

## **МИРОВОЙ ОПЫТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПОДХОДОВ, УЧИТЫВАЮЩИХ ВЫГОРАНИЕ ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА ПРИ ОБОСНОВАНИИ ЯДЕРНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ОБРАЩЕНИЯ С ОЯТ**

Аникин А.Ю., Курындин А.В., Курындина Л.А., Строганов А.А.  
(НТЦ ЯРБ)

Ожидается, что к 2020 г., когда закончится срок эксплуатации большинства из ныне действующих реакторов, общее количество ОЯТ в хранилищах по всему миру превысит 450000 тТМ [1]. Обращение с таким количеством ОЯТ, являющегося источником ионизирующего излучения, содержащего ядерные материалы и имеющего остаточное тепловыделение, является технически сложной и дорогостоящей задачей.

Проблему обращения с ОЯТ еще более усугубляет развитие новых топливных циклов с выраженной тенденцией к увеличению начального обогащения и глубины выгорания ЯТ. В настоящее время почти все ОЯТ хранится в так называемых «мокрых» хранилищах – бассейнах – под слоем воды, являющейся как теплоносителем, отводящим остаточное тепловыделение, так и биологической защитой от излучения. Однако вода является замедлителем нейтронов, вследствие чего, при определенном соотношении топлива и воды, в хранилище ОЯТ возможно возникновение самоподдерживающейся цепной реакции деления [1, 2].

До недавнего времени при проведении анализа ядерной безопасности загружаемое в контейнер или хранилище ОЯТ рассматривалось как свежее топливо. Приближение «свежего топлива» является очень консервативным, так как размножающая способность ЯТ, как известно, уменьшается в процессе облучения в активной зоне реактора за счет уменьшения концентрации делящегося материала и накопления нуклидов, поглощающих нейтроны. Исключением является топливо, содержащее выгорающий поглотитель, зависимость размножающей способности которого от глубины выгорания носит более сложный характер и может иметь максимум при отличающейся от нуля глубине выгорания. Несмотря на то, что приближение «свежего топлива» существенно упрощает анализ ядерной безопасности и контроль при загрузке ОЯТ, свойственный этому приближению чрезмерный консерватизм приводит к существенному уменьшению допустимого количества ТВС, загружаемых в транспортный контейнер или хранилище [2].

Попытки уменьшить консерватизм приближения «свежего топлива» привели к созданию подхода к обоснованию ядерной безопасности, учитывающего изменение нуклидного состава топлива в процессе выгорания и получившего название «Burnup credit» [2]. На рисунке 1 схематически представлено сравнение приближения «свежего топлива» и подхода «Burnup credit» [3]. Из рисунка видно, что рассчитанное с использованием подхода «Burnup credit» значение Кэфф системы, содержащей ОЯТ, значительно меньше значения, полученного для той же системы с использованием приближения «свежего топлива». Это позволяет увеличить количество ОЯТ, загружаемого в контейнер или хранилище, сохранив прежний уровень запаса между рассчитанным и допустимым значением Кэфф.

Теоретически подход «Burnup credit» можно применять для обоснования ядерной безопасности на любом этапе обращения с ОЯТ, включая его переработку и захоронение, однако в данной статье будет рассмотрено использование этого подхода только при хранении и транспортировании ОЯТ.

В отличие от приближения «свежего топлива», при использовании которого необходимо провести только расчет Кэфф, подход «Burnup credit» требует

проведения двух расчетов: расчета нуклидного состава ОЯТ и расчета Кэфф ОЯТ в анализируемой системе.

