

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТЕЙ ОТДЕЛЬНЫХ ОРГАНОВ РЕГУЛИРОВАНИЯ СУЗ И ВЕЛИЧИНЫ АСИММЕТРИИ РАЗМНОЖАЮЩИХ СВОЙСТВ АКТИВНОЙ ЗОНЫ РЕАКТОРА БЛОКА № 3 КАЛИНИНСКОЙ АЭС

**В.А. Литицкий\*, Б.В. Кутин\*, В.А. Терешонок\*\*, В.А. Питилимов\*\***

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

*\*\* ВНИИАЭС, г. Москва*



Приведено описание методов измерения эффективностей отдельных органов регулирования СУЗ и величины асимметрии размножающих свойств активной зоны реактора на этапе физического пуска третьего блока Калининской АЭС.

**Ключевые слова:** СУЗ, ядерный реактор, управление реактором, асимметрия, физический пуск, реактивность, пространственный эффект.

**Key words:** safety system regulating units, nuclear power plant, reactor control, skewness, first criticality, reactivity, spacing effect.

Первая топливная загрузка активной зоны реактора с ВВЭР-1000 блока № 3 Калининской АЭС впервые была полностью укомплектована альтернативными тепловыделяющими сборками (ТВСА) с уран-гадолиниевым топливом без стержней выгорающего поглотителя. С целью всестороннего изучения характеристик активной зоны с новыми топливными сборками был значительно расширен объем исследований нейтронно-физических характеристик. Одним из дополнительных экспериментов было определение эффективностей каждого из органов регулирования (ОР) системы управления и защиты реактора (СУЗ) при практически свободной от твердых поглотителей активной зоне реактора (1 – 9 группы ОР СУЗ находились на верхнем концевом выключателе (ВКВ), 10 группа – в положении 70% от нижнего концевого выключателя (НКВ)). Такая информация важна для установления реальной эффективности ОР, выталкиваемых из активной зоны при проектной аварии, и уточнения констант компьютерных программ моделирования топливных циклов ВВЭР-1000, которые используются для обоснования безопасности эксплуатации энергоблоков АЭС. Результаты этих экспериментов позволяли оценить и асимметрию размножающих свойств активной зоны реактора. Чем меньше величина асимметрии, тем более равномерно происходит энерговыделение по активной зоне, что позволяет снять большую мощность с реактора, не превышая

максимально-допустимые тепловые нагрузки. Согласно эксплуатационным требованиям, асимметрия размножающих свойств не должна превышать 10%. По результатам определения асимметрии активной зоны допускается подъем мощности выше 1%  $N_{\text{ном}}$  ( $N_{\text{ном}} = 3000$  МВт).

Экспериментальные исследования с целью определения эффективностей отдельных органов регулирования СУЗ проводились на минимально контролируемом уровне мощности реактора при практически постоянных температуре теплоносителя и давлении в первом контуре и стабилизированных концентрациях борной кислоты в теплоносителе. Отравление реактора ксеноном-135 и самарием-149 отсутствовало. Сбросы органов регулирования осуществлялись из критического или надкритического состояния, которое достигалось перемещением регулирующей 10-й группы ОР СУЗ вверх. Мощность реактора перед сбросами органов регулирования находилась в диапазоне  $(1-5) \cdot 10^{-2} \% N_{\text{ном}}$ . При сбросе ОР она снижалась до  $(1-9) \cdot 10^{-4} \% N_{\text{ном}}$ . Сбросы органов регулирования из 1-9 групп СУЗ производились из крайнего верхнего положения, а ОР из 10-й группы – из положения 70% от НКВ. Время перемещения органов регулирования от ВКВ до НКВ при сбросе составляло  $\sim 2.1$  с. Для повышения точности измерений сбросы всех органов регулирования из 1-9 групп СУЗ осуществлялись при одном и том же положении 10-й группы ОР СУЗ. Положения органов регулирования 10-й группы перед их поочередными сбросами в активную зону были одинаковыми. Для контроля идентичности условий измерения периодически, перед началом определения эффективностей ОР практически каждой конкретной группы, измерялась эффективность одного и того же заранее выбранного реперного ОР (ОР 12-23 из четвертой группы СУЗ). На рисунке 1 представлена схема расположения каналов ионизационных камер, органов регулирования СУЗ и их распределения по группам.

