

На правах рукописи

Мин Мин Со

**СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПЕРСПЕКТИВНЫХ ТОПЛИВНЫХ
ЦИКЛОВ ТЯЖЕЛОВОДНЫХ КАНАЛЬНЫХ РЕАКТОРОВ С
ПОЗИЦИЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ И БЕЗОПАСНОСТИ**

05.14.03 - Ядерные энергетические установки, включая проектирование,
эксплуатацию и вывод из эксплуатации

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Автор:



Москва – 2009

Работа выполнена в Московском инженерно-физическом институте
(государственном университете)

Научный руководитель: кандидат физико-математических наук,
профессор, МИФИ (ГУ)
Наумов Владимир Ильич

Официальные оппоненты: доктор технических наук,
заведующий лабораторией,
ГНЦ РФ - ИТЭФ
Герасимов Александр Семенович

кандидат технических наук,
первый заместитель генерального
инспектора концерна «Энергоатом»,
Зонов Игорь Владимирович

Ведущая организация: РНЦ «Курчатовский институт»

Защита состоится « 13 » мая 2009 г. в 17 час. 00 мин. на заседании
диссертационного совета Д 212.130.04 в Московском инженерно-физическом
институте (государственном университете) по адресу:
115409, г. Москва, Каширское шоссе, д.31.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МИФИ.

Автореферат разослан: « 13 » апреля 2009 г.

Просим принять участие в работе совета или прислать отзыв в одном
экземпляре, заверенном печатью организации, по адресу МИФИ.

Ученый секретарь диссертационного совета,
доктор физико-математических наук,
профессор



И.И. Чернов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Реакторы типа CANDU, способные эффективно работать на природном уране в условиях открытого топливного цикла, могут быть привлекательны для стран, начинающих осваивать ядерную энергетику. К недостаткам действующих реакторов CANDU следует отнести относительно небольшую глубину выгорания ядерного топлива, что отражается на объемах производства ТВС и хранения облученного топлива. Учитывая длительный срок службы реакторов нового поколения (50-60 лет), возможные изменения на рынке ядерного топлива, прогресс в разработке ядерных реакторов других типов, создание региональных центров по производству и переработке топлива, не исключена возможность существенного совершенствования топливных циклов CANDU с целью сохранения их конкурентоспособности. Актуальность работы обусловлена необходимостью получения достаточно полной информации о возможностях эволюции топливных циклов реакторов типа CANDU на этапе принятия решений по выбору направлений развития ядерной энергетики и по масштабам производственных мощностей обеспечения их топливных циклов. Результаты исследований могут представлять интерес для российского атомного комплекса с позиции его участия в международных проектах региональных центров по производству и переработке ядерного топлива и поставок ядерного топлива в страны, эксплуатирующие реакторы типа CANDU.

Целью работы явилось получение количественных данных по основным показателям перспективных топливных циклов и параметрам безопасности реакторов CANDU, их сравнительный анализ и рекомендации по внедрению.

Научная новизна работы состоит в комплексном исследовании с единой методической позиции и физическом обосновании различных вариантов топливных циклов реакторов типа CANDU. Наряду с топливными циклами на слабо обогащенном уране рассмотрены различные варианты на базе МОКС-топлива и варианты совместных топливных циклов на основе слабо

обогащенного урана и тория. Исследованы варианты совместных топливных циклов, которые ранее в литературе не рассматривались. Получены оценки натуральных показателей топливных циклов и коэффициентов реактивности. Обоснованы возможности профилирования энерговыделения за счет перестановок ТВС по схеме «периферия-центр-периферия» с учетом специфики реактора CANDU.

Практическая значимость полученных результатов состоит в формировании представлений о возможной эволюции топливных циклов реакторов типа CANDU, полученной оценке натуральных показателей топливных циклов, в возможном использовании результатов для экономических оценок и принятия решений о реализации рассмотренных вариантов.

На защиту выносятся

1. Результаты комплексного анализа перспективных топливных циклов реакторов CANDU на основе слабо обогащенного урана и МОКС-топлива.
2. Результаты комплексного анализа совместных топливных циклов на основе слабо обогащенного урана и тория.
3. Результаты исследований и рекомендации по организации перегрузок топлива в реакторах CANDU с целью профилирования энерговыделения и повышения безопасности.

Достоверность полученных результатов базируется на использовании многократно проверенных вычислительных средств (Программа ГЕТЕРА), совпадении проведенных тестовых расчетов для известных вариантов топливных циклов CANDU и физической непротиворечивости результатов расчетов.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения. Работа изложена на 118 страницах, содержит 27 рисунков и список цитируемой литературы из 94 наименований.

Апробация работы

Основные положения работы докладывались и обсуждались на XV семинаре по проблемам физики реакторов «ВОЛГА-2008» (Москва, 2 – 6 сентября 2008 г.), на 6-й Курчатовской молодежной научной школе (Москва, 17 – 19 ноября 2008 г.), на Научных сессиях МИФИ в 2007, 2008 и 2009 г.г.

