

На правах рукописи

Уланов Дмитрий Валерьевич

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГЛОБАЛЬНЫХ ПОТОКОВ ЯДЕРНЫХ
МАТЕРИАЛОВ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ВАРИАНТАХ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ
ЯДЕРНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Специальность 05.13.01 – системный анализ, управление и обработка
информации (в информационных системах)

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Автор:



Москва – 2013

Работа выполнена
в Национальном исследовательском ядерном университете «МИФИ»

Научный
руководитель

доктор технических наук, профессор,
НИЯУ МИФИ, заведующий кафедрой
«Анализ конкурентных систем»
Оныкий Борис Николаевич

Официальные
оппоненты

доктор технических наук, НИЦ
«Курчатовский институт», заместитель
директора научно-технологического
комплекса «Электроника»
Румянцев Александр Николаевич
кандидат технических наук, ОАО
«Концерн «Системпром», начальник
управления планирования, координации
и сопровождения научных исследований
Горелкин Георгий Александрович

Ведущая организация

Институт проблем информатики
Российской академии наук (ИПИ РАН),
г. Москва

Защита состоится «20» ноября 2013 г. в 15 час. 00 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.130.03 при Национальном исследовательском ядерном университете «МИФИ» по адресу Москва, 115409, Каширское шоссе, 31.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ».

Просим принять участие в работе совета или прислать Ваши отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенных печатью Вашей организации, по указанному адресу на имя ученого секретаря специализированного совета.

Автореферат разослан «30» сентября 2013 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор технических наук, доцент



Леонова Н.М.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В настоящее время приобретают актуальность комплексные количественные исследования по оценке перспектив развития ядерной энергетики (ЯЭ) путем имитационного моделирования динамики развития мировой ЯЭ при различных вариантах использования как существующих, так и инновационных ядерно-энергетических систем (ИЯЭС). В последние годы в отношении к ЯЭ просматривается очевидная тенденция осознания ее значимости в качестве стабильного и эффективного энергоресурса. Сейчас, по данным Международного агентства по атомной энергии (МАГАТЭ), более тридцати стран, не имеющих ЯЭ и необходимой инфраструктуры ядерного топливного цикла (ЯТЦ), рассматривают возможность строительства атомных электростанций (АЭС).

Для современной ЯЭ характерно взаимовыгодное сотрудничество на международном рынке ядерных услуг, что было невозможно в 60-70х годах XX века из-за стремления ядерных держав самостоятельно развивать ядерную отрасль без взаимодействия с окружающим миром. Сложившиеся условия интеграции позволяют «странам-новичкам», решившим развивать ЯЭ, консолидировать и использовать НИОКР, знания и опыт развитых стран для эффективного включения ЯЭ в национальную структуру энергопотребления.

С целью сокращения затрат и повышения эффективности использования ресурсов атомные промышленные компании объединяют усилия на международном уровне для поиска общих решений. Принимая во внимание сложность производства оборудования для АЭС, отсутствие в развивающихся странах необходимых промышленных мощностей, инфраструктуры и кадровых ресурсов для обеспечения эффективного функционирования ЯТЦ, атомные корпорации фактически перешли на поставку атомных блоков «под ключ», взяв на себя все технические и коммерческие риски по сдаче АЭС в эксплуатацию по оговоренным ценам в обозначенный срок.

В данных условиях важную роль играет МАГАТЭ, под эгидой которого развивается глобальное использование ядерной энергии и осуществляется содействие развивающимся странам в доступе к передовым мирным ядерным технологиям. Показательным примером глобализации ЯЭ является Китай, на территории которого будут эксплуатироваться канадские, российские, французские и американские ядерные технологии, а сам Китай, в свою очередь, оказывает помощь Пакистану и Бангладеш в разработке и развитии ядерных программ.

В среднесрочной перспективе многие государства рассчитывают использовать в своем энергетическом балансе установки ЯЭ четвертого поколения. Эти ИЯЭС в соответствии с требованиями МАГАТЭ должны будут отвечать следующим основополагающим условиям: быть ресурсообеспеченными, малоотходными и экономически эффективными; поддерживать необходимый уровень безопасности и надежности; обеспечивать устойчивость нераспространения ядерного оружия и надежную физическую защиту делящихся материалов.

