

## ПУТИ ОПТИМИЗАЦИИ КОЭФФИЦИЕНТОВ РЕАКТИВНОСТИ АКТИВНОЙ ЗОНЫ РЕАКТОРА ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ «МАСТЕР»

**Д.М. Титов\***, **С.Л. Дорохович\*\***, **Ю.А. Казанский\*\*\***

\* *Московское отделение компании Siemens,  
115184, Москва, ул. Большая Татарская, д. 9*

\*\* *Экспериментальный научно-исследовательский и методический центр «Моделирующие системы». 249035, Калужская обл., Обнинск, пр. Ленина, 133.*

\*\*\* *Обнинский институт атомной энергетики НИЯУ МИФИ.  
249033, Калужская обл., Обнинск, Студгородок, 1*



После увеличения предельного значения мощности реактора теплоснабжения МАСТЕР путем введения кольцевого канала с теплоносителем ухудшились коэффициенты обратных связей. В связи с этим возникла необходимость найти способы изменения коэффициентов реактивности в новой конструкции реактора, сохранив при этом естественную циркуляцию, низкое давление в активной зоне и выходную температуру теплоносителя. С этой целью рассчитаны зависимости коэффициентов реактивности от ширины и места расположения кольцевого канала, а также от степени обогащения топлива. В качестве расчетного инструмента в работе использовался нейтронно-физический код WIMS-D4. Полученные результаты показали, что наилучшие коэффициенты обратных связей могут быть достигнуты при уменьшении ширины кольцевого канала и увеличении обогащения топлива. В то же время коэффициенты реактивности не чувствительны к изменению радиуса расположения кольцевого канала. Ограничения по обогащению топлива (требования МАГАТЭ) и по уменьшению размера кольцевого канала (невозможность снятия заданного уровня мощности или значительное увеличение высоты теплообменника) показали, что перспективы улучшения обратных связей за счет вариации ширины и расположения кольцевого канала исчерпаны. Возможные улучшения могут быть получены при изменении выбранного выгорающего поглотителя и нейтронного спектра, вариации которого можно достичь путем изменения обогащения топлива и доли теплоносителя в активной зоне.

**Ключевые слова:** физика реакторов, выгорающий поглотитель, реакторы малой мощности, коэффициенты реактивности.

### ВВЕДЕНИЕ

Одно из направлений применения ядерной энергии – это использование реакторов малой мощности (тепловая мощность до 300 МВт). Представление о разработках блоков малой мощности, в том числе и сверхмалой (тепловая мощность менее 30 МВт), можно получить из работ [1] и периодических конференций по малой энергетике, например, [2]. В публикациях количество проектов существенно превосходит

© *Д.М. Титов, С.Л. Дорохович, Ю.А. Казанский, 2014*

число реализованных. Отметим, что в США в 1950-х гг. были построены около десятка маломощных реакторов для энергосбережения воинских частей, расположенных вдали от систем централизованного снабжения. Эти энергоблоки не получили дальнейшего развития, поскольку при их проектировании не уделяли большого внимания экономической составляющей разработок [3]. Позднее появились проекты, в которых во главу угла ставилась конкуренция с энергоблоками сравнимой мощности на традиционном органическом топливе. Некоторые из проектов были реализованы [4, 5].

Данное исследование, являясь продолжением работ [6, 7], связано с разработкой реактора теплоснабжения МАСТЕР мощностью 300 кВт. Среди других проектов реакторов малой и сверхмалой мощности данная реакторная установка отличается естественной циркуляцией теплоносителя, низким давлением в первом контуре (0.16 МПа) и реализацией идеи теплопроводной матрицы от топлива к теплоносителю, что дает дополнительный барьер безопасности.

За время проработки проекта был представлен вариант с тепловой мощностью 1 МВт, с улучшенными техническими и экономическими показателями [8], полученный в результате следующих усовершенствований:

- увеличена тепловая мощность реактора до 1 МВт за счет введения в конструкцию активной зоны дополнительного кольцевого канала охлаждения;
- уменьшено обогащение урана ниже 20%;
- снижено содержание Вe за счет применения Al-Be-сплава;
- применен диспрозий (Dy) в качестве выгорающего поглотителя (ВП) с целью пассивной компенсации изменения реактивности в результате выгорания топлива.