Измерение и регистрация параметров в ходе эксперимента осуществлялись с помощью системы экспериментального контроля (СЭК) [1], которая была специально разработана во ФГУП ГНЦ РФ-ФЭИ для определения нейтронно-физических характеристик в период пуска и освоения мощности блока № 3 Калининской АЭС. Комплекс аппаратуры СЭК состоял из четырех модулей регистрации параметров (МРП-32), каждый из которых обеспечивает регистрацию до 32-х параметров, трех цифровых вычислителей реактивности (ЦВР-10) с самописцами, источников питания ионизационных камер СВИП-4 и автоматизированного рабочего места руководителя пуска блока (АРМ). С помощью реактиметров ЦВР-10 производилось измерение реактивности и токов ионизационных камер (ИК) КНК-4, которые находились в каналах биологической защиты № 3, 14, 25 и по высоте размещались напротив центра активной зоны реактора. Каждая ионизационная камера подключалась к отдельному реактиметру. При этом значения других параметров (температуры и давления теплоносителя, концентрации борной кислоты в теплоносителе и др., кроме положений ОР СУЗ), необходимых для определения коэффициентов и эффектов реактивности, измерялись с помощью модулей МРП-32. Вся полученная от реактиметров ЦВР-10 и модулей МРП-32 информация поступала в АРМ научного руководителя пуска по сети CAN2.0B в режиме реального времени. Информация о положении ОР СУЗ поступала в АРМ по протоколу ModBus TCP сети EtherNet от штатной аппаратуры регистрации параметров АЭС. АРМ представляло собой ПЭВМ со специализированным программным обеспечением для одновременной записи в архив с частотой 10 Гц всех принимаемых параметров и воспроизведения их на экране монитора в графическом и цифровом видах в режиме реального времени.

Обработка результатов измерений, полученных при помощи СЭК, осуществлялась согласно изложенной ниже методике.

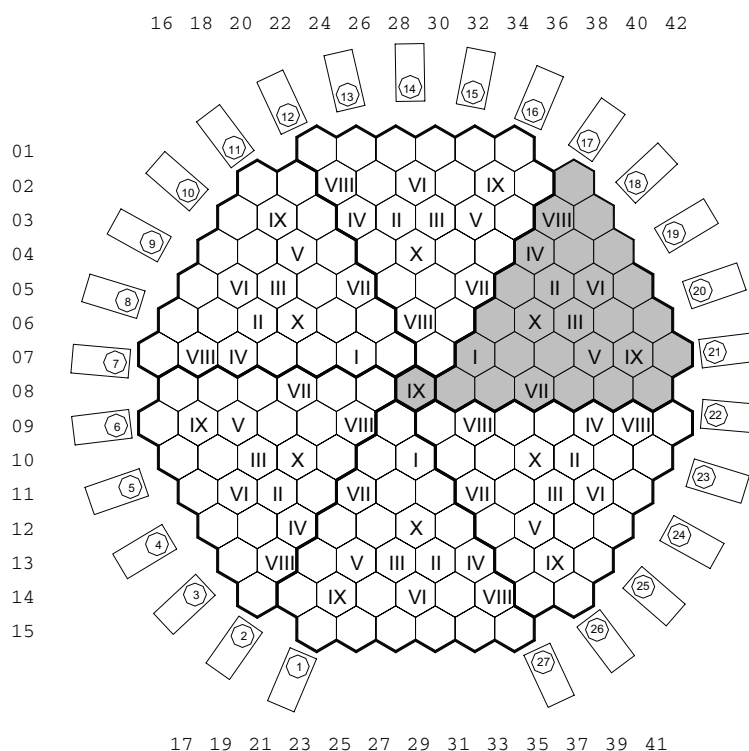


Рис. 1. Схема расположения каналов ионизационных камер и органов регулирования СУЗ:

① – номер канала ИК; X – номер группы ОР СУЗ

Эффективность  $i$ -го органа регулирования  $k$ -й группы определялась по формуле

$$\Delta\rho_{ik} = |\rho_{уст} - \rho_0| \cdot \beta_{эф} \quad (1)$$

где  $\rho_0$  – реактивность в исходном положении (непосредственно перед сбросом ОР),  $\rho_{уст}$  – установившееся значение реактивности после падения органа,  $\beta_{эф}$  – эффективная доля запаздывающих нейтронов.

Среднеарифметическое значение эффективностей симметричных органов регулирования  $k$ -й группы

$$\Delta\rho_k = \sum_{i=1}^n \Delta\rho_{ik} / n, \quad (2)$$

где  $n$  – количество симметричных органов регулирования в  $k$ -ой группе СУЗ.