Таким образом, приходим к выводу, что к началу XXI века в развитии ЯЭ в мире сложилась новая геополитическая, экономическая и технологическая ситуация. Вследствие изменившейся объективной обстановки резко выросла актуальность исследования динамики развития ЯЭ как целостной мировой системы, а также выделения и исследования кластеров этой системы по характеристикам полноты ядерного топливного цикла (ЯТЦ) и технологического уровня его компонент. В этом случае задачи системного исследования сводятся к анализу взаимного влияния таких показателей, как установленные энергетические мощности АЭС, материальные потоки ЯТЦ, защита от нераспространения, обращение с отработавшим ядерным топливом (ОЯТ) и радиоактивными отходами, ядерная и физическая безопасность установок. Исследование перечисленных компонент и их взаимного влияния дает возможность прогнозировать облик ЯЭ будущего.

В этой связи в данной работе с помощью методов системного анализа и имитационного моделирования проведены исследования системных связей и закономерностей функционирования ЯЭ, ориентированные на повышение эффективности использования объектов ЯЭ и ИЯЭС в рамках ЯТЦ.

Принимая во внимание, что ЯЭ является сложной технико-экономической системой, практические исследования по описанной выше актуальной проблематике не могут быть выполнены без специального научно-методического и современного программно-технического инструментария. Более того, этот инструментарий должен быть одобрен учеными и специалистами в области ЯЭ и, в конечном счете, признан и сертифицирован МАГАТЭ. Поэтому в данной работе изучены и использованы системы компьютерного моделирования, поддерживаемые и рекомендуемые МАГАТЭ (NFCSS, MESSAGE, DESAE).

Результаты, полученные в диссертации, основаны на работах ведущих отечественных и зарубежных специалистов по направлению системного анализа и разработки имитационных моделей развивающихся систем ЯЭ для анализа вопросов топливообеспечения и нераспространения, в числе которых: В.И. Усанов, Е.В. Поплавская, Г.А. Фесенко, В.В. Кузнецов, В.Н. Лысаков, В.С. Каграманян, В.Ф. Цибульский, С.А. Субботин, А.Н. Румянцев, Д. Вилер, Б. Диксон, Г. Ван ден Ейнде, Р. Синха, Д. Карлсон, Х. Хаяши, Р. Калабрезе и другие. Однако применение работ перечисленных авторов потребовало существенной адаптации к решаемым автором задачам и их дальнейшего развития.

Объектом исследования данной работы является сложная развивающаяся система мировой ЯЭ, включающая в себя такие стадии ЯТЦ, как начальный этап (добыча урана, конверсия, обогащение, фабрикация топлива), эксплуатация ядерно-энергетических систем и электрогенерация, а также конечный этап (вывод из эксплуатации, обращение с РАО и ОЯТ).

Предмет исследования – глобальные потоки ядерных материалов при различных вариантах использования ядерно-энергетических систем в зависимости от вида ЯТЦ и реакторного парка.

Методы исследования – методы системного и сенситивного анализа, а также имитационное моделирование с использованием информационных систем МАГАТЭ и верифицированных средств анализа и обработки информации.

Целью работы является моделирование и анализ материальных потоков открытого и замкнутого ЯТЦ (на основе быстрых реакторов), определение потенциальной роли в двухкомпонентной структуре ЯЭ таких ИЯЭС, как жидкосолевые реакторы и подкритические электроядерные установки, направленные на трансмутацию минорных актинидов, а также исследование системных связей и закономерностей функционирования ЯЭ, ориентированное на повышение эффективности использования энергоресурсов с применением современных методов обработки информации.

Исходя из цели, **задачами** исследования стали:

- определение спроса на ЯЭ в XXI веке;
- разработка имитационных моделей и сценарных схем развития ЯЭ с учетом освоения ИЯЭС в соответствии с негеографическим принципом;
- разработка алгоритма проведения вычислительных экспериментов, оптимизации распределения установленных мощностей ядерно-энергетических систем и визуализации полученных результатов;
- расчет с помощью верифицированных программных средств, анализ и сопоставление материальных потоков в рамках ЯТЦ в соответствии с определенными показателями и критерием эффективности развития ЯЭ.

