

ОТЗЫВ

официального оппонента,

к.т.н. Глебов Василий Борисович

старший научный сотрудник Национального исследовательского ядерного университета "МИФИ" (НИЯУ МИФИ)

г. Москва, Каширское ш., 31.

на диссертацию Боброва Евгения Анатольевича

"Исследование характеристик замыкания топливного цикла реакторов ВВЭР на основе РЕМИКС-технологии"

представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.14.03 – "Ядерные энергетические установки, включая проектирование, эксплуатацию и вывод из эксплуатации"

Диссертационная работа Боброва Евгения Анатольевича посвящена комплексному исследованию возможностей перехода к замкнутому топливному циклу в реакторах ВВЭР на основе РЕМИКС топлива. Актуальность этого исследования не вызывает сомнений, так как в рамках РЕМИКС технологии мы запускаем в работу главные компоненты ОЯТ: уран и плутоний, причем в реакторах, составляющих основу современной ядерной энергетики – реакторы ВВЭР типа. Это исследование, фактически лежит на магистральном направлении развития топливного цикла легководных реакторов. Все варианты замыкания топливного цикла реакторов ВВЭР, включая РЕМИКС технологию, служат экономии расхода добываемого природного урана и сокращению темпов накопления ОЯТ в связи с ограниченностью объемов хранилищ для них.

Диссертационная работа изложена на 129 страницах, состоит из введения, 5 глав и заключения. Во введении обоснована актуальность проведенных исследований, сформулированы цель и задачи работы, указаны научная новизна, практическая значимость и достоверность полученных результатов, изложены основные положения, выносимые на защиту.

В Главе 1 представлен обзор по особенностям замыкания топливного цикла с реакторными установками на тепловых нейтронах (типа ВВЭР, или PWR) с

топливом из регенерированного урана, с МОКС или с РЕМИКС-топливом. Обоснована актуальность данного подхода.

В Главе 2 автор исследовал множественный рецикл U-Pu смеси из ОЯТ реакторов ВВЭР-1000 и его продвинутых версий (например, ВВЭР-С) на протяжении значительной части жизненного цикла реакторных установок, т.е. ~ 20 лет. Анализ параметров топливного цикла этих установок при многократном рецикле РЕМИКС топлива дал возможность оценить тенденции их изменения. Автором показано, что в пределах большей части жизненного цикла установки (48 лет) целевой показатель замыкания топливного цикла (расход урана на подпитку) не понижается по мере рециклирования РЕМИКС-топлива и выходит на установившийся уровень ($\approx 25\%$).

В том числе, анализ нейтронно-физических характеристик показал принципиальную возможность 100% загрузки АЗ ВВЭР-1000 РЕМИКС топливом на протяжении 5 рециклов (это - 20 лет работы РУ ВВЭР-1000) без значительных изменений в конструкции ТВС и АЗ. То есть, значения основных нейтронно-физических характеристик АЗ с загрузкой РЕМИКС топливом, включая основные эффекты реактивности, укладываются в проектные ограничения для реакторных установок ВВЭР-1000.

Следует отметить также, что в этих исследованиях автор исходил из одного важного условия замыкания топливного цикла: Весь объем U-Pu регенерата, извлекаемого из ОЯТ при переработке, идет на изготовление РЕМИКС топлива следующей загрузки. Это позволяет на 100% замкнуть топливный цикл по Pu и регенерируемому U на значительный период жизненного цикла реакторной установки.

Комплексный характер данного исследования представляется, в том числе, обширным анализом (глава 2) имеющихся подходов многократного замыкания топливного цикла по U и Pu для реакторов ВВЭР. В том числе, анализ вариантов замыкания с МОХ-топливом и РЕМИКС-топливом. Этот сравнительный анализ позволил автору диссертации развить идею гетерогенной РЕМИКС ТВС, где предлагается разделить в ТВС твэлы с U – Pu регенератом и урановые твэлы (с подпиткой ВОУ). Такое пространственное разделение приводит к сокращению затрат на работу разделения при обогащении урана ($\sim 15\div 20\%$) и к сокращению стоимости топливной загрузки реактора с гетерогенными РЕМИКС ТВС за счет снижения количества дорогих для производства твэлов с U-Pu регенератом. Надо, однако, здесь сказать, что при снижении количества твэлов с U-Pu

регенератором приходится отказаться от условия использования всего объема регенерата в следующей топливной загрузке. Таким образом, гетерогенная компоновка РЕМИКС топлива в ТВС позволяет объединить (и это показано в диссертационной работе) преимущества реализации МОКС и РЕМИКС топлив в условиях многократного их рецикла.

