



# ИНФОРМАЦИОННЫЙ БЮЛЛЕТЕНЬ

№ 2

2013

## СЕРИЯ: АТОМНАЯ ЭНЕРГЕТИКА ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОНЦЕПЦИИ «ЗАПАС ВЫГОРАНИЯ» ПРИ ОБРАЩЕНИИ С ОЯТ

Обращение с отработавшим ядерным топливом – технически и теоретически сложная, дорогостоящая задача, которая на современном этапе еще более усложняется в связи с развитием новых топливных циклов с выраженной тенденцией к увеличению начального обогащения и глубины выгорания топлива. Поиск, как в области технологий, так и в теоретической области, экономически целесообразных и экологически приемлемых подходов к решению проблем отработавшего топлива на этапах послереакторного ядерного топливного цикла – одна из главных задач атомной отрасли.

В настоящее время при анализе ядерной безопасности систем обращения с отработавшим ядерным топливом используется консервативный подход, который не учитывает выгорание, то есть отработавшее ядерное топливо (ОЯТ) рассматривается как свежее, имеющее максимальное начальное обогащение и максимальные размножающие свойства, – это так называемое приближение «свежего топлива».

Приближение «свежего топлива» существенно упрощает анализ ядерной безопасности и контроль обращения с отработавшим ядерным топливом. Однако свойственный этому приближению чрезмерный консерватизм приводит к значительно завышенным расчетным значениям размножающих свойств (реактивности) системы с ОЯТ и, соответственно, к завышенным, избыточным, мерам безопасности, которые необходимо предпринимать.

Попытки уменьшить консерватизм приближения «свежего топлива» при анализе ядерной безопасности привели к созданию подхода, учитывающего изменение нуклидного состава топлива в процессе выгорания, получившего название концепции «запас выгорания» (Burnup credit). Термин «запас выгорания» означает количественную оценку влияния на реактивность системы с ОЯТ выгорания топлива и накопления делящихся материалов, образования и накопления продуктов деления и актинидов в ядерном топливе и поглощения ими нейтронов, уменьшения концентрации выгорающих поглотителей.

Теоретически этот подход можно применять при обосновании ядерной безопасности на любом этапе обращения с ОЯТ, включая переработку и захоронение, и для любых элементов, обеспечивающих его жизненный цикл. При этом, в отличие от приближения «свежего топлива», использование которого предполагает только расчет эффективного коэффициента размножения (т. е. реактивности) системы по известному начальному составу свежего топлива, подход «запас выгорания» требует определения нуклидного состава ОЯТ как функции выгорания, а затем – расчета коэффициента размножения.

Специалисты выделяют четыре уровня сложности при проведении расчетов с использованием подхода «запас выгорания», различающиеся набором учитываемых нуклидов. В зависимости от выбранного уровня сложность анализа с использованием подход «запас выгорания» существенно меняется. Так, при использовании самого простого уровня

«запаса выгорания» – «Только делящиеся нуклиды» – в расчетах учитывается изменение концентраций только основных делящихся нуклидов ( $^{235}\text{U}$ ,  $^{239}\text{Pu}$ ,  $^{241}\text{Pu}$  и др.) и уменьшение концентрации  $^{238}\text{U}$ .

Следующим по сложности является уровень «Только актиниды», в котором помимо основных делящихся нуклидов учитывается изменение концентраций минорных актинидов. Так как современное состояние науки и техники позволяет с достаточной точностью определять концентрации данных нуклидов, этот уровень «запаса выгорания» является наиболее распространенным.

Однако эволюция топливных циклов ядерных реакторов в сторону увеличения начального обогащения ядерного топлива привела к необходимости дальнейшего развития подхода «запас выгорания». Третий уровень «запаса выгорания» – «Актиниды + продукты деления» – заключается в учете изменения концентраций как актинидов, так и продуктов деления.

Помимо этих трех основных уровней специалисты выделяют еще один, связанный с учетом изменения концентраций выгорающих поглотителей. Данный уровень может быть использован совместно с любым из вышеперечисленных уровней «запаса выгорания».

Так как обращение с ОЯТ вносит существенный вклад в стоимость электроэнергии, получаемой на АЭС, реализация концепции «запас выгорания» в системах обращения с ОЯТ является одним из одобренных МАГАТЭ механизмов уменьшения стоимости ядерного топливного цикла.