Научная новизна работы:

- разработаны оригинальные гомогенные и гетерогенные имитационные модели для вариантного анализа развития ЯЭ при реализации существующих и будущих проектов на основе ИЯЭС;
- созданы и описаны сценарные схемы передвижения глобальных материальных потоков в ЯТЦ в среде моделирующих инструментов энергетического планирования МАГАТЭ (NFCSS, DESAE и MESSAGE), подробно отражающие структуру и организацию ЯТЦ, а также позволяющие их пополнение дополнительными элементами;
- проведены вычислительные эксперименты на основе разработанного алгоритма с использованием гомогенных и гетерогенных моделей и сценарных схем, а также определены значения характеристик материальных потоков и оптимизированы необходимые мощности предприятий ЯТЦ в различных структурах ЯЭ на глобальном уровне;
- проведен сенситивный анализ с целью определения чувствительности основных показателей модели к изменению параметров моделирования и сценарных условий;
- количественно охарактеризованы на основании критерия эффективности потребности ЯЭ в природном уране в зависимости от выбранного сценария, а также определена потенциальная роль жидкосолевых реакторов и подкритических электроядерных установок в двухкомпонентной структуре ЯЭ.

Теоретическая значимость работы:

- определены прогнозы спроса на электроэнергию, генерируемую за счет ЯЭ, в XXI веке на основе данных МАГАТЭ, АЯЭ ОЭСР, Межправительственной комиссии по изменению климата, Всемирной ядерной ассоциации, Международного энергетического агентства;
- разработаны имитационные гомогенная и гетерогенная модели развития ЯЭ в соответствии с негеографическим принципом, учитывающие внедрение и освоение ИЯЭС;
- разработан алгоритм проведения вычислительных экспериментов, оптимизации распределения установленных мощностей ядерно-энергетических систем и визуализации полученных результатов;
- определены условия формирования сбалансированной по плутонию структуры топливообеспечения ЯЭ на глобальной гомогенной и гетерогенной групповой основе при наличии в структуре необходимых служб обращения с топливом как тепловых, так и быстрых реакторов;
- разработаны сценарные схемы передвижения глобальных материальных потоков в ЯТЦ и выявлена вероятная динамика их изменений в зависимости от выбранных условий и направлений развития ЯЭ;
- выполнена оценка влияния модификаций ЯТЦ и стратегий обращения с делящимися материалами на основные показатели развития ЯЭ: распределение ядерных установленных мощностей в соответствии со спросом на ЯЭ, ежегодный кумулятивный спрос на природный уран, потребности в обогащении, количество выгружаемого и перерабатываемого ОЯТ, баланс по плутонию и изменение аккумуляции минорных актинидов;
- проведен чувствительный анализ с целью определения чувствительности модели к изменению параметров моделирования как для сценариев с существующими коммерческими реакторами, так и с реакторами на быстрых нейтронах;
- определены потенциальная роль ИЯЭС (реакторы на быстрых нейтронах, жидкосолевые реакторы и подкритические электроядерные установки) в двухкомпонентной структуре ЯЭ на основе применения введенного критерия эффективности и при условии доступности и конкурентоспособности данных технологий.

Практическая значимость работы:

- разработаны и верифицированы в среде моделирующих программных комплексов NFCSS, MESSAGE и DESAE детальные схемы передвижения ядерных материальных потоков в ЯТЦ, использование которых в аналитических и прогнозных исследованиях позволяет отказаться от упрощений описания ЯТЦ и повысить, в конечном счете, эффективность и достоверность проводимых на их основе оценок развития ЯЭ в национальном, региональном и глобальном масштабах;
- разработанные схемы и результаты вычислительных экспериментов представлены в технических документах МАГАТЭ высокого уровня (IAEA Nuclear Energy Series);

- результаты работы использованы для оптимизации и совершенствования моделирующих инструментов энергетического планирования NFCSS, DESAE и MESSAGE;

