

На правах рукописи

ФЕДОРОВА ЕЛЕНА ВИКТОРОВНА

**ОЦЕНКИ КОНКУРЕНТОСПОСОБНОСТИ
ПЕРСПЕКТИВНЫХ ЯДЕРНЫХ ТОПЛИВНЫХ ЦИКЛОВ
И ИХ КОМПОНЕНТОВ НА ОСНОВЕ МЕЖДУНАРОДНОГО
ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО
ПЛАНИРОВАНИЯ**

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

АВТОРЕФЕРАТ

на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Обнинск 2011

Работа выполнена в Обнинском институте атомной энергетики – филиале Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

Научный руководитель: доктор физ.-мат. наук, профессор
Коровин Юрий Александрович

Официальные оппоненты: доктор технических наук
Герасимов Александр Семенович

кандидат технических наук
Каграманян Владимир Семенович

Ведущая организация: Национальный исследовательский
центр «Курчатовский институт»

Защита состоится «___» _____ 2012 г. в ___ час. ___ мин. на заседании диссертационного совета Д 212.130.10 при Национальном исследовательском ядерном университете «МИФИ» по адресу: 249040, Калужская обл., г. Обнинск, Студгородок, 1, зал заседаний ученого совета ИАТЭ НИЯУ «МИФИ».

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИАТЭ НИЯУ «МИФИ».

Автореферат разослан «___» _____ 2012 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
д.ф.-м.н., профессор

В.Л. Шаблов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Формирование стратегии развития ядерной энергетики на национальном, региональном или глобальном уровне предполагает оценку ее возможной роли в обеспечении устойчивого развития экономики. Такая оценка включает сравнение между собой различных ядерных сценариев и выявление конкурентоспособности ядерного способа производства энергии в общей системе энергоснабжения. Необходимость использования программных средств для оценки стратегий развития таких сложных систем, как ядерная энергетика и ТЭК в целом, представляется очевидной, поэтому их разработка является обязательной составляющей исследований, которые проводятся в рамках национальных и международных ядерных инициатив.

В 70–80-х годах было разработано значительное количество оптимизационных моделей развивающейся ЯЭ. Задачи, которые ставились в то время перед разработчиками средств оценки стратегий развития ЯЭ, и ограниченные возможности вычислительной техники обусловили упрощенное описание топливного цикла. Основной исследуемой проблемой была проблема обеспечения топливом будущей национальной ядерной энергетики. Поэтому задачи оптимизации заключались в поиске структуры ЯЭ, обеспечивающей либо максимальную экономию природного урана, либо минимум денежных затрат в условиях ограниченности запасов природного урана. Новые международные ядерные инициативы, выдвинутые в начале 2000-х годов, стали стимулом для разработки программных средств, которые позволяли бы детально описывать основные этапы топливных циклов и выполнять оценку стратегий развития ядерных энергосистем с учетом не только экономических, но и экологических и социально-политических факторов.

Цель и задачи исследования

Целью работы является совершенствование методологии оценки стратегий развития ядерно-энергетических систем, разработка расчетных схем традиционных и инновационных ЯТЦ, выявление конкурентоспособности ЯЭ и перспективных ЯЭУ. Задачами исследования стали:

- разработка методики формирования расчетных схем ЯТЦ;
- формирование расчетных схем ЯТЦ и их компонентов;
- верификация расчетных методик с помощью комплексов программ по ЯТЦ, рекомендованных МАГАТЭ;
- оптимизационная оценка стратегий развития ЯЭ с различными вариантами ЯТЦ и конкурентоспособности традиционных и инновационных ядерных технологий.

На защиту выносятся:

- методика формирования расчетных схем систем ЯЭ с различными вариантами ЯТЦ в современной среде энергетического планирования MESSAGE;
- оптимизационная расчетная схема ТЭК России с ЯТЦ ВВЭР-1000, учитывающая производство не только электроэнергии, но и тепла;
- оптимизационная расчетная схема ЗЯТЦ России для оценки конкурентоспособности БН в рамках работ по новой технологической платформе ЯЭ России;
- оптимизационная расчетная схема межрегионального энергообмена между Россией и республикой Беларусь для оценки перспектив строительства АЭС в республике Беларусь;
- оптимизационная расчетная схема глобальной ЯЭ с U-Pu-Th ЯТЦ и результаты применения метода критериальных ограничений в задачах замыкания глобального ЯТЦ.

Научная новизна работы:

- впервые разработана оптимизационная расчетная схема ТЭК России, которая включает описание всех основных переделов ЯТЦ и позволяет оценивать конкурентоспособность ЯЭ с учетом спроса не только на производство электроэнергии, но и тепла;
- впервые разработана оптимизационная расчетная схема ЯТЦ России, включающая варианты быстрых натриевых реакторов с разными параметрами воспроизводства, и оценена их конкурентоспособность в структуре ЯЭ в рамках работ по новой технологической платформе ЯЭ России;
- впервые разработана оптимизационная расчетная схема смешанного U-Pu-Th ЯТЦ глобальной ЯЭ и выполнена оценка стратегий развития глобальной ЯЭ при различных наборах критериальных ограничений.

