

МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ И РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК РЕАКТОРА СМ ПРИ ПЕРЕХОДЕ НА НОВОЕ ТОПЛИВО

Ю.А. Краснов, А.П. Малков, А.Л. Петелин

ОАО «ГНЦ НИИАР», г. Димитровград



Экспериментально исследованы физические характеристики активной зоны реактора СМ в процессе его перевода на новое топливо. Проведен анализ завершенных кампаний по технико-экономическим показателям работы реактора с опытными ТВС. Получены данные, необходимые для внесения изменений в проектную документацию реактора и выполнения уточняющего анализа безопасности. На основании полученных результатов сделаны рекомендации о возможности перевода новых ТВС из категории опытных сборок в категорию штатных.

Ключевые слова: исследовательский реактор СМ, новое топливо, результаты исследований, эффекты реактивности, температурный и мощностной коэффициенты реактивности, эффективность органов СУЗ.

Key words: research reactor SM, new fuel, investigation results, reactivity effects, temperature and power coefficients of reactivity, effectiveness of control rods.

Для расширения экспериментальных возможностей высокопоточного исследовательского реактора СМ [1] проводят его модернизацию, в результате которой будет обеспечена возможность размещения в активной зоне дополнительных экспериментальных каналов [2]. Компенсация потерь реактивности при удалении части твэлов при сохранении нейтронно-физических и эксплуатационных параметров реактора обеспечивается заменой ныне используемого твэла реактора. На первом этапе модернизации активной зоны решено увеличить на 20% количество топлива (с 5г ^{235}U до 6г ^{235}U) при сохранении геометрии и материального состава штатного твэла реактора СМ [3].

В сечении активная зона реактора СМ (рис.1) представляет собой квадрат 420×420мм (6×6 ячеек квадратной решетки с шагом 70 мм). Высота активной зоны 350 мм. Центральная замедляющая полость (ЦЗП) образована извлечением четырех ТВС и состоит из четырех фигурных бериллиевых вкладышей, образующих в сборе цилиндрическую полость, и из устройства, в котором размещают облучаемые мишени. Рабочие органы аварийной защиты (РО АЗ) и центральный компенсирующий орган (ЦКО) кольцевой формы расположены в ЦЗП. Компенсирующие органы (КО) размещены в четырех угловых ячейках активной зоны, а РО автомати-

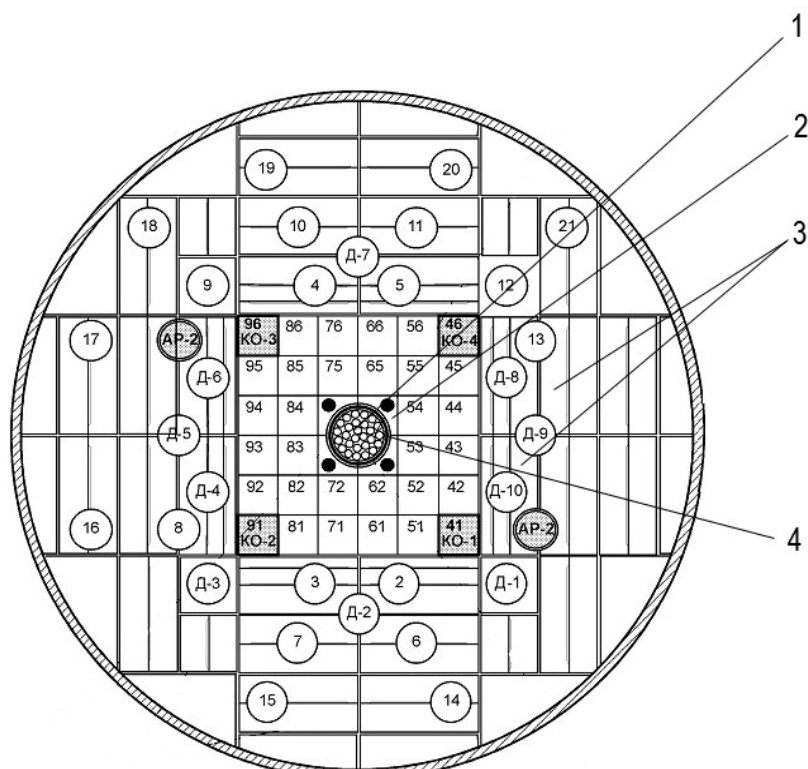


Рис. 1. Поперечное сечение реактора СМ: 1 – центральная полость для размещения мишеней; 2 – бериллиевые вкладыши; 3 – бериллиевые блоки отражателя; 4 – центральный компенсирующий орган (ЦКО)