В Главе 3 рассмотрены варианты перспективных замкнутых топливных циклов на основе РЕМИКС-технологии, в которых делящиеся материалы для изготовления топлива подпитки для ВВЭР нарабатываются в экранах быстрых реакторов типа БН-1200. В качестве делящихся материалов выступают ^{233}U и Pu . В качестве сырьевого материала выступают либо уран с отвалов обогатительных предприятий, либо торий. Замыкание топливного цикла по РЕМИКС-технологии (многократное рециклирование) совместно с варьированием величин водно-топливного отношения в ТВС ВВЭР и продолжительности топливного цикла позволили определить условия, при которых расход топлива подпитки минимален. Согласно полученным результатам следует, что для рассмотренной двухкомпонентной системы ядерной энергетики наиболее оптимальной с точки зрения расхода топлива подпитки (расход минимальный) для многократного замыкания топливного цикла ВВЭР по РЕМИКС-технологии является конструкция ТВС с затесненной решеткой твэлов (водно-топливное отношение 1.5) и трехгодичная кампания топлива.

Большое место в диссертационной работе (глава 4) отведено исследованию замыкания топливного цикла в перспективных реакторных установках, конкретно в РУ ВВЭР со спектральным регулированием работы реактора (на базе перспективной установки ВВЭР-С-1250).

Главная особенность этого исследования – анализ изменения эффективности спектрального регулирования в условиях периодических загрузок РЕМИКС топливом.

Автору удалось показать, что содержание изотопа Pu-240 в РЕМИКС топливе в сочетании с высоким значением сечения поглощения в резонансной области у Pu-240 приводит к увеличению эффективности спектрального регулирования (веса вытеснителей).

На основе расчетов реактора ВВЭР-С-1250 с использованием пакета программ CONSUL получены результаты по замыканию топливного цикла реактора с РЕМИКС топливом. Автором показано, что вовлечение в замкнутый цикл РЕМИКС топлива позволяет значительно улучшить топливо

использование (на $18 \div 22\%$) по сравнению с открытым циклом этого реактора.

При этом оценки автора показывают, что при загрузке РЕМИКС топливом с соответствующим увеличением доли плутония в АЗ РУ ВВЭР-С не наблюдается значительного понижения параметров безопасности (коэффициентов реактивности).

В Главе 5 представлено описание ПК Consul и проведена работа по обоснованию возможности использования этого расчетного инструмента для проведения нейтронно-физического расчета характеристик замкнутого топливного цикла с РЕМИКС-топливом. Верификация ПК Consul проводилась путем сравнения с подобными результатами, полученными при расчетах по прецизионным кодам (MCNP в сшивке с ISTAR).

Исходя из результатов верификации, можно утверждать, что ПК Consul является приемлемым инструментом для проведения нейтронно-физического расчета топливных циклов с РЕМИКС-топливом (многократный рецикл), а также расчета уран-ториевых и плутоний-ториевых топливных циклов для реакторов с тепловым спектром нейтронов ВВЭР.

В результате выполненной диссертационной работы было установлено, что реализация РЕМИКС технологии производства топлива для реакторов ВВЭР позволит:

- ✓ экономить до 20-32 % природного урана (в зависимости от рецикла и продолжительности кампании реактора) при производстве топлива (<130 т. природного урана на ГВт*год);
- ✓ осуществлять многократную (5 рециклов) загрузку АЗ ВВЭР-1000 РЕМИКС топливом на протяжении ~ 20 лет работы РУ ВВЭР-1000 без значительных изменений в конструкции ТВС и АЗ;
- ✓ максимально вовлечь в ЯТЦ полученные в процессе переработки уран и плутоний (100% U и Pu из ОЯТ идет на производство РЕМИКС-топлива). Сократить большие объемы ОЯТ;
- ✓ значения основных эффектов реактивности для АЗ ВВЭР-1000 с 100% загрузкой РЕМИКС топливом укладываются в проектные ограничения для реакторных установок ВВЭР-1000. Вопросы ядерной и радиационной безопасности при обращении со свежим и отработанным РЕМИКС топливом требуют дальнейших дополнительных исследований;
- ✓ Использование ТВС с гетерогенным размещением твэлов с урановым и уран-плутониевым топливом позволяет сократить затраты на работу