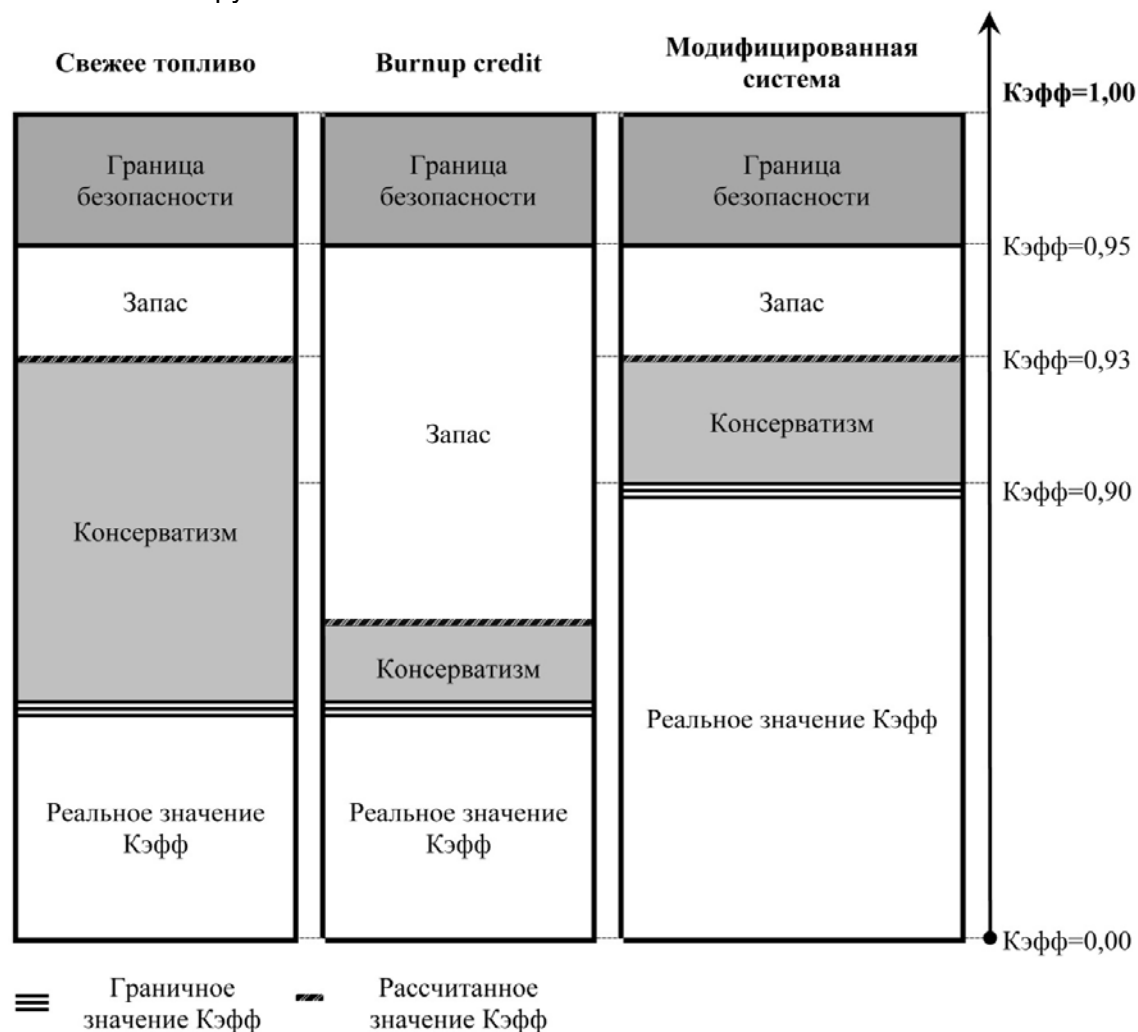


Рис. 1. Сравнение приближения «свежего топлива» и подхода «Burnup credit»

Расчет нуклидного состава ОЯТ является довольно сложной задачей, при решении которой необходимо для каждой ТВС корректно учесть влияние множества параметров, таких как мощность ТВС в течение всего времени облучения в реакторе, ее положение в реакторе, время выдержки, движение стержней СУЗ и др. Более того, для подтверждения применимости используемых методик расчета и определения систематических и статистических погрешностей необходимо провести валидацию расчетных методик и программных средств путем сравнения результатов расчетов с экспериментальными данными или результатами расчетных бенчмарк-экспериментов.

Методики и программные средства для расчета Кэфф достаточно хорошо развиты и позволяют определять значение Кэфф довольно сложных систем. Однако для валидации этих методик и программных средств, как правило, используются бенчмарк-эксперименты, проводимые на критических сборках, что затрудняет использование результатов валидации при определении Кэфф подкритических систем, содержащих ОЯТ.