ческого регулирования (АР) мощности реактора находятся в отражателе.

В 2005 г. выполнен поэтапный перевод реактора СМ на топливо с увеличенной загрузкой ^{235}U в твэле. В течение пяти месяцев эксплуатации реактора (11 кампаний) во все ячейки активной зоны были загружены опытные тепловыделяющие сборки при очередных заменах отработавшего топлива. Во время планового профилактического ремонта реактора заменены также ТВС в топливных подвесках компенсирующих органов. Таким образом, к моменту пуска реактора СМ после профилактического ремонта вся активная зона, включая топливные подвески КО, была набрана из опытных ТВС. Кроме этого были заменены также поглощающие части КО, выработавшие проектный ресурс.

Для уточнения основных физических характеристик реактора СМ с новым составом активной зоны на реакторе были проведены измерения:

- мощностного коэффициента реактивности;
- температурного эффекта реактивности;

- градуировочных характеристик КО;
- эффективности рабочих органов СУЗ;
- эффектов реактивности от загрузки в активную зону опытных ТВС с различным выгоранием топлива.

При определении реактивных характеристик на реакторе использовали методы, основанные на обращенном решении уравнения кинетики, реализованные в аналоговом реактиметре аппаратуры СУЗ КАРПАТЫ и цифровом многоканальном реактиметре разработки НИИАР. Применяли также метод перекомпенсации с известной реактивностью. Все используемые экспериментальные методики измерения нейтронно-физических характеристик аттестованы. Погрешность определения реактивных параметров составляет 4,2–10%.

Мощностной коэффициент реактивности определяли для рабочего уровня мощности (90 МВт) в условиях стационарного отравления по ^{135}Xe . Для измерения эффекта реактивности снизили в автоматическом режиме управления мощность реактора на 7 МВт и зафиксировали соответствующее изменение положения рабочего органа автоматического регулирования (РО АР). По изменению положения РО АР с известной эффективностью определили эффект реактивности при таком изменении мощности, который составил $0,034 \beta_{\text{эф}}$, соответственно, мощностной коэффициент реактивности для «горячего отравленного» состояния активной зоны реактора $-(4,7 \pm 0,3) \cdot 10^{-3} \beta_{\text{эф}}/\text{МВт}$. Это значение несколько выше мощностного коэффициента реактивности $-(4,0 \pm 0,3) \cdot 10^{-3} \beta_{\text{эф}}/\text{МВт}$ для аналогичного состояния активной зоны, загруженной штатным топливом.

Изотермический температурный эффект реактивности определяли по изменению реактивности разотравленного реактора, работающего на минимально контролируемом уровне (МКУ) мощности, при равномерном разогреве всех компонентов активной зоны в процессе работы главных циркуляционных насосов (ГЦН) при отключенных теплообменниках второго контура. В процессе разогрева регистрировали изменение температуры теплоносителя первого контура и положения одного из ранее отградуированного КО в критсостоянии. На рисунке 2 показаны кривые изменения температурного эффекта реактивности реактора СМ с новым и штатным топливом в активной зоне.