Практическая значимость работы состоит в том, предложенная методика обеспечивает корректное формирование материальных балансов ЯТЦ, что позволяет использовать ее для решения задач оптимизации структуры ЯТЦ и выявления направлений повышения конкурентоспособности ЯЭ; разработанные расчетные схемы перспективных ЯТЦ, включающие инновационные ЯЭУ, могут использоваться для обоснования их места и роли в структуре ЯЭ.

Достоверность и обоснованность результатов работы подтверждаются проведенными верификационными расчетами по используемым в международных проектах программам VISTA и DESAE. Полученные по разработанным моделям результаты обсуждались на семинарах МАГАТЭ и получили одобрение специалистов в области моделирования ЯТЦ.

Личным вкладом соискателя в представленную работу является:

- разработка методики формирования расчетных схем ЯТЦ в среде MESSAGE;
- выполнение тестовых расчетов для верификации предложенной методики;
- разработка схемы ТЭК России с ЯТЦ ВВЭР-1000, выполнение расчетного анализа влияния изменения цен на газ на конкурентоспособность ЯЭ;
- разработка схемы ЗЯТЦ России, выполнение расчетного анализа места БН с различными коэффициентами воспроизводства в структуре ЯЭ;
- разработка расчетной схемы межрегионального энергообмена, выполнение расчетного анализа конкурентоспособности АЭС в республике Беларусь;
- разработка расчетной схемы глобальной ЯЭ, выполнение расчетного анализа влияния критериальных ограничений на формирование оптимальной стратегии развития глобальной ЯЭ.

Апробация результатов диссертации. Лекции по разработанной методике были прочитаны на тренингах МАГАТЭ по программе MESSAGE (Киев, Украина, 2005; Братислава, Словакия, 2006; Загреб, Хорватия, 2007; Загреб, Хорватия, 2009). Результаты работы докладывались на рабочих совещаниях МАГАТЭ по про-

грамме ИНПРО (Вена, Австрия, 2005, 2006, 2009), на рабочем совещании МАГАТЭ по обмену опытом использования программных комплексов энергетического планирования (Сеул, Корея, 2006), на международных конференциях «ENERGY STRAT'2004» (Москва, 2004), «Безопасность АЭС и подготовка кадров» (Обнинск, 2005, 2007); GLOBAL-2009 (Париж, Франция, 2009).

Опубликованность результатов диссертации. По материалам диссертации опубликовано 11 работ, в том числе 6 статей в научных рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК, 1 – в материалах конференций, 4 – в тезисах докладов на конференциях.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав с многоуровневой нумерацией внутри каждой главы, заключения и библиографического списка, включающего в себя 112 наименований. Работа изложена на 138 страницах с 67 иллюстрациями и 17 таблицами.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В главе I дан аналитический обзор методологических подходов и программных средств, используемых для оценки стратегий развития ядерных энергосистем. Показано, что на современном этапе перехода к масштабному развитию ЯЭ на основе реакторов нового поколения и перспективных топливных циклов формулируются новые требования к программным средствам оценки стратегий развития ЯЭ и ЯТЦ. Оценка конкурентоспособности ЯЭ, способной обеспечить устойчивое развитие экономики, должна учитывать не только экономические, но и экологические и социально-политические характеристики. Реализация многосторонних подходов к организации ЯТЦ предполагает, в частности, детальное рассмотрение региональных особенностей формирующейся глобальной ядерной энергетики.

Чтобы обеспечить возможность детального и всестороннего сравнения сценариев развития ЯТЦ для выявления конкурентоспособности перспективных ядерных технологий, работы в области системного ядерного моделирования ведутся в следующих направлениях:

- повышение точности расчетов моделей, описывающих поведение компонентов топливного цикла;

- повышение степени детализации описания организации топливного цикла (включая стадию окончательного захоронения);
- увеличение расчетного интервала (до 100 и более лет);
- возможность расчета экономических, экологических и социально-политических индикаторов;
- возможность учета региональных факторов организации глобального ЯТЦ;
- возможность многокритериальной оценки перспектив развития систем ЯЭ.

Системные ядерные модели наиболее активно разрабатываются в США. Подавляющее большинство существующих программных средств реализуют имитационный подход, однако конечной целью разработки активно развивающихся имитационных моделей, например, DANESS и GENIUS, является создание комплексов программ для всесторонней оценки систем ЯЭ, в которые будут входить оптимизационные системные модели. В результате подготовки обзора было выделено три оптимизационных модели, используемых в международных проектах: FCOPT, MARKAL и его модификация LA US MARKAL и MESSAGE V. Все перечисленные модели основаны на методах линейного программирования. Следует отметить, что только модель FCOPT (Fuel Cycle OPTimization model for NFC analyses), разработанная в Лос-Аламосской Национальной лаборатории (США) – продукт, полученный в рамках исследовательской ядерной программы. MARKAL (MARKet Allocation model) и MESSAGE (Model for Energy Supply Strategy Alternatives and their General Environmental Impacts) являются широко известными энергетическими моделями мирового класса, которые давно используются для решения задач энергетического планирования и прогнозирования разными странами и международными организациями.

Цель оптимизационного исследования энергосистемы с помощью упомянутых выше линейных моделей состоит в нахождении структуры системы, которая соответствует минимуму целевой функции – суммарных приведенных системных затрат на рассматриваемом интервале прогнозирования. Коэффициенты целевой функции включают капитальные затраты, переменные эксплуатационные затраты, постоянные эксплуатационные затраты, затраты, связанные с наложенными ограничениями, штрафы.

