 115 + \frac{120}{Re_{0,2}} + \frac{1,0 \cdot 10^6}{Re} \pm 5\%. \quad (4)$$

Аппроксимация по формуле (3) показана на рис. 4 сплошной кривой, а аппроксимация по формуле (4) пунктирной. Обозначения опытных данных на рис. 4 соответствуют обозначениям на рис. 2.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполнены измерения расходов и потерь давления в проточной части гидродинамической модели реактора при различных расходах и температурах воды, как при одновременной работе двух петель, так и при работе только одной петли циркуляции. Получены экспериментальные данные и аппроксимирующие зависимости для коэффициентов сопротивления в зависимости от числа Рейнольдса, рассчитанного по диаметру имитатора рабочего канала. При подаче расхода в гидродинамическую модель только по одной петле (вторая отключена) получены значения коэффициен-

тов сопротивления; полученные результаты необходимы для усовершенствования методики гидравлического расчета корпусных реакторов.

Авторы выражают благодарность Д.С. Лазикину за помощь в проведении экспериментальных работ.

Литература

1. Авдеев Е.Ф., Чусов И.А., Устюжанин А.Я. и др. Гидравлический стенд для испытания моделей ядерных реакторов//Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2004. – № 4. – С. 46-53.
2. Кириллов П.Л., Юрьев Ю.С., Бобков В.П. Справочник по теплогидравлическим расчетам (ядерные реакторы, теплообменники, парогенераторы). – М.: Энергоатомиздат, 1990. – С. 358.
3. Авдеев Е.Ф., Большунова В.В. Способ определения расхода в трубопроводе: Патент РФ на изобретение № 2169905.

Поступила в редакцию 18.10.2005

УДК 621.311.25:621.039

Neutron and Physical Characteristics of the Khmel'nitsk-2 First Loading with Alternative-Design Fuel Assemblies at the Stages of Physical and Power Startup \ E.S. Saakov, V.P. Derij, A.M. Yakovlev, A.A. Kormilitsin, A.V. Klepov, M.H. Gashev, Yu.A. Krainov, V.I. Chmykhun, V.V. Sarbukov, O.V. Lebedev, V.V. Makeev, A.Yu. Belyakov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of High Schools. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2005. – 13 pages, 9 tables, 3 illustrations. – References, 8 titles.

The papers cover the results of the research in the field of physical and neutron characteristics for Khmel'nitsk-2 first loading with alternative-design fuel assemblies at the stages of physical and power startup. The obtained experimental findings could be used to adjust the constants and software to be applied for design modeling of the fuel cycle at the stages of design and operation of the power reactors

УДК 621.039.55

Experimental Investigation of Hydraulic Characteristics of Tank Reactor Model \ E.F. Avdeev, I.A. Chusov, V.A. Levchenko, Yu.D. Levchenko, Yu.S. Yur'ev; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of High Schools. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2005. – 8 pages, 2 tables, 4 illustrations. – References, 3 titles.

The results of experimental investigation of hydraulic characteristics of tank reactor model on «MP» installation are cited in the paper. Description of hydraulic model of two-loop tank type reactor plant is given. Experimental data cover wide range of installation performance parameters including emergency operational mode of reactor plant model with complete shut down of one feed-pump.

УДК 621.039.58

Experimental Investigations in Substantiation of Design Functions of the Passive System of Filtration of the Leaks to the NPP Annulus \ S.G. Kalyakin, A.A. Tsyganok; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of High Schools. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2005. – 7 pages, 4 tables, 5 illustrations. – References, 4 titles.

Experimental investigations of heat transfer and heat power of the “air – air” heat exchanger – vent pipe of the passive filtration system are carried out. It's obtained that heat transfer between heating and cold air is increasing below $Re_h \gg 5 \cdot 10^3$ and when heating air flow is further rising the heat transfer ratio is remain constant. The temperature of the internal surface of the heat exchange pipe in the investigated range of the operating conditions is exceed 120 °C that provide full vaporization of the dropping aerosol before it hit on the filters.

УДК 621.039,534.6

Experimental and Numerical Modelling of Liquid Metal Boiling Heat Transfer in a System of Parallel Fuel Subassemblies under conditions of Natural Convection \ G.A. Sorokin, X. Ninokata, X. Endo, A.D. Efanov, A.P. Sorokin, E.F. Ivanov, G.P. Bogoslovskaya, V.V. Ivanov, A.D. Volkov, I.R. Zueva; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of High Schools. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2005. – 15 pages, 1 table, 8 illustrations. – References, 32 titles.

The paper presents description of test facility and experimental data on boiling hydrodynamics and heat transfer obtained with eutectic sodium-potassium alloy in a system of two parallel heat generating subassemblies positioned in the natural circulation loop. Also the paper describes briefly the modified numerical model and numerical code for calculations of thermohydraulic characteristics in case of liquid metal boiling as within single subassembly and in a system of parallel subassemblies. It is shown that results of calculations are in a good agreement with experimental data. It is concluded that modeling of natural circulation thermohydraulics in reactor core allows the conditions of stable heat transfer to be determined and such phenomena as heat transfer crisis, fuel pin dryout, reactor core melting to be prevent in the mode of fast reactor emergency cooling up.