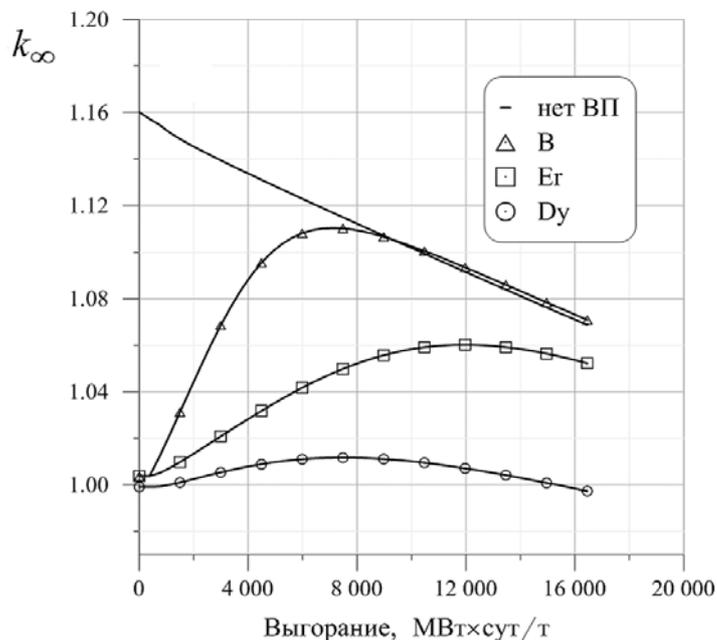


Рис.1. Зависимость  $k_{\infty}$  от выгорания топлива для различных типов выгорающих поглотителей

Размещение диспрозия в стальной оболочке кольцевого канала охлаждения дало выигрыш с точки зрения величины выбега реактивности в течение кампании реактора. На рисунке 1 представлена зависимость  $k_{\infty}$  от выгорания топлива для различных типов выгорающих поглотителей [9].

В качестве расчетного инструмента в работе использовалась транспортная программа WIMS-D4 (Winfrith Improved Multigroup Scheme) [10], основным направлением которой является нейтронно-физический расчет ячеек ядерных реакторов различного типа. WIMS-D4, разработанный в Уинфрисе (Великобритания), – один из наиболее известных кодов этого класса, использующий собственную 69-групповую библиотеку констант и библиотеку ENDF/B-VII [11], подготовленную для разных материалов и температур, на основе формата ENDF (Evaluated Nuclear Data File).

Температурные коэффициенты реактивности были рассчитаны следующим образом. Определялись эффективные коэффициенты реактивности для двух температур теплоносителя (или топлива) – начальной при 300 К и температуре при номинальном уровне мощности. Приращение реактивности нормировалось на 1 К и таким образом вычислялся средний коэффициент реактивности по теплоносителю (или топливу) на интервале температур при нулевой и номинальной мощности.

Мощностной коэффициент реактивности рассчитывался для двух состояний. В первом состоянии для нулевой мощности температура в активной зоне бралась 300 К. Во втором состоянии для 100%-ой мощности реактора брались следующие температуры: топливо – 800 К, оболочка твэла – 600 К, оболочка активной зоны – 400 К, Al-Be-замедлитель – 500 К, теплоноситель – 360 К (плотность 0.967 г/см<sup>3</sup>), материал обечайки – 360 К. При этих температурах рассчитывался эффективный коэффициент размножения нейтронов по формуле  $\alpha_w = (k_1 - k_2) \cdot 10^5 / 100$ , где  $k_2$  – эффективный коэффициент размножения нейтронов для 100%-ой мощности, а  $k_1$  – эффективный коэффициент размножения нейтронов для нулевой мощности. В данном случае было найдено среднее значение мощностного коэффициента реактивности на интервале мощности от 0 до 100%.

Улучшение характеристик саморегулирования при помощи ВП (диспрозия) негативно повлияло на коэффициенты реактивности – положительный коэффициент реактивности по температуре теплоносителя вырос практически вдвое. В таблице 1 представлены уточненные расчетные значения коэффициентов реактивности для случая размещения диспрозия в стальной оболочке канала и без него. При расчетах температурных коэффициентов реактивности «изменялась» температура только топлива или только теплоносителя, что выражалось в изменениях макроскопических сечений взаимодействия нейтронов с ядрами топлива или теплоносителя.