В начале 2000-х МАГАТЭ был запущен проект по оказанию помощи странам-участницам в освоении программного пакета энергетического планирования MESSAGE. МАГАТЭ был разработан пользовательский интерфейс для MESSAGE V – последней версии MESSAGE, приобретенной у IIASA. Средствами MESSAGE система может быть описана параметрами разной степени детализации в зависимости от конкретной задачи. Интервал прогнозирования при использовании минимального расчетного шага программы 1 год составляет более 300 лет. Интерфейс программы содержит возможности, которые позволяют описать все переделы ЯТЦ и учесть параметры, необходимые для корректного моделирования ядерных энергосистем: первую загрузку топлива и последнюю выгрузку ОЯТ, задержки ЯТЦ, хранение и захоронение ядерных материалов. Однако MESSAGE является средой моделирования и не включает готовых расчетных схем. Расчетная схема, являющаяся техническим описанием моделируемой системы, разрабатывается пользователем самостоятельно, исходя из конкретной задачи исследования. Приложение возможностей среды моделирования для описания специфики исследуемых систем предполагает разработку методик, обеспечивающих корректную интерпретацию физических особенностей исследуемой системы в терминах MESSAGE.

В **главе II** описана разработанная автором методика подготовки в среде MESSAGE расчетных схем систем ЯЭ с различными вариантами ЯТЦ.

В отраслевой литературе топливная цепочка АЭС с реактором на тепловых нейтронах описывается следующим набором параметров:

W [МВт] – установленная мощность АЭС;

B [МВт·сут/тТМ] – глубина выгорания топлива;

ϕ – коэффициент использования установленной мощности;

η – коэффициент полезного действия АЭС;

x – обогащение топлива;

x_{dep} – обогащение отвалов;

T_{eff} [дни] – эффективная кампания топлива.

В силу особенностей математической формулировки MESSAGE, подразумевающей использование определенных единиц измерения величин, которые формируют матрицу коэффици-

ентов задачи линейного программирования, этот набор параметров не может быть использован напрямую. Хотя MESSAGE предназначен для решения задач оптимизации любых систем, которые могут быть описаны в терминах физических потоков, типичным является использование энергетических единиц измерения потоков между элементами схемы. Специфика моделирования ядерных цепочек состоит в необходимости оперировать в рамках одной расчетной схемы энергетическими единицами и единицами массы. Для корректного описания работы АЭС, этапов топливного цикла и связей между рассматриваемыми объектами при подготовке расчетной схемы необходимо:

- 1) из имеющегося набора физических параметров с помощью известных формул получить значения, характеризующие изменение материальных потоков ядерной цепочки на каждом из этапов ЯТЦ;
- 2) описать связи между элементами расчетной схемы в терминах MESSAGE;
- 3) перевести имеющиеся литературные данные по затратам переделов ЯТЦ в размерности MESSAGE.

Предложенная методика состоит из указаний по подготовке исходных данных, описания особенностей моделирования всех элементов, необходимых для формирования расчетной схемы производного варианта ЯТЦ, и рекомендаций по моделированию связей между выбранными элементами.

Одним из специфических элементов ядерной топливной цепочки является предприятие по обогащению природного урана. Обогащение природного урана – физический процесс, исходным сырьем для которого является природный уран. Но для корректного описания этого процесса в среде MESSAGE необходимо отдельно смоделировать источники двух входящих «сырьевых» потоков – природного урана и ЕРР. Кроме того, элемент расчетной схемы, описывающий этап обогащения природного урана, должен включать дополнительную технологию «хранилище» для учета накопления отвалов. Расчет «коэффициента полезного действия» предприятия по обогащению природного урана и величины потока обедненного урана осуществляется с помощью известных формул, связывающих требуемое обогащение ядерного топлива, расход ЕРР и обогащение отвалов.

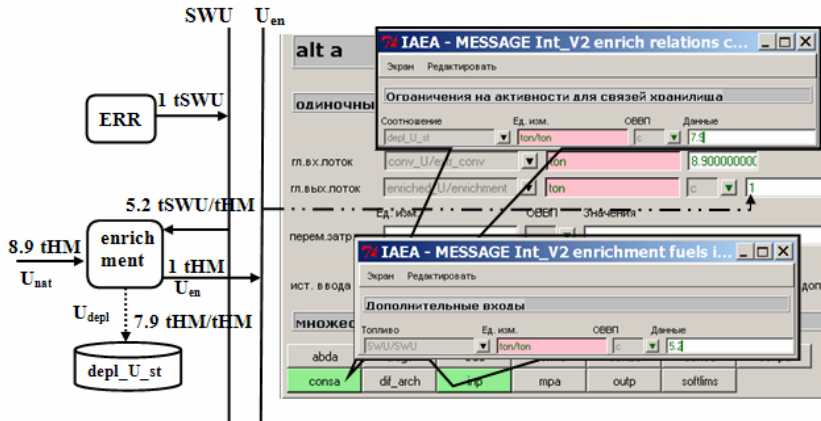


Рис. 1. Элемент расчетной схемы для моделирования обогащения природного урана

На рисунке 1 приведена схема и фрагмент интерфейса MESSAGE с исходными данными, иллюстрирующие предложенный подход к моделированию предприятия по обогащению природного урана.