В настоящее время в ряде стран эта концепция используется для увеличения вместимости бассейнов выдержки энергоблоков атомных станций и промежуточных хранилищ за счет перехода на уплотненную схему хранения тепловыделяющих сборок (ТВС), размещения в существующие хранилища выгоревшего топлива с более высоким начальным обогащением и, соответственно, с большей глубиной выгорания, для увеличения загрузки в транспортные упаковочные комплекты при перевозке облученного топлива, в компонентах перерабатывающих производств (США, Германия, Франция и др.).

Значения выгорания ядерного топлива также необходимы для учета и контроля ядерных материалов.

Расчет нуклидного состава ОЯТ как функции выгорания является сложной задачей, при решении которой необходимо для каждой ТВС корректно учесть влияние множества параметров, определяющих мощность кассеты в течение всего времени облучения, например таких, как положение и время нахождения ТВС в реакторе, движение стержней СУЗ и др. Кроме этого, для подтверждения применимости используемых методик расчета и определения систематических и статистических погрешностей требуется проведение валидации (подтверждения) расчетных методик и программных средств путем сравнения результатов расчетов с экспериментальными данными или результатами расчетных бенчмарк-экспериментов.

Все это требует существенных первоначальных капиталовложений для разработки методов и программных средств расчета, проведения достаточного количества экспериментов. Самостоятельно развивать и применять концепцию на практике способны страны с развитыми ядерными научно-промышленными комплексами. Поэтому, являясь теоретически привлекательным инструментом для экономии затрат на обращение с отработавшим топливом, практически подход «запас выгорания» на современном этапе не имеет статуса общепринятого при анализе ядерной безопасности.

Для развития этого подхода образованы международные исследовательские программы.

Внедрение подхода «запас выгорания» требует также и соответствующего изменения нормативной базы регулирования ядерной безопасности. Помимо документов, содержащих требования к обоснованию ядерной безопасности с использованием этой концепции, в нормативной базе должны содержаться подробные руководства по ее применению,

составленные признанными экспертами в данной области с учетом международного опыта использования.

### **Расчетно-экспериментальное определение глубины выгорания отработавшего ядерного топлива на АЭС с реакторами ВВЭР**

Российская Федерация, обладая одним из наиболее мощных ядерных научно-промышленных комплексов, не форсирует широкое внедрение при обосновании ядерной безопасности в системах обращения с ОЯТ концепции «запас выгорания».

Существующая нормативная база регулирования ядерной безопасности в Российской Федерации не запрещает применение подхода «запас выгорания»: например, в соответствии с правилами по ядерной безопасности при компактном размещении выгоревших тепловыделяющих сборок в хранилищах и при заполнении транспортных контейнеров разрешается использовать глубину выгорания в качестве параметра ядерной безопасности.

Однако в нормативной базе не отражены в достаточной степени требования к некоторым ключевым аспектам обоснования ядерной безопасности с использованием данного подхода: к проведению и валидации расчетов изменения изотопного состава и расчетов Кэфф, к методикам и средствам определения глубины выгорания отработавших ТВС и др. Отсутствует также и достаточная экспериментальная база для полноценной верификации необходимых методик и программных средств.

На российских АЭС функционирует система централизованного контроля (СЦК), предназначенная для автоматического контроля параметров основного оборудования энергоблока, а также выполнения оперативных расчетов и логического анализа неисправностей в работе систем. С использованием этой системы, а также результатов нейтронно-физических расчетов по программам КАСКАД, ПЕРМАК-А и др. получают расчетные данные по выгоранию – так называемые учетные данные АЭС, которые применяют при размещении ОЯТ в бассейне выдержки и при загрузке в транспортные контейнеры для вывоза с территории станции.

Для экспериментального подтверждения корректности использования при обосновании ядерной безопасности учетных данных на АЭС внедряются установки измерения глубины выгорания.

#### *Установки измерения глубины выгорания ядерного топлива на АЭС*

Для приборного контроля глубины выгорания разработаны и прошли опытно-промышленную эксплуатацию на российских АЭС установки измерения глубины выгорания, изотопного состава, энерговыделения ядерного топлива отработавших тепловыделяющих сборок эксплуатируемых реакторов ВВЭР, РБМК, АМБ. В частности, разработана техническая документация, изготовлено оборудование и внедрены установки измерения выгорания ядерного топлива отработавших ТВС реакторов РБМК-1000, ВВЭР-440 и ВВЭР-1000 для условий бассейнов выдержки.

