

СРАВНЕНИЕ ДВУХ ПОДХОДОВ ДЛЯ РАСЧЕТА СИЛОВОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ДВУХФАЗНОГО ПОТОКА С ТРУБНЫМ ПУЧКОМ

**В.Г. Асмолов, В.Н. Блинков, В.И. Мелихов, О.И. Мелихов,
А.А. Неровнов, Ю.В. Парфенов**

Московский энергетический институт (Национальный исследовательский университет МЭИ(ТУ)), г. Москва



Выполнено сравнение различных подходов для описания силового взаимодействия двухфазного потока с внешними поверхностями, в частности, с пучком труб (трубчаткой). Для расчета перепада давления двухфазного потока при поперечном обтекании трубного пучка была разработана двухскоростная модель течения двухфазного потока. При помощи этой модели были проведены сопоставительные расчеты перепадов давления на трубчатке с применением двух различных подходов для описания силового взаимодействия потока с трубчаткой. Полученные результаты расчетов были сопоставлены с опытными данными. Выполненные расчеты позволили определить наилучший подход для описания силового взаимодействия двухфазного потока с трубчаткой, который основан на использовании эмпирической информации по гидравлическому сопротивлению двухфазного потока.

Ключевые слова: гидравлическое сопротивление о трубчатку, двухфазные течения, математическое моделирование, двухскоростная модель.

Key words: hydraulic drag with the tube bundle, two-phase flows, mathematical simulation, two-velocity model.

ВВЕДЕНИЕ

Двухскоростные, двухтемпературные модели двухфазных потоков в настоящее время являются одним из основных средств исследований гидродинамики и теплообмена в сложном энергетическом оборудовании. Достоверность получаемых при этом результатов в существенной степени определяется качеством описания межфазного взаимодействия и гидравлического силового взаимодействия каждой фазы с внешними поверхностями (стенки канала, внутренние конструкции, пучки труб и т.п.).

При использовании двухскоростных моделей разработаны два основных подхода для описания силового взаимодействия каждой фазы с внешними поверхностями. В первом из них, который предложен создателями расчетных кодов семейства TRAC/TRACE [1], сила гидравлического сопротивления каждой фазы полага-

© В.Г. Асмолов, В.Н. Блинков, В.И. Мелихов, О.И. Мелихов, А.А. Неровнов, Ю.В. Парфенов, 2012

ется пропорциональной ее объемной доле, а для расчета этой силы используются корреляции, полученные для однофазных сред. Каких-либо опытных данных по гидравлическому сопротивлению для двухфазного потока при этом не используется. Проверка качества такого моделирования сопротивления осуществляется путем сопоставления с опытными данными результатов расчетов по двухскоростной модели.

Второй подход развит разработчиками кодов серии RELAP [2]. В нем непосредственно используются корреляции по гидравлическому сопротивлению для двухфазного потока, полученные в результате обработки опытных данных. При этом для вычисления сопротивления каждой фазы, которое требуется при применении двухскоростной модели среды, используются корреляции для однофазного потока. Однако в отличие от [1] производится специальная перенормировка, обеспечивающая равенство суммарной расчетной силы гидравлического сопротивления фаз и силы гидравлического сопротивления двухфазного потока, определенной по эмпирической корреляции. Таким образом, в подходе [2] в двухскоростную модель закладывается экспериментальная информация по гидравлическому сопротивлению для двухфазных потоков, что является ее преимуществом по сравнению с [1].

В работе [3] выполнено экспериментальное исследование истинного объемного паросодержания и гидравлического сопротивления при поперечном обтекании трубного пучка двухфазным водовоздушным потоком. Приведенные в [3] опытные данные позволяют сделать сравнительный анализ вышеописанных подходов для описания гидравлического сопротивления каждой фазы применительно к таким системам.

КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

В [3] экспериментально исследовались характеристики адиабатического водовоздушного потока при поперечном обтекании трубного пучка с коридорным расположением труб. Трубный пучок состоял из пяти рядов труб по ширине и 20-ти рядов труб по высоте, диаметр трубок равнялся 19 мм. Эксперименты проводились в диапазонах давлений 101–180 кПа; массовых расходных паросодержаниях 0–0,33; массовых скоростей водовоздушной смеси 27–818 кг/м²с. Рабочий участок был оснащен системой измерений, позволяющей определять перепад давления на трубном пучке с точностью ±0,25% и распределение истинного объемного паросодержания по высоте трубного пучка с точностью ±5% при различных величинах массового расходного паросодержания на входе в трубный пучок. Особое внимание в экспериментах было уделено исключению влияния концевых эффектов на получаемые результаты. Широкий диапазон изменения параметров, достаточно представительные геометрические характеристики пучка и наличие высокоточной системы измерения дают основание использовать полученные экспериментальные данные для проверки различных математических моделей, описывающих взаимодействие двухфазного потока с трубным пучком.