Таблица 1

Результаты тестовых расчетов по программам DESAE, VISTA и MESSAGE

Рассчитанные значения	DESAE	VISTA	MESSAGE
Природный уран, т	187,5	188,7	188,6
ЕРР, т ЕРР	110,0	110,3	110,2
Обедненный уран, т	166,2	167,6	167,5
Производство топлива, т	21,2	21,1	21,1
Переработка ОЯТ, т	20,2	21,1	21,2
Выделенный Pu, т	0,213	0,215	0,216
Выделенный U, т	19,97	19,9	19,9
Минорные актиноиды, т	0,019	0,02	0,02
Продукты деления, т	0,952	0,981	0,982

Для верификации предложенной автором методики были проведены сравнительные тестовые расчеты по программам DESAE, VISTA и MESSAGE, рекомендованным МАГАТЭ в качестве расчетных инструментов ИНПРО. Приведенные в табл.1 результаты демонстрируют корректность расчета топливных балансов в среде MESSAGE с применением предложенной методики.

В главе III приведены примеры решения разных по постановке задач, иллюстрирующие применение разработанной методики для оценки конкурентоспособности ЯЭ и перспективных ядерных технологий. Расширение области приложения энергетической модели MESSAGE позволяет осуществлять оценку сценариев развития ЯТЦ в соответствии с требованиями, которые предъявляются к современным программным средствам.

В настоящее время в России более половины электроэнергии производится на ТЭЦ, и изменение структуры потребления энергоресурсов в производстве электроэнергии влечет за собой изменение структуры потребления энергоресурсов в производстве тепла. Поэтому в рыночных условиях ЯЭ должна конкурировать с другими энергетическими источниками, предназначенными для производства не только электроэнергии, но и электроэнергии и тепла. Для оценки конкурентоспособности ЯЭ была разработана и реализована расчетная схема ТЭК России, включающая однопродуктовые и двухпродуктовые энерготехнологии. Энергосистема моделировалась на национальном уровне без учета специфических особенностей отдельных регионов и учета передачи энергоресурсов между регионами (газо- и нефтепроводов и линий электропередач). Используя такой подход, можно исследовать энергетический баланс страны в целом, что представляется приемлемым для общей оценки тенденций изменения структуры энергопроизводства и, в частности, производства электроэнергии и тепла при росте цен на первичные энергоресурсы. На основе разработанной обобщенной модели ТЭК России определена оптимальная структура производства электроэнергии и тепла на интервале прогнозирования до 2030 г.

Поскольку основной задачей исследования являлась оценка конкурентоспособности ЯЭ в производстве электроэнергии, этапы производства ядерной электроэнергии смоделированы более подробно, чем производство электроэнергии другими технологиями. В схему ТЭК России включены основные элементы ЯТЦ, которые

определяют масштабы развития ЯЭ страны. В данной схеме не рассматривались импортно-экспортные связи атомного комплекса. Смоделированная в составе модели ТЭК ядерная энергетическая цепочка соответствует открытому топливному циклу реактора ВВЭР-1000.

Выделение ядерной цепочки в модели ТЭК России дает дополнительные возможности анализа конкурентоспособности ядерной энергетики в сравнении с другими способами производства электроэнергии. Моделирование этапов подготовки ядерного горючего от добычи природного урана до выгрузки отработавшего топлива в хранилище позволяет оценить влияние изменения затрат на каждом из переделов ядерного топливного цикла на конкурентоспособность ядерной энергетики.

Расчетная схема включала следующий набор установок для производства электроэнергии и тепла: станции на ископаемом топливе; атомные электростанции; гидроэлектростанции. Рассматривались шесть типов энерготехнологий на органическом топливе: газовые конденсационные станции; угольные конденсационные станции; газо-мазутные ТЭЦ; угольно-мазутные ТЭЦ; угольные котельные; газовые котельные.

Место АЭС в структуре производства электроэнергии определялось принятыми предположениями: 1) о механизме инвестирования в энергогенерирующие предприятия; 2) об изменении цен на энергоресурсы; 3) о технических и экономических характеристиках станций всех рассматриваемых типов; 4) о потребностях в производстве электричества и тепла; 5) о внутреннем потреблении газа и бензина; 6) об обязательствах по экспорту нефти, газа и угля и 7) об ограничениях на добычу углеводородного сырья. Численные значения для задания ограничений линейной задачи были взяты из материалов, подготовленных институтами РАН. Принятый в исследовании прогноз производства электроэнергии и тепла соответствует умеренному варианту развития ТЭК страны («вариант 2000»).