Публикации

По теме диссертационной работы опубликовано 8 работ, перечень которых приведен в конце автореферата.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность проведенных исследований, сформулирована цель работы, указаны научная новизна, практическая значимость и достоверность полученных результатов, изложены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе приведен обзор работ по существующим тяжеловодным реакторам типа CANDU и совершенствованию их топливных циклов. Использование такого идеального материала, как тяжелая вода, в качестве замедлителя и теплоносителя позволяет применить в CANDU в качестве ядерного топлива двуокись природного урана. Один из серьезных недостатков действующих реакторов типа CANDU, при использовании природного урана, состоит в том, что в этом варианте выгорание топлива не превышает 10 МВт·сут/кг, что в 5-6 раз ниже, чем в современных легководных реакторах, работающих на обогащенном топливе. Это приводит, с одной стороны, к большому объему производства тепловыделяющих элементов (ТВЭЛов), а с другой стороны – к большому объему хранилищ облученного топлива. Можно заключить, что перспектива CANDU в значительной степени связана с использованием обогащенного топлива, открывающим, помимо увеличения выгорания, ряд новых возможностей, в частности, использование обычной легкой воды в качестве теплоносителя.

Одно из направлений поисковых исследований связано с потенциальным исчерпанием ресурсов дешевого урана и анализом возможности перехода на альтернативный топливный цикл, базирующийся на использовании тория и получаемого на его основе урана-233. Существуют перспективные проекты ядерных реакторов, реализующие в той или иной степени потенциальные возможности торий-уранового топливного цикла (жидкосолевые реакторы, высокотемпературные реакторы), но одним из реальных претендентов на использование тория являются тяжеловодные реакторы типа CANDU. Среди последних работ, посвященных использованию торий-уранового топливного цикла в CANDU показано, что при определенных условиях в тяжеловодном реакторе может быть реализован режим самообеспечения топливом, без использования дополнительного делящегося материала. Анализ опубликованных работ, посвященных упомянутым вопросам, позволил сформулировать следующие выводы:

- В усовершенствованных тяжеловодных реакторах типа CANDU наряду с природным ураном могут быть использованы слабо обогащенный уран, уран, выделенный после переработки отработавшего топлива ВВЭР, смешанное оксидное топливо (U и Pu), а также торий.
- Данные по потребности природных ресурсов топлива при использовании слабо обогащенного урана и МОКС-топлива применительно к реакторам типа CANDU в литературе практически не представлены, а также не было изучено изменение свойств реакторов при частичной загрузке реактора типа CANDU торием.
- Недостаточно изучено влияние новых видов топлива на параметры безопасности реакторов и изменения свойств реакторов, связанные с заменой тяжеловодного теплоносителя обычной легкой водой.
- Не исследована возможность профилирования энерговыделения в реакторах типа CANDU за счет внутризонного перемещения ТВС.

На основании сделанных выводов поставлены задачи исследования.

Во второй главе проведен сравнительный анализ ряда вариантов перспективных топливных циклов тяжеловодных реакторов типа CANDU с позиций эффективности использования ядерного топлива и влияния на параметры безопасности. Рассмотрены варианты, базирующиеся на использовании слабо обогащенного урана, смешанного (МОКС) топлива, а также совместного топливного цикла с реактором типа ВВЭР (DUPIC - технология). В связи с потенциальной возможностью использования в CANDU слабо обогащенного топлива, с целью экономии тяжелой воды, рассмотрены варианты замены тяжеловодного теплоносителя легкой водой. Анализируются изменения свойств реактора, связанные с заменой тяжеловодного теплоносителя обычной легкой водой.

В качестве исходного прототипа принят реактор типа CANDU PHWR-750 на природном уране со стандартной конструкцией ТВС, содержащей 37 ТВЭЛОВ. Шаг квадратной решетки технологических каналов равен 28,6 см. В качестве основного инструмента исследований использован комплекс программ ГЕТЕРА, позволяющий производить расчет нуклидного состава при выгорании топлива и коэффициента размножения для ячеек и полиячеек ядерных реакторов различных типов. В качестве критерия для определения достижимого выгорания принята величина коэффициента размножения бесконечной размножающей среды K_{∞} на среднем нуклидном составе топлива. В данных исследованиях коэффициент размножения принят одинаковым для всех вариантов и равным 1,05. Дополнительным аргументом в пользу такого выбора была полученная расчетная величина выгорания для базового варианта на природном уране, равная 8,2 МВт·сут./кг, которая хорошо коррелирует с известными данными по выгоранию топлива в существующих реакторах CANDU.

В табл. 1 приведены результаты расчетов основных показателей топливных циклов, базирующихся на основе слабо обогащенного топлива, а также на различных вариантах смешанного (МОКС) топлива, включая вариант DUPIC. Приведены данные по величине выгорания топлива B , по

удельному расходу ядерного топлива (в составе ТВС) на единицу произведенной электроэнергии g_x , по соответствующему удельному расходу природного урана g_c и удельному количеству разделительной работы. При расчете расхода природного урана и количества разделительной работы содержание урана-235 в отвале принято равным 0,25%. В вариантах со смешанным топливом изотопный состав плутония принят соответствующим энергетическому плутонию, содержащемуся в отработанном топливе реактора ВВЭР при выгорании 40 МВт сут./кг. В этих вариантах выделенный радиохимическим способом «энергетический» плутоний смешивается с отвальным ураном. Для сравнения приведены варианты, относящиеся к использованию в качестве теплоносителя тяжелой воды (числитель) или легкой воды (знаменатель). В качестве базового варианта приведены данные для стандартного топливного цикла CANDU на природном уране.