ДВУХСКОРОСТНАЯ МОДЕЛЬ ТЕЧЕНИЯ ДВУХФАЗНОГО ПОТОКА СКВОЗЬ ПОПЕРЕЧНЫЙ ТРУБНЫЙ ПУЧОК

Предполагается, что восходящее двухфазное течение при поперечном обтекании трубного пучка (трубчатки) является стационарным, одномерным и адиабатическим. В этом случае уравнения сохранения импульса имеют следующий вид:

$$\alpha_1 \frac{dp}{dz} = -\alpha_1 \rho_1 g + F_{21} - F_{31}, \quad (1)$$

$$\alpha_2 \frac{dp}{dz} = -\alpha_2 \rho_2 g - F_{21} - F_{32}, \quad (2)$$

где z – координата, направленная вверх; p – давление; α_1 и α_2 – объемные доли жидкой и газовой фаз соответственно; ρ_1 и ρ_2 – плотности жидкой и газовой фаз; g – ускорение силы тяжести; F_{21} – сила взаимодействия жидкости и газа; F_{31} и F_{32} – силы гидравлического сопротивления жидкой и газовой фаз.

Истинное объемное паросодержание вычисляется по соотношению

$$\varphi = \frac{\alpha_2}{\alpha_1 + \alpha_2}. \quad (3)$$

Рассматривая трубный пучок как пористую среду с объемной долей α_3 , комбинируя выражения (1)–(3), можно получить уравнение для определения истинного объемного паросодержания:

$$\varphi(1 - \alpha_3)(\rho_1 - \rho_2)g - \left(1 + \frac{\varphi}{1 - \varphi}\right)F_{21} + \frac{\varphi}{1 - \varphi}F_{31} - F_{32} = 0. \quad (4)$$

Сила межфазного взаимодействия F_{21} в общем случае является функцией разности скоростей жидкой и газовой фаз, диаметра дисперсных образований (пузырьки, капли, снаряды), коэффициента сопротивления, зависящего от режима течения двухфазной смеси.

Силы гидравлического сопротивления жидкой и газовой фаз о трубный пучок F_{31} и F_{32} зависят от скоростей фаз, геометрии трубного пучка и других факторов.

Задавая конкретные выражения для F_{21} , F_{31} , F_{32} , можно решить уравнение (4) и определить истинное объемное паросодержание φ .

Для описания силового межфазного взаимодействия (сила F_{21}) будем использовать модель Simovic a, Ocokoljica и Stefanovica [4], разработанную на основе анализа опытных данных [3]. В ней рассматриваются два режима течения: пузырьковый ($\varphi \leq 0,3$) и вспененный ($\varphi > 0,3$). При описании пузырькового режима в [4] используется соотношение из [5] с поправочным коэффициентом 0,4. Авторы [4] объяснили физическую природу этого коэффициента тем, что наличие трубчатки приводит к отклонению пузырей от сферической формы и к увеличению их коалесценции, что снижает коэффициент сопротивления. Для вспененного режима в [4] предложена новая корреляция, которая базируется на корреляции, предложенной разработчиками кода CATHARE [6].

При анализе экспериментов [3] для описания гидравлического сопротивления двухфазного потока о трубчатку в [4] был использован подход, предложенный создателями кода TRAC [1]: сила гидравлического сопротивления каждой фазы полагается пропорциональной ее объемной доле, а для расчета этой силы используются корреляции, полученные для однофазных сред. Авторы [4] применили соотношение для расчета гидравлического сопротивления однофазного потока о трубчатку, предложенное в работе [7]. В настоящей работе наряду с этим подходом был использован вышеописанный подход разработчиков кода RELAP [2], при этом для расчета гидравлического сопротивления однофазного потока о трубчатку было использовано также соотношение из [7], а в качестве эмпирической корреляции для гидравлического сопротивления двухфазного потока было выбрано соотношение, полученное в [3] на основе обработки опытных данных [3] с использованием параметра Локкарта-Мартинелли. Это соотношение выражает связь между отношением перепада давления на трубчатке из-за гидравлического сопротивления в двухфазном потоке $\Delta P_{2\phi}$ к перепаду давления на трубчатке из-за гидравлического сопротивления в однофазном потоке жидкости с таким же удельным массовым расходом ΔP_1

