

Отзыв

официального оппонента Симоненко Вадима Александровича на диссертацию Боброва Евгения Анатольевича «Исследования характеристик замыкания топливного цикла реакторов ВВЭР на основе РЕМИКС-технологии»

Диссертация Боброва Евгения Анатольевича «Исследования характеристик замыкания топливного цикла реакторов ВВЭР на основе РЕМИКС-технологии» представлена на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 05.14.03 – «Ядерные энергетические установки, проектирование, эксплуатация и вывод из эксплуатации». Цель работы достаточно полно и ёмко сформулирована в названии диссертации и уточняется во введении: расчётный анализ возможности сокращения объёмов ОЯТ и расхода природного урана на подпитку реакторов ВВЭР за счёт замыкания их топливного цикла по РЕМИКС-технологии при многократном рециклировании.

В первой главе автор делает обзор работ, выполненных до него, и определяет направления, которые рассматриваются в трех последующих главах. Пятая глава посвящена методическим вопросам – программному комплексу Consul, который является основным инструментом при выполнении всех расчётных работ, представленных в диссертации. Описывается его состав, обосновываются возможности использования его для решения задач замыкания топливного цикла реакторов типа ВВЭР. Подчёркнём, что предметом рассмотрения являются нетрадиционные активные зоны реактора, причем в силу целевой задачи – изучения замыкания топливного цикла по технологии РЕМИКС – приходится работать с различными исходными составами топлива, различными режимами энергосъёма и учитывать изменения нуклидного состава при каждой перезагрузке. Поэтому этот материал оправдано включён в диссертацию. В основном, он доказывает приемлемость использования комплекса Consul для решения поставленных автором задач. Однако имеется один серьёзный недостаток – существенные погрешности в расчётах накопления U^{232} , на которые обращает внимание и автор. Учёт этого обстоятельства является принципиально важным при оценке возможностей многократного рецикла РЕМИКС-топлива.

Наиболее объёмной является вторая глава, посвящённая рассмотрению возможностей использования РЕМИКС-топлива в реакторных установках типа ВВЭР-1000 при многократном рециклировании. Привлекательной особенностью этого рассмотрения является ориентация на использование всего уран-плутониевого регенерата, полученного из ОЯТ ВВЭР-1000 с четырёхгодичной кампанией при длительности годовой микрокампании 300 эффективных суток с топливной загрузкой с обогащением по ^{235}U 4,11% и при среднем выгорании топлива 49,3 МВт·суток/кг ТМ. При этом предполагается полное удаление из регенерированного материала продуктов деления и минорных актинидов. Доводка топливного состава до необходимых нейтронно-физических характеристик активной зоны осуществляется добавлением урана с обогащением 52+61% в зависимости от рецикла. Такой состав автор выбирает в качестве базового. Для него и были выполнены в работе основные расчёты.

Достаточно представительные расчётные исследования были проведены для пяти последовательных рециклов с общей длительностью внешней части топливного цикла 5 лет. Более грубо в 2D-приближении для оценок асимптотического поведения нуклидных составов такие оценки были продлены до 12 рециклов. Они, в частности, указывают на выход на стационарные режимы по основным изотомам урана и плутония, кроме U^{232} , U^{236} и Pu^{238} . Было оценено влияние эволюции нуклидных составов при работе реактора на основные нейтронно-физические характеристики активной зоны, доказана её управляемость. Обращено внимание на радиационные параметры топлива, оказывающие влияние на технологии обращения с РАО и на производство свежего топлива. Изучалось влияние неопределённости в константном обеспечении на контролируемые параметры, в частности, на содержание основных делящихся и радиационно опасных изотопов урана и плутония. Оценивалось влияние длительности кампании реактора на характеристики РЕМИКС-топлива. Выбранная базовая схема формирования состава РЕМИКС-топлива сравнивается с рядом иных схем, возможных или принятых в других работах. Отмечается их близость по влиянию на свойства АЗ, поэтому при окончательном выборе следует учитывать дополнительные, например, производственно-технологические особенности. Дается сравнение концепцией использования МОКС топлива в ВВЭР и подчёркивается ряд существенных преимуществ концепции РЕМИКС. Делаются сравнительные экономические оценки для рассмотренных вариантов. Рассматриваются также возможности использования РЕМИКС-ТВС с гетерогенным размещением уранового и уран-плутониевого топлива. Отмечаются принципиальные достоинства гетерогенных РЕМИКС-ТВС по сравнению с гомогенными. А их недостатком является необходимость повышения обогащения используемого урана.