- результаты моделирования позволяют оценить потенциальную роль, эффективность и влияние инновационных иностранных и российских технологий на развитие ЯЭ в мире (в частности, таких как прототип демонстрационного российского реактора БН-800, прототип индийского реактора PFBR, прототип японского коммерческого быстрого реактора, прототип Европейской установки для промышленной трансмутации EFIT);

- результаты диссертации использованы для обоснования позиции Государственной корпорации по атомной энергии «Росатом» и дочерних предприятий в проектах по продвижению российских технологий на мировые рынки ядерных услуг;

- полученный в работе опыт моделирования может быть использован для совершенствования образовательного процесса при подготовке специалистов в области системного анализа.

Личный вклад соискателя:

- разработан алгоритм проведения вычислительных экспериментов и оптимизации распределения ядерно-энергетических мощностей по реакторным технологиям в зависимости от заданных условий;

- разработаны имитационные модели и сценарные схемы развития ЯЭ в соответствии с негеографическим принципом на основе внедрения и освоения ИЯЭС, реализованные в среде моделирующих инструментов энергетического планирования NFCSS, DESAE и MESSAGE;

- проведены обширные вычислительные эксперименты для определения значения характеристик материальных потоков и необходимых мощностей предприятий ЯТЦ в различных структурах ЯЭ;

- проведены оптимизация и количественный сравнительный анализ вариантов развития ЯЭ в рамках глобальных гомогенных и гетерогенных моделей, а также осуществлен чувствительный анализ показателей развития ЯЭ;

- рассчитаны потребности ЯЭ в ресурсах (природный уран, мощности обогащения и переработки) и определена потенциальная роль жидкосолевых реакторов и подкритических электроядерных установок в двухкомпонентной структуре ЯЭ в качестве ИЯЭС по трансмутации минорных актинидов;

- визуализированы с помощью компьютерных методов обработки информации все числовые результаты, полученные в рамках моделирования.

На защиту выносятся:

- имитационные гомогенные и гетерогенные модели развития ЯЭ, построенные в соответствии с негеографическим принципом на основе внедрения и освоения ИЯЭС;

- алгоритм проведения вычислительных экспериментов и оптимизации распределения ядерно-энергетических мощностей;

- сценарные схемы передвижения материальных потоков ЯТЦ, разработанные в среде инструментов энергетического планирования NFCSS, DESAE и MESSAGE, одобренных и сертифицированных МАГАТЭ;
- результаты вычислительных экспериментов открытых и замкнутых ЯТЦ в соответствии с введенными показателями развития ЯЭ и критерием эффективности;
- результаты изучения потенциальной роли таких ИЯЭС, как реакторы на быстрых нейтронах, жидкосольевые реакторы и подкритические электроядерные установки с точки зрения повышения эффективности функционирования ЯЭ.

Информационная база исследования:

- аналитические, статистические материалы и базы данных по энергетическим реакторам и технологиям ЯТЦ авторитетных международных организаций: МАГАТЭ, Агентство по ядерной энергии Организации экономического сотрудничества и развития (АЯЭ ОЭСР), Всемирная ядерная ассоциация, Международное энергетическое агентство;
- данные национальных министерств и ведомств, ответственных за развитие ЯЭ: Госкорпорация «Росатом», Комиссия по ядерному регулированию США, Департамент энергетики США, Комиссариат по атомной энергии Франции, Японское агентство по атомной энергии;
- отчеты российских и зарубежных научно-исследовательских институтов, занимающихся вопросами развития ЯЭ: РИЦ «Курчатовский институт», ФГУП «ГНЦ РФ – ФЭИ», ОАО «ГНЦ НИИАР», Центр атомных исследований им. Индиры Ганди, Национальная лаборатория Айдахо и др.

Достоверность и адекватность результатов работы подтверждена:

- использованием информационных систем МАГАТЭ, включая базы данных и сертифицированные инструментальные программно-технические средства энергетического планирования (NFCSS, DESAE и MESSAGE);
- использованием в качестве исходных данных для моделирования официальных аналитических и статистических материалов авторитетных международных, национальных и исследовательских организаций;
- сопоставлением и согласованностью результатов моделирования с ранее опубликованными материалами в научных изданиях;
- апробацией результатов на международных технических совещаниях и семинарах МАГАТЭ и их публикацией в официальных технических документах МАГАТЭ высокого уровня.