$$\phi_l^2 = \frac{\Delta P_{2\phi}}{\Delta P_1} \quad (5)$$

и параметром Локкарта- Мартинелли χ_{tt}^2 , который определяется как

$$\chi_{tt}^2 = \left(\frac{1-x}{x} \right)^{2-m} \left(\frac{\rho_2}{\rho_1} \right) \left(\frac{\mu_1}{\mu_2} \right)^m, \quad (6)$$

где x – массовое расходное паросодержание; μ_1 – динамическая вязкость воды; μ_2 – динамическая вязкость воздуха. Эти параметры связаны эмпирическим соотношением

$$\phi_l^2 = 1 + \frac{C}{\chi_{tt}} + \frac{1}{\chi_{tt}^2}. \quad (7)$$

Для описания полученных опытных данных в [3] рекомендуется использовать следующие значения эмпирических констант: $m = 0,2$ и $C = 8$ для удельной массовой скорости двухфазного потока $G > 200$ кг/м²с.

АНАЛИЗ ОПЫТНЫХ ДАННЫХ ПО ГИДРАВЛИЧЕСКОМУ СОПРОТИВЛЕНИЮ ДВУХФАЗНОГО ПОТОКА О ТРУБЧАТКУ С ПОМОЩЬЮ ДВУХСКОРОСТНОЙ МОДЕЛИ

На рисунке 1 показаны результаты расчета перепадов давления на трубчатке для эксперимента [3] при удельной массовой скорости двухфазного потока – 503 кг/м²с.

Из рисунка 1 следует, что описание гидравлического сопротивления о трубчатку по методике [2] дает результаты, более близкие к опытным данным, чем при использовании методики [1].

Были выполнены расчеты перепада давлений на трубчатке для всех экспериментальных режимов [3] в диапазоне удельных массовых скоростей двухфазного потока 262–818 кг/м²с. Мера расхождения расчетных и опытных данных определялась с помощью вычисления коэффициента стохастической аппроксимации

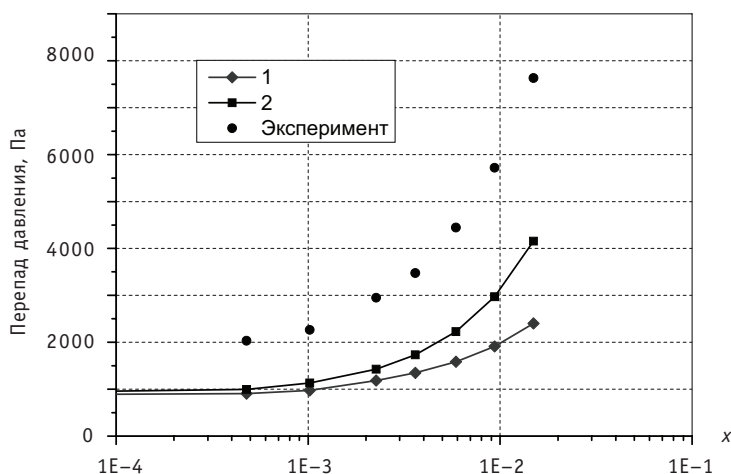


Рис. 1. Зависимость перепада давления на трубчатке от массового расходного паросодержания ($G = 503$ кг/м²с): 1 – модель межфазного трения [4], сопротивление каждой фазы о трубчатку в соответствии с [1], в расчете используется корреляция для расчета сопротивления однофазного потока о трубчатку [7]; 2 – модель межфазного трения [4], сопротивление каждой фазы о трубчатку в соответствии с [2], корреляция для расчета сопротивления однофазного потока о трубчатку [7]

(SAR) [8]. Особенность этого метода состоит в том, что он позволяет в рамках единого подхода выполнять аппроксимацию множеств входных и выходных данных произвольной конфигурации и вычислять меру соответствия между полученными аппроксимациями. Расчетные значения перепадов давления, вычисленные с использованием модели межфазного трения [4] и подхода [1] для моделирования гидравлического сопротивления о трубчатку, согласуются с экспериментом с коэффициентом $SAR = 0,34$. Расчетные значения перепадов давления, вычисленные с использованием модели межфазного трения [4] и подхода [2] для моделирования гидравлического сопротивления о трубчатку модели, согласуются с экспериментом лучше (коэффициент $SAR = 0,49$).