Расчеты показали, что в случае сохранения регулируемых цен на газ при норме дисконта $D = 5\%$ атомная энергетика успешно конкурирует на рынке производства электроэнергии, замещая технологии, потребляющие газ. Доля производства электроэнергии, приходящаяся на АЭС, достигает к 2030 году 38%. Поскольку значительная доля электроэнергии производится ТЭЦ, изменения в

структуре производства электроэнергии сопровождаются изменениями в структуре производства тепла. В производстве тепла газовые технологии вытесняются угольными. К концу интервала прогнозирования около 80% тепла производится за счет сжигания угля. Более жесткие условия финансирования резко снижают конкурентоспособность АЭС. При $D = 10\%$ наращивание производства электроэнергии в оптимальной структуре системы происходит за счет строительства газовых и угольных станций, при этом новые АЭС вводятся только для замещения установок, выработавших свой ресурс. Тепло производится газовыми и угольными установками примерно в равных долях. Изменение предположения о росте цен на газ принципиально меняет сценарий оптимального развития ТЭК России. Если при регулируемых ценах на газ ужесточение условий финансирования приводит к потере конкурентоспособности АЭС, при конкурентных ценах на газ атомная энергетика сохраняет конкурентоспособность и при относительно высоких значениях нормы дисконта. Доля производства электроэнергии, приходящаяся на АЭС при конкурентных ценах на газ, достигает 60%. При переходе к конкурентным ценам конкурентоспособность газовых технологий становится крайне низкой: они обеспечивают около 5% производства электроэнергии и около 15% производства тепла.

Моделирование ядерной цепочки позволяет количественно оценить чувствительность полученного оптимального решения к изменению затрат на каждом из переделов топливного цикла. Для рассматриваемой системы изменение затрат на обогащение природного урана на 20% приводит к изменению оптимальных темпов ввода АЭС примерно на 20% к 2030 г. При том же изменении затрат на производство ядерного топлива темпы строительства АЭС изменяются примерно на 10% к концу интервала прогнозирования. В обоих случаях существует временной интервал роста системы, когда изменение затрат в 20% приводит к изменению решения не более, чем на 5%. Однако чувствительность системы меняется с изменением характеристик, «внешних» относительно ядерной цепочки (в данном случае с ростом цен на газ и уголь).

Обобщенная схема ТЭК России использовалась в исследовании по оценке конкурентоспособности АЭС в республике Беларусь. На первом этапе моделирования межрегионального энергообмена энергетическая модель России и Беларуси разрабатывалась и опти-

мизировалась по отдельности. Затем с помощью специальной процедуры задавались связи, моделирующие взаимное влияние регионов в процессе энергообмена.

С помощью разработанной модели межрегионального энергообмена выполнена оценка перспектив строительства российской АЭС в Беларуси для трех вариантов стратегии развития белорусской энергосистемы: А – развитие энергосистемы с использованием традиционных видов топлив, Б и В – включение в энергосистему АЭС.

Согласно результатам расчетов, строительство двух ядерных энергоблоков мощностью 1000 МВт (вар. Б, цена энергоблока 3,5 млрд. \$) позволяет снизить импорт нефти примерно в 2 раза и импорт газа примерно в полтора раза и несколько уменьшить импорт электроэнергии. При цене энергоблока 2,5 млрд. \$ с вводом трех ядерных энергоблоков (вариант В) экономически оправдано не только снижение потребления импортируемых энергоресурсов, но и полный отказ от импорта электроэнергии к концу рассматриваемого интервала прогнозирования.

Возможность учета региональных особенностей – одно из требований к современным средствам оценки стратегий развития ЯТЦ. Однако в среде моделирования MESSAGE под «регионом» может пониматься любая оптимизационная схема. Так, в качестве двух регионов, между которыми осуществляется обмен материальными потоками, может рассматриваться ТЭК России и ЯЭ с замкнутым ЯТЦ.

Разработанная расчетная схема замкнутого ЯТЦ России содержит основные элементы двухкомпонентной ядерной цепочки. Задача исследования заключалась в оценке предпочтительных сценариев долгосрочного (до 2100 г.) развития ядерной энергосистемы России. Предполагалось, что доступные запасы урана ограничены, и в случае недостаточности этих запасов для замыкания топливного цикла могут вводиться быстрые натриевые реакторы с различными значениями коэффициента воспроизводства (КВ). Существующие АЭС были агрегированы в две группы по типам реакторов: РБМК и ВВЭР. В качестве кандидатов на ввод в развивающуюся систему ЯЭ рассматривались реакторы ВВЭР, ВВЭРм (модифицированный реактор ВВЭР с повышенной глубиной выгорания), БН-800 и три варианта реактора БН-К с КВ = 1,23, 1,34, 1,42 (БН-К-1, БН-К-2, БН-К-3, соответственно). Оптимальные оценки были получены для следую-

щих предположений относительно запасов природного урана: а) «умеренных», равных 1 млн. 200 тыс. тонн (вариант «а»), и б) «оптимистических», равных 1 млн. 600 тыс. тонн (вариант «б»).

Структуру системы ЯЭ, полученную в результате оптимизационных расчетов, в первую очередь определяют имеющиеся запасы природного урана. Расчеты показали, что даже в том случае, если достоверной окажется оптимистическая оценка запасов природного урана, их будет недостаточно для производства требуемого количества электроэнергии. Чтобы обеспечить нужное количество топлива, в структуру системы включаются наработчики вторичного ядерного топлива (табл. 2). В варианте «б» для соблюдения топливного баланса достаточно ввести реакторы БН-К-1. При меньших запасах урана в варианте «а» требуется технология с более высоким КВ, и в систему включаются реакторы БН-К-2. Реактор БН-К-3, имеющий предельно высокий КВ, при заданном спросе на ядерную электроэнергию не включается в оптимальную структуру системы ЯЭ.