Таблица 1

Характеристики уран-плутониевого топливного цикла с использованием слабо обогащенного урана и смешанного (МОКС) топлива

Топливо	Выгорание В [МВт·сут/кг]	Удельный расход топлива (в составе ТВС), g_x [кг/МВт(эл)·год]		Удельный расход природного урана, g_c [кг/МВт(эл)·год]	Удельное количество разделительной работы [кг ЕРР/МВт(эл)·год]
		UO ₂	PuO ₂		
UO ₂ (X ₅ =0,71%)	8,2 / -	144 / -	-	144 / -	0 / -
UO ₂ (X ₅ =1,0%)	17,5 / 6,6	67 / 183	-	110 / 298	20,6 / 59,6
UO ₂ (X ₅ =1,5%)	30,6 / 19,1	38 / 64	-	105 / 173	39,0 / 65,7
UO ₂ (X ₅ =2,0%)	42,1 / 29,4	28 / 41	-	106 / 157	52,3 / 76,6
UO ₂ (X ₅ =2,5%)	52,9 / 39,5	22 / 30	-	109 / 151	61,1 / 83,3
UO ₂ (X ₅ =3,0%)	63,2 / 48,5	19 / 25	-	111 / 150	70,8 / 93,2
(U+Pu)O ₂ (2,0%PuO ₂)	45,5 / 32,8	26 / 36	0,54 / 0,74	-	-
(U+Pu)O ₂ (3,0%PuO ₂)	64,8 / 51,8	18 / 23	0,56 / 0,71	-	-
DUPIC - технология	19,4 / 13,5	61 / 87	-	-	-

Как следует из расчетных результатов, переход в реакторах CANDU на слабо обогащенное топливо позволяет не только увеличить выгорание, но и существенно уменьшить расход природного урана. Значительный эффект в экономии природного урана, порядка 30%, достигается при весьма умеренном увеличении начального обогащения, до 1,0-1,5%. Дальнейшее повышение обогащения, до 2,0-3,0%, не приводит к экономии природного урана, но позволяет значительно увеличить выгорание топлива и сократить объем твэльного производства. Приведенные данные показывают, что увеличение обогащения урана до 3,0% позволяет увеличить выгорание до 60 МВт-сут/кг, при этом сократить расход природного урана на 23%, а расход топлива в виде ТВС почти в 8 раз по сравнению с базовым вариантом.

Переход на смешанное топливо на основе «энергетического» плутония и отвального урана позволяет полностью исключить потребление природного урана. Аналогичный эффект достигается и при использовании DUPIC-технологии. В случае легководного теплоносителя расход природного урана увеличивается за счет потери выгорания топлива. Замена тяжеловодного теплоносителя легкой водой приводит к ухудшению показателей по эффективности использования ядерного топлива и с этой точки зрения может иметь смысл только при использовании топлива с обогащением не менее 2,0-3,0%. В этом диапазоне тяжеловодный реактор с легководным теплоносителем сохраняет преимущество как по объему производства ТВС, так и по расходу природного урана.

Для рассмотренных выше вариантов были рассчитаны коэффициенты реактивности по температуре топлива $\alpha_T = \frac{d\rho}{dT_{\text{топ}}}$, по температуре теплоносителя $\alpha_{T/H} = \frac{d\rho}{dT_{T/H}}$ и средние доли запаздывающих нейтронов $\bar{\beta}$. Были также рассчитаны коэффициенты реактивности по мощности $\alpha_W = W \cdot \frac{d\rho}{dW}$ и по расходу теплоносителя $\alpha_G = G \cdot \frac{d\rho}{dG}$, демонстрирующие чувствительность реактора к возможным колебаниям мощности и расхода

теплоносителя. При расчете коэффициентов реактивности по мощности и по расходу теплоносителя учитывалось совокупное влияние вариации данного параметра на температуру топлива, плотность и температуру теплоносителя. Количественные значения этих коэффициентов нормированы на процент изменения мощности или расхода. Расчеты проведены для вариантов тяжеловодного (числитель) и легководного (знаменатель) теплоносителей. Результаты расчетов представлены в табл. 2.

Таблица 2

Значения коэффициентов реактивности и выхода запаздывающих нейтронов
уран-плутониевых топливных циклов

Топливо	α_T [1/°K] ,10 ⁻⁵	$\alpha_{T/H}$ [1/°K] ,10 ⁻⁵	α_w [1/%] ,10 ⁻⁵	α_G [1/%] ,10 ⁻⁵	$\bar{\beta}$,10 ⁻²
UO ₂ (X ₅ =0,71%)	-1,23 / -	2,15 / -	-7,54 / -	-4,14 / -	0,46 / -
UO ₂ (X ₅ =1,0%)	-1,23 / -1,18	2,16 / 21,5	-7,54 / -7,36	-4,12 / -40,6	0,45 / 0,46
UO ₂ (X ₅ =1,5%)	-1,22 / -1,17	2,25 / 19,3	-7,52 / -7,34	-4,02 / -38,8	0,45 / 0,45
UO ₂ (X ₅ =2,0%)	-1,21 / -1,16	2,27 / 18,2	-7,52 / -7,33	-4,01 / -37,6	0,44 / 0,45
UO ₂ (X ₅ =2,5%)	-1,20 / -1,15	2,31 / 17,4	-7,51 / -7,32	-3,96 / -36,2	0,44 / 0,45
UO ₂ (X ₅ =3,0%)	-1,20 / -1,15	2,35 / 16,6	-7,51 / -7,31	-3,93 / -35,1	0,44 / 0,45
(U+Pu)O ₂ (2,0%PuO ₂)	-1,21 / -1,16	1,92 / 14,8	-7,52 / -7,31	-4,46 / -33,2	0,35 / 0,35
(U+Pu)O ₂ (3,0%PuO ₂)	-1,20 / -1,15	1,95 / 11,3	-7,51 / -7,30	-4,48 / -31,6	0,35 / 0,35
DUPIС - технология	-1,22 / -1,17	2,26 / 13,6	-7,52 / -7,31	-4,02 / -32,7	0,41 / 0,43

