

СЖИГАНИЕ ПЛУТОНИЯ В СИСТЕМЕ РЕАКТОРОВ ВВЭР И БН ПРИ ЕГО РЕЦИКЛИРОВАНИИ*

А.В. Петров, С.Г. Усынина, В.А. Чирков

Нижегородский государственный технический университет, г. Н. Новгород



В статье рассмотрены различные схемы циркуляции плутония в действующих реакторах ВВЭР и БН. Исследованы варианты циркуляции плутония в замкнутом топливном цикле по отдельной схеме (реактор каждого типа использует только тот плутоний, который в нем нарабатывается) и в симбиозной системе ВВЭР-РБН. Выполнены расчеты выгорания плутония для представленных схем. Показано, что многократное использование плутония наиболее эффективно в системе реакторов различного типа. Наличие реакторов на быстрых нейтронах в системе позволяет улучшить использование плутония в реакторах на тепловых нейтронах.

В условиях избыточности производимого плутония становится актуальной задача эффективной его утилизации в энергетических реакторах существующих типов. Это возможно в замкнутом топливном цикле при многократном возврате несгоревшего плутония в активные зоны реакторов, т. е. при его рециклировании. По-видимому, в этом процессе должны участвовать реакторы как на тепловых, так и на быстрых нейтронах [1]. Реактор каждого типа имеет свои специфические особенности, которые могут быть использованы при оптимизации процесса утилизации плутония. Ниже рассмотрены две схемы циркуляции плутония в реакторах типа ВВЭР и БН.

По первой схеме реактор каждого типа использует только тот плутоний, который в нем нарабатывается (рис.1). Реактор БН переводится из режима размножителя в режим сжигателя путем отказа от размещения в экранах сырьевых материалов (урана или тория) и замены их на нейтральные (например, сталь и натрий). Исключение урана из состава активной зоны вызовет существенное ухудшение эксплуатационных характеристик реактора и поэтому здесь не рассматривается. Для РБН средней мощности (БН-600, БН-800) внутренний коэффициент воспроизводства меньше единицы, следовательно, активная зона является сжигателем плутония. Для увеличения скорости сжигания этот коэффициент может быть несколько уменьшен за счет снижения содержания ^{238}U (уменьшение диаметра твэлов, введение разбавителя) при условии сохранения скорости снижения реактивности при выгорании и других эксплуатационных характеристик на приемлемом уровне.

Эксплуатируемые ныне реакторы ВВЭР могут быть переведены на частичную загрузку уран-плутониевым (МОХ) топливом (рис.1б) при определенной их модер-

© А.В. Петров, С.Г. Усынина, В.А. Чирков, 2000

*Работа поддержана грантом Минобразования РФ №215 по исследованиям в области ядерной техники

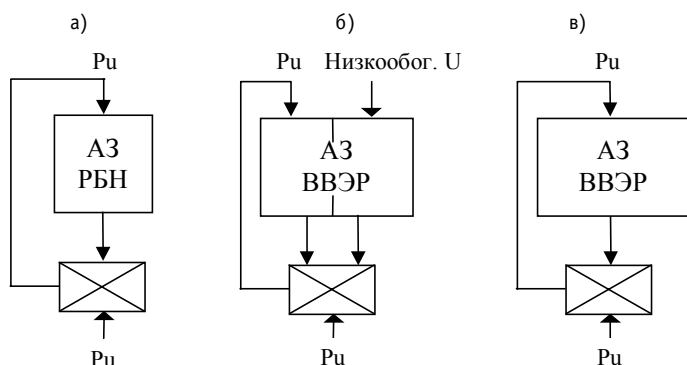




Рис. 1. Потoki плутония в замкнутом топливном цикле по первой схеме (раздельные циклы):  - переработка и рефабрикация твэлов;  - из внешних источников