разделения при обогащении урана ($\sim 15\div 20\%$), а также сократить стоимость топливной загрузки реактора за счет снижения количества дорогих для производства твэлов с U-Pu регенератором;

- ✓ Для двухкомпонентной системы ядерной энергетики (ВВЭР-1000 с многократным рециклом РЕМИКС-топлива – БР) минимальный расход топлива подпитки достигается для конструкции ТВС с затесненной решеткой твэлов (вода – топливное отношение 1.5) и трех - годичной кампанией топлива.

По диссертационной работе можно сделать несколько замечаний/пожеланий, которые не меняют сути диссертационной работы:

- На стр.4 автореферата после п. 2 сразу идет п.4;
- В разделе 2.1 диссертации рассмотрены радиационные и экологические аспекты обращения с ОЯТ, содержащим РЕМИКС топливо. Следует отметить, что вопросы ядерной безопасности, например, при транспортировке ОЯТ с РЕМИКС топливом, также требуют отдельного анализа;
- Исследования влияния кратности перегрузок желательно проводить с учетом изменения КИУМа;
- В автореферате (например, на стр.6) и в тексте диссертационной работы используются термины «изменение ЕРР» и «экономия ЕРР». Наверное, более корректно было бы написать, например, величина объема разделительных работ (которая измеряется в ЕРР).
- В табл. 14 (стр. 58 диссертации) приведены данные по экономии природного урана и объема разделительных работ, видимо, по сравнению с U-загрузкой в ОЯТЦ;
- Одной из целей диссертационной работы заявлен (автореферат, стр. 3) расчетный анализ сокращения объемов ОЯТ за счет замыкания топливного цикла реакторов ВВЭР. Численных оценок сокращения темпов накопления ОЯТ в диссертационной работе не нашел;
- Стр. 37 диссертационной работы, последний абзац: вместо ссылки «на рис.12» надо писать ссылку «на рис.13»;

- В разделе 2.1 диссертации автором исследованы основные эффекты реактивности активной зоны реактора ВВЭР-1000 со 100% загрузкой РЕМИКС топливом. Сделан вывод, что нейтронно-физические характеристики, влияющие на безопасность РУ, укладываются в проектные ограничения (стр.72 диссертации). Желательно продолжить исследование безопасности реакторов ВВЭР с РЕМИКС загрузкой в переходных процессах и их поведение в условиях реактивностных аварий.

Указанные замечания не снижают общую положительную оценку работы. Результаты исследований изложены в 33 печатных работах, в том числе в изданиях, рекомендованных ВАК, и были представлены на российских и международных конференциях. Автореферат и публикации полностью соответствуют содержанию диссертации.

Оценивая диссертационную работу Боброва Е.А. в целом, хочется отметить комплексный и многосторонний характер данного исследования. Автором обоснованы все рассмотренные сценарии замыкания топливного цикла реакторов ВВЭР по РЕМИКС технологии. Заключение автора сделано на основе многочисленных расчетов с применением современного верифицированного на бенч-марках программного комплекса "CONSUL". Диссертационная работа представляет собой законченное научное исследование, выполнена на высоком научном уровне и оставляет хорошее впечатление своим логичным построением и ясностью изложения. Чувствуется, что выполненная работа представлена в диссертации зрелым профессионалом.

В итоге считаю, что данная диссертационная работа соответствует всем требованиям, предъявляемым ВАК Минобрнауки к кандидатским диссертациям, а Бобров Евгений Анатольевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.14.03 – "Ядерные энергетические установки, включая проектирование, эксплуатацию и вывод из эксплуатации"

Официальный оппонент,
к.т.н. Глебов Василий Борисович,
старший научный сотрудник НИЯУ МИФИ, 115409, Москва,
Каширское шоссе, 31. Тел. +7 (495) 788 56 99, доб. 8359,
E-почта: VBGlébov@mephi.ru

Подпись В.Б. Глебова подтверждаю

Подпись удостоверяю
Заместитель начальника отдела
документационного обеспечения
НИЯУ МИФИ



В.Б. Глебов