Как и следовало ожидать, коэффициент реактивности по температуре топлива, определяемый в основном эффектом Доплера, остается отрицательным и практически неизменным для всех рассмотренных вариантов. Коэффициент реактивности по температуре теплоносителя для тяжеловодного варианта является слабо положительным и мало отличается от базового варианта. Переход на легководный теплоноситель приводит к значительному, почти на порядок, увеличению коэффициента реактивности по сравнению с тяжеловодным вариантом. В коэффициенте реактивности по мощности реактора доминирует составляющая, связанная с эффектом

Доплера, что обеспечивает ему благоприятный отрицательный знак. В коэффициенте реактивности по расходу теплоносителя доминирует составляющая, связанная с положительной обратной связью по температуре теплоносителя, что приводит к его неблагоприятному отрицательному знаку. Судя по полученным результатам, при замене тяжеловодного теплоносителя на легкую воду следует ожидать значительного повышения чувствительности реактора к колебаниям расхода теплоносителя.

В третьей главе проведено исследование возможностей профилирования энерговыделения за счет радиальных перестановок ТВС по схеме «периферия-центр-периферия» в пределах активной зоны в реакторах типа CANDU при использовании в качестве топлива слабо обогащенного урана. Рассмотрена эффективность перестановок ТВС на конкретном примере реактора CANDU с радиусом активной зоны 425 см и длиной рабочей части технологических каналов 600 см. Приведены количественные оценки эффективности профилирования на примере модели реактора CANDU в диапазоне начального обогащения топлива от 0,71 до 3,0%. Увеличение обогащения неизбежно приводит к росту неравномерности энерговыделения из-за увеличения разницы между максимальным и средним макросечениями деления ядерного топлива в пределах активной зоны. В реакторах типа CANDU, работающих на природном уране при относительно небольшом выгорании топлива, разница между максимальным и средним макросечениями по длине канала не настолько велика, чтобы применять какие-либо специальные средства по ее уменьшению. Но при увеличении начального обогащения топлива и однократном прохождении ТВС через активную зону разница между максимальным и средним по длине канала макросечениями возрастает, что приводит к росту аксиальной неравномерности энерговыделения. Представлено относительное распределение макросечения деления топлива по длине канала для трех рассмотренных вариантов при однократном прохождении через активную зону. В случае использования природного урана макросечение деления

топлива мало меняется в процессе выгорания и составляет около 10%. В вариантах со слабо обогащенным ураном, при обогащении 2,0% и 3,0% изменение макросечения деления составляет 55% и 65% соответственно. На рис.1 показана зависимость относительной плотности энерговыделения по длине канала для трех рассмотренных вариантов при симметричном (синусоидальном) распределении плотности потока нейтронов и однократном прохождении топлива через активную зону. Видно, что по мере увеличения начального обогащения максимум плотности энерговыделения смещается ко входу в активную зону, что приводит к значительному росту аксиальной неравномерности энерговыделения.

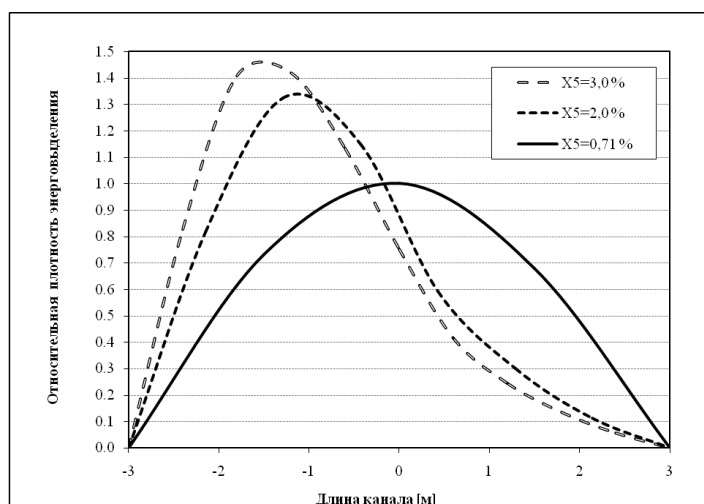


Рис.1. Зависимость относительной плотности энерговыделения по длине канала

Существует реальная возможность уменьшения как радиальной, так и аксиальной неравномерности энерговыделения за счет радиальных перестановок топлива. Одним из эффективных способов профилирования поля энерговыделения являются перестановки типа «периферия-центр-периферия». В соответствии с этой схемой, свежие ТВС поступают сначала в периферийные каналы реактора, где облучаются треть полной кампании, затем перемещаются в каналы центральной зоны, где также облучаются треть кампании, а на последок возвращаются в каналы периферийной зоны, где дожигаются за счет избытка нейтронов, генерируемых свежими ТВС.

При исследовании эффективности профилирования энерговыделения за счет перестановок топлива предполагалось, что коэффициент размножения нейтронов K_∞ как в центральной, так и в периферийной зоне одинаков. При этом условии радиальное распределение плотности потока нейтронов в реакторе может быть представлено в виде функции Бесселя $J_0(2,405 \frac{r}{R_{A.3} + \Delta_{отр}})$. Активная зона окружена боковым отражателем, обеспечивающим эффективную добавку $\Delta_{отр} \approx 50$ см, так, что радиальный коэффициент неравномерности плотности потока нейтронов в активной зоне составляет $k_r = 1,91$. Условие непрерывности потока ТВС позволяет определить размеры центральной и периферийной зон, соотносящиеся как 1:2, и радиус центральной зоны, равный в данном случае 245 см. Соответствующие коэффициенты радиальной неравномерности плотности потока нейтронов в центральной и периферийной зонах равны 1,22 и 1,74. Приведены относительные аксиальные распределения плотности энерговыделения по длине технологического канала при перестановке ТВС из периферийной в центральную, а затем – снова в периферийную зону. Уменьшение максимальной плотности энерговыделения свежезагружаемых ТВС для 2,0% и 3,0% вариантов за счет перестановки ТВС составляет около 35% и 40% соответственно.