Апробация работы

Результаты работы доложены и одобрены на трех международных технических совещаниях МАГАТЭ:

- совещание Международного проекта МАГАТЭ по инновационным ядерным реакторам и топливным циклам (ИНПРО) (Вена, Австрия, 2010);
- совещание МАГАТЭ «Совершенствование программного кода NFCSS» (Вена, Австрия, 2010);

- совещание МАГАТЭ «Глобальная архитектура инновационных ядерных систем на основе тепловых и быстрых реакторов с использованием замкнутого ЯТЦ» (Кадараш, Франция, 2010).

Результаты работы неоднократно докладывались на Научной сессии МИФИ (2008, 2009, 2012, 2013 годов) и на научных семинарах кафедры «Анализ конкурентных систем» НИЯУ МИФИ.

Результаты работы внедрены и использованы (Акты о внедрении МАГАТЭ от 22.03.2013 и Госкорпорации «Росатом» от 15.03.2013) в Международном проекте МАГАТЭ по инновационным ядерным реакторам и топливным циклам и в Департаменте международного сотрудничества Государственной корпорации по атомной энергии «Росатом».

Публикация результатов диссертации. Основные научные положения диссертации представлены в 15 работах, в том числе:

- 3 статьи в научных рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК Минобрнауки России;
- 2 официальных технических отчета МАГАТЭ высокого уровня;
- 3 доклада на международных технических совещаниях МАГАТЭ;
- 6 статей в сборниках научных трудов Научной сессии МИФИ;
- 1 научный отчет кафедры «Анализ конкурентных систем» НИЯУ МИФИ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав основного текста, заключения, библиографического списка, включающего в себя 107 наименований. Работа изложена на 195 страницах с 102 иллюстрациями, 18 таблицами и приложениями на 39 страницах.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цели и задачи исследования, перечислены основные положения, выносимые на защиту, показана научная новизна полученных результатов и их практическая значимость, приведены сведения об апробации результатов, публикациях, структуре и объеме работы.

В первой главе проведен обзор и структуризация источников достоверной информации для решения конкретных вопросов моделирования мировой ЯЭ как целостной системы и формирования базы достоверных данных для последующих вычислительных экспериментов.

В частности, изучены роль и значение ЯЭ как в мировом энергетическом балансе, так и на национальных уровнях. Проанализированы планы ряда стран, эксплуатирующих АЭС (Аргентина, Армения, Бразилия, Болгария, Великобритания, Канада, Китай, Индия, Пакистан, Россия, Румыния, США, Словакия, Украина, Франция, Чехия, Южная Корея, ЮАР), по увеличению доли ЯЭ в общем энергетическом балансе, а также планы более 30 «стран-новичков» по строительству АЭС. На основе проведенного анализа сделан вывод о том, что строительство наибольшего числа реакторов запланировано в азиатском регионе, т.к. именно здесь расположены страны с быстро развивающейся экономикой и, соответственно, с быстро растущими энергопотребностями.

В главе отмечено, что многие аспекты ЯЭ, связанные с обеспечением безопасности, изменением климата и нераспространением, носят международный характер, поэтому важную роль в обеспечении мирного и безопасного развития ЯЭ играют такие международные организации, как МАГАТЭ и Всемирная Ассоциация Операторов АЭС. Кроме того, высокая научно- и капиталоемкость, а также необходимость использования передовых инновационных технологий требуют объединения сил на международном уровне, что приводит к слияниям и объединениям ряда национальных компаний в единые транснациональные структуры.

Особое внимание уделено анализу инициатив, направленных на продвижение международного сотрудничества в области развития ЯЭ и нацеленных на разработку новых ядерных систем, включая реакторы и топливные циклы (ИНПРО, Международный форум «Поколение-IV», IFNЕС), импульсом для реализации которых послужили одни и те же потребности стран в постепенном переходе от использования углеводородного топлива к более широкому использованию альтернативных источников энергии.