Как отмечалось выше, при расчете перепада давления двухфазного потока использовалась эмпирическая корреляция для расчета гидравлического сопротивления однофазного потока о трубчатку [7], которая, как показали расчеты, с погрешностью примерно 30–40% воспроизводит опытные данные [3] по перепаду давления однофазного потока жидкости. Это обстоятельство затрудняет сравнение подходов [1] и [2] для моделирования гидравлического сопротивления о трубчатку двухфазного потока. Поэтому для преодоления этой трудности были использованы экспериментальные величины перепада давления при течении однофазной жидкости, приведенные в [3] при сопоставлении подходов [1] и [2]. На рисунке 2 показаны результаты расчета перепадов давления на трубчатке для экспериментов [3], рассчитанные подобным способом. Использование в расчетах величины экспериментального перепада давления при течении однофазной жидкости приводит к улучшению согласия с экспериментом для обоих подходов по сравнению с предыдущим способом, что видно из сопоставления рис. 1 и 2. Экспериментальные результаты согласуются с расчетными результатами, вычисленными в соответствии с подходом [1], с коэффициентом $SAR = 0,49$, с расчетными результатами, вычисленными в соответствии с подходом [2], с коэффициентом $SAR = 0,85$, что весьма близко к предельному значению $SAR = 1$.

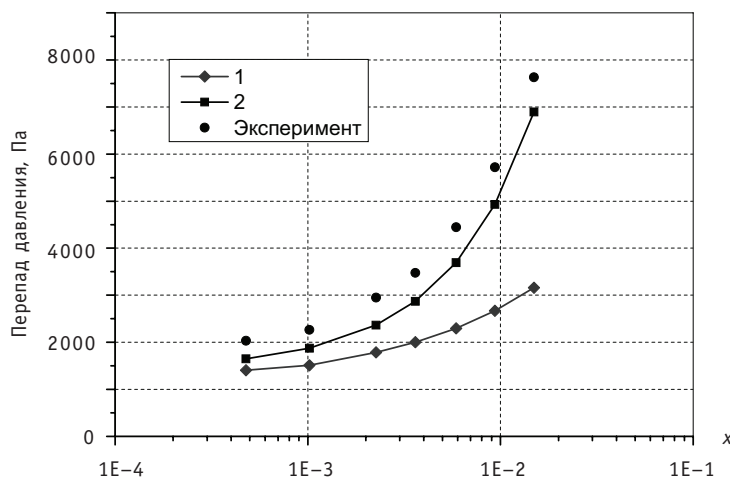


Рис. 2. Зависимость перепада давления на трубчатке от массового расходного паросодержания ($G = 503 \text{ кг/м}^2\text{с}$): 1 – модель межфазного трения [4], сопротивление каждой фазы о трубчатку в соответствии с [1], в расчете используется экспериментальный перепад давления однофазной жидкости; 2 – модель межфазного трения [4], сопротивление каждой фазы о трубчатку в соответствии с [2], в расчете используется экспериментальный перепад давления однофазной жидкости

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При помощи двухскоростной модели были проведены сопоставительные расчеты перепадов давления на трубчатке с применением двух различных подходов для описания силового взаимодействия потока с трубчаткой. Выполненный анализ позволяет сделать вывод о том, что использование подхода [2], основанного на использовании эмпирической информации по гидравлическому сопротивлению двухфазного потока, для численного моделирования теплогидравлических процессов в горизонтальных парогенераторах АЭС с ВВЭР с помощью расчетных кодов является более предпочтительным.

Следует отметить, что методика обработки опытных данных с использованием параметра Локкарта-Мартинелли не имеет никаких преимуществ перед другими эмпирическими методиками расчета [9]. Поэтому при расчетах теплогидравлики горизонтальных парогенераторов АЭС с ВВЭР ($P = 4-7$ МПа) с помощью кодов, основанных на двухскоростной модели пароводяной среды, следует использовать специально разработанные для этих условий на основе обобщения опытных данных эмпирические корреляции по гидравлическому сопротивлению двухфазного потока [10].

