

УДК 621.039.51

DOI: 10.17223/00213411/64/2-2/8

*Н.П. ГОЛОВИН<sup>1</sup>, А.В. ЕГОРОВ<sup>2</sup>, Е.А. РОДИНА<sup>2</sup>, Ю.С. ХОМЯКОВ<sup>2</sup>*

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАПАСА РЕАКТИВНОСТИ В ИННОВАЦИОННЫХ РЕАКТОРАХ НА БЫСТРЫХ НЕЙТРОНАХ БОЛЬШОЙ МОЩНОСТИ В ЗЯТЦ

В рамках проектного направления «Прорыв» в Российской Федерации разрабатывается комплекс технологий замыкания топливного цикла с использованием смешанного (U-Pu-MA) нитридного топлива. Одна из ключевых задач новой технологии – обеспечение такого состава топлива и таких характеристик активных зон с новым топливом, при которых реактор имеет минимальный запас реактивности в процессе кампании. Это должно привести к снижению или исключению риска реактивностных аварий с тяжелыми последствиями. В новой технологии при достижении коэффициента воспроизводства в активной зоне, близкого к единице, возможна реализация равновесного режима, характеризующегося стабильностью как реактивности, так и изотопного состава топлива. Однако реакторная установка (РУ) длительное время (более 10 лет) должна работать в переходном режиме, который требует специальных мер по управлению выбегом реактивности по кампании. Представлены результаты расчетных исследований, показывающие, что использование в топливе стартовых загрузок быстрых реакторов минорных актинидов из отработавшего ядерного топлива (ОЯТ) тепловых реакторов позволяет улучшить кривую изменения реактивности РУ, приводя к снижению запаса реактивности на выгорание. В работе представлены результаты моделирования полного жизненного цикла быстрого реактора мощностью 1200 МВт, перехода топливной композиции к равновесному составу и изменение нуклидного и изотопного состава ОЯТ в этом процессе.

**Ключевые слова:** быстрые реакторы, нитридное топливо, замкнутый ядерный топливный цикл, запас реактивности, равновесный цикл.

### Введение

Замыкание ядерного топливного цикла в настоящее время рассматривается как способ решения насущных проблем существующей ядерной энергетики и путь к крупномасштабной ядерной энергетике на базе реакторов на быстрых нейтронах (РБН). Замкнутый ядерный топливный цикл (ЗЯТЦ) позволяет принципиально решить проблему отработавшего ядерного топлива (ОЯТ) и снизить радиологическую опасность радиоактивных отходов (РАО) до приемлемого уровня радиационной эквивалентности [1, 2]. Ключевую системообразующую роль в ЗЯТЦ играют реакторы на быстрых нейтронах, работающие на плутонии, выделяемом из ОЯТ, с последующим многократным его рециклированием, и позволяющие выжигать долгоживущие РАО, так называемые минорные актиниды (МА). Комплекс технологий РБН и ЗЯТЦ активно разрабатывается в России в рамках проектного направления «Прорыв» [3–5].

Помимо проблем, связанных с ОЯТ и РАО, РБН должны продемонстрировать и новый, ранее не достижимый уровень безопасности, детерминистически исключая потенциальную возможность тяжелых аварий, подобных Чернобыльской. В частности, В.В. Орловым предложено снизить запас реактивности РБН до величины не более доли запаздывающих нейтронов ( $\beta_{\text{эфф}}$ ), что позволяет исключить реактивностные аварии на мгновенных нейтронах [6]. Это достигается за счет обеспечения высокого воспроизводства топлива в активной зоне с коэффициентом воспроизводства (КВА) не менее единицы.

Теоретически такая возможность, безусловно, существует при использовании в активной зоне плотного топлива. В рамках проекта «Прорыв» для этого используется смешанное нитридное топливо (СНУП-топливо). Ключевой практической проблемой реализации данной идеи является необходимость обеспечения высокой точности соблюдения запаса реактивности и учета неопределенностей в прогнозируемом составе топлива и активной зоны. Эти неопределенности связаны как с неоднозначностью изотопного состава исходного плутония, так и еще в большей степени с постоянным изменением состава топлива в процессе многократного рециклирования, зависящего от условий облучения, длительности и схемы реализации топливного цикла, выгорания топлива, учета выжигания МА, а также технологическими неопределенностями при изготовлении топлива. Характеристики топлива и активной зоны, а следовательно, и запас реактивности РБН изменяются

в течение длительного времени, что требует их прогноза на много лет вперед (как будет показано ниже – не менее 30 лет).