Таблица 1

Коэффициент	WIMS-D4 (без Dy)	WIMS-D4 (с Dy)
$\alpha_{H_2O}$ , pcm/K	7.0	14.7
$\alpha_f$ , pcm/K	-2.1	-2.0
$\alpha_w$ , pcm/%	-5.1	-1.2
Температурные коэффициенты реактивности: $\alpha_{H_2O}$ – по теплоносителю; $\alpha_f$ – по топливу; $\alpha_w$ – мощностной		

Целью данной работы является поиск возможностей уменьшения температурного коэффициента реактивности по теплоносителю, а в идеальном случае – перевод данного коэффициента в отрицательную область за счет оптимизации характеристик активной зоны реактора МАСТЕР мощностью 1 МВт(т).

### **ЗАВИСИМОСТЬ КОЭФФИЦИЕНТОВ РЕАКТИВНОСТИ ОТ ПАРАМЕТРОВ АКТИВНОЙ ЗОНЫ И ОБОГАЩЕНИЯ ТОПЛИВА**

Кольцевой канал охлаждения был введен в активную зону реактора МАСТЕР для улучшения теплосъема и, следовательно, как одна из возможностей увеличения теп-

ловой мощности реакторной установки. С точки зрения нахождения путей для оптимизации коэффициентов реактивности были выбраны следующие технические предложения: изменение радиуса расположения кольцевого канала охлаждения внутри активной зоны; изменение толщины кольцевого канала и вариации обогащения топлива.

Рассчитаны зависимости температурного коэффициента от радиуса расположения канала для нескольких значений в интервале от 10 до 25 см, при этом для каждого случая менялась толщина канала в интервале от 1 до 2.5 см. Обогащение по  $^{235}\text{U}$  было фиксированным и составляло 17%. Необходимо отметить, что все зависимости были рассчитаны без ВП. Расчеты показывают, что изменение коэффициентов реактивности в случае размещения ВП (диспрозия) в кольцевом канале охлаждения и без него принимает линейный характер (рис. 2). По этой причине расчет зависимостей был проведен без ВП.

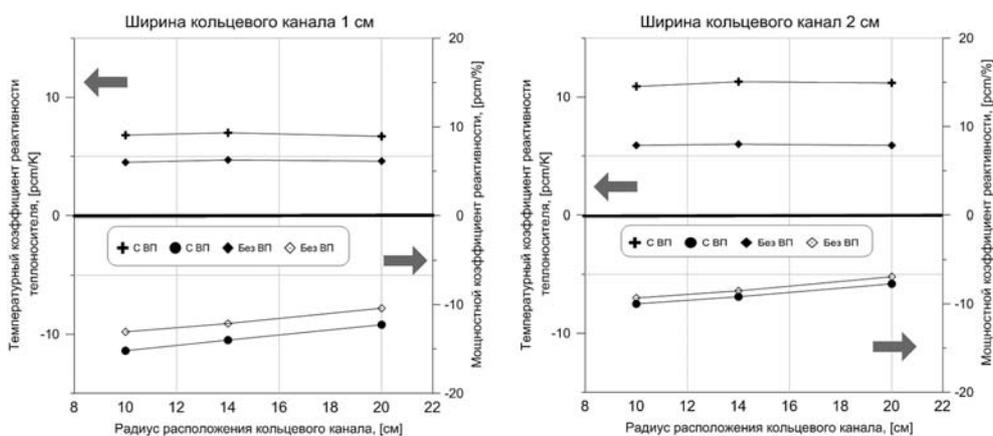


Рис. 2. Зависимость коэффициентов реактивности при размещении ВП (диспрозия) в кольцевом канале и без него от параметров кольцевого канала

Далее строилась трехмерная поверхность (рис. 3, 4). По оси  $Z$  отложен температурный коэффициент реактивности по теплоносителю в  $\text{pcm}/\text{K}$ , по  $X$  и  $Y$  – соответственно радиус расположения кольцевого канала в сантиметрах и толщина канала с теплоносителем в сантиметрах.

Из представленных на рис. 3 и 4 результатов следует, что коэффициент реактивности по температуре теплоносителя оказывается положительным и минимально возможное значение принимает при максимальном обогащении топлива 20% и толщине канала 1 – 1.5 см. Радиус расположения канала не влияет на значение этой составляющей коэффициента реактивности по температуре теплоносителя.

Наряду с поведением коэффициента реактивности по температуре теплоносителя было рассмотрено поведение мощностного коэффициента (рис. 5, 6). Как и в предыдущем случае, было проведено исследование зависимости мощностного коэффициента реактивности от обогащения топлива по  $^{235}\text{U}$  и толщины кольцевого канала. В качестве опорных значений использовалось обогащение топлива в интервале от 12 до 20%. Радиус расположения канала равнялся 14 см. Мощностной коэффициент реактивности представлен в  $\text{pcm}$  на 1% мощности реактора.