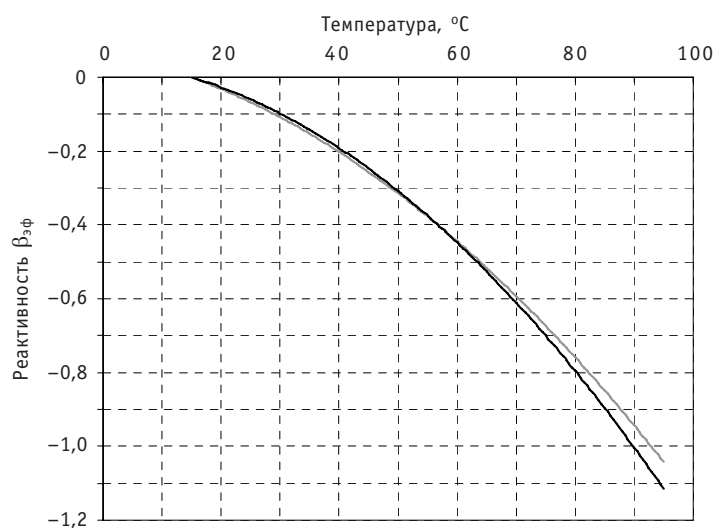


Рис. 2. График зависимости реактивности от средней температуры активной зоны реактора СМ, набранной из опытных (—) и штатных ТВС (---)

Таблица 1

Характеристики температурных эффекта и коэффициента реактивности активной зоны реактора СМ, набранной из штатных и опытных ТВС

Параметр	Опытные ТВС	Штатные ТВС
Зависимость эффекта реактивности $\rho(T)$ от температуры, $\beta_{эф}$	$-1,14 \cdot 10^{-4} T^2 - 1,40 \cdot 10^{-3} T + 4,67 \cdot 10^{-2}$	$-8,96 \cdot 10^{-5} T^2 - 3,16 \cdot 10^{-3} T + 6,67 \cdot 10^{-2}$
Зависимость температурного коэффициента реактивности $k_p(T)$ от температуры, $\beta_{эф}/^{\circ}\text{C}$	$-2,28 \cdot 10^{-4} T - 1,40 \cdot 10^{-3}$	$-1,79 \cdot 10^{-4} T - 3,16 \cdot 10^{-3}$
Значение температурного коэффициента реактивности для номинальной мощности $k_p(75 \leq T \leq 90)$, $\beta_{эф}/^{\circ}\text{C}$	$-(0,020 \pm 0,001)$	$-(0,018 \pm 0,001)$
Значение температурного эффекта реактивности при выводе реактора на номинальный уровень мощности $\Delta\rho(15 \leq T \leq 95)$, $\beta_{эф}$	$-(1,12 \pm 0,06)$	$-(1,04 \pm 0,05)$

В таблице 1 приведены аппроксимационные, полученные с использованием метода наименьших квадратов, зависимости от температуры температурных эффекта и коэффициента реактивности для активной зоны реактора СМ, загруженной новым и штатным топливом ($5 \text{ г } ^{235}\text{U}$ на твэл) в диапазоне изменения температуры от 15 до 95°C.

При поэтапной замене элементов КО (топливная подвеска и поглощающая часть) определили градуировочные характеристики КО, существенно отличающихся материальным составом топливной подвески и поглощающей части:

- поглощающая часть после двенадцати лет эксплуатации (выгоревший поглотитель), топливные подвески – штатные ТВС с выгоранием топлива 28–29 %;
- выгоревший поглотитель, топливные подвески – опытные ТВС с нулевым выгоранием;
- необлученный поглотитель, топливные подвески – опытные ТВС с нулевым выгоранием.

Полученную зависимость эффективности КО от глубины его погружения в активную зону нормировали на полную эффективность КО (при извлеченном органе его относительная эффективность равна нулю, при введенном в активную зону рабочем органе – единице). Усредненную зависимость относительной эффективности КО от их положения в активной зоне аппроксимировали полиномом вида

$$\rho(p) = A_4 \left(\frac{p}{p_{\max}} \right)^4 + A_3 \left(\frac{p}{p_{\max}} \right)^3 + A_2 \left(\frac{p}{p_{\max}} \right)^2 + A_1 \left(\frac{p}{p_{\max}} \right),$$

где ρ – эффективность органа, отн.ед.; A_1, A_2, A_3, A_4 – коэффициенты, полученные методом наименьших квадратов; p – глубина погружения РО в активную зону, мм по указателю положения (0 мм – извлечен, 450 мм – КО введен в активную зону); p_{\max} – максимальная глубина погружения КО в активную зону, мм.