Работа выполнена в рамках реализации Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 гг. по Госконтрактам №П491 от 13.05.2010 и №П1091 от 31.05.2010 и при финансировании Российским фондом фундаментальных исследований (проекты РФФИ №10-08-00373-а, проект РФФИ №11-08-00410-а).

Литература

1. TRACEV5.0. Theory Manual, Field Equations, Solution methods and Physical models. U.S. Nuclear Regulation Commission, 2007, Washington, 696P.
2. RELAP5-3D code manual Volume 1: Code structure, system models, and solutions methods. Idaho National Laboratory, Idaho Falls, April 2005.
3. Dowlati, R., Kawaji, M., Chan, A.M.C. Pitch-to-diameter effect on two-phase flow across an in-line tube bundle//AIChEJ. – 1990. – V.36. – P.765-772.
4. Simovic Z.R., Ocoolkjic S., Stefanovic V.D. Interfacial friction correlations for the two-phase flow across tube bundles//International Journal of Multiphase Flow. – 2007. – V. 33. – P.217-226.
5. Ishii M., Zuber N. Drag coefficient and relative velocity in bubble, droplet and particulate flows//AIChEJ. – 1979. – V. 25. – P.843-855.
6. Bengaouer A., Bestion D. CATHARE 2 V1.3. Users guide lines/Equipe CATHARE Centre d'Etudes Nucleaires de Grenoble, STR/LML/EM/94-266, 1995.
7. Кузнецов Н.В., Щербakov А.З., Титова Е.Я. Новые расчётные формулы для сопротивления поперечно обтекаемых трубных пучков//Теплоэнергетика. – 1954. – №9. – С. 27-32.
8. Мелихов О.И., Мелихов В.И., Парфенов Ю.В. Оценка неопределенности результатов расчета эксперимента с большой течью теплоносителя//Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2007. – №4. – С. 109-118.
9. Лабунцов Д.А., Ягов В.В. Механика двухфазных систем. – М.: Издательство МЭИ, 2000. – 374 с.
10. Методические указания. Тепловой и гидравлический расчет теплообменного оборудования АЭС. РД 24.035.05-89. – Л.: Министерство тяжелого, энергетического и транспортного машиностроения СССР, 1991 – 211 с.

Поступила в редакцию 5.03.2012

The liquid metal coolants including lead containing metallic melts are used in a number of nuclear reactors at present. The impurities being contained in the coolant, primarily oxygen impurity, exert an important effect on its quality. Knowledge of the true values of the thermodynamic activity (TDA) of oxygen in different parts of the circuit enables this quantity to be held in a proper range. This is necessary to prevent slag formation and oxide phase crystallization in the "cold" parts of the circuit and preserve the protective oxide coating on the inner surfaces of structural materials in the "hot" sites. To do this, the OASCR calibration rig capable of reproducing the different modes of oxygen activity in liquid lead is constructed and tested. The OASCR calibration rig is entered in the State List. In SSC RF IPPE the OAA-1 analyzer is developed as well, to measure the oxygen activity in liquid lead and lead-bismuth. The analyzer makes it possible to take continuous remote measurements of the thermodynamic activity of oxygen in molten lead. In 2011 the OAA-1 analyzers were successfully tested using the OASCR test rig.

УДК 621.039.51

Optimization of Isotopic Composition Identification by Program Code MGAU using Statistical Methods \ V.I. Boyko, M.E. Silaev, Y.V. Nedbaylo; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2012. – 6 pages, 2 illustrations. – References, 8 titles.

This paper includes statistical analysis of isotopic composition results that were got with program MGAU. Multivariate analysis was chosen as suitable statistical method. In accordance with results of analysis the recommendations were made for using of this program code in combination with Low Energy Germanium Detector. These recommendations give opportunity to optimize of measurement process of uranium isotopic composition.

УДК 621.039.51

IRT Research Reactor Burnup Calculation for the Analysis of Conversion to Low Enrichment Uranium Fuel \ S.V. Ivakhin, A.I. Radaev, G.V. Tikhomirov, M.V. Shchurovskaya; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2012. – 10 pages, 5 tables, 4 illustrations. – References, 8 titles.

Neutronic characteristics of IRT-3M fuel assembly with dioxide high enrichment uranium (HEU) fuel and uranium-molybdenum low enrichment uranium (LEU) fuel are considered. Results of calculation of irradiated fuel isotope composition are presented. Test problems for IRT cells with HEU and LEU fuel calculated by MCU and MCNP codes are proposed.

