

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ПРОФИЛИРОВАНИЯ ЭНЕРГОВЫДЕЛЕНИЯ ЗА СЧЕТ РАДИАЛЬНЫХ ПЕРЕСТАНОВОК ТВС В РЕАКТОРАХ ТИПА CANDU

**Мин Мин Со, В.И. Наумов**

*Московский инженерно-физический институт (государственный университет),  
г. Москва*



Проведено исследование возможностей профилирования энерговыделения за счет радиальных перестановок ТВС по схеме «периферия-центр-периферия» в пределах активной зоны в реакторах типа CANDU при использовании в качестве топлива слабообогащенного урана. Приведены количественные оценки эффективности профилирования на примере модели реактора CANDU с параметрами, близкими к проекту PHWR-750 в диапазоне начального обогащения топлива от 0,71 до 3,0%.

В работе [1] представлены результаты исследований по совершенствованию топливных циклов реакторов типа CANDU при использовании в качестве ядерного топлива слабообогащенного урана. Увеличение начального обогащения и соответствующее увеличение энерговыработки с единицы загруженного топлива является общей тенденцией развития топливных циклов современных ядерных энергетических реакторов, включая и реакторы типа CANDU [2]. Но увеличение обогащения топлива неизбежно приводит к росту неравномерности энерговыделения из-за увеличения разницы между максимальным и средним макросечениями деления ядерного топлива в пределах активной зоны. Для уменьшения неравномерности энерговыделения применяют различные способы: профилирование плотности потока нейтронов и обогащения ядерного топлива, перемещение топлива в процессе выгорания в пределах активной зоны. Возможности и эффективность профилирования в значительной степени зависят от конструкции реактора.

Специфической особенностью реакторов типа CANDU является перемещение секционированных ТВС в процессе выгорания вдоль технологических каналов от входа к выходу, обеспечивающее равномерное выгорание топлива.

В реакторах типа CANDU, работающих на природном уране при относительно небольшом выгорании топлива, разница между максимальным и средним макросечениями по длине канала не настолько велика, чтобы применять какие-либо специальные средства по ее уменьшению. Встречное движение ТВС в соседних каналах от входа к выходу и подбор скорости движения, обеспечивающий достижение одинакового выгорания во всех каналах активной зоны, приводят к формированию практически однородного среднего состава активной зоны. Но при уве-

личении начального обогащения топлива и однократном прохождении ТВС через активную зону разница между максимальным и средним по длине канала макросечениями возрастает, что приводит к росту аксиальной неравномерности энерговыделения. При этом полная неравномерность энерговыделения по объему активной зоны, складывающаяся из аксиальной неравномерности и неравномерности, обусловленной радиальным распределением плотности потока нейтронов, может превысить допустимые пределы.

Существует реальная возможность уменьшения как радиальной, так и аксиальной неравномерностей энерговыделения за счет радиальных перестановок топлива. Общие принципы и различные режимы перестановок топлива в активной зоне реактора были исследованы в работе [3]. Одним из эффективных способов профилирования поля энерговыделения являются перестановки типа «периферия-центр-периферия». Количественные оценки эффективности таких перестановок в приложении к реакторам канального типа (РБМК) содержатся, в частности, в работе [4]. Перестановки типа «периферия-центр-периферия» практикуются и в других типах энергетических реакторов. В соответствии со схемой, представленной на рис. 1, свежие ТВС поступают сначала в периферийные каналы реактора, где облучаются треть полной кампании при относительно низкой плотности потока нейтронов, затем перемещаются в каналы центральной зоны, где также облучаются треть кампании, и возвращаются в каналы периферийной зоны, где дожигаются за счет избытка нейтронов, генерируемых свежими ТВС. Комбинация в периферийной зоне свежих и выгоревших ТВС формирует размножающую среду с коэффициентом размножения, близким к коэффициенту размножения центральной зоны. Поскольку свежие ТВС не попадают в каналы с максимальной плотностью нейтронов, а полное выгорание топлива достигается при трехкратном прохождении активной зоны, радиальная и аксиальная неравномерности могут быть существенно понижены.