Полученные таким образом усредненные (по четырем органам) коэффициенты градуировочных кривых КО представлены в табл. 2.

Из сравнения коэффициентов полиномов, описывающих градуировочные характеристики КО, следует, что при замене ТВС топливной подвески и поглотителя

Таблица 2

Характеристики градуировочных кривых КО реактора СМ

Материальный состав РО	Коэффициенты полинома 4-й степени				σ_3^* , %
	A_4	A_3	A_2	A_1	
Выгоревший поглотитель, ТП – ТВС 184.03 (выгорание 28–29%)	1,432	–4,454	3,757	0,266	1,6
Выгоревший поглотитель, ТП – ТВС 184.08 (выгорание 0%)	2,151	–6,188	5,042	–0,005	1,4
Необлученный поглотитель, ТП – ТВС 184.08 (выгорание 0%)	2,224	–6,449	5,226	–0,001	1,6

*Относительное среднеквадратическое отклонение экспериментальных точек от аппроксимирующей кривой.

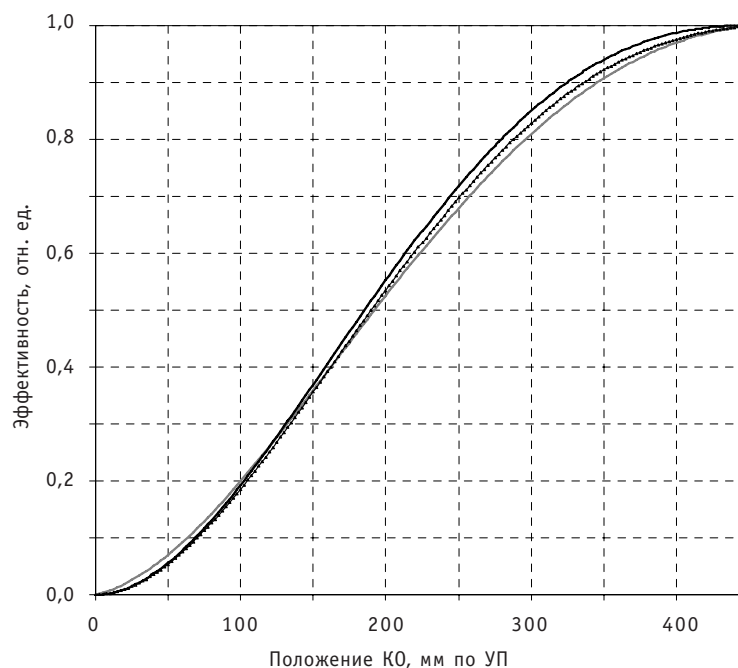


Рис. 3. Градуировочные кривые КО реактора СМ:

— выгоревший поглотитель, топливные подвески – штатные ТВС с выгоранием 28–29%;
 • • • – выгоревший поглотитель, топливные подвески – опытные ТВС с нулевым выгоранием;
 — — — необлученный поглотитель, ТП – ТВС типа 184.08 с нулевым выгоранием

ход градуировочной кривой несколько изменился, что наглядно подтверждается графиками, представленными на рис. 3.

Полная эффективность компенсирующих органов, отличающихся материальным составом топливной подвески и поглощающей части, была определена по результатам измерения их градуировочных характеристик при погруженном в активную зону центральном компенсирующем органе. Полученные результаты приведены в табл. 3.