В главе подробно проанализированы существующие проекты и исследования в области анализа и моделирования динамики развития ЯЭ на национальном, региональном и международном уровнях:

- Международная оценка ядерного топливного цикла (International Nuclear Fuel Cycle Evaluation - INFCE);
- Совместные исследования инновационных ядерных систем закрытого ЯТЦ на основе быстрых реакторов в рамках проекта МАГАТЭ ИНПРО;

- Совместное исследование МАГАТЭ в рамках проекта ИНПРО «Развитие ядерной энергетики в XXI веке: глобальные сценарии и региональные тренды»;
- Проект Red-Impract по изучению влияния технологий деления, переработки и трансмутации на конечное захоронение отходов;
- Европейский план действий по делению и трансмутации для устойчивого развития атомной энергетики (PATEROS);
- Исследования в рамках АЯЭ ОЭСР.

Проведенный анализ перечисленных работ выявил, что основное внимание в рамках исследований уделялось либо отдельно взятым проблемам ЯТЦ (например, проблеме деления и трансмутации отходов в рамках проекта PATEROS), либо анализу и моделированию систем ЯЭ, которые основывались на географическом принципе деления стран (как, например, в рамках исследования МАГАТЭ «Развитие ядерной энергетики в XXI веке: глобальные сценарии и региональные тренды»), что не учитывает влияние региональной неравномерности развития ЯЭ на итоговые результаты моделирования.

Таким образом, материал первой главы позволил определить место ЯЭ в мировой структуре энергопотребления, обозначил основные тенденции по консолидированию усилий на международном уровне в области развития ЯЭ и выявил недостатки существующих подходов к моделированию развития национальных и глобальных систем ЯЭ.

Во второй главе разработаны и описаны модели глобальной системы ЯЭ для проведения вычислительных экспериментов при следующих предположениях:

- Гомогенная модель рассматривает мир в качестве единого целого с обобщенной историей и совместными путями развития. В этой модели вся ядерная инфраструктура рассматривается как единый парк ядерных установок, начиная от обобщенной добычи урана, конверсии, обогащения, парка ядерных реакторов, переработки и заканчивая совместным захоронением ядерных отходов.
- Гетерогенная модель описывает мир, основанный на уверенности его участников в своих силах и сохранении местной идентичности. В данной модели учитываются разные уровни доступности ископаемых ресурсов, темпы роста потребностей в электроэнергии, а также скорость развертывания ЯЭ. Определение регионов в данной модели происходит не по географическому принципу, а по условиям и состоянию развития ЯЭ в отдельно взятых группах.

Гомогенный мир подразумевает сотрудничество между всеми участниками, в то время как гетерогенный мир можно рассматривать с двух точек зрения: либо полное отсутствие взаимодействия между группами, либо разные уровни взаимодействия с применением разных технологий и стратегий ЯТЦ. В этой связи гомогенный мир моделируется как одна мировая группа, а гетерогенный мир – как несколько либо невзаимодействующих друг с другом групп, либо как взаимодействующих на определенных условиях групп (рисунок 1).