Специалисты выделяют четыре уровня «Burnup credit» [3], различающиеся набором учитываемых нуклидов. В зависимости от выбранного уровня сложность анализа с использованием подхода «Burnup credit» существенно меняется. Так, при использовании самого простого уровня «Burnup credit» – «Только делящиеся нуклиды» – в расчетах учитывается изменение концентрации 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 концентрации минорных актинидов. Так как современное состояние развития науки и техники позволяет с достаточной точностью определять концентрации данных нуклидов, этот уровень «Burnup credit» является наиболее распространенным. Однако эволюция топливных циклов ядерных реакторов в сторону увеличения начального обогащения ЯТ привела к необходимости дальнейшего развития подхода «Burnup credit». Третий уровень «Burnup credit» – «Актиниды + продукты деления» – заключается в учете изменения концентрации как актинидов, так и продуктов деления. Помимо этих трех основных уровней специалисты выделяют ещё один, связанный с учетом изменения концентрации выгорающих поглотителей [2, 3], все чаще применяемых в конструкции ЯТ. Данный уровень может быть использован совместно с любым из вышеперечисленных уровней «Burnup credit».

Как было отмечено выше, использование подхода «Burnup credit» позволяет увеличить загрузку (количество загружаемого ОЯТ) контейнера/хранилища. Ввиду большого количества ОЯТ и высокой стоимости хранения и транспортирования использование подхода «Burnup credit» при обосновании ядерной безопасности обращения с ОЯТ является экономически более выгодным по сравнению с приближением «свежего топлива» [4]. Более того, сокращение количества транспортируемых упаковок также уменьшает дозы облучения, получаемые персоналом при обращении с ОЯТ, что отвечает принципу оптимизации ALARA.

Однако, являясь единственным способом обоснования ядерной безопасности при увеличении вместимости транспортных контейнеров и хранилищ с ОЯТ без изменения их конструкции (например, добавления в конструкцию контейнера или хранилища дополнительных поглотителей нейтронов) [4], подход «Burnup credit» требует существенных первоначальных капиталовложений для разработки методов и программных средств расчета, равно как и проведения достаточного количества экспериментов для их валидации. Лишь немногие страны с наиболее развитым ядерным научно-промышленным комплексом способны самостоятельно развивать и применять на практике подход «Burnup credit». Данное обстоятельство привело к образованию международных исследовательских программ, направленных на развитие подхода «Burnup credit», объединивших усилия многих стран для достижения поставленной цели [5].

В некоторых странах при обосновании ядерной безопасности «мокрого» хранения ОЯТ PWR в приреакторных бассейнах выдержки уже применяется подход «Burnup credit» уровня «Актиниды + продукты деления». Причем в США разрешается учитывать все продукты деления за исключением  $^{135}\text{Xe}$  ( $T_{1/2} = 9,11$  часа).

При обосновании ядерной безопасности обращения с ЯТ, содержащим выгорающий поглотитель, необходимо принимать во внимание, что зависимость Кэфф от глубины выгорания такого топлива, как отмечалось выше, может иметь максимум при отличающейся от нуля глубине выгорания, который, тем не менее, будет меньше значения Кэфф свежего топлива без учета выгорающего поглотителя. В США при обосновании ядерной безопасности «мокрого» хранения ОЯТ реакторов BWR определяется максимальное значение Кэфф с учетом выгорания

как топлива, так и выгорающего поглотителя. На рисунке 2 представлено сравнение зависимости коэффициента размножения бесконечной решетки ТВС BWR от глубины выгорания при наличии и при отсутствии выгорающего поглотителя (Gd) в топливе. Стрелкой показано снижение расчетного значения  $K_{\infty}$  за счет учета содержания в топливе выгорающего поглотителя. Так как при обосновании ядерной безопасности используется максимальное значение коэффициента размножения, перед загрузкой ТВС в хранилище не требуется проведение инструментального контроля с целью подтверждения значения глубины выгорания [2].