### 1. Методика моделирования жизненного цикла активной зоны РУ

Для исследования описанных выше проблем разрабатывается специальная методика автоматизированного моделирования полного жизненного цикла активной зоны РБН, работающего в условиях ЗЯТЦ с многократным рециклом топлива. Основные положения этой методики заключаются в следующем.

Считается, что запуск быстрого реактора происходит в рамках двухкомпонентной ядерной энергетики и для формирования стартовой загрузки РБН плутония, выделенного из ОЯТ тепловых реакторов ВВЭР. Плутоний такого же состава используется и для двух первых перегрузок топлива, а начиная с третьей перегрузки топлива РБН переходит на использование собственного регенерированного топлива. Поскольку тепловыделяющие сборки (ТВС) с первоначально одинаковым составом топлива облучаются в несколько различающихся условиях по нейтронному потоку и энерговыделению, то и состав выгружаемого, а затем рециклируемого топлива также может различаться. Поэтому необходима организация моделирования каждой персональной ТВС.

Для формирования критических загрузок разработан специализированный алгоритм подбора массовой доли плутония двух или трех компонент топлива с обеспечением критичности на начало микрокампании. В наиболее простом варианте происходит итерационное определение массовой доли плутония в СНУП-топливе. В более сложных вариантах возможно моделирование смешения более сложных композиций, например, неразделенных смесей урана и плутония после переработки с природным или обедненным ураном.

В течение микрокампании управление критичностью осуществляется изменением положения рабочих органов системы управления и защиты (РО СУЗ). При выгонке реактора в критическое состояние учитывается возможность учета методической погрешности расчетного кода, а также требуемый уровень точности итераций.

Состав активной зоны формируется из регенерируемых ТВС автоматически, исходя из заданной пользователем схемы частично-равномерной перегрузки топлива и расчетного состава топлива, выгруженного двумя перегрузками ранее, с учетом изменения в течение хранения и переработки.

Нейтронно-физический расчет ведется на базе многогруппового диффузионного уравнения переноса с заранее определенной методической поправкой на критичность. Применение диффузионного приближения дает достоверные результаты изменения реактивности при выгорании топлива при разумной скорости расчетов, позволяющих обеспечить моделирование 30–60 лет эксплуатации РБН в ЗЯТЦ.

Реализация указанного подхода осуществляется в рамках программного комплекса РТМ-2 [7], современная опытная версия которого использовалась и в данной работе.

### 2. Анализ различных алгоритмов формирования критических загрузок на запас реактивности

Различия в изотопном составе плутония требуют корректировки его массовой доли для обеспечения критичности загрузки активной зоны. Ввиду заметных погрешностей расчета критичности  $\sim 0.4\text{--}0.5\%\Delta k/k$  (более  $\beta_{\text{эфф}}$ ) для определения массовой доли необходимо опираться не на расчетную, а экспериментальную величину, определенную на данной стадии эксплуатации. Однако целесообразность изменения массовой доли в каждой микрокампании вызывает сомнения по технологическим причинам. И, как показали расчеты, попытка «продлонгации» измеренного запаса реактивности на несколько микрокампаний вперед может приводить к потере стабильности методики корректировки (рис. 1), колебаниям как запаса реактивности, так и массовой доли. Эту проблему можно решить за счет использования расчетной усредненной величины массовой доли на прогнозируемое число микрокампаний. В целом, может быть рекомендована корректировка не по микрокампаниям, а по каждому рециклу топлива, что технологически наиболее приемлемо.