Рассмотрим эффективность перестановок ТВС на конкретном примере реактора CANDY с параметрами, близкими к варианту PHWR-750 с радиусом активной зоны 425 см, равномерным шагом решетки технологических каналов 28,6 см и длиной рабочей части технологических каналов 600 см [5]. ТВС реактора содержит 37 твэлов. Длина ТВС равна 50 см. Расчетная величина выгорания топлива при использовании природного урана составляет 8,2 МВт-сут/кг. При использовании ядерного топлива с начальным обогащением 2,0 или 3,0% и тех же ограничениях на величину коэффициента размножения  $k_{\infty}$  выгорание достигает соответственно 42,1 или 63,2 МВт-сут/кг. На рисунке 2 показано относительное распределение макросечения деления топлива по длине канала для трех рассмотренных вариантов при однократном прохождении через активную зону. Как видно из приведен-

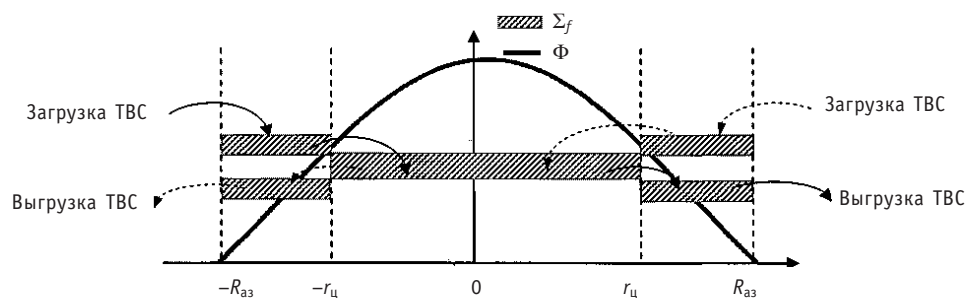


Рис. 1. Схема перестановки ТВС и распределения сечения деления и плотности потока нейтронов в активной зоне

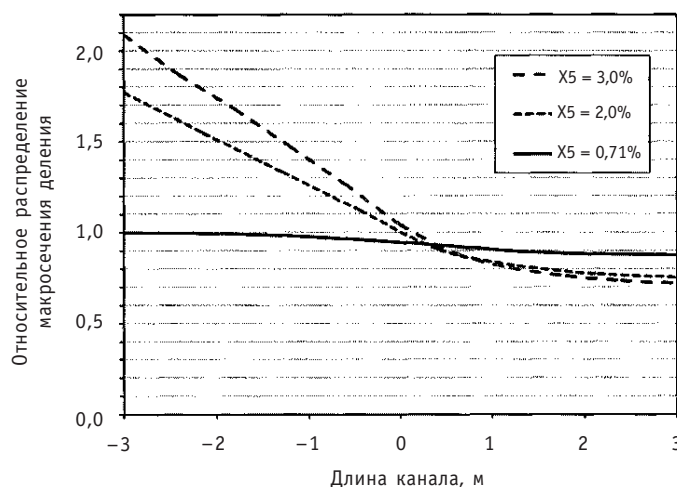


Рис. 2. Относительное распределение макросечения деления по длине канала

ных данных, в случае использования природного урана макросечение деления топлива, включающее в себя как уран-235, так и накапливаемые делящиеся изотопы плутония, слабо меняется в процессе выгорания. Изменение макросечения деления топлива составляет около 10%. Но использование слабообогащенного топлива при существенном увеличении глубины выгорания приводит к весьма значительной зависимости макросечения деления от выгорания, а при однократном прохождении через активную зону – к заметному изменению макросечения деления от входа к выходу. В вариантах со слабообогащенным ураном при обогащении 2,0 и 3,0% изменение макросечения деления составляет 55 и 65% соответственно.