В рамках выполнения мероприятий по внедрению на АЭС с ВВЭР установок измерения глубины выгорания выполнены опытные измерения выгорания ОЯТ с помощью установки МКС-01 ВВЭР на Нововоронежской АЭС, изготовлена установка МКС-01 ВВЭР-1000 для Калининской АЭС.

Установки измерения выгорания позволяют по полученному среднему значению выгорания оперативно произвести расчет активности, изотопного состава, выхода нейтронов и энерговыделения. Изотопный состав дается для каждого из делящихся радиоизотопов (изотопов урана, нептуния, плутония, кюрия, америция) и каждого из основных дозообразующих радиоизотопов –  $^{106}\text{Ru}$ ,  $^{134}\text{Cs}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{154}\text{Eu}$ .

Измерение выгорания осуществляется детекторами установок сканированием по длине ТВС или непрерывно с заданной скоростью, или с остановками в фиксированных точках. Для ТВС реакторов ВВЭР продольное перемещение кассет относительно детекторов установки МКС-01 выполняется штатной перегрузочной машиной, осуществляющей сканирование. Средние значения масс изотопов урана и плутония в выгоревших кассетах, а

также остаточного тепловыделения вычисляются путем арифметического усреднения значений в определенных точках вдоль ТВС.

Характеристики нейтронного и гамма-излучения, необходимые для определения выгорания, изотопного состава и энерговыделения, измеряются с помощью входящих в состав установок каналов регистрации нейтронного и гамма-излучения.

Фактором надежности константного обеспечения установок является использование аттестованных программных комплексов, протестированных по результатам разрушающего анализа выгорания и изотопного состава ядерного топлива, выполненного гамма-спектрометрическим и радиохимическим методами в Научно-исследовательском институте атомных реакторов и в Физико-энергетическом институте имени А.И. Лейпунского. Разрушающий анализ проводился в соответствии с международным стандартом «ASTM E244-80. Standart Test Method for Atom Percent Fission in Uranium and Plutonium Fuel (Mass-spectrometric Method).

Основные технические характеристики установки МКС-01 измерения глубины выгорания ядерного топлива в реакторах ВВЭР:

диапазон значений выгорания составляет 5-70 МВт·сут/кг;

время от момента извлечения облученной ТВС из реактора до момента измерения выгорания (время выдержки) составляет от 2 до 50 лет;

время измерения выгорания и количества ядерного материала в одной тепловыделяющей сборке – 3-10 мин;

пределы допускаемой относительной погрешности определения выгорания составляют  $\pm 10\%$ ;

диапазон измерений остаточного тепловыделения, нормированный на 1 кг необлученного топлива, составляет от  $5 \cdot 10^{-2}$  до 12 Вт/кг;

контролируемые ядерные материалы – уран, плутоний ( $^{235}\text{U}$ ,  $^{236}\text{U}$ ,  $^{238}\text{Pu}$ ,  $^{239}\text{Pu}$ ,  $^{240}\text{Pu}$ ,  $^{241}\text{Pu}$ ,  $^{242}\text{Pu}$ ).

\*\*\*

Использование концепции «запас выгорания» – прогрессивная тенденция, отражающая экономически целесообразный подход к решению проблем отработавшего ядерного топлива, но требующая корректного теоретического и экспериментального обоснования.

Источники:

1. IAEA – TECDOC – 1547

2. Аникин, А.Ю. Мировой опыт использования подходов, учитывающих выгорание ядерного топлива при обосновании ядерной безопасности обращения С ОЯТ / А.Ю. Аникин, А.В. Курындин, Л.А. Курындина, А.А.Строгонов // Ядерная и радиационная безопасность – 2009. – №3 – С. 38 - 43.

3. Материалы МНТК-2010, МНТК-2012 «Безопасность, эффективность и экономика атомной энергетики»

Материал подготовили: Брылева В.А., Войтецкая Е.Ф., Нарейко Л.М.

**Адреса для контактов:**

ГНУ «ОИЭЯИ – Сосны» НАН Беларуси, 220109, Минск, ул. академика А.К. Красина, 99

тел.: 299-47-61, 299-45-56, факс: 299-43-55, Web-site: <http://www.sosny.bas-net.by>

E-mail: [valentina.bryliova@yandex.by](mailto:valentina.bryliova@yandex.by)

Для получения данного информационного бюллетеня просим подать заявку в электронном виде с указанием своего электронного адреса

©При перепечатке ссылка обязательна

По заказу Министерства энергетики Республики Беларусь