На основании результатов расчета для мощностного коэффициента реактивности можно сделать вывод, что максимум значения мощностного коэффициента наблюдается на радиусе расположения канала 10 см при толщине канала 1 см и с обогащением топлива 12%.

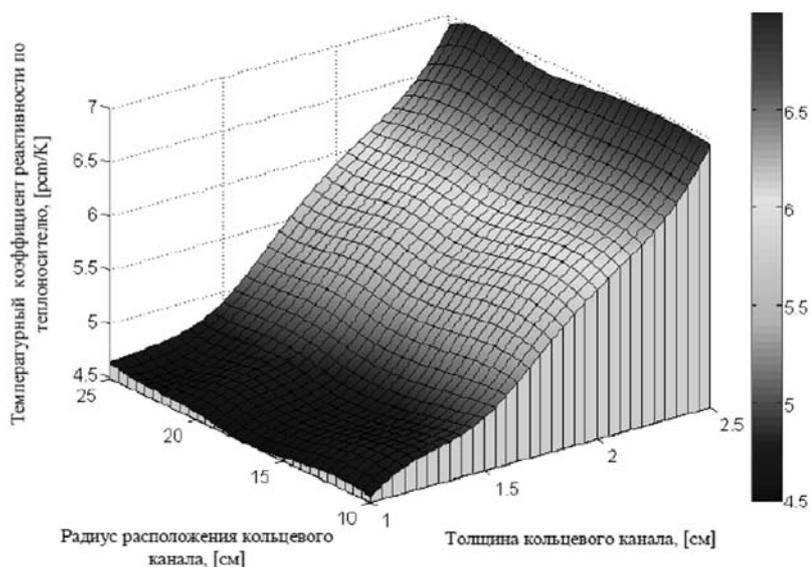


Рис. 3. Зависимость коэффициента реактивности по температуре теплоносителя от толщины и радиуса расположения кольцевого канала

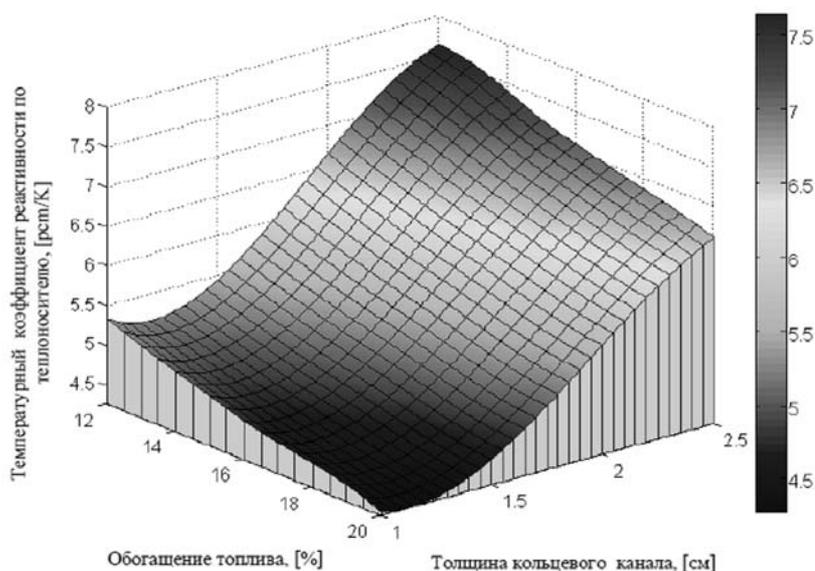


Рис. 4. Зависимость коэффициента реактивности по температуре теплоносителя от обогащения топлива и толщины канала

### ОБОБЩЕНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ АНАЛИЗА ЗНАЧЕНИЙ КОЭФФИЦИЕНТОВ РЕАКТИВНОСТИ РЕАКТОРА «МАСТЕР»

Из приведенных результатов расчета следует, что наибольший вклад в изменение численных значений коэффициентов реактивности вносят изменения толщины канала охлаждения и обогащения топлива. Варьируя толщину кольцевого канала охлаждения можно существенно повлиять на температурный и мощностной коэффициенты реактивности для реперной модели активной зоны.

