

КОЭФФИЦИЕНТЫ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ $k_{эфф}$ И $k_{в}$ К ПАРАМЕТРАМ ТОПЛИВНОЙ ЗАГРУЗКИ

И.В. Деменева, В.А. Елисеев, Л.В. Коробейникова

АО «ГНЦ РФ-ФЭИ» им. А.И. Лейпунского. 249033, Обнинск, пл. Бондаренко, 1



Необходимые свойства активной зоны быстрого реактора на нитридном топливе достигаются только при ее загрузке топливом на основе плутония строго определенного (равновесного) изотопного состава со строго определенной массовой долей плутония (обогащением). В качестве стартовой загрузки предполагается использовать топливо, представляющее собой смесь нитридов обедненного урана и плутония энергетического состава (U-Pu)N. Известно, что в настоящее время в России выделенный энергетический плутоний хранится на ПО «Маяк», где он упакован в контейнеры. Предсказать точно изотопный состав плутония, который получится при смешивании разных партий плутония, невозможно. Поэтому должны быть предусмотрены меры, позволяющие скомпенсировать отклонения изотопного состава и обогащения топлива от проектных значений. Для этого необходим алгоритм учета отклонений. Такой алгоритм можно построить, рассчитав чувствительности физических характеристик к отклонениям топливной загрузки. Рассмотрены два подхода к расчету чувствительностей параметров реактора к изменению изотопного состава плутония. Представлены численные иллюстрации применительно к реактору типа БРЕСТ-300.

Ключевые слова: коэффициенты чувствительности, изотопный состав плутония, коэффициент размножения, коэффициент воспроизводства.

ВВЕДЕНИЕ

Сочетание свойств тяжелого свинцового теплоносителя и плотного нитридного топлива создает условия для достижения полного воспроизводства делящихся нуклидов в активной зоне и стабилизации размножающих свойств реактора, что позволяет работать при малом и стабильном запасе реактивности [1].

Однако необходимые свойства активной зоны, а именно, близкий к нулю запас реактивности на выгорание, достигаются только при ее загрузке топливом на основе плутония строго определенного (равновесного) изотопного состава со строго определенной массовой долей плутония. В качестве стартовой загрузки предполагается использовать топливо, представляющее собой смесь нитридов обедненного урана и плутония энергетического состава (U-Pu)N, получаемого при 20-летней выдержке и последующей переработке ОЯТ ВВЭР. Плутоний, извлекаемый из ОЯТ при порционной переработке ОТВС, имеет разный изотопный состав вследствие его зависимости от глубины выгорания и исходного обогащения уранового топлива. Кроме того, при хранении плутония происходит распад ^{241}Pu ($T^{1/2} \approx 14$ лет), что приводит к дополнительному разбросу в относительном содержании изотопов плутония.

© И.В. Деменева, В.А. Елисеев, Л.В. Коробейникова, 2015

Неоднородность изотопного состава плутония обуславливает необходимость проведения исследований и выработки алгоритма учета влияния изотопного состава на физические характеристики реактора, в первую очередь, на критические параметры.

Такой алгоритм можно построить, имея коэффициенты чувствительности [2] физических характеристик к отклонениям топливной загрузки.

Рассмотрим две такие характеристики – эффективный коэффициент размножения $k_{эфф}$ и коэффициент воспроизводства (КВ) – и соответствующие коэффициенты чувствительности:

$$KЧ = (\Delta k_{эфф}/k_{эфф})/\Delta C \quad \text{или} \quad KЧ = (\Delta KB/KB) / \Delta C, \quad (1)$$

где $KЧ$ – коэффициент чувствительности; $\Delta k_{эфф}$ – отклонение эффективного коэффициента размножения; ΔKB – отклонение коэффициента воспроизводства; ΔC – относительное отклонение параметра топливной загрузки.

Это относится как к изготовлению топлива для стартовой загрузки активной зоны, так и к эксплуатации реактора в замкнутом топливном цикле, в котором будет происходить постоянное изменение изотопного состава плутония по мере его приближения к равновесному.

Определить коэффициенты чувствительности $k_{эфф}$ и КВ можно как по теории возмущений, так и прямыми расчетами. В рассматриваемом случае для этого использовались физические расчеты реактора с помощью программного комплекса TRIGEX с константной библиотекой БНАБ-93 и системой их подготовки CONSYST [3 – 5]. При сравнительно небольших вариациях изотопного состава в 1–2% абс. оба эти способа хорошо совпадают. Отметим, что метод прямых расчетов (в отличие от теории возмущений) более информативен и позволяет определить нарушение линейной зависимости изменений $k_{эфф}$ и КВ от изменения состава топлива и, следовательно, границы применимости коэффициентов чувствительности.