Таблица 2

Динамика ввода мощностей (вар. «а» / вар. «б»), ГВт

	РБМК	ВВЭР	ВВЭРм	БН-800	БН-К-1	БН-К-2	БН-К-3
2009-2015	0/0	8/8	0/0	0.87/0.87	0/0	0/0	0/0
2016-2025	0/0	0/0	27/27	0/0	4/4	0/0	0/0
2026-2035	0/0	0/0	25/25	0/0	1/1	0/0	0/0
2036-2045	0/0	0/0	24/24	0/0	0/0	0/0	0/0
2046-2055	0/0	0/0	18/22	0/0	4/0	0/0	0/0
2056-2065	0/0	0/0	15/25	0/0	14/4	0/0	0/0
2066-2075	0/0	0/0	0/18	0/0	9/3	12/0	0/0
2076-2085	0/0	0/0	0/10	0/0	7/39	43/0	0/0
2086-2095	0/0	0/0	0/0	0/0	9/46	36/0	0/0

Благодаря разработанной автором методике детального моделирования ЯТЦ, для рассчитанной оптимальной структуры производства ядерной электроэнергии могут быть получены основные характеристики ЯТЦ, традиционно используемые в оценках сценариев развития ЯЭ: расход природного урана, объемы накопленного ОЯТ, потребности в услугах по обогащению и переработке (рис. 2),

потребности в производстве топлива для рассматриваемых типов реакторов, потребности в мощностях смежных производств, количество выделенного при переработке P_u .

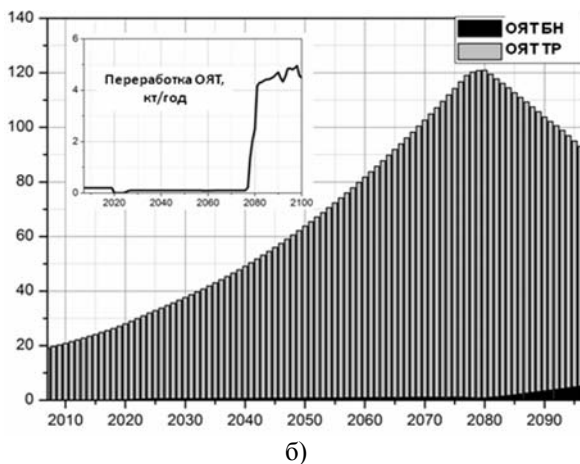
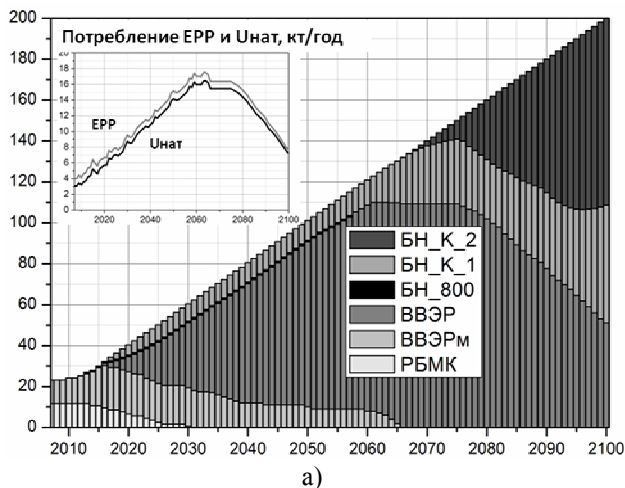


Рис. 2. Результаты оптимизации: а) оптимальная структура установленных мощностей ЯЭ (ГВт), годовое потребление ЕРР и природного урана (кт/год); б) накопление ОЯТ и потребности в услугах по переработке ОЯТ (кт/год)

Анализ характеристик ЯТЦ, полученных в результате оптимизационных расчетов, может показать, что решение, оптимальное с точки зрения минимизации системных затрат, не удовлетворяет другим критериям выбора наиболее приемлемого варианта стратегии развития ЯТЦ. Дополнительные критерии оценки ЯТЦ могут быть введены в модель в виде критериальных ограничений.

В главе IV продемонстрировано применение метода критериальных ограничений в среде MESSAGE для задач оптимизации структуры глобальной ядерной энергетики. Показано, что наиболее приемлемым решением, которое удовлетворяет критерию минимума приведенных системных затрат и одновременно удовлетворяет ограничениям по запасам природного урана, оценке перспектив рынка технологий тепловых реакторов и требованию к нераспространению технологии переработки ОЯТ, является переход к замкнутому U-Pu-Th топливному циклу.

В среде энергетического планирования MESSAGE были разработаны расчетная схема ОЯТЦ и следующие расчетные схемы ЗЯТЦ:

U-Pu ЗЯТЦ с реакторами LWR, HWR и их усовершенствованными прототипами (ALWR и ACR), а также реакторами с быстрым спектром – наработчиком (AFR(MOX)) и выжигателем (BR) плутония;

U-Pu-Th ЗЯТЦ: U-Pu ЗЯТЦ, дополненный быстрым бридером с плутониевой активной зоной и ториевым бланкетом (AFR(Th)) и легководным реактором на ^{233}U (ALWR(^{233}U)). Это один из вариантов смешанного топливного цикла, в котором ^{233}U для загрузки тепловых реакторов нарабатывается в ториевых бланкетах быстрых реакторов с MOX топливом в активных зонах.

В исследовании использовались технические характеристики тепловых и быстрых реакторов из баз данных моделей NFCSS (VISTA) и DESAE.