На рисунке 3 показана зависимость относительной максимальной плотности энерговыделения по длине канала для трех рассмотренных вариантов при симметричном (синусоидальном) распределении плотности потока нейтронов и однократном прохождении топлива через активную зону. Видно, что по мере увеличения начального обогащения максимум плотности энерговыделения смещается ко входу в активную зону, что приводит к значительному росту аксиальной неравномерности энерговыделения.

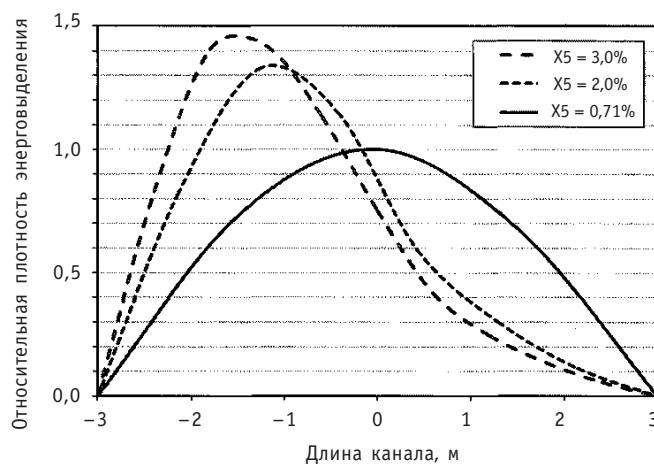


Рис. 3. Зависимость относительной максимальной плотности энерговыделения по длине канала

При исследовании эффективности профилирования энерговыделения за счет перестановок топлива предполагалось, что коэффициент размножения нейтронов  $K_\infty$  как в центральной, так и в периферийной зонах одинаков. При этом условии радиальное распределение плотности потока нейтронов в реакторе может быть

представлено в виде функции Бесселя  $J_0 \left( 2,405 \frac{r}{R_{аз} + \Delta_{отр}} \right)$ . Активная зона окруже-

на боковым отражателем, обеспечивающим эффективную добавку  $\Delta_{отр} \approx 50$  см, так, что радиальный коэффициент неравномерности плотности потока нейтронов в активной зоне составляет  $k_r = 1,91$ .

В принятой расчетной модели дискретное перемещение ТВС по длине канала заменено непрерывным движением со скоростью, обеспечивающей заданное время прохождения от входа к выходу и равное выгорание топлива в выгружаемых ТВС. Принимая среднее время пребывания ТВС в периферийной и центральной зонах одинаковым на трех этапах облучения, из условия непрерывности потока ТВС можно найти соотношение между числом каналов и размерами зон. В данном конкретном случае размеры центральной и периферийной зон соотносятся как 1:2, и радиус центральной зоны равен 245 см. Соответствующие коэффициенты неравномерности в центральной и периферийной зонах равны 1,22 и 1,74. Величина аксиального коэффициента неравномерности энерговыделения в каждой из зон зависит от степени изменения макросечения деления ТВС по длине канала на данном этапе выгорания топлива.

На рисунке 4 в качестве примера приведены относительные аксиальные распределения плотности энерговыделения по длине технологического канала при перестановке ТВС из периферийной в центральную, а затем снова в периферийную зону для случая с начальным обогащением 3,0%. Полная мощность самого напряженного канала в варианте с перестановками ТВС отнесена к мощности самого напряженного канала при использовании топлива из природного урана. Сравнивая результаты, приведенные на рис. 4 и 3 для однократного прохождения активной зоны, можно видеть эффективность перестановок. Уменьшение максимальной плотности энерговыделения свежезагружаемых ТВС для 2,0 и 3,0% вариантов за счет перестановки ТВС составляет около 35 и 40% соответственно.

