

Подход «Burnup credit»: особенности и мировой опыт использования при обосновании ядерной безопасности обращения с ОЯТ

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

В настоящее время в России накоплено свыше 18500 тонн ОЯТ. На атомных электростанциях с реакторами типа РБМК и ЭГП-6 показатели заполнения хранилищ отработавшего ядерного топлива уже близки к критическим [1]. Поэтому, согласно концепции федеральной целевой программы «Обеспечение ядерной и радиационной безопасности на 2008 год и на период до 2015 года» [1], проблема обращения с ОЯТ, являющимся источником ионизирующего излучения, содержащим ядерные материалы и имеющим значительное остаточное тепловыделение, рассматривается как одна из основных проблем в области обеспечения ядерной и радиационной безопасности.

Следует отметить, что с данной проблемой сталкиваются все страны, эксплуатирующие АС. Так, к 2020 году, когда закончится срок эксплуатации большинства из ныне действующих реакторов, ожидается, что общее количество ОЯТ в хранилищах по всему миру превысит 450000 тТМ [2].

Одной из основных проблем обращения с ОЯТ является обеспечение ядерной безопасности. Поэтому специалистами Ростехнадзора в рамках федеральной целевой программы «Обеспечение ядерной и радиационной безопасности на 2008 год и на период до 2015 года» [1] с 2009 г. ведется анализ мирового опыта в этой области [3].

До недавнего времени в мире при обосновании ядерной безопасности использовалось приближение «свежего топлива», согласно которому загружаемое в контейнер или хранилище отработавшее ядерное топливо требовалось рассматривать как свежее. Поскольку, как известно, размножающая способность ЯТ уменьшается в процессе облучения в активной зоне реактора за счет уменьшения концентрации делящегося материала и накопления нуклидов, поглощающих нейтроны, приближение «свежего топлива» является чрезмерно консервативным. Несмотря на то, что приближение «свежего топлива» существенно упрощает обоснование ядерной безопасности и контроль при загрузке ОЯТ, свойственная этому приближению высокая степень консерватизма приводит к существенному уменьшению количества ТВС, которые, согласно действующим нормативным документам, допускается загружать в транспортный контейнер или хранилище [4].

Развитие новых топливных циклов, направленных на увеличение глубины выгорания ЯТ, и, соответственно, приводящих к увеличению начального обогащения, еще более усугубляет проблему обоснования ядерной безопасности обращения с ОЯТ.

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» [4]. На рисунке 1 схематически представлено сравнение приближения «свежего топлива» и подхода «Burnup credit» [5]. 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». Таким образом, использование подхода «Burnup credit» позволяет, сохранив прежний уровень запаса между рассчитанным и допустимым значением Кэфф, обосновать ядерную безопасность системы, содержащей значительно большее количество ОЯТ, чем в случае применения приближения «свежего топлива».