Оптимизационные расчеты показали, что при отсутствии ограничения на запасы природного урана при принятых в задаче предположениях не происходит перехода к ЗЯТЦ. Для загрузки и подпитки легководных и тяжеловодных реакторов рассматриваемой системы необходимо около 33000 кт природного урана до конца века. Это вдвое больше, чем величина традиционных категорий запасов природного урана по классификации МАГАТЭ. Чтобы обес-

печить эту систему топливом, потребуется увеличить годовую добычу природного урана и производство ЕРР примерно в 4 раза к середине века.

Введение критериального ограничения на запасы природного урана (16 млн. т – традиционные запасы) приводит к замыканию ЯТЦ. Доля быстрых реакторов в полученной системе превышает 60% к 2100 г., в то время как на долю стран, планирующих развитие быстрых технологий, приходится 40–60% мирового производства ядерной энергии. Таким образом, такая структура мировой ЯЭ, будучи оптимальной с экономической точки зрения, является нежелательной с точки зрения распространения технологии переработки ОЯТ. Столько быстрых реакторов не может быть размещено в странах, планирующих развитие замкнутого ЯТЦ, даже если предположить, что вся ядерная энергия в этих странах будет производиться быстрыми реакторами. Исходя из приведенных выше рассуждений, в модель было введено критериальное ограничение на долю быстрых реакторов. В последующих итерациях оптимизационных расчетов предполагалось, что быстрыми реакторами будет производиться не более 40% мировой ядерной энергии.

Для всех рассмотренных вариантов энергосистемы с ограничением доли быстрых реакторов доля реакторов АСР составила не менее 60% к 2100 г. Иначе говоря, к концу века технология АСР производит всю электроэнергию, приходящуюся на тепловые реакторы. Такой результат вряд ли можно считать реалистичным, принимая во внимание многообразие конструкций тепловых реакторов, представленных на рынке. Чтобы учесть это обстоятельство и соответствующим образом ограничить область допустимых решений задачи, модель была дополнена критериальным ограничением, согласно которому доля реакторов АСР в глобальной системе производства ядерной электроэнергии не может превышать 30% ее общего производства. Расчеты показали, что не существует решения, удовлетворяющего одновременно ограничению доли быстрых реакторов и доли реакторов АСР в U-Pu ЯТЦ.

В условиях ограниченности запасов урана и ограничений на долю быстрых и тяжеловодных реакторов доля тепловых реакторов может быть увеличена, если ввести в список технологий-кандидатов тепловой реактор на ^{233}U , т.е. разрешить переход к U-Pu-Th ЯТЦ (рис. 3).

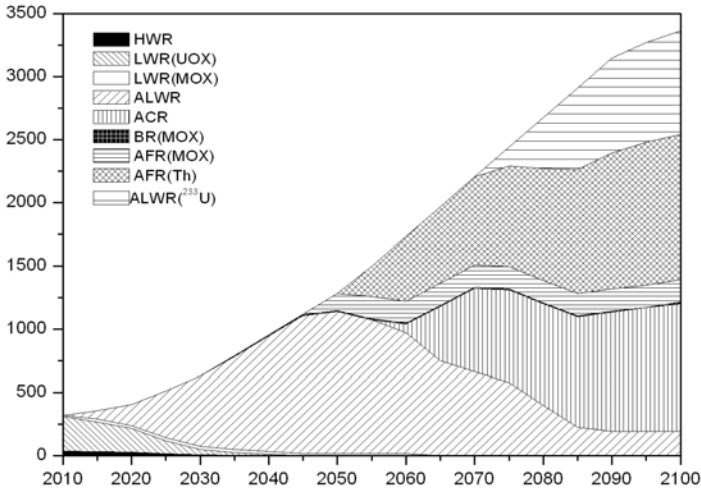


Рис. 3. Оптимальная структура производства ядерной электроэнергии, ГВт-год (запасы природного урана не превышают 16 млн. т, доля ACR не превышает 30%, доля быстрых реакторов не превышает 40%)

В **заключении** перечислены основные результаты выполненной работы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Выполнен обзор методологических подходов и программных средств, используемых для оценки стратегий развития ядерных энергосистем, и сформулированы требования, которые предъявляются к средствам расчетных исследований ЯЭ и ЯТЦ на современном этапе перехода к масштабному развитию ЯЭ.

2. Разработана методика подготовки расчетных схем предприятий ОЯТЦ и ЗЯТЦ и связей между ними, которая обеспечивает адекватное описание средствами среды моделирования MESSAGE особенностей работы АЭС и предприятий топливного цикла и корректное формирование балансов ядерных материалов.

3. Разработана и реализована расчетная схема упрощенной модели ТЭК России, учитывающая спрос на производство электроэнергии и тепла. Показано, что моделирование ядерной цепочки в составе расчетной схемы ТЭК позволяет оценить влияние затрат на каждом из этапов ЯТЦ на конкурентоспособность ЯЭ.

4. С использованием разработанной модели и расчетной схемы межрегионального энергообмена выполнена оценка перспектив строительства российских АЭС в Республике Беларусь.