В качестве количественного критерия эффективности профилирования энерговыделения при радиальных перестановках ТВС выбран полный объемный коэффициент неравномерности энерговыделения, который в данном случае определяется следующим образом:

$$k_v = \frac{q_{\max}}{\bar{q}} = \frac{\pi R_{аз}^2}{\sum \int \frac{q_{\max_i}}{q_{\max}} \frac{1}{k_{z_i} k_{r_i}} 2\pi r dr}, \quad (1)$$

где  $q_{\max_i}$  – максимальная плотность энерговыделения в  $i$ -ой зоне;  $q_{\max}$  – максимальная плотность энерговыделения в активной зоне;  $k_{z_i}$  – максимальная неравномерность энерговыделения в  $i$ -ой зоне;  $k_{r_i}$  – радиальная неравномерность энерговыделения в  $i$ -ой зоне.

В таблице 1 представлены результаты расчета полной неравномерности энерговыделения для рассмотренных вариантов начального обогащения без перестановок ТВС и с перестановками «периферия-центр-периферия». В таблице 2 приведены данные по составляющим коэффициента неравномерности в случаях без перестановок и с перестановками для каждой из зон, а также относительные мак-

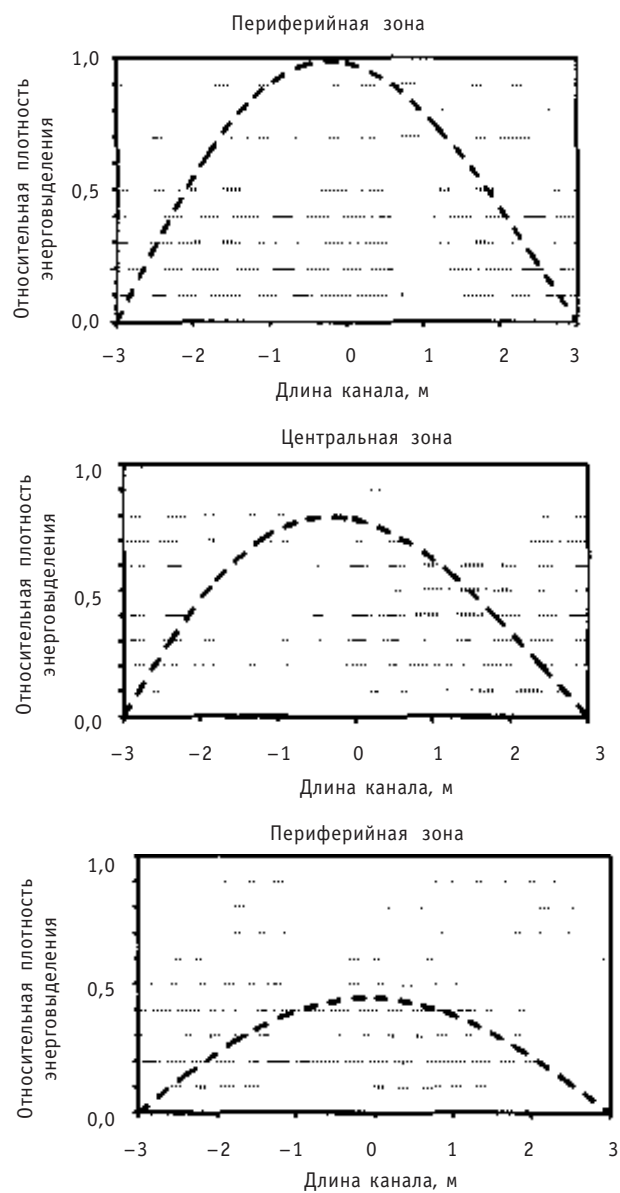


Рис. 4. Распределения относительной плотности энерговыделения по длине канала при перестановке ТВС для случая с начальным обогащением 3,0%

Таблица 1

**Объемный коэффициент неравномерности энерговыделения**

$X_s$ [%]	$k_v = \frac{q_{max}}{\bar{q}}$	
	Без перестановок ТВС	При перестановке ТВС
0,71	3,08	3,07
2,0	3,88	3,03
3,0	4,47	3,12