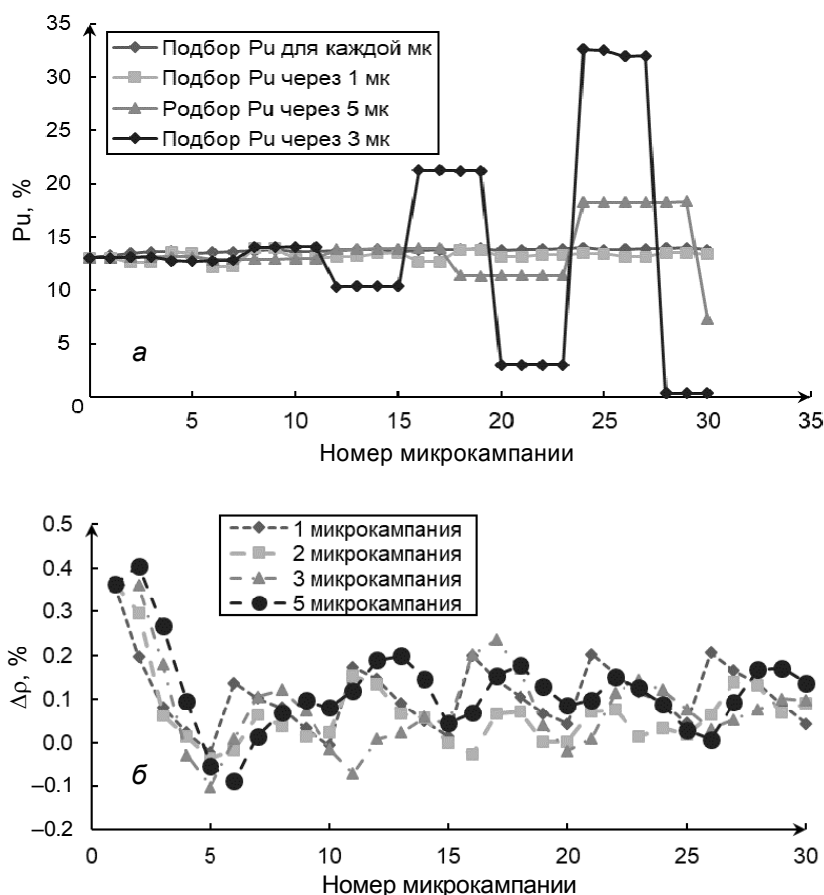


Рис. 1. Изменение запаса реактивности при использовании различных алгоритмов формирования критических нагрузок: *а* – базовый состав топлива; *б* – изменение реактивности для базового состава топлива

### 3. Изменения реактивности в реакторах с натриевым и свинцовым теплоносителем

Первые же расчеты показали, что запас реактивности достаточно долго изменяется в связи с модификацией состава топлива при рециклировании до стабилизации на так называемом равновесном уровне. Можно отметить, что физика КВА и запаса реактивности более благоприятна в реакторах со свинцовым теплоносителем, в которых можно наблюдать даже рост реактивности при выгорании топлива, в то время как в РУ БН изменение реактивности носит более традиционный спадающий характер. Технически при высоком КВА и росте реактивности управлять запасом реактивности проще, так как для снижения этого роста может быть использован ряд мер, таких, как снижение объемной доли топлива, использование поглотителей. Влияние погрешности для РУ БН компенсировать сложнее, потому что оно требует увеличения средней плотности топлива по активной зоне, а такие возможности уже практически исчерпаны. Результаты сравнительного расчетного анализа изменения реактивности при выгорании топлива для длительности жизненного цикла, равного 60 лет, представлены на рис. 2.

### 4. Анализ влияния состава топлива стартовой загрузки на запас реактивности

Включение в состав топливной композиции не только  $Pu$ , но и минорных актинидов ( $Am$  и  $Np$ ) позволяет улучшить кривую изменения реактивности РУ, выхолаживая ее и приводя к снижению запаса реактивности на выгорание (рис. 3). По-видимому, МА играют роль некоего дополнительного «выгорающего поглотителя», а их доля может быть дополнительным параметром для оптимизации запаса реактивности.

Начальная концентрация МА в топливе РБН определялась соотношением МА и  $Pu$  в ОЯТ ВВЭР, так чтобы все трансурановые элементы были вовлечены в топливный цикл. Доля МА может применяться и для регулирования запаса реактивности при использовании плутония различного изотопного состава.