Из представленных данных следует, что при замене «выгоревших» топливных подвесок на сборки с увеличенной загрузкой топлива эффективность КО в сред-

Таблица 3

Эффективности КО реактора СМ ($\beta_{эф}$)

Материальный состав КО	КО-1	КО-2	КО-3	КО-4	Сумма
Выгоревший поглотитель, топливная подвеска – штатная ТВС (выгорание 28–29%)	1,16±0,06	1,22±0,06	1,14±0,06	1,22±0,06	4,74±0,34
Выгоревший поглотитель, топливная подвеска – опытная ТВС (выгорание 0 %)	1,82±0,11	2,04±0,12	1,88±0,11	1,96±0,11	7,70±0,54
Необлученный поглотитель, топливная подвеска – опытная ТВС (выгорание 0 %)	1,83±0,11	2,07±0,12	2,09±0,12	2,00±0,12	7,99±0,56

Таблица 4

Эффективность ЦКО и КО реактора СМ при крайних положениях ЦКО

Положение РО по указателю положения, мм		Эффективность, $\beta_{эф}$					
ЦКО	КО-1–4	ЦКО	КО-1	КО-2	КО-3	КО-4	КО-1–4
350*	215	5,9±0,3	1,9±0,1	2,0±0,1	2,4±0,1	2,1±0,1	8,4±0,5
67	450	3,9±0,2	2,4±0,1	2,4±0,1	3,0±0,2	2,6±0,1	10,4±0,6

* – рабочий орган введен в активную зону

Таблица 5

Эффективность АР реактора СМ при различном положении ближайшего КО

Положение КО-1, мм	Эффективность АР-1, $\beta_{эф}$	Положение КО-3, мм	Эффективность АР-2, $\beta_{эф}$
450	0,005±0,001	450	0,014±0,001
0	0,074±0,003	0	0,174±0,005

Таблица 6

Эффекты реактивности при перегрузке ТВС с увеличенной загрузкой топлива в реакторе СМ ($\beta_{эф}$)

№ ячейки	ТВС 184.08 с выгоранием		ТВС 184.09 с выгоранием		ТВС 184.10 с выгоранием	
	0%	40%	0%	40%	0%	40%
53, 54, 62, 65, 72, 75, 83, 84	2,3±0,1	0,9±0,1	— ¹⁾	—	1,7±0,1	0,7±0,1
43, 44, 61, 66, 71, 76, 93, 94	1,5±0,1	0,4±0,1	1,2±0,1	0,4±0,1	1,1±0,1	0,4±0,1
52, 55, 82, 85	1,5±0,1	0,4±0,1	1,2±0,1	0,3±0,1	1,1±0,1	0,3±0,1
42, 45, 51, 56, 81, 86, 92, 95	1,1±0,1	0,5±0,1	—	—	—	—

¹⁾ ТВС данного типа не устанавливается в указанные ячейки

суммарная эффективность КО снижается в 1,24 раза. По мере извлечения КО эффективность ЦКО увеличивается до 1,5 раза.

Эффективности РО АР-1,2 в наибольшей степени зависят от глубины погружения в активную зону ближайшего КО, поэтому их определяли при различном положении КО-1 и КО-3. Полученные результаты представлены в табл.5.

Таким образом, при полном извлечении ближайшего КО эффективность РО АР увеличивается в 12 – 14 раз.

Получено, что значения эффективности органов СУЗ для активной зоны реактора СМ с новым топливом не выходят за паспортные диапазоны для проектного состояния активной зоны.

Для уточнения значений эффектов реактивности, полученных в экспериментах на критсборке, и исследования влияния перегрузки топлива с реальным выгоранием топлива на реактивность активной зоны на реакторе были проведены измерения эффектов реактивности от выгрузки опытных ТВС из различных ячеек (см. рис.1) активной зоны. В эксперименте определяли изменение подкритичности от выгрузки ТВС с различным выгоранием топлива из полностью загруженной опытными тепловыделяющими сборками активной зоны.

По результатам анализа значений эффектов реактивности при перегрузке ТВС с увеличенной загрузкой топлива, полученных в экспериментах, на критсборке и реакторе установлены значения эффектов реактивности (табл. 6), которые используют при планировании перегрузок реактора СМ с новым топливом.