По второй схеме (рис.2) в активной зоне БН используются комбинированные тепловыделяющие сборки [3], в которых компонуются как твэлы без урана, так и твэлы без плутония, обозначенные на рис.2 соответственно как топливные (ТЭ) и сырьевые элементы (СЭ). Они перерабатываются отдельно, и потоки плутония из них не смешиваются. Не сгоревший за кампанию плутоний из ТЭ возвращается в новые твэлы этого типа. Туда же идет поток плутония из отработавшего топлива ВВЭР как урановой, так и МОХ-зоны. Отработавшее топливо из СЭ РБН может идти почти без корректировки состава (кроме очистки от продуктов деления) на загрузку МОХ-зоны ВВЭР. Об этом свидетельствует приемлемый для ВВЭР диапазон обогащения урана плутонием в отработавших СЭ РБН (рис.3). Важно отметить, что доля делящихся изотопов (^{239}Pu , ^{241}Pu) в этом плутонии не ниже 90%.

Были выполнены расчеты выгорания плутония для рассмотренных выше схем. В качестве прототипов выбраны реакторы БН-800 и ВВЭР-1000. Предполагалось, что при переработке отделяются продукты деления и малые актиниды.

Для расчета РБН использовалась программа SYNTES с константами БНАБ-78, а для расчета ВВЭР - программа WIMS/D4 с собственной библиотекой констант. Результаты расчетов позволяют сделать следующие выводы.

Работа в режиме 1а (рис.1) дает возможность сжигать плутоний любого состава при любом количестве циклов. При этом уже после двух-трех циклов практически устанавливается равновесный «собственный» состав выгружаемого из активной зоны плутония. В данном случае этот состав определяется плутониевым вектором (0.8; 72.9; 21.7; 3.5; 1.2), компоненты которого определяют содержание в % ^{238}Pu , ^{239}Pu , ^{240}Pu , ^{241}Pu , ^{242}Pu соответственно при подпитке энергетическим плутонием, извлекаемым из уранового топлива реактора ВВЭР, с вектором (0.5; 60; 24.5; 10.9; 4.1). Дополнительно можно отметить, что режим 1а допускает неполную очистку перерабатываемого топлива от продуктов деления и от малых актинидов. Последние

низации [2] как это сделано на некоторых западно-европейских PWR. В этом случае интенсивность сжигания плутония из внешнего источника будет определяться вкладом МОХ-зоны в суммарную мощность реактора. В перспективе, по-видимому, возможен перевод части реакторов типа ВВЭР на МОХ-топливо (рис.1в).

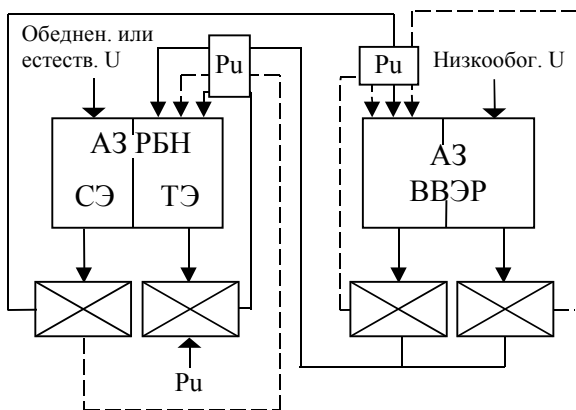


Рис. 2. Поток плутония в совместном топливном цикле ВВЭР и РБН: - - - альтернативные варианты

эффективно выгорают в жестком спектре нейтронов.

Сжигание плутония по схемам 1б и 1в характеризуется постоянным ухудшением вектора плутония, т.е. уменьшением доли делящихся изотопов ^{239}Pu и ^{241}Pu от цикла к циклу. Так, использование энергетического плутония с вектором (1.8; 55.6; 21.87; 14.5; 6.3) в загружаемом МОХ-топливе водо-водяного реактора до выгорания 33 МВт·сут./кг снижает долю делящихся изотопов с 70 до 56%, а при выгорании 50 МВт·сут./кг - до 47%.