Таблица 2

**Максимальные плотности энерговыделения  
и локальные неравномерности энерговыделения**

$X_{ср}$ %	Без перестановок ТВС			При перестановке ТВС								
				Периферийная зона (1)			Центральная зона (2)			Периферийная зона (3)		
	$q_{max}$	$k_z$	$k_r$	$q_{max_1}$	$k_{z_1}$	$k_{r_1}$	$q_{max_2}$	$k_{z_2}$	$k_{r_2}$	$q_{max_3}$	$k_{z_3}$	$k_{r_3}$
0,71	1,0	1,61	1,91	0,7	1,57	1,74	1,0	1,57	1,22	0,6	1,57	1,74
2,0	1,3	2,03	1,91	0,9	1,71	1,74	0,8	1,71	1,22	0,5	1,71	1,74
3,0	1,4	2,34	1,91	1,0	1,73	1,74	0,8	1,73	1,22	0,4	1,73	1,74

симальные плотности энерговыделения в каждой из зон, отнесенные к максимальной плотности энерговыделения в базовом варианте. Как и следовало ожидать, при перестановке ТВС в базовом варианте не достигается значительного эффекта уменьшения максимальной плотности энерговыделения из-за незначительного изменения макросечения деления по длине канала. Если принять в качестве ограничения максимальную плотность энерговыделения для варианта с природным ураном без перестановок ТВС, то, как следует из приведенных данных в табл. 2, перестановки ТВС дают возможность не только снизить максимальную плотность энерговыделения ниже предельного значения, но и создать определенный резерв для повышения мощности реактора.

Следует обратить внимание, что дополнительные операции перестановок ТВС в условиях существенного увеличения энерговыработки не приводят к повышению нагрузки на перегрузочные машины по сравнению с базовым вариантом. В базовом варианте на природном уране с однократным прохождением ТВС энерговыработка составляет 8,2 МВт·сут/кг. В варианте с обогащением 2,0% при трех перегрузочных операциях энерговыработка составляет 42,1 МВт·сут/кг, что соответствует 14 МВт·сут/кг на одну операцию. В случае начального обогащения 3,0% и энерговыработки 63,2 МВт·сут/кг на одну перегрузочную операцию приходится 21 МВт·сут/кг, т.е. в 2,6 раза больше, чем в базовом варианте.

**ВЫВОДЫ**

Использование радиальных перестановок ТВС по схеме «периферия-центр-периферия» позволяет существенно понизить коэффициент неравномерности и максимальную плотность энерговыделения в топливе в случае использования в CANDU слабообогащенного топлива.

Эффект профилирования тем больше, чем больше начальное обогащение, и полностью отсутствует при использовании природного урана.

Дополнительные операции по радиальным перестановкам ТВС со слабообогащенным топливом не приводят к увеличению нагрузки на перегрузочные машины по сравнению с базовым вариантом.

Целесообразно предусматривать техническую возможность радиальных перестановок ТВС во вновь строящихся и проектируемых реакторах типа CANDU, рассчитанных на длительный срок эксплуатации.

**Литература**

1. Мин Мин Со, Наумов В.И. Нейтронно-физический анализ перспективных топливных циклов реакторов типа CANDU с позиций эффективности использования природных ресурсов и показателей безопасности//Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2008. – № 3. -С. 65-73.
2. Петруник К. На пути к коммерческому реактору АСК-1000//Атомная техника за рубежом. 2008. – № 6.
3. Фейнберг СМ., Анциферов Е.С., Катков В.П. и др. Выгорание горючего в водо-водяных энергетических реакторах и эксперименты с уран-водной решеткой// Ядерные реакторы и ядерная энергетика. II Международная конференция по мирному использованию атомной энергии. Доклады советских ученых. Москва, 1959.
4. Бычков С.А., Наумов В.И., Тупиков О.А., Федосов А.М. Анализ возможностей повышения энергонапряженности топлива в реакторах канального типа за счет внутризонных перестановок ТВС// Методы и алгоритмы в исследованиях физики ядерных реакторов. – М.: Энергоатомиздат, 1987.
5. Heavy Water Reactors: Status and Projected Development//Technical Report Series № 407. International Atomic Energy Agency (IAEA), Vienna, 2002.