За величину асимметрии размножающих свойств активной зоны (в процентах) принималось максимальное значение величины

$$\omega = \left| \sqrt{\Delta\rho_{ik} / \Delta\rho_k} - 1 \right| \cdot 100, \%. \quad (3)$$

Результаты определения асимметрии по результатам измерений эффективности отдельных органов регулирования приведены в табл. 1. Отметим, что на точность результатов измерений по данным различных ИК влияли, в основном, следующие факторы:

- изменение температуры теплоносителя в первом контуре (в пределах одного градуса) при длительной выдержке на НКВ (до восьми минут) сброшенного в активную зону органа регулирования;
- не всегда достигалась окончательная стабилизация показаний реактивности

по всем каналам ее измерения при положениях ОР на НКВ из-за снижения токов ИК до минимально допустимых значений, после чего сброшенный в активную зону ОР извлекался в исходное положение.

Длительность стабилизации нейтронного потока при положении органа регулирования на НКВ была обусловлена необходимостью снижения до нуля вклада в измеряемую реактивность «пространственных эффектов», сильно зависящих от положения ОР относительно конкретной ИК. На рисунках 2, 3 в качестве примера показаны зависимости от времени реактивности по данным трех ИК при сбросе ОР СУЗ 13 – 22 из восьмой группы и ОР СУЗ 07-32 из первой группы. ОР СУЗ 13-22 находится на периферии, а ОР СУЗ 07-32 – практически в центре активной зоны. На рисунках показан интервал времени с момента сброса ОР СУЗ до момента стабилизации реактивности по показаниям трех камер. Видно, что после сброса органа реактивность по всем каналам ее измерения стабилизируется на одном и том же уровне. Характер изменения результатов измерения реактивности в интервале времени от начала падения органа регулирования до их стабилизации обусловлен действием пространственных эффектов, зависящих от взаимного расположения падающего ОР и ИК. Чем ближе ОР СУЗ расположен к ИК, тем более существенным будет изменение реактивности. Длительность стабилизации реактивности зависит в данных экспериментах как от взаимного положения ИК и ОР, так и от эффективности ОР. Для наиболее эффективных органов регулирования, расположенных вблизи ИК, интервал времени достижения стабилизации результатов измерения реактивности после их падения будет максимальным.

Для определения асимметрии активную зону реактора условно разделяются на шесть секторов симметрии. Первый – это сектор симметрии  $60^\circ$  (на рис. 1 ячейки, закрашенные темно-серым цветом), второй –  $120^\circ$ , который определяется путем поворота (по часовой стрелке) первого сектора на  $60^\circ$ , третий –  $180^\circ$ , который определяется путем поворота первого сектора на  $120^\circ$  и так далее до шестого сектора, который получается в результате поворота первого сектора на  $300^\circ$ . Далее для каждого органа СУЗ из сектора симметрии  $60^\circ$  находятся симметричные ему органы из других секторов и вычисляются их среднеарифметические значения эффективностей по формуле (2). После этого рассчитываются величины асимметрии по формуле (3). Вычисления производятся отдельно по каждому измерительному каналу. Для органа 08-29 из девятой группы оценка асимметрии не производилась, т.к. он является общим для всех секторов симметрии и симметричных ему органов нет. Результаты вычислений представлены в табл. 1. Из анализа данных таблицы следует, что максимальная асимметрия размножающих свойств активной зоны реактора не превышает 5% и имеет место для ОР с координатами 02-25 (восьмая группа СУЗ) по данным ИК № 25. Последнее удовлетворяет эксплуатационным требованиям, согласно которым асимметрия размножающих свойств не должна превышать 10%.

Результаты измерения эффективности отдельных ОР СУЗ, полученные на этапе определения асимметрии активной зоны, позволили найти усредненные по всем трем каналам измерения и по симметричным в группе СУЗ значения эффективностей органов регулирования. Результаты отличия этих данных от соответствующих расчетных величин, полученных по программе БИПР-7А, представлены в табл. 2. Видно, что экспериментальные значения  $\Delta\rho_k$  (относительная погрешность определения которых составляет 5%) превышают соответствующие расчетные данные. Наибольшие различия имеют место для органов регулирования первой группы СУЗ, расположенных в центральной части активной зоны, ОР из восьмой группы, а также для ОР из шестой и седьмой групп СУЗ.