Расчет ВВЭР-1000 проводился на уровне элементарной ячейки. Определялось необходимое обогащение топлива из условия сохранения среднего за кампанию K_{inf} . Исходное значение K_{inf} соответствует использованию уранового топлива с обогащением 4% до выгорания 35 МВт·сут./кг. Предполагалось, что плутоний из предыдущего цикла концентрируется в твэлах без подмешивания к нему плутония из внешних источников и разбавляется ^{238}U в степени, сохраняющей исходное значение K_{inf} . Результаты расчета показаны на рис.4. Из рисунка видно, что загрузка

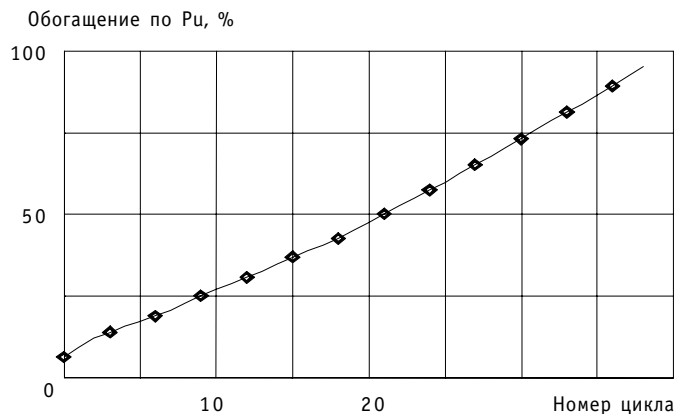


Рис. 4. Зависимость обогащения загружаемого МОХ-топлива ВВЭР от номера цикла (одному циклу соответствует $T_{эфф} = 800$ сут. пребывания в активной зоне)

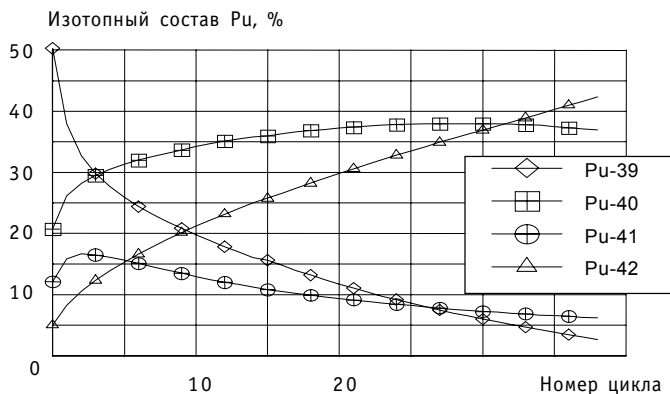


Рис. 5. Изотопный состав загружаемого в ВВЭР плутония в зависимости от номера цикла

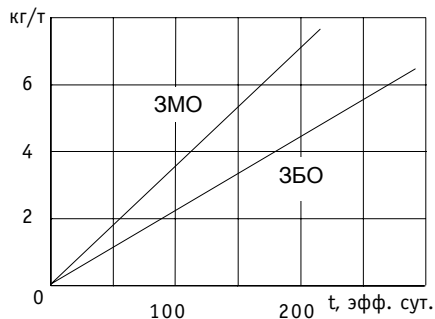


Рис. 3. Среднее содержание делящихся изотопов плутония в выгружаемых СЭ в зависимости от времени облучения их в АЗ РБН

плутония в твэлы растет от цикла к циклу за счет ухудшения его вектора, а ограничение продолжительности циркуляции топлива по такой схеме вследствие достижения 100% обогащения соизмеримо со сроком службы отдельного реактора (30-40 лет). Изменение вектора плутония показано на рис.5. Видно, что доля делящихся изотопов в плутонии, используемом в этом режиме (рис.1в), становится меньше, чем в цикле РБН (рис.1а) уже в первых циклах. Изменение состава плутония от цикла к циклу определялось с помощью программного комплекса BURN, разработанному одним из авторов [5]. Для расчета использовалась библиотека Actinoid library ORIGEN2, предназначенная для