Таким образом, в результате экспериментальных исследований в условиях активной зоны реактора СМ, полностью загруженной опытными ТВС с увеличенной загрузкой топлива, определены значения мощностного коэффициента реактивности и температурного эффекта реактивности, градуировочные характеристики КО с различным составом топливной подвески и поглощающей части, эффективность рабочих органов (РО) СУЗ, эффекты реактивности от загрузки в активную зону опытных ТВС с различным выгоранием топлива, которые вошли в пояснительную записку модернизированной активной зоны и используются при эксплуатации реактора.

Литература

1. Исследовательские реакторы НИИАР и их экспериментальные возможности/Под научн. ред. проф. В.А. Цыканова. – Димитровград: НИИАР, 1991.
2. Цыканов В.А., Святкин М.Н., Клинов А.В., Старков В.А. Модернизация активной зоны реактора СМ/Международная научно-техническая конференция «Исследовательские реакторы: наука и высокие технологии»: Сб. докладов. Т. 2. Ч. 1 (Димитровград, 25-29 июня 2001 г.). – Димитровград: ФГУП «ГНЦ РФ НИИАР», 2002. – С. 3-16.
3. Клинов А.В., Малков А.П., Старков В.А. и др. Характеристики и экспериментальные возможности реактора СМ после модернизации активной зоны/Международная научно-техническая конференция «Исследовательские реакторы в XXI веке»: Тез. докладов. – Москва: ФГУП НИКИЭТ, 2006. – С. 28.

Поступила в редакцию 31.08.2009

Obninsk, 2009. – 6 pages, 1 table, 4 illustration. – References 5 titles.

The result of calculation the indicators of emergency electrical power safety (EEPS) and emergency feedwater (EFW) of serial Power Unit with VVER-1000, are shown. We suggest using a steam-water injector (SWI) working on steam generators dump steam for water supply of steam generators in a blackout mode of NPP with VVER-1000 (PWR).

Calculated analysis of SWI is conducted at variable parameters of steam at the entrance to injector, corresponding to various moments of time from the beginning of steam-and-water damping with reference to the power unit with VVER-1000. For providing the working of the system it is suggested at the primary period of aftercooling to make water on injector from additional tanks of the sum of chemically saltless water. These additional tanks are based in the reactor hall at the level of 36,9 meters. The fundamental opportunity of operation of steam generators emergency supply system with SWI during ~ 3 hours from the beginning of damping is shown.

УДК 519.7:621.039

A Reliability Model for Safety System-Protected Object Complex with Periodic Testing of Safety System \ A.I. Pereguda, D.A. Timashov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2009. – 9 pages, 1 table, 1 illustration. – References, 5 titles.

In this paper an advanced safety system-protected object complex reliability model has been proposed, assuming the safety system has a complex structure. The model can be used to estimate such reliability indices as mean time to failure and probability of failure prior to time t . The proposed model can be easily used for different types of objects like nuclear power plants and others. This model is more computationally efficient than Markov and semi-Markov models especially for large systems.

УДК 621.039.538

Application of the risk analysis for calculating of the integral characteristics of the environmental radioactivity in the areas of Nuclear Power Plants \ I.I. Kryshev, E.K. Khandogina, A.Yu. Pakhomov, A.I. Kryshev, K.D. Sanina; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2009. – 7 pages, 5 tables. – References, 12 titles.

Methodology and assessments of the integral characteristics of the radioactivity of the atmosphere, water bodies and soil on basis of risk analysis are presented.

УДК 621.039.512

The Peculiarities of Nuclear Reactor Space Kinetic at the Space-Depended Part of Delayed Neutrons \ Yu.N. Volkov, V.I. Naumov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2009. – 10 pages, 2 tables, 2 illustrations. – References, 6 titles.

At this paper the results of qualitative analysis of space reactor kinetics at the space-depended part of delayed neutrons and distributed control system have been represented. The analysis based on one-dimensions, one-group diffusion reactor model with one effective group of delayed neutrons. The possibility and conditions of implementing of averaged part of delayed neutrons for the reactor kinetic analysis are under discussions.

УДК 621.039.51

Neutron Density Probabilistic Characteristics in Nuclear Reactor with Stochastic Disturbance in Medium Properties \ A.M. Zagrebayev, V.A. Nasonova; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2009. – 8 pages, 4 illustrations. – References, 23 titles.