В качестве количественного критерия эффективности профилирования энерговыделения при радиальных перестановках ТВС выбран полный объемный коэффициент неравномерности энерговыделения

$$k_v = \frac{q_{\max}}{\bar{q}} = \frac{\pi \cdot R_{A.3}^2}{\sum_i \int \frac{q_{\max_i}}{q_{\max}} \frac{1}{k_{z_i} \cdot k_{r_i}} 2 \cdot \pi \cdot r dr}$$

где: q_{\max_i} = максимальная плотность энерговыделения в i -ой зоне;

q_{\max} = максимальная плотность энерговыделения в активной зоне;

k_{z_i} = аксиальная неравномерность энерговыделения в i -ой зоне;

k_{r_i} = радиальная неравномерность энерговыделения в i -ой зоне.

В табл. 3 представлены результаты расчета полной неравномерности энерговыделения для рассмотренных вариантов начального обогащения без перестановок ТВС и с перестановками «периферия-центр-периферия». В табл. 4 приведены данные по составляющим коэффициента неравномерности в случаях без перестановок и с перестановками для каждой из зон, а также – относительные максимальные плотности энерговыделения в каждой из зон, отнесенные к максимальной плотности энерговыделения в базовом варианте. Если принять в качестве ограничения максимальную плотность энерговыделения для варианта с природным ураном без перестановок ТВС, то, как следует из приведенных данных в табл. 4, перестановки ТВС дают возможность не только снизить максимальную плотность энерговыделения ниже предельного значения, но и создать определенный резерв для повышения мощности реактора.

Таблица 3

Объемный коэффициент неравномерности энерговыделения

X ₅ [%]	k _v	
	Без перестановок ТВС	При перестановке ТВС
0,71	3,08	3,07
2,0	3,88	3,03
3,0	4,47	3,12

Таблица 4

Максимальные плотности энерговыделения и локальные неравномерности энерговыделения

X ₅ [%]	Без перестановок ТВС			При перестановке ТВС								
				Периферийная зона (1)			Центральная зона (2)			Периферийная зона (3)		
	q _{max}	k _z	k _r	q _{max1}	k _{z1}	k _{r1}	q _{max2}	k _{z2}	k _{r2}	q _{max3}	k _{z3}	k _{r3}
0,71	1,0	1,61	1,91	0,7	1,57	1,74	1,0	1,57	1,22	0,6	1,57	1,74
2,0	1,3	2,03	1,91	0,9	1,71	1,74	0,8	1,71	1,22	0,5	1,71	1,74
3,0	1,4	2,34	1,91	1,0	1,73	1,74	0,8	1,73	1,22	0,4	1,73	1,74

В четвертой главе проведен сравнительный анализ совместного открытого торий-уранового топливного цикла и варианты замкнутого цикла только по торию. Приведены результаты анализа ряда вариантов комбинированных топливных циклов, основанных на частичной загрузке реактора типа CANDU ториевыми ТВС и использовании слабо обогащенного уранового топлива. Анализируется гипотетическая возможность реализации замкнутого топливного цикла по торию.

Среди первых претендентов на внедрение тория в ядерные энергетические установки называют реакторы CANDU как наиболее приспособленные к изменению топливного цикла. Возможны различные варианты внедрения тория в топливные загрузки ядерных реакторов, простейшим из которых является комбинированный вариант, предполагающий частичную загрузку реактора ториевыми ТВС без добавления делящихся материалов и совместный топливный цикл на основе слабо обогащенного урана и тория. Предполагается, что ТВС со слабо обогащенным ураном и торием непрерывно загружаются в отдельные каналы полирешетки реактора, перемещаются вдоль каналов по мере выгорания топлива. Скорости перемещения урановых v_{UO_2} и ториевых v_{ThO_2} ТВС могут быть как одинаковыми, так и существенно различными, в частности, $(v_{ThO_2} = \frac{v_{UO_2}}{2})$. Фрагмент активной зоны реактора моделировался в виде полиячейки из 4-х каналов, загружаемых урановыми и ториевыми ТВС в пропорции 3:1, 2:2. Время облучения ТВС и, соответственно, скорость их перемещения в каналах активной зоны выбиралось таким образом, чтобы коэффициент размножения K_∞ во всех сравниваемых вариантах, как и в предыдущем уран-плутониевом топливном цикле, был равен 1,05.

Наряду с расходом природного урана, анализируются полный расход обогащенного урана и тория, определяющий объем производства ТВС, объем разделительной работы, необходимый для производства обогащенного урана и наработка урана-233 и урана-235 в облученных ториевых ТВС. В табл. 5

приведены результаты расчетов глубины выгорания урана (числитель) и тория (знаменатель), удельного расхода природного урана и тория, удельного расхода ядерного топлива (в составе ТВС), удельного количества разделительной работы и наработки делящегося $^{233}\text{U}+^{235}\text{U}$ в ториевых ТВС для двух вариантов, когда скорости движения ториевых и урановых ТВС равны между собой и когда скорость движения ториевых ТВС вдвое меньше скорости урановых ТВС при загрузке реактора в пропорции 3:1. Для сравнения, в первом столбце табл. 5 приведены результаты совместного топливного цикла на основе природного урана при той же загрузке реактора, но при предельно низкой скорости движения ториевых ТВС. Как видно, даже это экстремальное снижение скорости ториевых ТВС не приводит к сокращению расхода природных ресурсов ядерного топлива. Положительный эффект возникает только при использовании в совместном топливном цикле слабо обогащенного урана. Как видно из приведенных результатов, относительные скорости движения ТВС существенно влияют на основные показатели, характеризующие эффективность использования природных ресурсов.