Таблица 1

Относительная ценность выделяемого плутония

Потребитель Pu	Источник Pu			
	ВВЭР UO ₂	ВВЭР МОХ	РБН СЭ	РБН ТЭ
РБН	<u>0.787</u>	<u>0.719</u>	<u>0.961</u>	<u>0.725</u>
ТЭ	0.787	—	0.961	0.750
ВВЭР	<u>0.725</u>	<u>0.617</u>	<u>0.944</u>	<u>0.639</u>
МОХ	0.725	0.425	0.944	0.650

Примечание: числитель – первый цикл, знаменатель – второй цикл

расчета уран-водных решеток типа PWR. Верификация программы BURN на известных авторам экспериментальных данных [6] по выгоранию уранового топлива в реакторе ВВЭР-440 показала, что по делящимся изотопам и по ²⁴⁰Pu состав плутония предсказывается с точностью 5-8%, в то время как по ²³⁸Pu и ²⁴²Pu расхождения составляют 45 и 25% соответственно. Учитывая, что содержание ²³⁸Pu никогда не превышает 2-3%, а изотоп ²⁴²Pu является замыкающим в цепочке выгорания плутония, упомянутую выше точность расчета вектора плутония можно считать удовлетворительной и соответствующей современному состоянию ядерных констант. Несколько большее расхождение в составе плутония по сравнению с [4], где также использовалась библиотека ORIGEN2, но предназначенная для МОХ-загрузки PWR, объясняется, по оценкам авторов, главным образом, отличиями в составе рассматриваемой элементарной ячейки по сравнению с ячейкой PWR.

Сравнение различных схем циркуляции плутония в системе реакторов можно проанализировать на основе сопоставления относительной ценности плутония. Ее можно характеризовать относительным вкладом в реактивность одной весовой единицы плутония заданного состава по сравнению с реактивностью чистого ²³⁹Pu (~40%). Совместный топливный цикл РБН и ВВЭР (рис.2) имеет преимущества в том, что плутоний с наибольшим содержанием делящихся тепловыми нейтронами изотопов из СЭ РБН направляется в ВВЭР, где его ценность наиболее высока, а весь плутоний с большим содержанием четно-четных изотопов пережигается в РБН. Для рассматриваемых реакторов эти ценности представлены в табл.1, из которой видно, что ценность плутония в РБН во всех случаях выше, чем в ВВЭР, но особенно велик проигрыш в ценности при возврате плутония из МОХ-зоны ВВЭР в этот же тип реакторов (~ 40%). Наличие реакторов РБН в системе позволяет снизить обогащение в реакторе на тепловых нейтронах и улучшить условия использования МОХ-топлива. Оптимизация потоков плутония в топливном цикле приводит к снижению общего его количества в системе реакторов ВВЭР и РБН с одновременным увеличением содержания в нем делящихся изотопов. Дополнительные преимущества схемы, приведенной на рис.2, состоят в меньшей скорости накопления малых актинидов в топливном цикле. Это обстоятельство требует специального рассмотрения.

Литература

1. Усынин Г.Б., Усынина С.Т., Петров А.В. Возможности интегрированного топливного цикла в достижении экологической приемлемости атомных станций // Известия вузов. Ядерная энергетика. - 1998. - № 4. - С. 65-71.
2. Новиков А.Н., Павлов В.И. и др. Совершенствование топливных циклов ВВЭР, перспектива использования МОХ-топлива: Тез. докл. X Межд. сем. по проблемам физики реакторов (Москва, 2-6 сентября 1997). - М.: МИФИ, 1997. - С. 1116-1120.