A 1-dimensional reactor mathematical model with neutronic and thermal feedbacks and automatic control system is described. This model is used for neutron density statistical properties research in nuclear reactor with stochastic disturbance in medium properties. The results of modeling and statistical analysis of in-core data in RBMK nuclear reactor are given.

УДК 621.039.548

Methodical Peculiarities and Results of Experimental Investigation of the Physical Characteristics of the SM Reactor Converted to New Fuel \ A.Yu. Krasnov, A.P. Malkov, A.L. Petelin; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2009. – 7 pages, 6 tables, 3 illustrations. – References, 15 titles.

The paper presents the results of experimental investigation of changes in physical characteristics of the SM reactor core in the course of its conversion to new fuel with the increased content of U-235 in a fuel rod. The methodical peculiarities of the experiments are described. The functional dependences and values of the temperature and power coefficients of reactivity have been determined as well as the effectiveness and calibration characteristics of the control rods and reactivity effects when reloading the fuel assemblies. The performed micro-runs have been analyzed in terms of the feasibility of the reactor with pilot fuel assemblies. Data have been obtained to introduce changes into the reactor design documents and to revise the safety analysis. Based on the obtained results, the recommendations have been made on the possibility to use the new pilot fuel assemblies as standard ones.

УДК 621.039.52:615.849.1

Subcritical Systems for Neutron Therapy: Simulation Techniques & Performance Criteria \Yu.A. Kurachenko; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2009. – 9 pages, 3 tables, 7 illustrations. – References, 11 titles.

Simulation techniques based on combined transport codes application to new neutron facilities beams are proposed. «In air» & «in phantom» characteristics of the facilities are optimized for the neutron capture therapy. It is displayed that new facilities provide absolute safety, simplicity of technology and exploiting; they are highly competitive with these existing and designing ones for the neutron capture therapy.

УДК 621.039.553.34

Status of Study on Heat Transfer in Fuel Pin Bundles and Some Problems of Liquid-Metal Cooling \A.V. Zhukov, J.A. Kuzina, A.P. Sorokin; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2009. – 14 pages, 1 table, 11 illustrations. – References, 28 titles.

Data on heat transfer and temperature fields of fuel pins in triangular and square lattices with liquid-metal cooling are systematized. Necessity of detailed additional studies for square pin lattices is emphasized.

УДК 621.039.51:536.248.2

The generalize of Experimental Data on the Critical Heat Flux in the Clusters with Triangular Disposition of Rods \A.A. Ivashkevitch; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2009. – 6 pages, 2 tables. – References, 18 titles.

The correlation for the critical heat flux in form $q_{кр} = x_{bx} L_k$ in the uniformly heated clusters with the triangular disposition of the rods is obtained. As compared with the early suggested correlations the proposed correlation generalizes the experimental data in the more broad diapasons of the regime parameters and with smaller standard deviation.

УДК 621.039.58:532.529.5

Experimental Study of Non-equilibrium Thermal-hydraulic Processes in a Passive VVER Core Reflooding System \A.V. Morozov, O.V. Remizov, A.A. Tsyganok; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2009. – 9 pages, 1 table, 8 illustrations. – References, 5 titles.

The paper presents the results of experimental investigations of the interaction between saturated steam and cold water at its flowing out from a vertical tube of the passive VVER core reflooding system from the second-stage hydroaccumulators. A physical model of the process of water outflow into countercurrent saturated steam flow in a vertical blanked-off tube with a variable level has been proposed. The semi-empirical correlation has been obtained for calculating the time of discharge from vertical blanked-off tubes.

УДК 621.039.58:536.423

Experimental Measurement of the Thermal Capacity of the VVER Steam Generator Model in Condensation Mode in the Event of the Beyond Design Basis Accident \A.V. Morozov, O.V. Remizov, A.A. Tsyganok, D.S. Kalyakin; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2009. – 8 pages, 7 illustrations. – References, 4 titles.

The experimental measurement of the thermal capacity of the VVER steam generator model in