В последнем (2.7) разделе главы 2 представлено сравнение двух вариантов использования МОКС топлива и двух вариантов – гомогенного и гетерогенного РЕМИКС-топлива. В варианте МОКС-А использовался весь регенерируемый уран и плутоний в двух видах ТВС: 1 – $U_{отв} + Pu_{рег}$, 2 – смесь природного обогащённого и дообогащённого регенерированного урана. На втором рецикле топливо из этих ТВС смешивалось для корректировки изотопной композиции урана. В варианте МОКС-Б – 20% АЗ формировалось ТВС с топливом МОКС- $U_{рег}$, а остальная часть – штатными ТВС с UO_2 . На первых рециклах МОКС загрузка имела экономические преимущества, но в дальнейшем не могла быть продолжена из-за последовавшей деградации состава топлива.

Глава 2 пугает обилием задач, неполный список которых представлен здесь. Наградой за такой труд является заключение (раздел 2.8). В нем достаточно ясно и кратко подытожены полученные результаты и сделаны чёткие выводы. Выделены достоинства и указаны недостатки РЕМИКС-топлива. Убедительно выглядят преимущества его перед МОКС-топливом. Положения этого раздела существенно восполняют пробелы, допущенные при перечислении материалов, выносимых на защиту.

Третья глава посвящена рассмотрению влияния величины водо-топливного отношения в ТВС ВВЭР и кратности перегрузок на характеристики РЕМИКС-топлива в двухкомпонентной системе ядерной энергетике с быстрыми реакторами типа БН-1200 с МОКС-топливом. Рассматриваются варианты реактора с урановым или ториевым бланкетом для наработки Pu ($c_{KB} \approx 1,21$) или ^{233}U . Для реактора ВВЭР рассматривались четыре топливных композиции: 1. $U_{отв}O_2 + Pu_{эк} BH O_2$; 2. $U_{отв}O_2 + ^{233}U_{эк} BH O_2$; 3. $ThO_2 + Pu_{эк} BH O_2$; 4. $ThO_2 + ^{233}U_{эк} BH O_2$. В задачах варьировалось водо-топливное отношение в

пределах от 1,5 до 2,5 в ТВС, продолжительность топливного цикла от 3 до 5 лет с ежегодной перегрузкой и длительностью микрокампании 300 эффективных суток. Рассматривалось замыкание топливного цикла по РЕМИКС технологии до 5 рециклов.

Было показано, что в открытом топливном цикле минимальное потребление делящегося материала происходит при пятигодичной кампании реактора. При РЕМИКС-подпитке $Pu_{жБН}$ оптимум достигается при значении водо-топливного отношения в ТВС, равном 2,5 с 30% экономией делящегося материала по сравнению с открытым топливным циклом. Применение Th в качестве сырьевого материала в тепловом реакторе увеличивает его топливную загрузку на 10% по сравнению с загрузкой обедненного ураном. Использование ^{233}U позволяет в 1,5 раза сократить ежегодную подпитку делящимся материалом.

Четвёртая глава посвящена изучению особенностей использования РЕМИКС-топлива в перспективных реакторах ВВЭР-С со спектральным регулированием вытеснителями из нержавеющей стали. Спектральное регулирование рассматривается в русле изучения возможностей эволюционного развития ВВЭР. Исходным составом при формировании первой РЕМИКС загрузки служил ОЯТ ВВЭР-С-1250 с оксидным топливом, с кампанией 6 лет по 331 суток. При этом среднее обогащение топлива составляло 3,5%, а среднее выгорание 50 МВт·сут/кг ТМ. Длительность внешней части топливного цикла была принята 5 лет. РЕМИКС-топливо первой загрузки формировалось как и базовое в главе 2. Были выполнены оценки основных коэффициентов реактивности, которые оказались в приемлемых пределах, оценена эволюция составов РЕМИКС-топлива при 4-х рециклах. Установлено, что использование РЕМИКС топлива позволяет улучшить использование делящихся материалов на 18-20% по сравнению в ВВЭР со спектральным регулированием и на 28-33% по сравнению с борным регулированием в открытых циклах.

Актуальность представленной работы определяются двумя факторами: необходимостью сокращения накопленного ОЯТ и изучением возможностей расширения топливной базы ядерной энергетики как путём оптимизации технологий использования делящихся материалов, так и посредством расширения топливной базы путём вовлечения в топливный цикл сырьевых изотопов урана и тория. Представленные в диссертации материалы на это и нацелены.

Положения, выносимые на защиту, четко обозначены, но не раскрыты во введении, однако с достаточной полнотой и убедительностью раскрыты в заключительных разделах к каждой главе диссертации. Ясно обозначены предложения автора в вопросах организации РЕМИКС рециклов применительно к трем направлениям: ВВЭР действующего типа и ближней перспективы, к продвинутым модификациям ВВЭР (с вариацией водо-топливного отношения и длительности микро-компаний) в составе двухкомпонентной ядерной энергетики, а также к ВВЭР-С со спектральным регулированием.