В данной работе были рассмотрены два подхода к расчету чувствительностей параметров реактора к изменению изотопного состава плутония. В первом подходе чувствительность к изменению изотопного состава плутония оценивалась при условии компенсации этого изменения за счет урана-238. Такой подход назван «консервативным». Он обусловлен технологией корректировки обогащения смешанного топлива по плутонию при отклонении состава плутония от базового. Во втором подходе при расчете чувствительностей изменение содержания одного из изотопов плутония компенсировалось содержанием других изотопов плутония. Такой подход назван «векторным». Он соответствует предполагаемой технологии изготовления топлива, когда изотопный состав плутония формируется на одном технологическом участке, а смешивание плутония с обедненным ураном – на другом. Суммарная загрузка топлива в обоих случаях оставалась постоянной. В дальнейшем, для удобства, мы использовали терминологию «коэффициенты чувствительности» для обозначения отношений относительных изменений коэффициента размножения и КВ к относительному изменению содержания изотопов плутония в смеси при оговоренных выше условиях.

КОЭФФИЦИЕНТЫ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ К ИЗОТОПНОМУ СОСТАВУ ПЛУТОНИЯ

Иллюстрация численных значений «консервативных» и «векторных» коэффициентов чувствительности $k_{эфф}$ и КВ, рассчитанных для реактора на нитридном топливе со свинцовым теплоносителем и близким к нулю запасом реактивности на выгорание, представлена в табл. 1. Как упоминалось, для «консервативного» подхода изменение содержания одного из изотопов плутония компенсировалось содержанием урана-238. При

«векторном» подходе изменение содержания одного из изотопов плутония компенсируется содержанием других изотопов плутония пропорционально их весу в исходном составе. Можно видеть, что эти коэффициенты принципиально отличаются друг от друга не только по величине, но и по знаку.

Таблица 1

Коэффициенты чувствительности $k_{эфф}$ и КВ к составу плутония при «консервативном» и «векторном» их определении

Изотоп	«Консервативный» подход		«Векторный» подход	
	% $\Delta k/k$ / % абс.	% $\Delta KV/KV$ / % абс.	% $\Delta k/k$ / % абс.	% $\Delta KV/KV$ / % абс.
^{238}Pu	0.49	- 0.19	- 0.11	0.90
^{239}Pu	0.78	- 1.5	0.57	- 1.4
^{240}Pu	0.13	0.1	- 0.61	1.5
^{241}Pu	1.1	- 1.8	0.51	- 0.8
^{242}Pu	0.09	- 0.14	- 0.53	1.0

Приведенные в табл. 1 значения коэффициентов чувствительности получены прямыми расчетами. Однако «векторные» КЧ можно получить и не выполняя физических расчетов реактора. Для этого достаточно рассчитать «консервативные» КЧ и знать отклонения текущего изотопного состава от заданного.

$$KЧ_{\text{вект.}}^i = \sum a_j KЧ_{\text{консерв.}}^j \quad (2)$$

где a_j – отклонение изотопного вектора (в % абс.) от заданного при изменении содержания i -го изотопа на 1% абс. Отклонения на 1% абс. (а не 1% отн.) приняты потому, что допуски на изотопный состав топлива ядерных реакторов и на его обогащение даются именно в абсолютных процентах.

Итак, рассчитав один раз «консервативные» КЧ для исходного состава плутония, в дальнейшем при изменении состава плутония по формуле (2) определяем «векторные» КЧ, а затем отклонения $k_{эфф}$ и КВ.

Представленные в таблице коэффициенты чувствительности даны для стартовой активной зоны – особого состояния реактора, загруженного свежим топливом без продуктов деления. В нем чувствительность к отклонениям параметров топливной загрузки максимальна. В дальнейшем, при работе реактора в режиме равномерно-частичных перегрузок, чувствительность реактора к отклонениям параметров очередной партии загружаемого топлива будет в несколько раз меньше (в зависимости от кратности перегрузок реактора).

КОЭФФИЦИЕНТЫ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ К ОБОГАЩЕНИЮ И ЗАГРУЗКЕ ТОПЛИВА

Для корректировки загрузки топлива кроме чувствительностей к изотопному составу плутония, необходимы также коэффициенты чувствительности к обогащению и загрузке топлива, которые показаны в табл. 2. Вариация в обоих случаях принималась равной $\pm 1\%$ абс. (для вариации загрузки топлива относительный и абсолютный проценты равнозначны, чего нельзя сказать про его обогащение).