Поступила в редакцию 18.12.2008



Neutron therapy for cancer treating are formed the specific requests to neutron beam parameters. At present time, multipurpose testing nuclear reactors which adjusted for medical purpose are used for neutron therapy. Favorable for neutron capture therapy energy interval depends on depth of tumor position and locates from 0,5eV to 20–40KeV. The materials which can be used as a moderator or filter under forming the need spectral structure of neutron beams for BNCT are given in present paper.

#### УДК 621.039.51

*High Energy Proton Activation Data Library (HEPAD-2008) \ Yu.A. Korovin, A.A. Natalenko, G.B. Pilnov, A.Yu. Konobeyev, A.Yu. Stankovskiy, A.V. Tikhonenko; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2009. – 9 pages, 4 tables, 3 illustrations. – References, 25 titles.*

A proton activation data library for 682 nuclides from 1H to 210Po in the power range from 150 MeV up to 1 GeV was developed at the INPE «PUSK» research laboratory. To calculate proton activation data the MCNPX 2.6c and CASCADE/INPE codes were chosen. The different intranuclear cascade, preequilibrium and equilibrium nuclear reaction models and they combinations are being used. The choice of the optimum models of calculation was carried out on the basis of statistical correlation for calculated and experimental proton data taken from the EXFOR international library of experimental nuclear data. All the data are presented in the ENDF-6 format files. The library was called HEPAD-2008 (High-Energy Proton Activation Data).

#### УДК 621.039.54

*Generalizing Operational-Constructive Criterion for Water-Water Reactors \ V.I. Korolev; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2009. – 7 pages, 1 illustration. – References, 1 title.*

The operational-constructive dimensionless criterion which allows connecting a number of the important characteristics for operation with the basic constructive sizes ТВЭЛ is developed. The given criterion can be used at designing of new active zones of the various sizes and characteristics with similar properties.

#### УДК 621.039.51

*Choice of the Fuel Composition for the Special Medical Reactor \ A.V. Levchenko, V.A. Barshevtsev, Y.A. Kazansky; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2009. – 7 pages, 2 tables, 4 illustrations. – References, 14 titles.*

Calculation substantiation of the fuel composition choice for the special medical reactor was considered. Two kinds of fuel – based upon americium and uranium (as more common one) were compared both in zirconium hydride matrix and as uranium dioxide. The general characteristics were contrasted and it was concluded that uranium dioxide fuel has an advantage.

#### УДК 621.039.543.4

*Possibility Research of Profiling of Energy-Release by Radial Transposition of Fuel in the CANDU Type Reactors \ Min Min Soe, V.I. Naumov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2009. – 7 pages, 2 tables, 4 illustrations. – References, 5 titles.*

Possibility research of profiling of energy-release by radial transposition of fuel by the scheme of «out-in-out» in the boundary of active zone of CANDU type reactors when utilizing slightly enriched uranium as a fuel was carried out. Quantitative estimations of effectiveness of transposition at the example model of CANDU type reactor with the parameters, similar to the PHWR-750 project in the range of initial enrichment of fuel is from 0.71 to 3% were outlined.

#### УДК 621.039.517

*Analysis of Decay Heat at BN-600 Assemblies \ S.V. Zabrodsкая, A.L. Kochetkov, A.V. Moiseev, M.Yu. Semenov, Yu.S. Khomyakov, E.F. Seleznev, V.P. Zabegaev, A.I. Karpenko, E.L. Rozenbaum, V.F. Rosliakov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2009. – 12 pages, 2 tables, 8 illustrations. – References, 11 titles.*

The method of decay heat calculation used by CARE\_03 code and module OST of complex GEFEST is described. The verification of method is carried out in comparison with ORIGEN code calculations of decay heat. The calculations validation on decay heat measurements is fulfilled on calorimetric equipment of Beloyrskaya Power Plant pool. The coincidence of calculation data of both codes CARE and ORIGEN are shown (< 5%). The discrepancy of decay heat calculation data with measurement data is indicated for spent subassemblies under the long cooling times with the low decay heat – 100-150 Wt. The calculate and