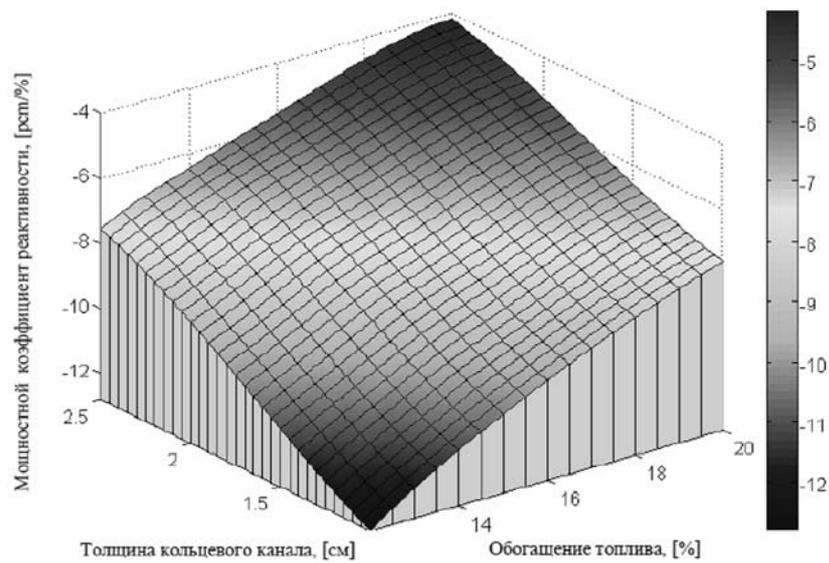


Рис. 5. Зависимость мощностного коэффициента реактивности от толщины кольцевого канала и обогащения топлива

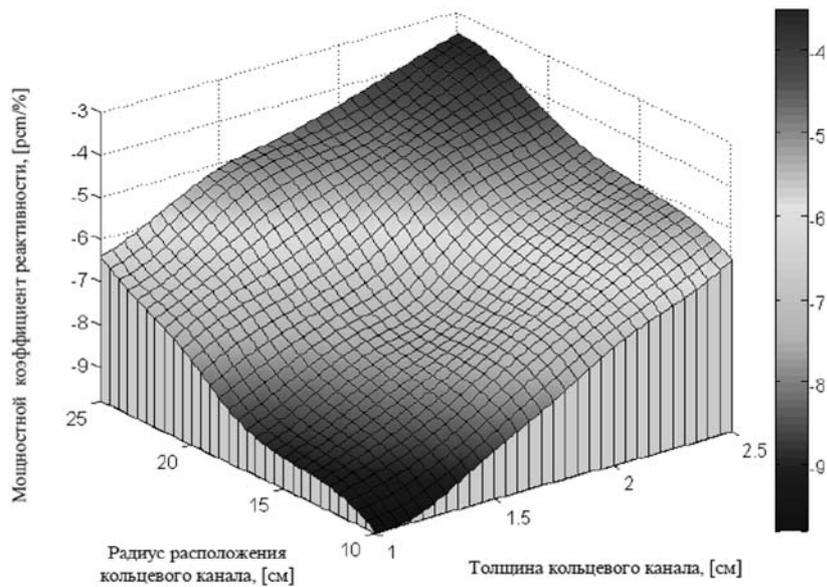


Рис. 6. Зависимость мощностного коэффициента реактивности от радиуса расположения кольцевого канала и толщины канала

На основании результатов расчета (рис. 7) обогащение топлива было зафиксировано на уровне 17%, но при этом уменьшалась толщина канала охлаждения до 1 см. Наряду с нейтронно-физическими оценками работы реакторной установки, безусловно, необходимо сделать теплогидравлические оценки, связанные с изменением толщины кольцевого канала охлаждения, а следовательно, и режимов работы контуров и сопутствующего оборудования.