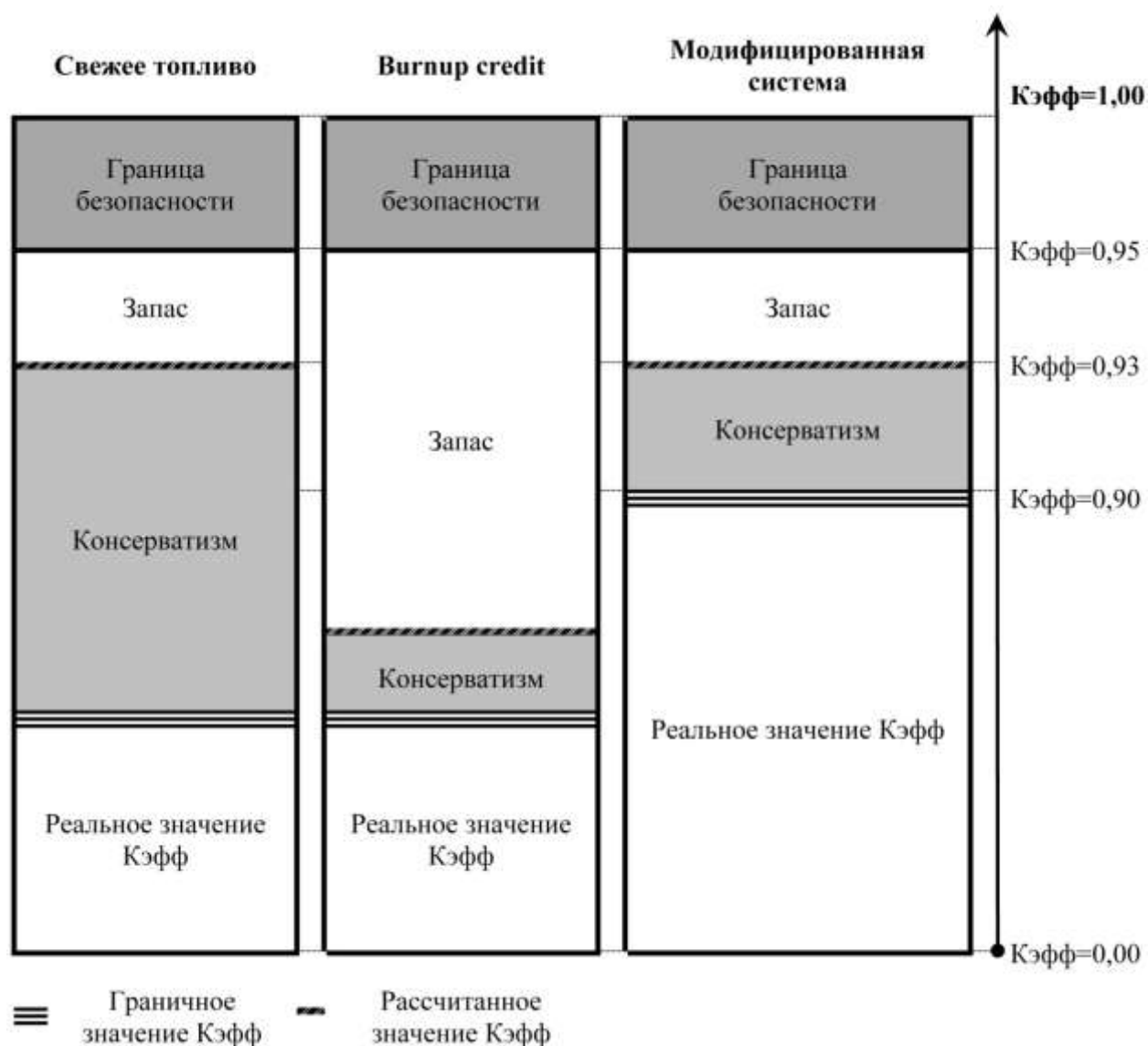


Рисунок 1. Сравнение приближения «свежего топлива» и подхода «Burnup credit»

Несмотря на то, что подход «Burnup credit» можно применять для обоснования ядерной безопасности на любом этапе обращения с ОЯТ [2], включая его переработку и захоронение, в данной статье будет рассмотрено использование этого подхода только при хранении и транспортировании.

Снижение консерватизма при использовании подхода «Burnup credit» по сравнению с приближением «свежего топлива» происходит за счет существенного усложнения проводимого анализа ядерной безопасности. 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. Расчет Кэфф при использовании подхода «Burnup credit» также усложняется вследствие необходимости учета пространственной неравномерности распределения нуклидного состава ОЯТ.

При этом и сам расчет нуклидного состава ОЯТ является довольно сложной задачей, требующей корректного учета множества параметров, таких как мощность ТВС в течение всего времени облучения в реакторе, ее положение в реакторе, время выдержки, движение стержней СУЗ и др. Валидация расчетных методик и программных средств, используемых для расчета нуклидного состава, проводимая путем сравнения результатов расчетов с экспериментальными данными или результатами расчетных бенчмарк-экспериментов, является одним из наиболее ресурсоемких этапов подхода «Burnup credit».

Несмотря на то, что методики и программные средства для расчета Кэфф достаточно хорошо развиты и позволяют определять значение Кэфф довольно сложных систем, 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.