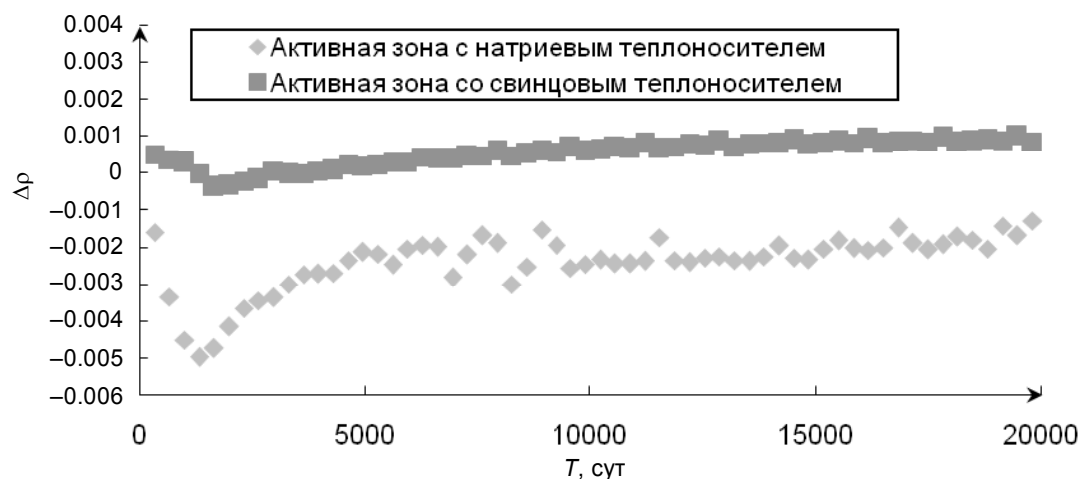


Рис. 2. Изменение реактивности при выгорании топлива в активной зоне

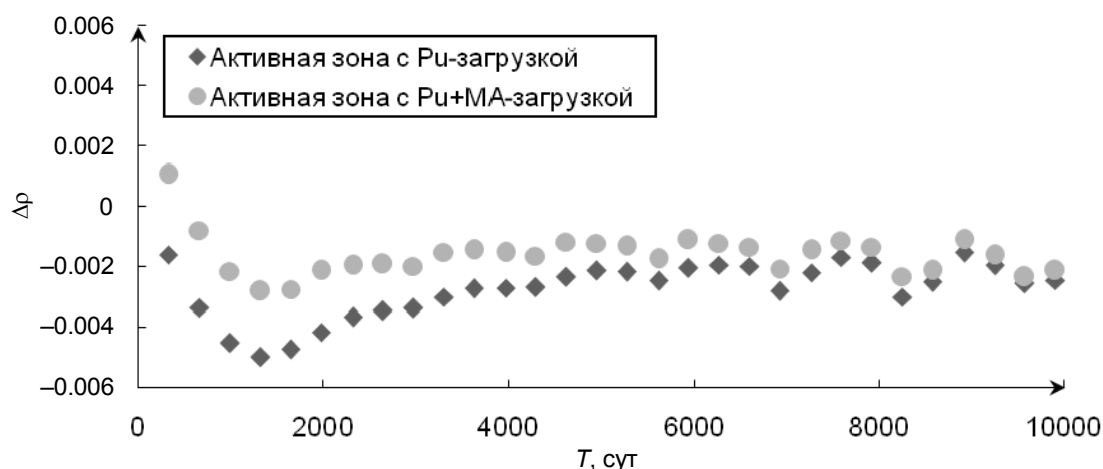


Рис. 3. Изменение реактивности при выгорании топлива при использовании Pu с добавлением минорных актинидов в стартовую загрузку

### Заключение

Одна из ключевых задач технологии ЗЯТЦ – обеспечение такого состава топлива и таких характеристик активных зон со смешанным уран-плутониевым топливом, при которых реактор имеет минимальный запас реактивности в процессе кампании.

В работе приведены основные положения автоматизированного моделирования полного жизненного цикла активной зоны РБН, работающего в условиях ЗЯТЦ с многократным рециклом топлива. Для формирования критических загрузок разработан специализированный алгоритм подбора массовой доли плутония с обеспечением критичности на начало микрокампании.

Представлены результаты моделирования полного жизненного цикла быстрых реакторов со свинцовым и натриевым теплоносителем в замкнутом ядерном топливном цикле и решения некоторых практических задач по реализации концепции малого запаса реактивности для исключения реактивностных аварий на мгновенных нейтронах. Показано, что использование МА благоприятно сказывается на величине максимального запаса реактивности, а массовая доля МА может быть параметром, позволяющим оптимизировать переходной режим в равновесный режим ЗЯТЦ.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Адамов Е.О., Ганев И.Х., Лопаткин А.В. и др. // Атомная энергия. – 1996. – Т. 81. – № 6. – С. 403–409.
2. Лопаткин А.В., Величкин В.И., Никипелов Б.В. и др. // Атомная энергия. – 2002. – Т. 92. – № 4. – С. 308–317.
3. Rachkov V.I., Adamov E.O., Lopatkin A.V., et al. // International Atomic Energy Agency, Fast Reactors and Related Fuel Cycles: Safe Technologies and Sustainable Scenarios. Paris, France, March 4, 2013. – 2013. – P. 93–102.

4. Адамов Е.О., Орлов В.В., Рачков В.И. и др. // Известия РАН. Энергетика. – 2015. – № 1. – С. 13–29.
5. Адамов Е.О., Забудько Л.М., Матвеев В.И. и др. // Известия РАН. Энергетика. – 2015. – № 2. – С. 3–15.
6. Орлов В.В., Адамов Е.О., Велихов Е.П. и др. // Атомная энергия. – 1992. – Т. 72. – № 4. – С. 317.
7. Egorov A.V., Khomyakov Yu.S., Rachkov V.I., et al. // Nucl. Energy Technol. – December 2019. – V. 5(4). – P. 353–359. <https://doi.org/10.3897/nucet.5.46517>.