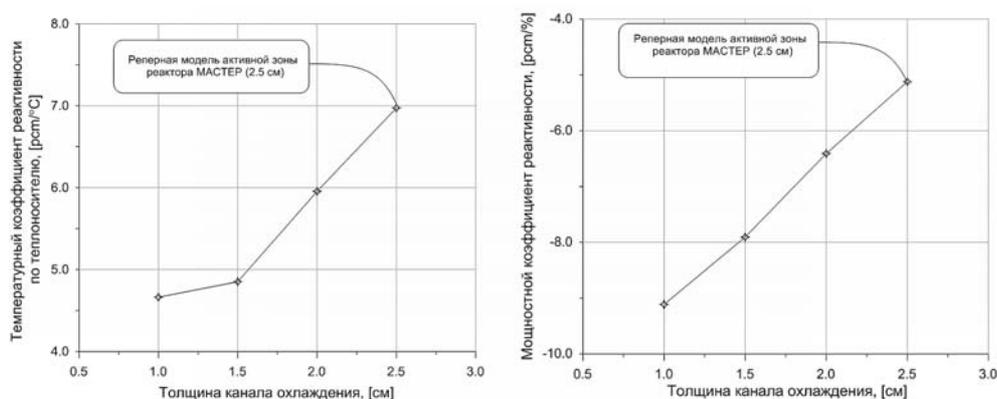


Рис. 7. Зависимость коэффициентов реактивности реактора МАСТЕР от толщины канала

Оценки реперной модели реакторной установки МАСТЕР были представлены в работе [12]. В таблице 2 даны сравнительные характеристики для ширин кольцевого канала внутри АЗ.

Таблица 2

Параметр	Значение	
	Проектировочный расчет	Проектировочный расчет
Ширина кольцевого канала внутри АЗ, см	2,5	1,0
Средняя температура теплоносителя первого контура на входе АЗ, °С	87,4	64,1
Средняя температура теплоносителя первого контура на выходе АЗ, °С	105,7	100
Расход воды первого контура (теплоносителя), кг/с	13,1	6,64
Средняя температура воды на входе второго контура, °С	90	90
Средняя температура воды на выходе второго контура, °С	59	56
Площадь поверхности теплообмена теплообменника первого контура, м <sup>2</sup>	42,12	80,65
Высота теплообменника первого контура, м	1,4	2,7
Средняя температура воды на входе контура потребителя, °С	80	80
Средняя температура воды на выходе контура потребителя, °С	50	50
Площадь поверхности теплообмена теплообменника контура потребителя, м <sup>2</sup>	42,12	63,85

Из таблицы 2 видно, что уменьшение толщины кольцевого канала охлаждения приводит к увеличению перепада температур в активной зоне, массогабаритов теплообменников первого контура и площади теплообменников контура потребителя, что неминуемо сказывается на технико-экономических показателях реакторной установки в целом. Необходимо отметить, что толщина канала охлаждения в 1 см является спорным решением с точки зрения безопасности реактора. Увеличение по-

догрева АЗ приведет к росту накипи на стенке кольцевого канала, что повлияет на расход и другие теплогидравлические характеристики реактора.

## ВЫВОДЫ

1. Реперная конструкция реакторной установки МАСТЕР может быть оптимизирована за счет изменения обогащения топлива либо замены типа и расположения выгорающего поглотителя.

2. Пути оптимизации исчерпаны либо ограничены принятой мощностью реактора 1 МВт и желанием сохранить исходную конструкцию и естественную циркуляцию.

3. Возможные улучшения могут быть получены при изменении нейтронного спектра, вариации которого можно достичь за счет обогащения топлива и доли теплоносителя в активной зоне.