Таблица 5

Характеристики совместного открытого торий-уранового топливного цикла при загрузке реактора в пропорции 3:1

	$v_{ThO_2} = \frac{v_{UO_2}}{10}$	$v_{ThO_2} = v_{UO_2}$			$v_{ThO_2} = \frac{v_{UO_2}}{2}$		
	0,71	2,0	2,5	3,0	2,0	2,5	3,0
Обогащение урана [%]							
Глубина выгорания урана и тория [МВт·сут/кг]	7,5/79,2	31,5/22,7	41,7/31,9	51,9/41,8	36,0/58,4	44,8/75,2	52,2/90,5
Удельный расход топлива (в составе ТВС) [кг/МВт(эл)·год]	153,2/3,8	30/10	22,5/7,5	18/6	27/4,5	20,6/3,4	17,5/2,9
Удельный расход природного урана и тория [кг/МВт(эл)·год]	153,2/3,8	115/10	110/7,5	107/6	103/4,5	100/3,4	105/2,9
Удельное количество разделительной работы [кг ЕРР/МВт(эл)·год]	0	56,04	62,46	67,09	50,44	57,19	65,22
Наработка $^{233}\text{U}+^{235}\text{U}$ [кг/МВт(эл)·год]	0,057	0,128	0,102	0,085	0,065	0,050	0,043

Сравнивая данные табл. 5 и 1, можно видеть, что включение тория в совместный топливный цикл позволяет, при определенных условиях, получить дополнительную экономию как в расходе природного урана, так и в затратах разделительной работы. Внедрение в топливную загрузку тория приводит к некоторому уменьшению выгорания урановых ТВС за счет потери нейтронов на захват в тории, но при этом экономия урана реализуется за счет замещения части загрузки реактора ториевыми ТВС и получения дополнительной энерговыработки за счет вклада деления урана-233 и незначительного вклада урана-235, накопленных в ториевых ТВС.

В табл. 6 приведены результаты расчетов совокупности параметров реактора, работающего в условиях совместного топливного цикла, при соотношении урановых и ториевых ТВС 2:2. Как видно из приведенных результатов, заметный эффект экономии природных ресурсов и топлива рабочего состава наблюдается только при дальнейшем повышении начального обогащения урана до 3,5 – 4,0 %. Проведены расчеты совокупности параметров реактора, работающего в условиях совместного топливного цикла и показано, что частичное включение в загрузку реактора ториевых ТВС не приводит к заметному ухудшению коэффициентов реактивности по сравнению с базовым вариантом и вариантами на слабо обогащенном уране.

Характеристики совместного открытого торий-уранового топливного цикла при загрузке реактора в пропорции 2:2

Обогащение урана [%]	$\nu_{ThO_2} = \nu_{UO_2}$			$\nu_{ThO_2} = \frac{\nu_{UO_2}}{2}$		
	3,0	3,5	4,0	3,0	3,5	4,0
Глубина выгорания урана и тория [МВт·сут/кг]	32,0/16,7	44,4/27,3	56,5/38,7	39,7/62,2	51,7/71,3	59,0/89,9
Удельный расход топлива (в составе ТВС) [кг/МВт(эл)·год]	24/24	16,5/16,5	12,5/12,5	14/7	12/6	11,7/5,85
Удельный расход природного урана и тория [кг/МВт(эл)·год]	145/24	116/16,5	102/12,5	83/7	87/6	96/5,85
Удельное количество разделительной работы [кг ЕРР/МВт(эл)·год]	89,5	77,68	71,39	52,18	56,50	66,82
Наработка $^{235}\text{U} + ^{235}\text{U}$ [кг/МВт(эл)·год]	0,287	0,179	0,168	0,203	0,153	0,087

Приведены результаты расчетов аксиальных распределений макросечений деления и плотностей энерговыделения в урановых и ториевых ТВС. В качестве примера на рис.2 приведены зависимости средних макросечений деления по спектру нейтронов в каналах, содержащих урановые и ториевые ТВС, для варианта загрузки реактора 3:1 с начальным обогащением урана 2,0%.