3. Кирюшина А.И., Усынин Г.Б., Усынина С.Г. Энергетическая утилизация трансурановых нуклидов в быстрых реакторах // Атомная энергия. - 1996. - Т.80. - Вып. 2. - С.97-101.
4. Magill J., Matzke HJ., Van Geel J. Plutonium Incineration in LWRs: Proc. Intern. Conf. on Future Nuclear Systems (Seattle, Sept. 12-17, 1993). - Washington: ANS, 1993. - P. 21-23.
5. Чирков В.А., Усынина С.Г., Петров А.В. Совместный топливный цикл БН и ВВЭР на основе пиропроцессинга: Отчет НГТУ, №г/р 01990004936. - Н. Новгород, 1999.
6. Синев И.М., Батуров Б.Б. Экономика атомной энергетики. - М.: Атомиздат, 1984.

Поступила в редакцию 20.12.99.

УДК 620.93

Experimental Research of Plasm-chemical Reactors Based on Frontal Ionization Waves \V.S. Kayokin, D.V. Meshalkin, V.K. Semyenov; Editorial board of journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2000. – 4 pages, 5 illustrations. – References, 4 titles.

Electric and thermal characteristics of discharge elements of plasm-chemical reactors based on frontal ionization waves, developed in the Ivanovo State Power University are investigated experimentally. The reactors can be utilised both for elimination of harmful-gaseous admixtures from exhaust gas mixtures, and for synthesis of ozone from free air.

УДК 532.526.4:621.039.533.34

Determination of Consumption Using Maximal Velocity and Pressure Overfall \E.F. Avdeev, V.V. Bol'shunova, A.V. Vinogradov; Editorial board of journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2000. – 6 pages, 2 illustrations, 1 table. – References, 5 titles.

A new method is suggested for determination of the consumption during turbulent flow in pipes. The method is based on measured values of the maximal velocity and pressure overfall of the flow. Using four different classical velocity distributions identical as to the structure, formula for the consumption was obtained and its geometrical interpretation is given. The relation of maximal and average velocities is defined more accurately and it is confirmed experimentally that the consumption can be determined using the method of successive approximations on the base of measured maximal velocity alone.

УДК 621.039.586 : 536.42

Model of Melten Fuel Relocation and Solidification in Undercore Channels During Fast Reactor Severe Accident \G.N. Vlasichev; Editorial board of journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2000. – 10 pages, 5 illustrations. – References, 11 titles.

The model is developed for the relocation and solidification of melted fuel in the pass of coolant channels of lower blanket under severe accident with the core meltdown. The model incorporates models of thermal conductivity and volumetric solidification and takes into account the narrowing of a channel and increase of relocating melt viscosity. The dynamics of changes both of the solidcrust thickness in a channel and the depth of channel material meltthrough is considered within the frames of the model. Numerical results consistent with experimental data is obtained as to the length of penetration of aluminium oxide melt into quartz pipes of different diameter in relation to the THEFIS experiment conduction.

УДК 621.039.59

Burning of Plutonium in System of VVER and BN reactors with Its Recycling \A.V. Petrov, S.G. Usynina, V.A. Chirkov; Editorial board of journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2000. – 5 pages, 5 illustrations, 1 table. – References, 6 titles.

Different schemes of plutonium circulation in VVER and BN reactors are considered in the paper. Variants of plutonium circulation and burning in the closed fuel cycle according to the separate scheme (reactor of each type utilizes only its own plutonium) and in the symbiotic VVER- BN system are investigated. It is shown that multiple usage of plutonium is the most effective in a system of reactors of different type. Presence of fast reactors in the system allows to improve utilization of plutonium in thermal reactors.

УДК 51-72:621.039.526

Failures of reactor runaway. The elementary models and regularities \N.M. Kadjuri; Editorial board of journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2000. – 7 pages, 2 illustrations, 1 table. – References, 4 titles.

The temporal behaviour of the fast reactor power when introducing the reactivity with high rates (up to 50 β/c) is considered. It is shown that the energy release during an outburst is proportional