Таким образом, являясь единственным способом уменьшить неоправданный консерватизм при обосновании ядерной безопасности транспортных контейнеров и хранилищ с ОЯТ с увеличенной загрузкой без изменения их конструкции (например, добавления в конструкцию контейнера или хранилища дополнительных поглотителей нейтронов) [6], подход «Burnup credit» требует существенных первоначальных усилий и 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 [7].

Специалисты выделяют три основных уровня «Burnup credit» [5], различающиеся набором учитываемых нуклидов и, соответственно, сложностью анализа. В таблице 1 в порядке возрастания сложности приведены основные уровни подхода «Burnup credit» и нуклиды, учитываемые при анализе ядерной безопасности с использованием соответствующих уровней.

Таблица 1. Уровни подхода «Burnup credit»

Уровень подхода «Burnup credit»	Учитываемые нуклиды
Актиниды, за исключением минорных	^{235}U , ^{239}Pu , ^{241}Pu , ^{238}U
Все актиниды	^{234}U , ^{235}U , ^{236}U , ^{238}U , ^{238}Pu , ^{239}Pu , ^{240}Pu , ^{241}Pu , ^{242}Pu , ^{241}Am , ^{243}Am , ^{237}Np
Актиниды + продукты деления	^{234}U , ^{235}U , ^{236}U , ^{238}U , ^{238}Pu , ^{239}Pu , ^{240}Pu , ^{241}Pu , ^{242}Pu , ^{241}Am , ^{243}Am , ^{237}Np , ^{95}Mo , ^{99}Tc , ^{101}Ru , ^{103}Rh , ^{109}Ag , ^{133}Cs , ^{147}Sm , ^{149}Sm , ^{150}Sm , ^{151}Sm , ^{152}Sm , ^{143}Nd , ^{145}Nd , ^{153}Eu , ^{155}Gd

Помимо этих трех основных уровней специалисты выделяют ещё один, связанный с учетом изменения концентрации выгорающих поглотителей [4, 5], все чаще применяемых в конструкции ЯТ. Данный уровень может быть использован совместно с любым из вышеперечисленных уровней «Burnup credit».

Поскольку современный уровень развития науки и техники позволяет с достаточной точностью определять концентрации основных актинидов, наиболее часто при обосновании ядерной безопасности используется уровень «Все актиниды».

Тем не менее, 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 любые продукты деления за исключением ^{135}Xe ($T_{1/2}=9,11$ часа).

Во Франции, Болгарии, Германии, Японии, Словакии, Швеции, Украине и США имеются «мокрые» хранилища ОЯТ, размещенные вне площадок АЭС, а в Швейцарии идет строительство подобного хранилища [4]. В большинстве таких хранилищ используется обычная (неборированная) вода. В настоящий момент только во Франции разрешено применять подход «Burnup credit» уровня «Все 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 актинидов, за исключением минорных, в то время как в США разрешен, а в Германии и Украине уже применяется подход «Burnup credit» уровня «Все актиниды». Использование уровня «Актиниды + продукты деления» для «сухого» хранения разрешено только в Германии, однако на практике пока не реализовано [4].

Как и в случае «сухого» хранения, при обосновании ядерной безопасности транспортирования ОЯТ в Армении разрешается использовать уровень «Актиниды, за исключением минорных». В США, Франции, Германии, Нидерландах, и Швейцарии разрешается использовать уровень «Все актиниды». В некоторых странах активно ведется деятельность, направленная на получение разрешения регулирующего органа использовать уровень «Актиниды + продукты деления», который, как отмечалось выше, уже разрешено использовать в Германии [4].

Значительное усложнение обоснования ядерной безопасности с использованием подхода «Burnup credit», по сравнению с приближением «свежего топлива», вызванное увеличением количества проводимых расчетов, учитываемых в них параметров и т.д., требует соответствующего развития нормативной базы регулирования ядерной безопасности. Причем помимо документов, содержащих требования к обоснованию ядерной безопасности с помощью подхода «Burnup credit», в нормативной базе таких передовых в данной области стран, как Франция, Германия и США содержатся подробные руководства по применению этого подхода [8-13].

