

$\sim 6 \cdot 10^{-3}$ К/с энергоблока. При этом, однако, основной вклад в погрешность (~ 97 и 98% в рассмотренных случаях) определяется первым слагаемым $1/\lambda_1$ в скобках выражения (7), т.е. инерционностью ТЭП, зависимой в том числе от термического сопротивления зазора ТЭП—наконечник канала. Приведенные в табл. 2 комплексы m и n позволяют на основании выражения (6) установить, что постоянство динамической погрешности наступит примерно через 2 мин после начала разогрева блока.

Т а б л и ц а 2. Расчет динамической погрешности измерения температуры теплоносителя

Показатель	ε , с	
	25	50
$\lambda_1 \cdot 10^2$, с ⁻¹	4	2
$\lambda_2 \cdot 10^3$, с ⁻¹	8	4
λ_3 , с ⁻¹	1,7	1,7
α , с ⁻¹	1,75	1,72
$\beta \cdot 10^2$, с ⁻²	7,0	3,5
m , с ⁻¹	1,7	1,7
$n \cdot 10^2$, с ⁻¹	4	2
$\Delta T_{\text{дин}}$, К	-0,14	-0,28

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Приймак С.В., Федик И.И., Ляхов Д.М., Олейников П.П. Методические погрешности внутриреакторных измерений температуры. — Атомная энергия, 1989, т. 66, вып. 5, с. 308—311.
2. Кеч В., Теодореску П. Введение в теорию обобщенных функций с приложениями в технике. М.: Мир, 1978. 518 с.
3. Hashemian H., Petersen K., Mitchell D. e.a. In-situ response time testing of thermocouples. — Inst. Soc. Am. Transac., 1990, v. 29, № 4, p. 97—104.
4. Будаков Б.М., Самарский А.А., Тихонов А.Н. Сборник задач по математической физике. М.: Наука, 1980. 686 с.

Поступила в Редакцию 27.09.02

УДК 621.039.574

ЦЕНА ТРАНСМУТАЦИИ ПРОДУКТОВ ДЕЛЕНИЯ В ЯДЕРНЫХ РЕАКТОРАХ

Герасимов А.С., Зарицкая Т.С., Киселев Г.В., Мырцымова Л.А.
(ФГУП ГНЦ РФ — ИТЭФ)

Трансмутация долгоживущих продуктов деления является частью общей проблемы обращения с долгоживущими радиоактивными отходами ядерной энергетики. В настоящее время среди специалистов сложилось мнение о том, какие долгоживущие продукты деления подлежат трансмутации — в первую очередь это ^{99}Tc и ^{129}I [1]. Они накапливаются в отработавшем топливе в значительном количестве. Кроме того, ^{129}I обладает повышенной миграционной способностью и опасен для

человеческого организма. В долгоживущих продуктах деления из изотопов технеция накапливается только ^{99}Tc . Наряду с ^{129}I накапливается $\sim 22\%$ стабильного ^{127}I .

Трансмутация продуктов деления связана с затратами нейтронов. Для трансмутации одного ядра ^{99}Tc необходимо израсходовать немногим более одного нейтрона, поскольку дополнительные нейтроны будут захватываться продуктами трансмутации. Первыми из них являются слабопоглощающие нейтроны изотопы рутения. При трансмутации ^{129}I расходуется $\sim 1,4$ нейтрона на одно ядро, поскольку часть нейтронов будет поглощаться ^{127}I . Трансмутация может проводиться в трансмутационных реакторах, характеристики которых аналогичны характеристикам реакторов для производства изотопов. Другой возможностью является трансмутация в существующих ВВЭР-1000.

ВВЭР-1000 — реактор корпусного типа [2, 3], работающий кампаниями продолжительностью примерно 3 года. Начальное обогащение урана составляет 4,4%. Максимальное выгорание 40 ГВт·сут на 1 т топлива, что соответствует накоплению 41,2 кг/т продуктов деления. В стационарном режиме в течение одной кампании проводятся три частичных перегрузки топлива и соответственно имеются три группы ТВС, различающихся выгоранием. Одна группа ТВС с предельным выгоранием выгружается и заменяется на свежее топливо. ТВС из двух других групп, загрузавшиеся в прошлую и позапрошлую частичные перегрузки, переставляются по активной зоне для обеспечения оптимального режима работы реактора. Среднее по трем группам выгорание топлива в момент перегрузки составляет 26,7 ГВт·сут/т. Теплоносителем является вода. В реакторе имеются две системы регулирования: система регулирующих кассет АРК, являющихся рабочими органами СУЗ, и система борного регулирования, основанная на изменении концентрации борной кислоты в теплоносителе. Кроме того, предусмотрена система выгорающих поглотителей.