Из таблицы видно, что при вариации загрузки топлива на $\pm 1\%$ изменения $k_{эфф}$ и КВ одинаковы по абсолютной величине, т.е. для загрузки зависимость линейна. В то же время при такой же вариации обогащения линейность нарушается – при отрицательных отклонениях обогащения изменения критичности и КВ заметно больше, чем при положительных. Это связано с тем, что для нитридного топлива, обога-

шение которого ~14%, отклонение на 1% абс. составляет ~7% отн., что слишком много. Если же вариацию обогащения уменьшить до 1% отн., то линейность изменения $k_{эфф}$ и КВ восстанавливается (см. значения, приведенные в табл. 2 в скобках).

Таблица 2

Коэффициенты чувствительности $k_{эфф}$ и КВ при вариации обогащения и массы топлива

Вариация, % абс.	Загрузка топлива		Обогащение топлива	
	КЧ $k_{эфф}$, % $\Delta k/k$ / % абс	КЧ КВ, % $\Delta KB/KB$ / % абс.	КЧ $k_{эфф}$, % $\Delta k/k$ / % абс. (% $\Delta k/k$ / % отн.)	КЧ КВ, % $\Delta KB/KB$ / % абс. (% $\Delta KB/KB$ / % отн.)
-1	-0.28	0.05	-4.56 (-0.6)	8.57 (1.08)
+1	0.28	-0.05	4.38 (0.6)	-7.53 (-1.06)

Для корректировки характеристик топливной загрузки необходимо, чтобы все полученные чувствительности были аддитивными, т.е. их можно было складывать. Иллюстрация справедливости этого представлена в табл. 3. Содержание изотопов плутония и загрузка топлива варьировались в интервале $\pm 1\%$ абс., а обогащение $\pm 1\%$ отн.

Таблица 3

Коэффициенты чувствительности $k_{эфф}$ и КВ к одновременной вариации изотопного состава, обогащения и массы топлива (прямые расчеты)

Отклонение параметров, %		КЧ $k_{эфф}$, % $\Delta k/k$ / %	КЧ КВ, % $\Delta KB/KB$ / %
-1	Изотопный состав Pu	-2.57	3.62
	Состав Pu + обогащение	-3.15	4.72
	Состав Pu + обогащение + загрузка	-3.43	4.77
+1	Изотопный состав Pu	2.60	-3.58
	Состав Pu + обогащение	3.21	-4.62
	Состав Pu + обогащение + загрузка	3.49	-4.67

Видно, что при отклонении изотопного состава плутония на 1% абс. в положительную и отрицательную стороны изменения $k_{эфф}$ и КВ по абсолютной величине практически одинаковы (расхождения около 1% отн.). При добавлении к числу варьируемых параметров обогащения и загрузки топлива расхождения незначительно увеличиваются (до 2% отн.). Значения КЧ можно получить суммированием приведенных выше КЧ, посчитанных для вариации состава плутония, обогащения и массы топлива по отдельности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Неизбежные отклонения параметров топливной загрузки реактора от проектных значений требуют выработку алгоритма учета влияния этих отклонений на физические характеристики реактора. Такой алгоритм строится с использованием коэффициентов чувствительности. Особое место в параметрах топливной загрузки занимает изотопный состав плутония. Коэффициенты чувствительности к содержанию каждого изотопа плутония непостоянны и зависят от соотношения других изотопов, поэтому для их получения при каждом изменении изотопного состава необходимы физические расчеты реактора. Однако можно воспользоваться способом получения коэффициентов чувствительности к текущему изотопному составу, основанным на

подмене «векторных» коэффициентов чувствительности «консервативными», в которых вариация содержания изотопов плутония компенсируется ураном-238. Эти коэффициенты чувствительности рассчитываются один раз для исходного состава. Имея их и текущий изотопный состав, можно получить все нужные коэффициенты чувствительности без физического расчета реактора. Представлены (на примере реактора типа БРЕСТ-300) численные иллюстрации коэффициентов чувствительности нейтронно-физических характеристик к изотопному составу плутония и другим параметрам топливной загрузки.