Таблица 1

**Результаты исследований асимметрии размножающих свойств активной зоны реактора**

$T_{\text{аз}}$ °C	$H_{10'}$ %	Сбрасываемый ОР		$\omega, \%$		
		координаты	номер группы	ИК № 3	ИК № 14	ИК № 25
1	2	3	4	5	6	7
280.2	70	08-29	9	0	0	0
280.5	70	07-40	9	0.5	0.8	0.5
280.0	70	14-25	9	2.5	2.3	2.7
279.9	70	03-22	9	0.9	0.8	0.9
280.2	70	13-36	9	1.3	1	1.3
280.3	70	09-18	9	0.5	0.2	0.7
280.6	70	02-33	9	2	1.7	2
279.9	70	14-33	8	3.9	3.7	3.2
280.5	70	02-25	8	4.2	3.5	4.6
280.1	70	09-40	8	1.8	1.9	1.8
280.7	70	07-18	8	2.4	2.6	2.7
280.4	70	13-22	8	2.1	1.9	1.8
280.4	70	03-36	8	1.4	1.7	1.8
279.6	70	09-26	8	2.3	2.3	2.3
280.0	70	06-29	8	1.9	1.9	1.9
280.3	70	09-32	8	1.2	1.2	1.2
280.1	70	10-29	1	1.6	1.6	1.6
280.1	70	07-32	1	0.5	4.5	4.5
280.3	70	07-26	1	0.5	4.5	4.5
281.5	70	11-32	7	0.7	0.6	0.8
281.6	70	08-23	7	1	1.2	1.4
281.5	70	05-32	7	1	0.5	0.8
281.6	70	11-26	7	1.6	1.5	1.6
281.7	70	08-35	7	1.1	1.1	1.2
281.6	70	05-26	7	1.5	1.6	1.4
281.5	70	11-38	6	3.2	3.4	3.9
281.7	70	02-29	6	0.8	0.7	1
280.9	70	11-20	6	0.8	0.7	1
280.9	70	05-38	6	0.2	1	0.3
281.8	70	14-29	6	0.2	0.1	0.3
281.6	70	05-20	6	3.3	3.2	3.5
279.4	70	07-38	5	0.2	1.2	1.2
279.7	70	14-23	5	2.7	2.8	3.2
279.5	70	13-26	5	2.1	2	2
279.4	70	03-32	5	1.1	1	2
279.6	70	12-35	5	1.5	1.4	1.6
279.7	70	09-20	5	0.7	0.8	0.8
279.5	70	13-32	4	1.2	1.5	1.5
279.4	70	04-35	4	0.8	0.2	0.7
279.7	70	07-20	4	2.1	2.2	2.3
279.6	70	09-38	4	2.1	2	2.1
279.5	70	12-23	4	1.8	1.3	1.5
279.7	70	03-26	4	2.4	2.5	2.1

Продолжение табл. 1

1	2	3	4	5	6	7
279.4	70	11-36	3	1	1	1.5
279.4	70	03-30	3	1.7	1.7	1.1
279.5	70	10-21	3	1.8	1.9	1.7
279.4	70	06-37	3	1.3	1.2	1.2
279.8	70	13-28	3	1.6	1.4	2.1
279.3	70	05-22	3	1.5	1.5	2.1
279.7	70	10-37	2	0.1	0.1	0.1
279.5	70	03-28	2	3.8	3.9	4.2
279.3	70	11-22	2	2.5	2.4	2.1
279.8	70	05-36	2	0.6	0.5	0.3
279.1	70	13-30	2	1.9	2.4	2.5
279.5	70	06-21	2	0.3	0.5	0.3
279.9	70	10-35	10	1.2	1	1.4
279.4	70	04-29	10	1.4	0.9	1
279.6	70	10-23	10	0.8	0.1	0
279.0	70	06-35	10	0.5	1.3	1.2
279.4	70	12-29	10	0.5	0.6	0.7
280.2	70	06-23	10	1.8	1.9	2.4