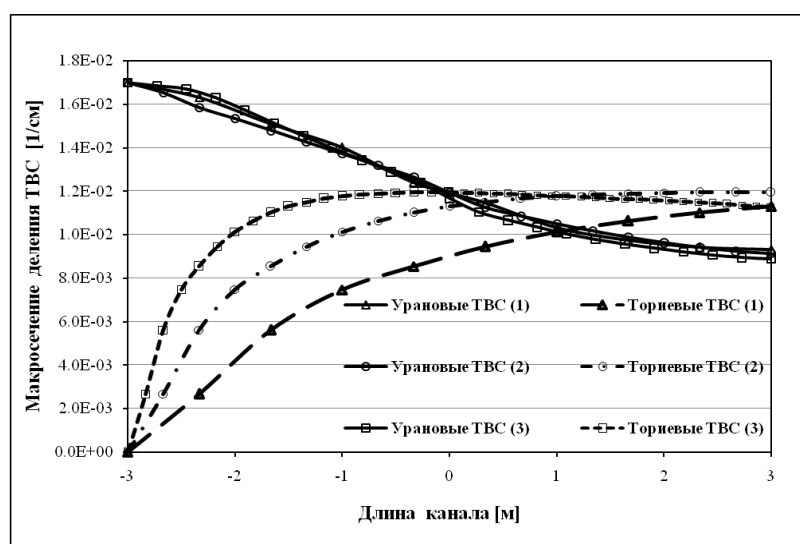
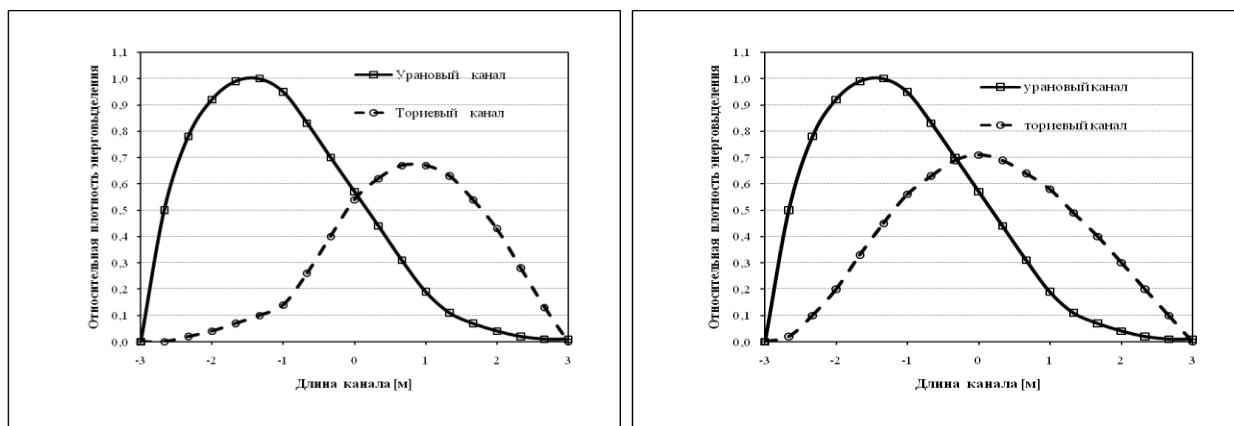


Рис. 2. Зависимости средних макросечений деления ториевых и урановых ТВС по длине канала. (1) скорость ториевых ТВС вдвое больше урановых ТВС (2) скорости урановых и ториевых ТВС равны между собой (3) скорость ториевых ТВС вдвое меньше урановых ТВС

Показано, что распределение макросечения деления в ториевых ТВС тем ровнее, чем меньше скорость их аксиального перемещения. Неравномерное распределение макросечений деления по длине каналов, содержащих урановые и ториевые ТВС, отражается на плотности энерговыделения по длине каналов.

На рис.3 в качестве примера приведены распределения относительных плотностей энерговыделения для двух вариантов скорости движения ториевых ТВС для варианта загрузки реактора 3:1 с начальным обогащением урана 4,0%. Как видно из графиков, максимумы энерговыделения как в урановых, так и в ториевых каналах смещены относительно центра активной зоны. Указаны возможные пути выравнивания аксиального распределения энерговыделения в урановых ТВС.



а.)

б.)

Рис.3. Распределения относительных плотностей энерговыделений ториевых и урановых каналов по длине каналов. а.) скорости ториевых и урановых ТВС равны между собой. б.) скорость ториевых ТВС вдвое меньше скорости урановых ТВС.

Замечено, что макросечение деления ториевых ТВС на выходе из активной зоны практически одинаково, поскольку концентрация делящихся изотопов урана в них достигает своего асимптотического значения, составляющего примерно 1,3% по отношению к сырьевому материалу торию-232. Это почти вдвое выше, чем содержание урана-235 в природном уране, и может служить основанием для замыкания топливного цикла по торию. Рассмотрена возможность эффективного использования

накапливаемых изотопов урана в ториевых ТВС. Предполагается, что облученные ториевые ТВС после временной выдержки отправляются на переработку топлива для замыкания топливного цикла по торию. Рассматривается как вариант радиохимической, так и термо-механической переработки с отделением легколетучих продуктов деления (по аналогии с технологией DUPIC для уран-плутониевого топлива). Предполагается, что в перспективе, при условии практического освоения термо-механической или радиохимической переработки облученных ториевых ТВС, торий может быть возвращен в топливный цикл и позволит получить дополнительную экономию природного урана. В замкнутом совместном топливном цикле урановые и ториевые ТВС движутся с одинаковой скоростью в отдельных каналах. В табл. 7 приведены результаты расчетов совместного замкнутого топливного цикла по торию после радиохимической переработки. Результаты показывают, что замыкание совместного топливного цикла по торию после радиохимической переработки позволяет увеличить глубину выгорания уранового топлива и сократить расход природного урана по сравнению с открытым совместным топливным циклом. Заметный эффект сокращения расхода природного урана за счет замыкания по торию наблюдается при загрузке реактора 2:2 с обогащением урана 3,0%.

Также приведены результаты расчетов совместного замкнутого топливного цикла с многократным повторным использованием тория после термо-механической переработки для двух рассмотренных вариантов загрузки реактора в пропорции 3:1 и 2:2. Результаты расчетов показывают, что замыкание совместного топливного цикла по торию после термо-механической переработки наиболее эффективно в первом рецикле для сокращения расхода природного урана. Дальнейшее повышение числа до двух-трехкратного повторного использования ториевого топлива не приводит к экономии природного урана.