Возможны различные способы внесения трансмутируемых нуклидов в активную зону, например, добавление в топливо или теплоноситель. Вследствие относительно малого эффективного сечения поглощения нейтронов ^{99}Tc и ^{129}I не могут использоваться как выгорающие поглотители для компенсации снижения реактивности при выгорании топлива. Количество ^{99}Tc при облучении в ВВЭР уменьшается примерно на 20% за кампанию, ^{129}I — примерно на 6%. Реально же добавление трансмутируемых нуклидов в ядерное топливо требует реорганизации процесса производства твэлов, поэтому должны быть веские основания для такого способа трансмутации. Добавление радиоактивных долгоживущих продуктов деления в теплоноситель, например, в виде раствора солей сопряжено со следующими очевидными осложнениями. Во-первых, во все элементы первого контура будет внесена дополнительная радиоактивность. Во-вторых, необходимо иметь простой и надежный метод извлечения трансмутируемых нуклидов из теплоносителя для компенсации выгорания топлива без потери радионуклидов.

Однако при любом способе помещения трансмутируемых нуклидов в реактор будет изменен обычный режим его работы из-за дополнительного поглощения нейтронов трансмутируемыми нуклидами. При этом если используется ядерное топливо с обычным обогащением, то продолжительность кампании и выгорание топлива уменьшаются. Если же требуется сохранить прежнее выгорание, то необходимо перейти на топливо с повышенным обогащением. Заметим, что при пере-

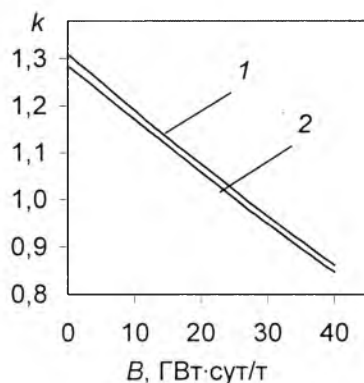
ходе на повышенное обогащение без трансмутации удлиняется кампания и повышается выгорание. Таким образом, расплатой за трансмутацию продуктов деления в энергетических реакторах служит снижение выгорания топлива по сравнению с обычным режимом без трансмутации. Единственной возможностью проводить трансмутацию без снижения выгорания является размещение трансмутируемых нуклидов таким способом, который позволил бы их извлекать из активной зоны за некоторое время до окончания кампании.

В статье приведены результаты оценок снижения выгорания топлива и сокращения кампании при трансмутации ^{99}Tc или ^{129}I в ВВЭР-1000. Рассмотрены два способа размещения трансмутируемых нуклидов — добавление в ядерное топливо или теплоноситель. На стадии оценок способ добавления нуклидов не имеет принципиального значения, важно лишь снижение коэффициента размножения нейтронов, вызванное добавлением нуклидов.

При оценке влияния добавляемых нуклидов на коэффициент размножения в течение кампании предполагалось, что вместо коэффициента размножения в реакторе можно взять коэффициент размножения в элементарной ячейке. Такое допущение представляется оправданным для получения разностного эффекта, связанного с дополнительным поглощением нейтронов. Рассматриваемая цилиндрическая элементарная ячейка имеет в центре урановый твэл в циркониевой оболочке, окруженный водой. Основные геометрические размеры зон элементарной ячейки и концентрация нуклидов в зонах приведены в справочнике [4]. Дополнительно учитывались центральное отверстие в твэле и кольцевой газовый зазор между твэлом и циркониевой оболочкой. Предполагалось, что без трансмутации реактор работает в обычном режиме при начальном обогащении топлива 4,4% с выгоранием выгружаемого топлива 40 ГВт-сут/т.