Упомянутая выше мировая тенденция к обострению проблемы ядерной безопасности обращения с ОЯТ, связанная как с большим количеством накопленного ОЯТ, так и с развитием новых топливных циклов, является актуальной и для России. Так, расчетное значение Кэфф в случае проектной аварии, связанной с падением ТУК-13, загруженного топливом ТВС АЭС-2006, с высоты 9 м, при определенных условиях превышает допустимое значение 0,95 [14].

При обосновании ядерной безопасности транспортирования ОЯТ реакторов ВВЭР и хранения ОЯТ РБМК в Российской Федерации уже применяется подход «Burnup credit» уровня «Все актиниды» [4]. 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 обосновании ядерной безопасности с помощью подхода «Burnup credit» [4]. Более того, существующая нормативная база регулирования ядерной безопасности в Российской Федерации [15-19], не запрещая применение подхода «Burnup credit», практически не содержит требований к обоснованию ядерной безопасности с использованием данного подхода. Так, 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 в случае учета изменения нуклидного состава;
- 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 нуждается в совершенствовании с целью актуализации требований, предъявляемых к обоснованию ядерной безопасности, прежде всего, в детальном определении порядка и условий применения подхода «Burnup credit».

Список используемых сокращений

PWR – ядерный реактор с водой под давлением (от англ. Pressurized Water Reactor)

АС – атомная станция
 АЭС – атомная электростанция
 ВВЭР – водо-водяной энергетический реактор
 Кэфф – эффективный коэффициент размножения нейтронов
 ОТВС – отработавшая тепловыделяющая сборка
 ОЯТ – отработавшее ядерное топливо
 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

Список используемой литературы

1. Концепция федеральной целевой программы «Обеспечение ядерной и радиационной безопасности на 2008 год и на период до 2015 года», утвержденная распоряжением Правительства РФ от 19 апреля 2007 г. № 484-р.
2. W.J. Danker, Current Status of IAEA Activities in Spent Fuel Management, IAEA, 2003, Vienna, Austria.
3. Отчет о НИР. Сравнение результатов различных методик оценки ядерной безопасности при транспортировании и хранении отработавшего ядерного топлива ВВЭР-440 и ВВЭР-1000. Анализ мирового опыта при обосновании ядерной безопасности обращения с ОЯТ – М.: НТЦ ЯРБ, 2009 г.
4. 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.
5. 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.
6. 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.
7. <http://www.nea.fr> - Официальный сайт Агентства по ядерной энергии ОЭСР.
8. 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.
9. 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.
10. DIN 25712 Draft, Criticality Safety with Fuel Burnup Credit in the Dale Lancaster, 2005 Status and Future of Burnup Credit in the USA.
11. 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.
12. Packaging and Transportation of Radioactive Material, Title 10, Part 71 of the U. S. Code of Federal Regulations, Revised as of January 1, 2000.
13. 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.
14. А.И. Иванюк, Ю.В. Козлов, В.Г. Крицкий, В.И. Куликов, А.В. Смирнов, А.И. Токаренко, «Проблемы обеспечения безопасности при транспортировании тепловыделяющих сборок реакторов ВВЭР-1200 и новых модификаций тепловыделяющих сборок реакторов ВВЭР-1000 после завершения эксплуатации их на АЭС», ОАО «ГИ «ВНИПИЭТ»,

Тематический сборник «Ядерная и радиационная безопасность России», выпуск № 6, Москва, 2009 г.

15. Общие положения обеспечения безопасности объектов ядерного топливного цикла (ОПБ ЯТЦ) (НП-016-05). Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору, Москва, 2005 г.
16. Правила ядерной безопасности для объектов ядерного топливного цикла (НП-063-05). Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору, Москва, 2005 г.
17. Правила безопасности при транспортировании радиоактивных материалов (НП-053-04). Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору, Москва, 2004 г.
18. 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.
19. Отработавшие тепловыделяющие сборки ядерных энергетических реакторов типа ВВЭР. Общие требования к поставке на заводы регенерации (ОСТ 95 745-2005). ВНИПИЭТ, Санкт-Петербург, 2005 г.