Поступила в редакцию 20.10.2020.

<sup>1</sup> Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,  
г. Москва, Россия

<sup>2</sup> Акционерное общество «Прорыв», г. Москва, Россия

Головин Никита Павлович, студент НИЯУ «МИФИ», e-mail: nikitagolovin95@yandex.ru;

Егоров Александр Владимирович, зам. начальника отдела АО «Прорыв», e-mail: eav@proruv2020.ru;

Родина Елена Александровна, к.т.н, ведущ. науч. сотр. АО «Прорыв», e-mail: rea@proryv2020.ru;

Хомяков Юрий Сергеевич, д.ф.-м.н., начальник отдела АО «Прорыв», e-mail: hus@proryv2020.ru.

*N.P. GOLOVIN<sup>1</sup>, A.V. EGOROV<sup>2</sup>, E.A. RODINA<sup>2</sup>, Yu.S. KHOMYAKOV<sup>2</sup>*

## STUDIES ON EXCESS REACTIVITY IN THE LARGE SIZE INNOVATIVE FAST REACTORS IN CNFC

Closure of nuclear fuel cycle is now addressed as an approach to solving vital problems of existing nuclear power and as pathway to development of the large-scale nuclear power based on fast reactors (FR). Closed nuclear fuel cycle (CNFC) makes it possible to ultimately solve the problem of spent nuclear fuel (SNF) and reduce radwaste related radiological hazard down to acceptable level of radiological equivalence [1, 2]. Fast neutron reactors using plutonium extracted from SNF with its repeated recycling are key, systemically important component of CNFC, in which long-lived radwaste, so-called minor actinides (MA) can be successfully incinerated. Suite of FR and CNFC technology is being intensively developed in Russia within the framework of «Proryv» project stream [3–5]. Apart from solving problems related to SNF and radwaste, FR should demonstrate the new level of safety, which has not been reached before. In this safety-grade reactor plant, the potential of Chernobyl type severe accident would be deterministically eliminated. In particular, V.V. Orlov proposed that excess reactivity value in FR would not exceed  $\beta_{\text{eff}}$ , thus eliminating prompt neutron reactivity accidents [6]. This is achieved by assuring high breeding ratio of the core (equal to at least 1). Certainly, such a possibility theoretically exists if high-density fuel is used in the reactor core. In this view mixed nitride uranium-plutonium, (MNUP) fuel is called for within the framework of «Proryv» project. On condition of the core-breeding ratio close to 1 the new technology allows realization of equilibrium mode characterized by stability of both reactivity and fuel isotopic composition. However reactor should be operated in transient mode for a long time period (more than 10 years), and this operation requires special measures for controlling reactivity windup during core lifetime. In the article presented are the main guidelines of automated modeling of the entire life cycle of the core of FR operating in CNFC with repeated fuel recycling. A designated algorithm of plutonium mass fraction selection assuring reactor criticality in the beginning of the core run was worked out for making critical loadings. Results of simulation of the whole life cycle of fast reactors with lead and sodium coolants in the closed fuel cycle are presented, as well as the results of solution of some practical problems concerning implementation of low excess reactivity concept in order to eliminate prompt neutron reactivity accidents. It was demonstrated that MA introduction had beneficial effect on max value of excess reactivity, and MA mass fraction might be the parameter allowing transient mode transformation into equilibrium mode of CNFC.

**Keywords:** fast reactors, nitride fuel, closed nuclear fuel cycle, excess reactivity, equilibrium cycle.

<sup>1</sup> National Research Nuclear University «MEPHI», Moscow, Russia

<sup>2</sup> JSC «Proryv», Moscow, Russia

Golovin Nikita Pavlovich, Student of NRNU «MEPHI», e-mail: nikitagolovin95@yandex.ru.

Egorov Alexander Vladimirovich, Deputy Head of Department of JSC «Proryv», e-mail: eav@proruv2020.ru;

Rodina Elena Alexandrovna, Ph.D. Tech. Sciences, Leading Researcher of JSC «Proryv», e-mail: rea@proryv2020.ru;

Khomyakov Yuri Sergeevich, Dr. Phys.-Math. Sciences, Head of Department of JSC «Proryv», e-mail: hus@proryv2020.ru.