## Литература

1. Status of innovative small and medium sized reactor designs 2012// IAEA. International Atomic Energy Agency (IAEA), Vienna, September 2012.
2. Международный семинар «Малая энергетика. Итоги и перспективы». 10-11 октября 2001 г., Москва.
3. *Williams D.V., Magnuson D.W., Batch M.L. et al.* Army Package Power Reactor// AEC Research Development Report, ORNL-2128, August, 1956.
4. *Каплар Е.П., Лисица Ф.Д.* Необслуживаемые саморегулируемые термоэлектрические станции малой мощности для централизованного теплоснабжения./ Международный конгресс и научно-техническая выставка «Малая энергетика и инвестиции». 1-4 ноября 1994 г., Москва. Сборник тез. докл. С. 43, 44.
5. *Доллежалъ Н.А., Малышев В.М., Широков С.В. и др.* Некоторые итоги эксплуатации Белоярской АЭС им. И.В. Курчатова// Атомная энергия, 1974, т. 36, № 6. С. 432.
6. *Казанский Ю.А., Левченко В.А., Матусевич Е.С., Юрьев Ю.С., Балакин И.П., Белугин В.А., Дорохович С.Л. и др.* Саморегулируемый реактор сверхмалой мощности для теплоснабжения «МАСТЕР ИАТЭ». // Известия вузов. Ядерная энергетика. №3, 2003.
7. *Казанский Ю.А., Матусевич Е.С., Левченко В.А., Юрьев Ю.С. и др.* Технические предложения для разработки концепции подземной ЯЭУ сверхмалой мощности «МАСТЕР ИАТЭ»/ Сборник тезисов, докладов и сообщений. Ядерное общество России. Ежегодная конференция (28 июня - 2 июля 1999 г., Обнинск). – Обнинск, -1999. -С. 173.
8. *Levchenko V.A., Kazansky Yu.A., Barshevtsev V.A., Yurev Yu.S., Belugin V.A.* Design concept of self-contained low power reactor «MASTER» for heat supply// Progress in Nuclear Energy.- 2008.-Vol. 50, -PP. 314-319.
9. *Казанский Ю.А., Левченко В.А., Матусевич Е.С., Юрьев Ю.С., Баршевцев В.А., Титов Д.М. и др.* Некоторые нейтронно-физические и теплогидравлические характеристики усовершенствованной конструкции реактора «МАСТЕР»// Известия вузов. Ядерная энергетика.-2008. -№ 1. -С. 41.
10. *Askew J.R., Fayers F.J., Kemshell F.B.* A General Description of the Lattice Code WIMS, Journal of the British Nuclear Energy Society 5, 4, 564, 1966.
11. Final report of a coordinated research project WIMS-D Library Update IAEA, December 2007.
12. *Дорохович С.Л., Юрьев Ю.С., Казанский Ю.А.* Гидродинамика и теплообмен в реакторной установке «МАСТЕР» // Известия вузов. Ядерная энергетика. - 2012. - № 3. - С. 116-128.

Поступила в редакцию 02.10.2014 г.

## Авторы

Титов Борис Михайлович, руководитель проекта  
E-mail: dmitry.titov@siemens.com

Дорохович Сергей Леонидович, заведующий лабораторией  
E-mail: dors@ssl.obninsk.ru:

Казанский Юрий Алексеевич, профессор, доктор физ.-мат. наук  
E-mail: kazansky@iate.obninsk.ru

UDC 621.039.56

## APPROACHES TO OPTIMIZATION OF CORE REACTIVITY COEFFICIENTS FOR THE «MASTER» HEAT SUPPLY REACTOR

Titov D.M. \*, Dorokhovich S.L. \*\*, Kazansky Yu.A. \*\*\*

\* Moscow branch of Siemens Co. 9, Bol'shaya Tatarskaya str., Moscow, 115184 Russia

\*\* Experimental Scientific-Research and Methodology Center «Simulation Systems» (SSL). 133, Lenin str., Obninsk, Kaluga reg., 249035 Russia

\*\*\* Obninsk Institute for Nuclear Power Engineering, National Nuclear Research University «MEPhI». 1 Studgorodok, Obninsk, Kaluga reg., 249040 Russia

### ABSTRACT

After the power output of the MASTER heat supply reactor increased due to insertion of an annular coolant channel, feedback coefficients deteriorated. Thereby, it was necessary to find ways to change reactivity coefficients in the new reactor design while at the same time retaining such features as natural circulation, low core pressure and outlet core temperature of the coolant. Calculations were made of the dependence of the reactivity coefficients on the annular coolant channel width and location and on fuel enrichment. The WIMS-D4 neutron-physical code was used as a calculation tool. The results showed that the feedback coefficients optimum can be achieved by reducing the annular channel width and increasing fuel enrichment. At the same time the reactivity coefficients are insensitive to changing the radius of the annular coolant channel location. Restrictions for fuel enrichment (IAEA requirements) coupled with geometry restrictions of the annular channel listed above (impossibility to remove thermal power or a significant increase in the height of the heat exchanger) have shown that the possibilities of improving feedbacks through varying the width and location of the annular channel have been used up. Possible improvements can be achieved by changing the type of burnable poison and the neutron spectrum.

**Key words:** reactor physics, burnable poison, low power reactors, reactivity coefficients.

### REFERENCES

1. Status of innovative small and medium sized reactor designs 2012. IAEA. International Atomic Energy Agency (IAEA), Vienna, September 2012.
2. Mezhdunarodnyj seminar "Malaja energetika". Itogi i perspektivy. [International seminar «Low Energy. Results and Prospects»]. Moscow, 2001.
3. Williams D.V., Magnuson D.W., Batch M.L, Army Package Power Reactor. AEC Research Development Report, ORNL-2128, August, 1956.
4. Kaplar E.P., Lisica F.D. Neobsluzhivaemye samoreguliruemye termoelektricheskie stancii maloj moshhnosti dlja centralizovannogo teplojenergospabzhenija. [Non maintenance, self regulation low power thermoelectric station for centralized heat and power supply]. Mezhdunarozdnyj kongress i nauchno-tehnicheskaja vystavka "Malaja energetika i investicii". [International congress «Low energy and investment»]. Moscow, 1994, p.43 (in Russian).
5. Dollezhal N.A., Malyshev V.M.C., Shyrokov S.V. Nekotoroye itogi jekspluatatsii