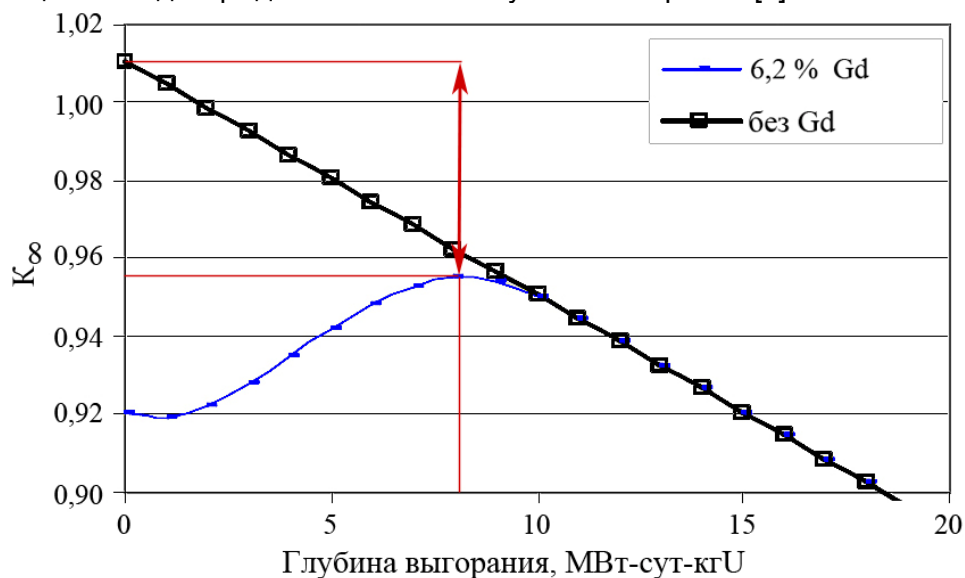


Рис. 2. Зависимость  $K_{\infty}$  топлива BWR от глубины выгорания с учетом Gd и без него

В Бельгии и России при обосновании ядерной безопасности «мокрого» хранения ОЯТ применяется подход «Burnup credit» уровня «Только актиниды».

Во Франции, Болгарии, Германии, Японии, России, Словакии, Швеции, Украине и США имеются «мокрые» хранилища ОЯТ, размещенные вне площадок АЭС, а в Швейцарии идет строительство подобного хранилища [2]. В большинстве таких хранилищ используется обычная (неборированная) вода. Обоснование с помощью подхода «Burnup credit» ядерной безопасности хранилищ ОЯТ PWR с неборированной водой может несколько отличаться от обоснования ядерной безопасности приреакторных бассейнов выдержки. В настоящий момент только во Франции разрешено применять подход «Burnup credit» уровня «Только актиниды» при обосновании ядерной безопасности хранения ОЯТ в «мокром» хранилище и идет разработка методики и условий допустимости учета в расчетах некоторых продуктов деления.

На сегодняшний день подход «Burnup credit» в случае «сухого» хранения ОЯТ применяют лишь несколько стран. В Армении разрешено учитывать изменение концентрации только делящихся нуклидов, в то время как в США разрешен, а в Германии и на Украине уже применяется подход «Burnup credit» уровня «Только актиниды». Использование уровня «Актиниды + продукты деления» для «сухого» хранения разрешено в Германии, однако на практике пока не реализовано [2].

Как и в случае «сухого» хранения, при обосновании ядерной безопасности транспортирования ОЯТ в Армении разрешается использовать уровень «Только делящиеся нуклиды». В США, Франции, Германии, Нидерландах, России и Швейцарии разрешается использовать уровень «Только актиниды». В некоторых стра-

нах активно ведется деятельность, направленная на получение разрешения регулирующего органа использовать уровень «Актиниды + продукты деления», который, как отмечалось выше, уже разрешено использовать в Германии [2].

При обосновании ядерной безопасности с использованием подхода «Burnup credit», по сравнению с использованием приближения «свежего топлива», необходимо корректно учесть влияние значительно большего количества параметров. Совершенно очевидно, что внедрение подхода «Burnup credit» требует соответствующего изменения нормативной базы регулирования ядерной безопасности. Причем помимо документов, содержащих требования к обоснованию ядерной безопасности с помощью подхода «Burnup credit», в нормативной базе должны содержаться подробные руководства по применению этого подхода, составленные признанными экспертами в данной области с учетом опыта таких передовых стран, как Германия [6 – 8], США [9 – 11] и Франция.

В Российской Федерации подход «Burnup credit» начального уровня применяется при обосновании ядерной безопасности транспортирования ОЯТ реакторов ВВЭР и хранения ОЯТ РБМК [2]. Однако стоит отметить, что Российская Федерация, обладая одним из наиболее мощных ядерных научно-промышленных комплексов в мире, тем не менее не располагает достаточной экспериментальной базой для полноценной верификации методик и программных средств, применяемых при анализе ядерной безопасности с помощью подхода «Burnup credit» [2]. Более того, существующая нормативная база регулирования ядерной безопасности в Российской Федерации [12 – 16], не запрещая применение подхода «Burnup credit», практически не содержит требований к обоснованию ядерной безопасности с использованием данного подхода, например, в отличие от США, Германии и Франции, в ней отсутствуют требования к таким ключевым аспектам, как:

- проведение и валидация расчетов изменения изотопного состава;
- проведение и валидация расчетов Кэфф;
- определение влияния высотного и радиального профиля на значение Кэфф;
- построение кривой загрузки;
- методики и средства определения глубины выгорания ОТВС и сравнения ее с допустимым значением.