Коэффициент размножения в элементарной ячейке и скорость реакций рассчитывали по программе TRIFON [5]. Кинетику превращения нуклидов в топливной зоне определяли при постоянной мощности с тремя промежуточными пересчетами скоростей реакций [4]. Начальная плотность потока, отнесенная к энергии нейтронов 0,0253 эВ, принималась равной $1,83 \cdot 10^{13} \text{ с}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$. При расчете коэффициента размножения учитывали поглощение нейтронов в продуктах деления и шлаках.

Зависимость коэффициента размножения в ячейке k от количества накопившихся продуктов деления в расчете на 1 т топлива представлена на рисунке кривой 1. Этой кривой соответствует ТВС, находившаяся в реакторе в течение всей кампании от загрузки свежей до выгрузки выгоревшей ТВС с двумя промежуточными перестановками. По ней можно было бы определить зависимость от времени (или выгорания) коэффициента размножения всего реактора для одной трети кампании, когда имеются ТВС свежезагруженные, а также простоявшие одну или две трети кампании. Такая зависимость позволила бы определять момент промежуточной перегрузки после достижения $k = 1$. Тот



Коэффициент размножения без трансмутации (1), с трансмутацией ^{99}Tc (2)

же результат можно получить, если учесть, что среднее по реактору выгорание в момент промежуточной перегрузки составляет 26,7 ГВт·сут /т. На рисунке этому значению выгорания соответствует $k = 1$.

При трансмутации ^{99}Tc и ^{129}I не образуются нуклиды, обладающие сильным поглощением нейтронов, и уменьшение количества ^{99}Tc и ^{129}I за кампанию невелико. Поэтому вклад поглощения нейтронов, обусловленный добавлением трансмутируемых нуклидов, слабо меняется в течение кампании. Он определяется в основном поглощением нейтронов ^{99}Tc и ^{129}I .

В режиме с трансмутацией детальные расчеты проводили для ^{99}Tc . Рассчитывали коэффициент размножения нейтронов при его добавлении в топливную зону элементарной ячейки или зону теплоносителя в концентрации, составляющей 1 и 0,48% концентрации урана соответственно. При этом абсолютное количество при добавлении ^{99}Tc в ту или другую зону одинаково. Удаление ^{99}Tc при снижении реактивности не предусматривалось. При добавлении малого количества трансмутируемых нуклидов эффект должен быть пропорционален количеству добавляемого нуклида.

Зависимость коэффициента размножения нейтронов от выгорания при введении ^{99}Tc в топливо представлена на рисунке кривой 2. Она проходит примерно параллельно кривой 1, соответствующей отсутствию трансмутируемых нуклидов. При выгорании 26,7 ГВт·сут /т расстояние между кривыми соответствует отрицательному приращению коэффициента размножения при введении ^{99}Tc $\Delta k = 0,017$. Наклон обеих кривых соответствует изменению k на 0,011 при изменении выгорания на 1 ГВт·сут/т. Из этих данных видно, что при добавлении ^{99}Tc вторая промежуточная перегрузка должна проводиться при меньшем на 1,5 ГВт·сут/т выгорании, чем без добавления (соответственно первая перегрузка при меньшем на 1,5/2 ГВт·сут/т выгорании). За три этапа (полная кампания) выгорание уменьшается на 2,25 ГВт·сут /т, что составляет 5,6% полного выгорания без добавления трансмутируемых нуклидов. Количество загружаемого и трансмутируемого ^{99}Tc может быть определено по плотности потока нейтронов и общей массе урана в реакторе, составляющей 70 т. При концентрации ^{99}Tc в топливе, составляющей 1% концентрации урана, его масса равна 291 кг. При принятой в расчетах плотности потока нейтронов за кампанию с учетом уменьшения трансмутируется 15,3% исходного ^{99}Tc . Заметим, что при значительно меньшей загрузке ^{99}Tc , когда его влияние на продолжительность кампании пренебрежимо мало, уменьшение количества за кампанию составило бы 16,2%. Таким образом, масса трансмутируемого ^{99}Tc за кампанию составляет 44,5 кг.