5. Выполнены оценки вариантов оптимальной структуры замкнутого ЯТЦ России, включающего быстрые натриевые реакторы с различными коэффициентами воспроизводства, для разных предположений о масштабах развития ЯЭ и запасах природного урана, которые иллюстрируют возможности применения разработанной расчетной схемы для задач прогнозирования развития ЯТЦ.

6. Разработаны и реализованы расчетные схемы для оценки сценариев развития глобальной ЯЭ: с открытым топливным циклом; замкнутым U-Pu топливным циклом; замкнутым U-Pu-Th топливным циклом. Продемонстрировано применение метода критерияльных ограничений для поиска наиболее приемлемой структуры глобальной ЯЭ, удовлетворяющей нескольким критериям. Показано, что наиболее приемлемым решением, которое удовлетворяет критерию минимума приведенных системных затрат и одновременно удовлетворяет ограничениям по запасам природного урана, оценке перспектив рынка технологий тепловых реакторов и требованию к нераспространению технологии переработки ОЯТ, является переход к замкнутому U-Pu-Th топливному циклу. Оценено влияние предположения о глубине переработки природного урана на полученные решения. Показано, что изменение предположения о глубине переработки природного урана приводит к изменению оптимальной структуры ЯТЦ, но не влияет на основные выводы исследования.

Публикации по теме диссертации

В рецензируемых журналах из списка ВАК:

1. Федорова Е.В. Применение программы MESSAGE для моделирования межрегионального энергообмена / Е.В. Федорова, Т.Г. Зорина // Известия вузов. Ядерная энергетика. №4, 2004 – С. 3–11.

2. Андрианов А.А. Оценка эффективности реакторов малой и средней мощности для Республики Саха (Якутия) / А.А. Андрианов, Ю.А. Коровин, Е.В. Федорова // Известия вузов. Ядерная энергетика. №4, 2005. – С. 40–51.

3. Андрианов А.А. Сравнительный анализ методов и инструментальных средств моделирования открытого и замкнутого топливных циклов: MESSAGE и DESAE / А.А. Андрианов, Ю.А. Коровин, В.М. Муругов, Е.В. Федорова, Г.А. Фесенко // Известия вузов. Ядерная энергетика. №2, 2006. – С. 82–89.

4. Андрианов А.А. Применение программного комплекса MESSAGE для задач оптимизации двухкомпонентной структуры крупномасштабной ядерной энергетики / А.А. Андрианов, М.Н. Бок, В.В. Коробейников, Ю.А. Коровин, Е.В. Федорова // Известия вузов. Ядерная энергетика. №3, 2007. – С. 20–25.

5. Андрианов А.А. Оптимизационные исследования структуры ядерной энергетики России с реакторами на тепловых и быстрых нейтронах с использованием пакета MESSAGE / А.А. Андрианов, В.В. Коробейников, Е.В. Поплавская, Е.Н. Рачкова, Е.В. Федорова // Известия вузов. Ядерная энергетика. №2, 2010 – С. 156–164.

6. Андрианов А.А. Метод критериальных ограничений в задачах оптимизации структуры глобальной ядерной энергетики в среде MESSAGE / А.А. Андрианов, Ю.А. Коровин, Е.В. Федорова // Известия вузов. Ядерная энергетика. №2, 2010. – С. 165–175.

В других изданиях:

7. Fedorova E. Closed Nuclear Fuel Cycles with Fast Reactors: Scenarios of Worldwide Nuclear Power Expansion / E. Fedorova, Yu. Korovin, A. Andrianov // Proceedings of GLOBAL-2009. – Paris, France, 2009. – P. 2692–2699.

8. Федорова Е.В. Опыт применения программы MESSAGE для моделирования ядерной энергетики России / Е.В. Федорова, Е.Ю. Станковский, Ю.А. Коровин // Планирование развития энергетики: методология, программное обеспечение, приложения (ENERGY STRAT-2004): тез.докл. 2-ой международной конференции. – Москва: ЦНИИ АТОМИНФОРМ, 2004. – С. 21.

9. Андрианов А.А. Оценка эффективности реакторов малой и средней мощности для Республики Саха (Якутия) / А.А. Андрианов, Ю.А. Коровин, Е.В. Федорова // Безопасность АЭС и подготовка кадров: тезисы докладов 9-ой международной конференции. – Обнинск: ИАТЭ, 2005. – С.65.

10. Федорова Е.В. Исследование перспектив развития ЯЭ в топливно-энергетическом балансе России на период до 2020 г. с при-

менением нового программного пакета МАГАТЭ MESSAGE / Е.В. Федорова, И.О. Прокопенко // «Энергетика-3000»: тез.докл. Международного конгресса. – Обнинск: ИАТЭ, 2002. – С. 31.

11. Федорова Е.В. Оценка роли ядерной энергетики в системе мер по ограничению выбросов парниковых газов / Е.В. Федорова, Ф.В. Веселов, О.Н. Семенова // Безопасность АЭС и подготовка кадров: тез.докл. 7-ой международной конференции. – Обнинск: ИАТЭ, 2001. – С. 117–118.

Компьютерная верстка Е.В. Федорова

ЛР № 020713 от 27.04.1998

Подписано к печати

Формат бумаги 60×84/16

Печать ризограф.

Бумага МВ

Печ. л. 1,5

Заказ №

Тираж 60 экз.

Цена договорная

Отдел множительной техники ИАТЭ

249035, г. Обнинск, Студгородок, 1