УДК 621.311.25.004.7

Creation and Application of Multidimensional Information Models of NPP Unit for Decommissioning \ B.K. Bylkin, V.L. Tikhonovsky, D.V. Chuyko; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2012. – 11 pages, 3 illustrations. – References, 10 titles.

Basic principles of the imitational modeling application for the nuclear power plant decommissioning planning have been described.

УДК 532.546

The comparison of Two Approaches for Calculation of the Force Interaction of the Two-Phase Flow with Tube Bundle \ V.G. Asmolov, V.N. Blinkov, V.I. Melikhov, O.I. Melikhov, A.A. Nerovnov, Y.V. Parfenov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2012. – 6 pages, 2 illustrations. – References, 10 titles.

The comparison of the two different approaches for simulation of the force interaction of the two-phase flow with the external surfaces is presented in the paper. The two-velocity two-phase flow model was developed for calculation of the two-phase pressure drop for the cross flow across tube bundle. The pressure drops across tube bundle were calculated with this model using two different approaches for simulation of the two-phase flow drag with the tube bundle. The calculated results

were compared with the experimental ones. The best approach for simulation of the two-phase flow drag with the tube bundle based on the empirical two-phase flow hydraulic resistance correlations was identified.

УДК 621.039.51

Experimental Determination of Power-Release in the Lead and Uranium Samples Irradiated by High-Energy Protons \A.A. Goverdovskiy, B.V. Keadze, D.M. Kovalev, R.R. Chernov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2012. – 8 pages, 3 tables, 9 illustrations. – References, 2 titles.

The paper describes the development, laboratory tests, and accelerator experiments of a measurement procedure of power-release in lead and uranium samples. The measurement procedure involved provides a reliable measurement of temperature of the sample at its rate of the change of 0,1 K per minute. The power-release data received in the lead and uranium sample are very important for tackling the problems of optimization of heat-removal from the irradiated target sample. The results obtained contributes to the development of ADS.

УДК 621.039.5

Hydrodynamics and Heat Transfer in Reactor Installation «MASTER» \S.L. Dorohovich, Yu.A. Kazanskiy, A.A. Kazantsev, S.V. Kovalchuk, A.V. Levchenko, V.A. Levchenko, Yu.S. Yurev; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2012. – 13 pages, 2 tables, 10 illustrations. – References, 6 titles.

The paper is concerned with results of calculation investigations of heat and hydrodynamic processes in reactor installation «MASTER». Designing and testing calculations using CFD-code «KANAL» were performed.

УДК 621.039.58: 536.423

Verification of TECH-M and KORSAR/GP Computer Codes on the Basis of Experimental Results Obtained on Large-scale Test Facility GE2M-PG \A.V. Morozov, O.V. Remizov, D.S. Kalyakin, V.I. Asyunin, V.I. Schekoldin, S.I. Zaitsev, M.O. Zakutaev; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2012. – 11 pages, 1 table, 8 illustrations. – References, 8 titles.

The paper presents the results of calculations of the experiments conducted at the GE2M-PG test facility in SSC RF-IPPE. These experiments simulate the operation of steam generator during the cooling of the core of the “NPP-2006” VVER reactor by the joint action of passive safety systems HA-2 and PHRS in case of accidents with loss of primary coolant. The purpose of the work was to conduct a post test calculations and verification of computer codes TECH-M and KORSAR/GP in terms of modeling of heat transfer processes in a steam generator model at low heat fluxes in the presence of noncondensable gases, and without them. As a result of verification it is possible to conclude about the ability of computer codes to reproduce the phenomenon of non-condensable gases distribution, accumulation and their effects on heat transfer in a steam generator tube bundle.

УДК 621.039.534

Calculation of Heat Transfer at the Seven Heated Rod Assembly upon Supercritical Fluid Parameters \I.A. Chusov, A.S. Shelegov, V.I. Slobodchuk, V.F. Ukraintsev; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2012. – 8 pages, 9 illustrations. – References, 6 titles.

The results of calculation analysis of experiments on thermal hydraulic of the seven fuel pin assembly under supercritical coolant parameters are presented. Calculations were done in accordance with experimental condition and results of SSC RF IPPE on modeling coolant freon-12. Comparison between experimental and calculation results was carried out. Possible ways of improvement of calculation technique were discussed.