Если добавлять ^{99}Tc в зону теплоносителя, то окончательный результат оказывается таким же, как при добавлении в топливную зону элементарной ячейки. При этом, с одной стороны, плотность потока нейтронов в зоне теплоносителя на 16% выше, чем в топливной зоне. С другой, отрицательное приращение коэффициента размножения Δk , связанное с добавлением ^{99}Tc , при выгорании ~26,7 ГВт·сут/т оказывается на 17,5% больше, производная коэффициента размножения по выгоранию такая же, как при его внесении в топливную зону. Таким образом, оба эффекта компенсируют один другой. Для сохранения того же выгорания, что при добавлении в топливную зону, необходимо снизить загрузку ^{99}Tc в зону теплоносителя на 17,5%. Но выгорание самого ^{99}Tc в более высоком потоке будет на 16% больше.

Таким образом, при добавлении в зону теплоносителя, а не в топливную зону количество уничтоженного ^{99}Tc будет на 1% меньше при том же сокращении кампании.

Если в качестве трансмутируемого взять ^{129}I , то количественный результат можно получить из данных, относящихся к ^{99}Tc , пересчитав их в соответствии с эффективным сечением. При этом необходимо учесть, что кроме ^{129}I в радиоактивных отходах присутствует также стабильный изотоп ^{127}I . Для нейтронного спектра ВВЭР эффективное сечение смеси изотопов иода в 2,6 раза меньше, чем ^{99}Tc . Поэтому для одинакового вклада в коэффициент размножения число ядер ^{127}I и ^{129}I должно быть в 2,6 раза больше, чем ^{99}Tc , и загрузка ^{129}I составит 804 кг. Эффективное сечение поглощения нейтронов ^{129}I в 2,8 раза меньше, чем ^{99}Tc . Выгорание ^{129}I за одну кампанию реактора составляет 5,7% исходного количества (или 6%, если не учитывать влияние добавляемого ^{129}I на продолжительность кампании). Таким образом, при уменьшении кампании реактора на 2,25 ГВт·сут /т масса трансмутируемого ^{129}I составляет 45,8 кг.

Таким образом, если трансмутировать ^{99}Tc или ^{129}I в ВВЭР путем добавления в топливо или теплоноситель на все время кампании, то из-за дополнительного поглощения продолжительность кампании и выгорание уменьшаются. Эти потери энергии являются ценой, которую приходится платить за трансмутацию нуклидов без их удаления во время работы реактора. Для иллюстрации приведем оценки потерь энерговыработки при трансмутации ^{99}Tc и ^{129}I , образующихся в ВВЭР-1000. В одном ВВЭР-1000 за кампанию (3 года) накапливается ~80 кг ^{99}Tc и 20 кг ^{129}I . Их трансмутация со скоростью накопления в реакторе вызывает снижение выгорания на 5,1 ГВт·сут/т, т.е. на 12,7% штатного выгорания. Это соответствует недопроизведенной электроэнергии 110 ГВт·сут за кампанию, или 37 ГВт·сут за 1 год работы. Снижения выгорания и связанных с ним потерь энергии можно избежать, если удастся найти такой способ размещения нуклидов для облучения в реакторе, который позволял бы их извлекать из работающего реактора за определенное время до очередной перегрузки.

Численные оценки указывают на то, что потери энерговыработки в режиме с трансмутацией большие. К тому же скорость трансмутации ^{99}Tc и ^{129}I низкая из-за невысокой плотности потока нейтронов. Поэтому использовать энергетические тепловые реакторы для трансмутации долгоживущих продуктов деления вряд ли целесообразно. Для этой цели необходимы специализированные трансмутационные установки.

В заключение авторы выражают глубокую благодарность А.М. Павловичеву за стимулирующие обсуждения материалов статьи и доброжелательную помощь.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Accelerator-Driven Systems (ADS) and Fast Reactors (FR) in Advanced Nuclear Fuel Cycles. OECD-NEA, France, ISBN 92-64-18482-1.
2. Семенов В.В. Основные физико-технические характеристики реакторных установок ВВЭР: Препринт ИАЭ-3104, 1979.
3. Овчинников Ф.Я., Голубев Л.И., Добрынин В.Д. и др. Эксплуатационные режимы водородных энергетических ядерных реакторов. М.: Атомиздат, 1977.
4. Герасимов А.С., Зарицкая Т.С., Рудик А.П. Справочник по образованию нуклидов в ядерных реакторах. М.: Энергоатомиздат, 1989.
5. Бурмистров А.Я., Кочуров Б.П. Пространственно-энергетическое распределение нейтронов в цилиндрической ячейке реактора: Препринт ИТЭФ-107, 1978.