- Belojarskoj AES im. I.V. Kurchatova. [Some results of Beloyarskaya NPP operation named Kurchatova I.V.]. *Atomnaja energiya*. 1974, v. 36, № 6, p. 432 (in Russian).
6. Kazansky Yu.A., Levchenko V.A., Matusevich E.S., Yurev Yu.S., Balakin I.P., Belugin V.A., Dorokhovitch S.L., Kazantsev A.A., Tikhonenko A.V., Travleev A.A., Uvarov A.A. Samoreguliruemyy reaktor sverhmaloj moshhnosti dlja teplosnabzhenija «MASTER-IATJe». [Self-controlled low power reactor for heat supply «MASTER-IATÉ»]. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*. 2003, v.3, pp.63-71 (in Russian).
7. Kazansky Yu.A., Levchenko V.A., Matusevich E.S., Yurev Yu.S. Tehnicheskie predlozhenija dlja razrabotki koncepcii podzemnoj YEU sverhmaloj moshhnosti MASTER IATÉ. [Technical proposals for concept development of underground low power NP]. Sbornik tezisov, dokladov i soobshhenij. Jadernoe obshhestvo Rossii. ezhegodnaja konferencija. [Scope of thesis and reports. Russia Nuclear Society. X international conference]. Obninsk, 1999.
8. Levchenko V.A., Kazansky Yu.A., Barshevtsev V.A., Yurev Yu.S., Belugin V.A., Design concept of self-contained low power reactor «MASTER» for heat supply. *Progress in Nuclear Energy*. 2008, v. 50. pp. 314-319.
9. Kazansky Yu.A., Levchenko V.A., Barshevtsev V.A., Yurev Yu.S., Belugin V.A., Levchenko Yu.D., Levchenko A.V., Kazantsev A.A., Titov D.M. Nekotorye nejtronno-fizicheskie i teplogidravlicheskie harakteristiki usovershenstvovannoj konstrukcii reaktora «MASTER». [Some Neutron-Physical and Thermo-Hydraulic Characteristics of Improved Facility MASTER]. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*. 2008, no. 1, p.41 (in Russian).
10. Askew J.R., Fayers F.J., Kemshell F.B. A General Description of the Lattice Code WIMS, Journal of the British Nuclear Energy Society 5, 4, 564, 1966.
11. Final report of a coordinated research project WIMS-D Library Update IAEA, December 2007.
12. Dorokhovitch S.L., Kazansky Yu.A., Kazantsev A.A. Yurev Yu.S., Kovalchuk S.V., Levchenko V.A., Levchenko A.V. Gidrodinamika i teploobmen v reaktornoj ustanovke MASTER. [Hydrodynamics and Heat Transfer in Reactor Installation «MASTER»]. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*. 2012, no. 3, pp. 116–128 (in Russian).

#### Authors

Titov Boris Mihajlovich, Project Manager

E-mail: dmitry.titov@siemens.com

Dorokhovitch Sergej Leonidovich, Head of Laboratory

E-mail: dors@ssl.obninsk.ru:

Kazansky Yuriy Altrseevich, Professor, Dr. Sci. (Phys.-Math.)

E-mail: kazansky@iate.obninsk.ru

**От редакции.** В предыдущем номере журнала в статье Б.Б. Тихомирова и В.М. Поплавского «Влияние статистических характеристик пучка твэлов ТВС на оценку температурного режима активной зоны быстрого натриевого реактора» на стр. 133 в записи знаменателей формул (5) и (6) была допущена опечатка. Формулы должны иметь вид

$$\Delta\Omega_i^{\text{отн}} = (\Omega_i^c - \Omega_p^{\text{min}})/\Omega_p^{\text{min}}; \quad (5)$$

$$\Delta\Omega_i^{\text{отн}} = (\Omega_i^c - \Omega^c \text{ min})/\Omega_p^{\text{min}}. \quad (6)$$

Приносим свои извинения авторам и читателям.