Таблица 2

### Эффективности органов регулирования СУЗ

Номер группы	Номер ячейки в секторе 60°	Эксперимент			Расчет			Разница $\Delta\rho_k - \Delta\rho_{\text{расч}}$ , %
		$H_{10}$ , %	$T_{\text{аз}}$ , °C	$C_{\text{бк}}$ , г/кг	$H_{10}$ , %	$T_{\text{аз}}$ , °C	$C_{\text{бк}}$ , г/кг	
1	8	70	280.1 – 280.3	6.78	80	280	6.85	20
2	20	70	279.1 – 279.8	6.78	80	280	6.85	8.2
3	16	70	279.3 – 279.8	6.78	80	280	6.85	8.2
4	23	70	279.4 – 279.7	6.78	80	280	6.85	6
5	11	70	279.4 – 279.7	6.78	80	280	6.85	6
6	21	70	280.9 – 281.8	6.78	80	280	6.85	15
7	4	70	281.5 – 281.7	6.78	80	280	6.85	18
8	8	70	279.6 – 280.3	6.78	80	280	6.85	20
8	26	70	279.9 – 280.7	6.78	80	280	6.85	9.8
9	1	70	280.2	6.78	80	280	6.85	16
9	12	70	279.9 – 280.6	6.78	80	280	6.85	9.8
10	15	70	279.0 – 280.2	6.78	80	280	6.85	11

Проведенные измерения эффективностей отдельных ОР СУЗ и определение асимметрии активной зоны реактора показали следующее.

1. Результаты измерения реактивности после сброса отдельных ОР СУЗ в активную зону сильно зависят от положения этого ОР СУЗ относительно используемой в эксперименте ИК (пространственный эффект), однако к 300 – 400-ой секунде после падения органа реактивность стабилизируется и становится по всем каналам ее измерения равной одному и тому же значению. Таким образом, эффективность отдельных ОР СУЗ может измеряться с помощью любой используемой в эксперименте ИК вне зависимости от ее положения относительно ОР СУЗ. Для сокращения времени проведения физэкспериментов с целью определения эффективностей отдельных органов регулирования СУЗ рекомендуется сигналы от всех ис-

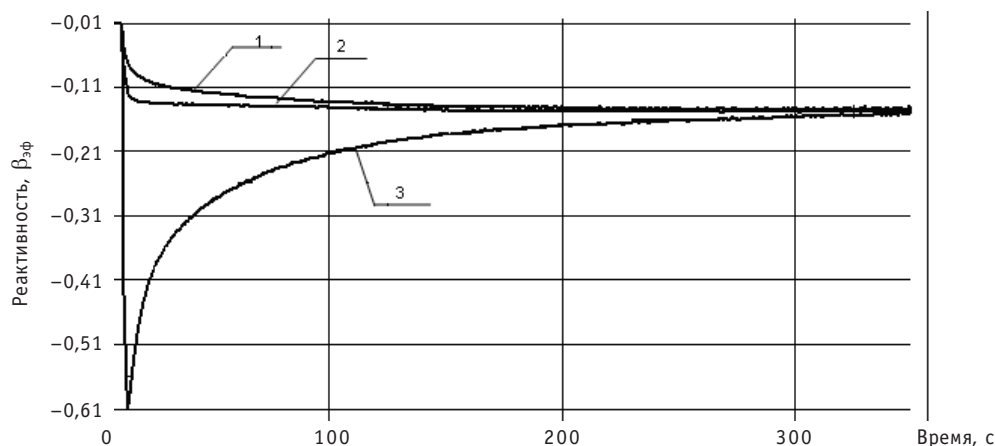


Рис. 2. Эксперимент по определению эффективности ОР СУЗ 13-22 из восьмой группы: 1 – ИК № 14; 2 – ИК № 25; 3 – ИК № 3

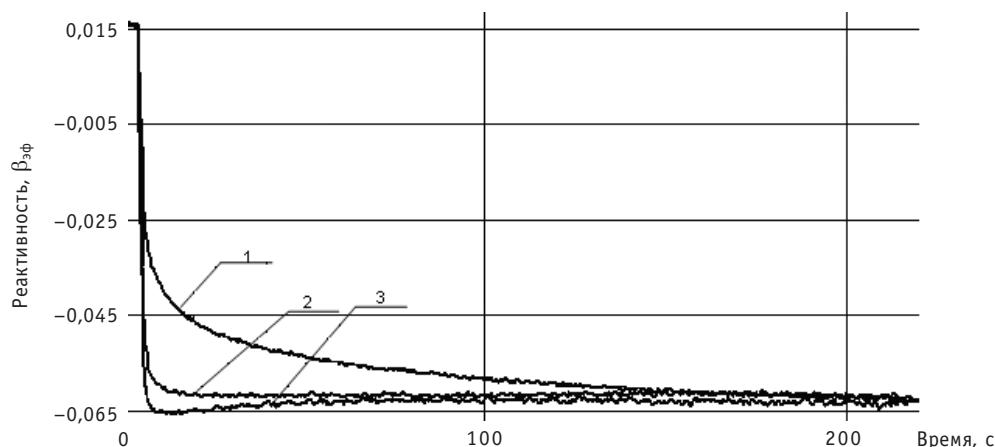


Рис. 3. Эксперимент по определению эффективности ОР СУЗ 07-32 из первой группы: 1 – ИК № 3; 2 – ИК № 25; 3 – ИК № 14