Литература

1. Орлов В.В., Филин А.И., Смирнов В.С. и др. Быстрый реактор естественной безопасности со свинцовым теплоносителем для крупномасштабной ядерной энергетики / Под ред. В.В. Орлова. –М.: 2001.
2. Усачев Л.Н., Бобков Ю.Г. Теория возмущений и планирование эксперимента в проблеме ядерных данных для реакторов. –М.: Атомиздат, 1980.
3. Серегин А.С. Аннотация программы ТРИГЕКС для малогруппового нейтронно-физического расчета реактора в трехмерной геометрии. // ВАНТ, Серия: Физика и техника ядерных реакторов, вып. 4 (32), 1983.
4. Мантуров Г.Н. и др. Система групповых констант БНАБ-93. // ВАНТ, Серия: Ядерные константы, вып. 1, 1996.
5. Мантуров Г.Н. и др. Аннотация программы CONSYST. // ВАНТ, Серия: Ядерные константы, вып. 2, 1999.

Поступила в редакцию 10.12.2014 г.

Авторы

Деменева Ирина Владимировна, инженер-исследователь
E-mail: idemeneva@ippe.ru

Елисеев Владимир Алексеевич, начальник лаборатории, канд. техн. наук, тел.
E-mail: eliseev@ippe.ru

Коробейникова Людмила Викторовна, старший научный сотрудник,
E-mail: lkorobeynikova@ippe.ru

UDC: 621.039.526

SENSITIVITY COEFFICIENTS OF THE NEUTRON AND PHYSICAL REACTOR PARAMETERS TO THE FUEL INVENTORY PARAMETERS

Demeneva I.V., Eliseev V.A., Korobeynikova L.V.

State Scientific Center of the Russian Federation – Institute for Physics and Power Engineering n.a. A.I. Leypunsky.

1, Bondarenko sq., Obninsk, Kaluga reg., 249033 Russia

ABSTRACT

The required properties of the fast reactor with nitride fuel achieved only when it is loaded by fuel with strictly defined plutonium isotope composition and strictly defined enrichment. To predict isotope composition of plutonium when mixing different consignments which are stored on «Mayak» it is impossible. Therefore, nuclear fuel production shall be provided to measure which permits to balance observed deviations of the isotope composition and enrichment. This requires the algorithm based on the sensitivity coefficients [1] of physical characteristics to variations in fuel load. The article offers the method for obtaining of sensitivity coefficients to the current without carrying out physical calculations. The method is based on the substitution of conventional («vector») sensitivity coefficients on the so called «conservative» in which the plutonium isotopes maintenance variation is compensated by U-238. Numerical illustrations of sensitivity coefficients to the plutonium isotope composition and other fuel inventory parameters for the reactor BREST-300 are given.

Key words: sensitivity coefficients, plutonium isotope composition, multiplication factor, breeding ratio.

REFERENCES

1. Orlov V.V., Filin A.I., Smirnov V.S. Bystryj reaktor estestvennoy bezopasnosti so svincovym teplonositelem dlya krupno-masshtabnoj yadernoj energetiki (Lead cooled fast reactor with natural safety for large-scale nuclear power). M., 2001 (in Russian).
2. Usachev L.N., Bobkov Yu.G. Teorija vozmuschenij i planirovanie experimenta v probleme yadernyh dannyh dlya reaktorov [Perturbation theory and experiment planning in nuclear data problem for reactors]. Moscow, Atomizdat Publ., 1980 (in Russian).
3. Seregin A.S. Annotaciya programmy TRIGEX dlya malogruppovogo nejtronno-fizicheskogo rascheta reaktora v trehmernoj geometrii (TRIGEX summary – engineering code for fast reactors neutronics calculations in three-dimensional geometry). *VANT*, Ser. Fizika i tehnika yadernyh reaktorov, iss.4 (32), 1983 (in Russian).
4. Manturov G.N. et al. Sistema gruppovyh konstant BNAB-93 (Group neutron constant system BNAB-93). *VANT*, ser. Yadernye konstanty, iss.1, 1996 (in Russian).
5. Manturov G.N. et al. Annotaciya programmy CONSYST (CONSYST code summary). *VANT*, ser. Yadernye konstanty, iss.2, 1999 (in Russian).

Authors

Demeneva Irina Vladimirovna, Engineer

E-mail: idemeneva@ippe.ru

Eliseev Vladimir Alekseevich, Head of Laboratory, Cand. Sci. (Engineering),

E-mail: eliseev@ippe.ru

Korobeynikova Lyudmila Viktorovna, Senior Researcher,

E-mail: lkorobeynikova@ippe.ru