Научная новизна результатов не вызывает сомнений: все изложенные в работе вопросы были впервые получены и представлены в работах автора или в сотрудничестве, в которых личный вклад автора был определяющим. Достоверность обоснована использованием базовой информации из богатейшего опыта развития и эксплуатации реакторов ВВЭР, использованием расчётной технологии в виде программного комплекса Consul, созданного и обоснованного специалистами Курчатовского института. Обоснование возможностей его использования для нового класса задач с РЕМИКС-

топливом осуществляется с привлечением специальных тестовых задач и референтных расчётов с помощью кодов MCNP для нейтронно-физических свойств и ORIGEN 2-2 для эволюции нуклидов.

Работа в целом открывает новые возможности углубления пониманий использования РЕМИКС-топлива при перспективном эволюционном развитии ядерной энергетики на основе тепловых реакторов ВВЭР. Позволяет понять новые возможности использования ВВЭР с полной загрузкой активной зоны регенерированными делящимися материалами при переходе к двухкомпонентной ЯЭ.

В целом, содержание работы изложено достаточно полно и убедительно, хотя текст не лишён ряда опечаток и невычитанных мест (см., например, стр.7, 44, 48).

По существу работы уместно сделать некоторые замечания.

1. В работе речь идёт фактически о концептуальных оценках возможности использования РЕМИКС-топлива с позиций его работы в активной зоне и лишь указывается постулируемая длительность внешней части топливного цикла, хотя часто применяется термин «технология РЕМИКС». На пути реализации этой технологии представляются большие технические трудности, которые необходимо обсуждать. По-видимому, в большей степени это надо делать другим специалистам. Однако некоторые вопросы, лежащие «на поверхности», можно исследовать на расчётно-теоретическом уровне. Представляются очевидными трудности организации РЕМИКС-технологии для одного ВВЭР: необходимость фактически непрерывного поступления ОЯТ меняющегося состава и фабрикация нескольких типов свежих твэлов с новыми составами. Умозрительно, проще всего иметь соответствующий «заводик» по переработке ОЯТ при каждом РЕМИКС реакторе. Ясно, что это будет очень затратно. Но и централизованный завод, например, с такими же или даже более широкими возможностями, чем РТ-1, тоже будет не дешёвым. Фактически, под каждый реактор надо будет держать отдельную нитку по переработке и по изготовлению.

2. Напрашивается поиск таких модификаций концепции РЕМИКС-топлива, при которой хотя бы топливо нескольких реакторов, не сильно отличающихся по времени пуска, можно было бы перерабатывать одновременно. При таком подходе, по-видимому, можно найти дополнительные возможности по корректировке деградации изотопного состава тяжёлых ядер.

3. Диссертационная работа, по нашему мнению, перегружена обилием рассматриваемых задач. Придерживаясь оценки кандидатской диссертации как квалификационной работы, можно было бы ограничиться 1, 2 и 5 главами. В этом случае можно было бы более аккуратно проследить свойства дальних (после 5-го) РЕМИКС-рециклов. Хотя конечно, материал 3 и 4 глав представляет определённый интерес и имеет ценность.

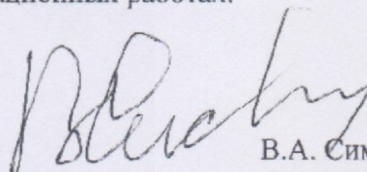
4. Большого внимания заслуживает вопрос накопления чётных изотопов урана и плутония. Его можно было более точно проследить с помощью кодов MCNP и ORIGEN 2 - 2.

Сделанные замечания, конечно, выходят за рамки представленной работы, хотя углублённое понимание поставленных вопросов способствовало бы разработке реалистического отношения к концепции РЕМИКС топлива. Подводя итоги, можно заключить, что представленная работа соответствует требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а её автор, Бобров Евгений Анатольевич, заслуживает

присуждения учёной степени кандидата технических наук по специальности 05.14.03 – ядерные энергетические установки, включая проектирование, эксплуатацию и вывод из эксплуатации.

Автореферат диссертации достаточно полно передаёт содержание диссертации и удовлетворяет требования положения о диссертационных работах.

Доктор физико-математических наук,
профессор



В.А. Симоненко

Заместитель научного руководителя института
Российский Федеральный Ядерный Центр – ВНИИ технической физики имени
академика Е.И. Забабахина,
456 770, г. Снежинск, Челябинская обл.,
Ул. Васильева 13,
Тел. института (351-46) 5-51-20, 5-43-67,
E-mail института: vniitf@vniitf.ru

Подпись официального оппонента заверяю
Ученый секретарь НТС института,
Кандидат физико-математических наук



В.Н. Ногин