пользуемых для измерения нейтронного потока ИК подавать на вход одного измерителя реактивности. Данную рекомендацию необходимо подтвердить экспериментально.

2. Экспериментальные значения эффективностей отдельных симметрично расположенных ОР СУЗ систематически превышают соответствующие расчетные значения. Это превышение достигает 10% и более, что существенно выше допустимой погрешности измерений. Обусловлено это, очевидно, неточностью констант, используемых в программе БИПР-7А для топливных загрузок, укомплектованных ТВСА. Рекомендуется уточнить константы, используемые в программе БИПР-7А, для уменьшения ошибки при теоретическом расчете.

### Литература

1. Литицкий В.А., Кутин Б.В., Паршутин В.С. Комплекс программно-технических средств для измерения нейтронно-физических характеристик в период пуска и освоения мощности энергоблока №3 Калининской АЭС // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2008. – №2.

Поступила в редакцию 27.08.2010



## ABSTRACTS OF THE PAPERS

### УДК 539.17

*Modified CASCADEX 1.2 Software for Spallation Reaction Calculation \A.A. Andrianov, A.Yu. Konobeev, Yu.A. Korovin, I.S. Kuptsov, A.Yu. Stankovskiy; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2011. – 12 pages, 7 tables, 2 illustrations. – References, 15 titles.*

The paper describes an improved version software system CASCADEX 1.2 designed to calculating high-energy spallation reactions. Improvements included latest version TALYS 1.2 code integration, double-differential cross-sections light nuclei (p, n, d, t,  $^3\text{He}$ ,  $^4\text{He}$ ) emission calculation module implementation, based on moving source model, cluster formation process accounting. The article also describes Interactive Media IViS CASCADEX, providing an opportunity for multiple-criteria serial calculations, meaningful choice of model parameters on the results of quantitative comparison with experiment, and includes a wide range of processing and presentation calculation results. The results, based on developed software, for constant improvement goal is shown.

### УДК 621.039.51

*The Determination of Reactor Control and Safety System Regulating Units Efficiency and Active Zone Skewness of Kalinin NPP Third Unit \V.A. Lititsky, B.V. Kutin, V.A. Tereshonok, V.A. Pitilimov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2011. – 7 pages, 2 tables, 3 illustrations. – References, 1 title.*

This article describes measurement techniques of reactor control and safety system regulating units efficiency and active zone skewness during first criticality of Kalinin nuclear power plant third unit.

### УДК 621.039.62

*Electricity Generation System Small Nuclear Power Plant Using High Effective Low Temperature Thermionic Process \P.A. Maslov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2011. – 10 pages, 4 tables, 7 illustrations. – References, 10 titles.*

Considered of a small nuclear power plant AIST-MP and the proposed bases design solutions for the construction of electricity power generating elements and channels. Proposed a method for equalizing the temperature of collectors EGC height EGE. Calculations of the characteristics EGC with a dynamic feed of cesium vapor, is confirmed the high efficiency of energy conversion, which is comparable with the efficiency of nuclear power plants on the basis of turbomachine conversion cycle.

### УДК 621.039.517

*The SM Reactor Calculation Model and Its Testing Results when Evaluating Fuel Burnup and Fission Products Distribution \V.A. Starkov, Y.B. Chertkov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2011. – 9 pages, 2 tables, 6 illustrations. – References, 10 titles.*

This paper presents the description of SM reactor core calculation model developed on the MCU-RR2 base. The approach to the initial data assignment allows the geometric characteristics to be described in details and the reactor core structure heterogeneity to be taken into account, power density calculation being done for each fuel element. The MCU-RR2 add-ons code allows modeling the movement of the control rods during a reactor run as well as determining the distribution of power density throughout fuel elements without application of averaging (homogenizing) methods. Coefficients of power density distribution non-uniformity throughout reactor cells, FA profile and height, thermal flux density on fuel elements surface and critical power ratio can be determined as well.