Таким образом, в настоящее время нормативная база регулирования ядерной безопасности в Российской Федерации только готовится к полноценному использованию подхода «Burnup credit» и нуждается в корректировке с целью актуализации требований, предъявляемых к обоснованию ядерной безопасности.

#### **Список обозначений и сокращений**

ALARA	–	настолько низко, насколько разумно достижимо (от английского As Low As is Reasonably Achievable)
BWR	–	ядерный реактор кипящего типа (от англ. Boiling Water Reactor)
PWR	–	ядерный реактор с водой под давлением (от англ. Pressurized Water Reactor)
АЭС	–	атомная электростанция
ВВЭР	–	водо-водяной энергетический реактор
Кэфф	–	эффективный коэффициент размножения нейтронов
$K_{\infty}$	–	коэффициент размножения нейтронов бесконечной среды
ОТВС	–	отработавшая тепловыделяющая сборка
ОЯТ	–	отработавшее ядерное топливо

## Статьи

РБМК	–	реактор большой мощности канальный
СУЗ	–	система управления и защиты
ТВС	–	тепловыделяющая сборка
тТМ	–	тонна тяжелого металла (урана и плутония, содержащегося в ядерном топливе до облучения в реакторе)
ЯТ	–	ядерное топливо

## **Использованная литература**

1. W.J. Danker, Current Status of IAEA Activities in Spent Fuel Management, IAEA, 2003, Vienna, Austria.
2. IAEA-TECDOC-1547, Advances in application of Burnup Credit to Enhance Spent Fuel Transportation, Storage, Reprocessing and Disposition, Proceedings of a Technical Committee meeting held in London, 29 August – 02 September 2005, May 2007.
3. J.C. Neuber, AREVA NP GmbH Germany, J.M. Conde Lopez, Consejo de Seguridad Nuclear Spain, Lecture 3, Overview, Workshop on Criticality Safety / Burnup Credit (BUC) in Spent Fuel Handling and Storage, State Office for Nuclear Safety, Prague, 19-23 March 2007.
4. DOE/RW-0492 Rev 2, Topical Report on Actinide-Only Burnup Credit for PWR Spent Nuclear Fuel Packages, September 1998, Office of Civilian Radioactive Waste Management, USA.
5. <http://www.nea.fr> – Официальный сайт Агентства по ядерной энергии ОЭСР.
6. KTA 3602, Storage and Handling of Fuel Assemblies and Associated Equipment in Nuclear Power Plants with Light-Water Reactors, November 2003, Nuclear Safety Standards Commission (KTA), Salzgitter, Germany.
7. DIN 25471, Criticality Safety with Fuel Assembly Burnup Credit in the Storage and Handling of Fuel Assemblies in Fuel Assembly Storage Pools of Nuclear Power Plants with Light-Water Reactors, September 2000.
8. DIN 25712 Draft, Criticality Safety with Fuel Burnup Credit in the Dale Lancaster, 2005 Status and Future of Burnup Credit in the USA.
9. Domestic Licensing of Production and Utilization Facilities, Title 10, Part 50 of the U. S. Code of Federal Regulations, Revised as of January 1, 2000.
10. Packaging and Transportation of Radioactive Material, Title 10, Part 71 of the U. S. Code of Federal Regulations, Revised as of January 1, 2000.
11. Licensing Requirements for the Independent Storage of Spent Nuclear Fuel and High-Level Radioactive Waste, Title 10, Part 72 of the U.S. Code of Federal Regulations, Revised as of January 1, 2000.
12. Общие положения обеспечения безопасности объектов ядерного топливного цикла (ОПБ ЯТЦ) (НП-016-05). Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору, Москва, 2005 г.
13. Правила ядерной безопасности для объектов ядерного топливного цикла (НП-063-05). Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору, Москва, 2005 г.
14. Правила безопасности при транспортировании радиоактивных материалов (НП-053-04). Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору, Москва, 2004 г.
15. Правила безопасности при хранении и транспортировании ядерного топлива на объектах использования атомной энергии (НП-061-05). Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору, Москва, 2005 г.
16. Отработавшие тепловыделяющие сборки ядерных энергетических реакторов типа ВВЭР. Общие требования к поставке на заводы регенерации (ОСТ 85 745-2005). ВНИПИЭТ, Санкт-Петербург, 2005 г.