Характеристики замкнутого топливного цикла по торью после радиохимической переработки

загрузка урановых и ториевых ТВС	Обогащение урана [%]	Глубина выгорания урана и тория [МВт·сут/кг]		Удельный расход урана и тория (в составе ТВС) [кг/МВт(эл)·год]		Удельный расход природного урана [кг/МВт(эл)·год]	Удельное количество разделительной работы [кг ЕРР/МВт(эл)·год]
		UO ₂	ThO ₂	UO ₂	ThO ₂		
3:1	2,0	35,9	35,9	24,6	8,2	93,6	50,0
3:1	3,0	54,9	53,1	16,2	5,4	97,0	60,5
2:2	3,0	46,5	41,7	13,4	13,4	80,0	49,8
2:2	4,0	61,6	53,6	10,2	10,2	83,5	58,5

Пятая глава посвящена анализу полученных результатов. Наиболее простым и очевидным вариантом совершенствования топливного цикла CANDU является переход на слабо обогащенное топливо. Продемонстрирован потенциал этого варианта на примере сравнения показателей реактора типа CANDU с соответствующими показателями реактора типа ВВЭР-1000 (В-392). Включение тория в топливный цикл CANDU существенно расширяет диапазон поисковых исследований, направленных на экономию природных ресурсов и эффективность топливного цикла реактора. Другим путем повышения эффективности использования тория может быть замыкание топливного цикла по торью, включающее радиохимическую или термо-механическую переработку облученного ториевого топлива.

Основные выводы

1. Продемонстрирован возможный диапазон сокращения потребления природного урана (на примере типового проекта реактора CANDU) и соответствующего изменения основных натуральных показателей топливного цикла (объем твэльного производства, объем единицы работы разделения) при переходе на слабо обогащенное ядерное топливо и использовании тория.

2. Показано, что замена тяжелой воды в контуре охлаждения на легкую воду приводит к ухудшению показателей по использованию ядерного топлива и приводит к значительному увеличению температурного коэффициента реактивности по сравнению с тяжеловодным вариантом.
3. Установлено, что использование радиальных перестановок ТВС по схеме «периферия-центр-периферия» позволяет существенно понизить коэффициент неравномерности и максимальную плотность энерговыделения в топливе в случае использования в CANDU слабо обогатленного топлива.
4. Показано, что дополнительные операции по радиальным перестановкам ТВС со слабо обогатленным топливом не приводят к увеличению нагрузки на перегрузочные машины по сравнению с базовым вариантом. Целесообразно предусматривать техническую возможность радиальных перестановок ТВС во вновь строящихся и проектируемых реакторах типа CANDU, рассчитанных на длительный срок эксплуатации.
5. Показано, что при замыкании топливного цикла по торию за счет термомеханической или радиохимической переработки облученных ториевых ТВС возможно небольшое дополнительное сокращение потребления уранового топлива как в составе ТВС, так и в пересчете на природный уран. При этом также возможно значительное сокращение потребления природного тория.
6. Целесообразность замыкания топливного цикла по торию только с точки зрения экономии природных ресурсов урана нельзя считать очевидной. Радиохимическая переработка ториевых ТВС может быть оправдана другими соображениями, например, накоплением урана-233 для использования в реакторах других типов, либо для реализации режима самообеспечения топливом в реакторах типа CANDU.

Основные публикации по теме диссертации

1. **Мин Мин Со**, Наумов В.И., Сравнительный анализ перспективных топливных циклов тяжеловодных реакторов типа CANDU. // Научная сессия МИФИ-2007. Сб. научных трудов. Том 8, М.: МИФИ, 2007, С. 119-122.
2. **Мин Мин Со**, Наумов В.И., Сравнительный анализ вариантов перспективных топливных циклов тяжеловодных реакторов типа CANDU. // Инженерная физика. 2007. № 3. С. 18-20.
3. **Мин Мин Со**, Тан Зин Чжо, Наумов В.И., Анализ смешанных топливных циклов на основе слабо обогащенного урана и тория в реакторах типа CANDU. // Научная сессия МИФИ-2008. Сб. научных трудов. Том 1, М.: МИФИ, 2008, С. 134-136.
4. **Мин Мин Со**, Наумов В.И., Савандер В.И., Нейтронно-физический анализ схемы перегрузок топлива в тяжеловодных реакторах типа CANDU с зонным изменением шага решетки. // Научная сессия МИФИ-2008. Сб. научных трудов. Том 1, М.: МИФИ, 2008, С. 97-99.
5. **Мин Мин Со**, Наумов В.И., Перспективные топливные циклы тяжеловодных реакторов типа CANDU. // Актуальные проблемы физики ядерных реакторов – эффективность, безопасность, нераспространение. Материалы XV семинара по проблемам физики реакторов «ВОЛГА-2008». С. 186-188.
6. **Мин Мин Со**, Наумов В.И., Нейтронно-физический анализ перспективных топливных циклов реакторов типа CANDU с позиций эффективности использования природных ресурсов и показателей безопасности. // Известия вузов. Ядерная энергетика. 2008. №.3. С. 65-73.
7. **Мин Мин Со**, Анализ возможности и условий внедрения слабо обогащенного топлива в реакторах типа CANDU. // 6-я Курчатовская молодежная научная школа. Сб. аннотаций работ. М.: 2008, С. 34.
8. Аунг Бо Хейн, **Мин Мин Со**, Наумов В.И., Анализ комбинированных топливных циклов на основе слабо обогащенного урана и тория в реакторах типа CANDU. // Научная сессия МИФИ - 2009. Аннотация докладов. Том 1, М.: МИФИ, 2009, С. 56.