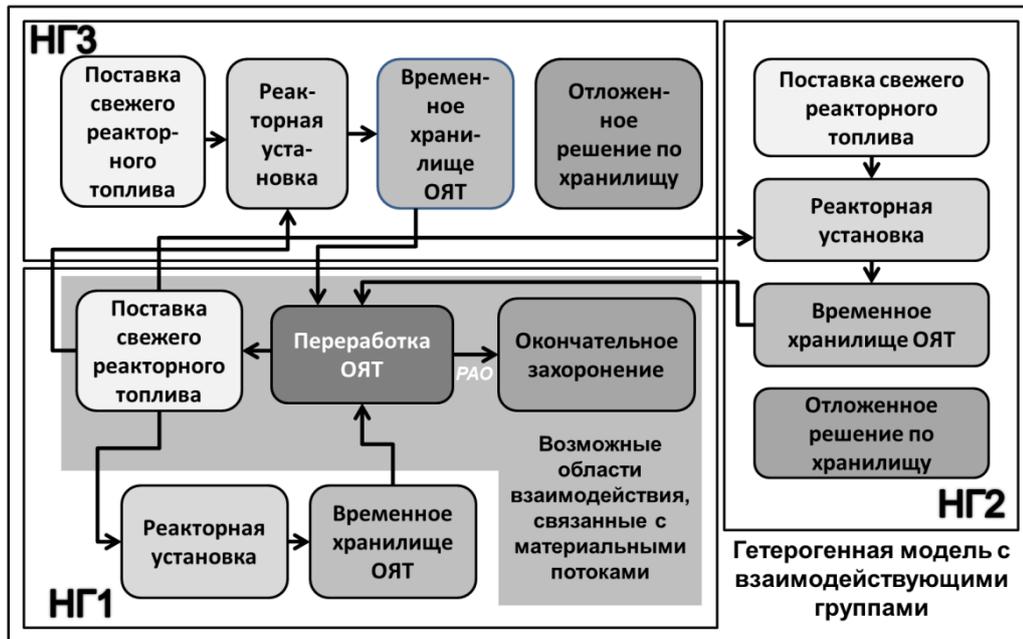


Рисунок 1 – Схематическая структура материальных потоков в гетерогенной модели с взаимодействующими негеографическими группами

Разделение на группы в рамках гетерогенной модели происходит на основе следующих условий: вовлечение в НИОКР, внедрение ИЯЭС, стратегия по обращению с ОЯТ и радиоактивными отходами:

- Первая группа (НГ1) состоит из стран, которые занимаются разработкой и внедрением ИЯЭС и, соответственно, применяют их, как только станут доступны коммерческие образцы. Основной стратегией данной группы является переработка ОЯТ. В связи с этим в рамках группы планируется строительство, обслуживание и эксплуатация перерабатывающих заводов, а также долговременных геологических хранилищ высокорadioактивных отходов.

- Вторая группа (НГ2) состоит из стран, на территории которых существуют необходимые объекты ядерной инфраструктуры, но страны не готовы быстро внедрять ИЯЭС. Основной стратегией второй группы является совместная работа с первой группой по переработке топлива и/или планы по строительству, обслуживанию и управлению перерабатывающими заводами. Для этой группы характерно отсутствие планов по сооружению долговременных геологических хранилищ высокорadioактивных отходов (отложенное решение).

- Третья группа (НГ3) состоит из стран, желающих включить в свою энергетическую структуру ЯЭ. Основной стратегией группы является использование свежего ядерного топлива. Вопрос обращения с ОЯТ либо остается неопределенным, либо ОЯТ передается для переработки или захоронения в странах первой группы. У этой группы нет планов по строительству, обслуживанию и эксплуатации перерабатывающих заводов, а также по сооружению долговременных геологических хранилищ высокорadioактивных отходов (отложенное решение).

В данной главе описаны два основных прогноза, используемые для расчетов и анализа развития ЯЭ - высокий и средний, которые находятся в пределах прогнозов таких организаций, как МАГАТЭ, АЯЭ ОЭСР, Межправительственная

Высокий прогноз					
Годы	Гомогенная модель (ГВт)	Гетерогенная модель			
		НГ 1 (ГВт)	НГ 2 (ГВт)	НГ 3 (ГВт)	Суммарно (ГВт)
2008	375	187,5	187,5	0	375
2030	700	333	333	33	700
2050	1500	682	682	137	1500
2100	5000	2000	2000	1000	5000

В качестве информационной системы в данной работе использована информационная система МАГАТЭ с совокупностью технического, программного и организационного обеспечения, а также совокупностью содержащейся в базах данных информации и обеспечивающих её обработку информационных технологий и технических средств. В работе использованы такие базы данных МАГАТЭ и информационные технологии и средства, как:

- Международная информационная система по ядерным данным (INIS);
- Информационная система по энергетическим реакторам (PRIS);
- Информационная система по усовершенствованным реакторам (ARIS);
- База данных по быстрым реакторам (FRDB);
- База данных по применению ядерной энергии в странах (CNPP);
- Библиотека МАГАТЭ;
- Международная сеть библиотек по ядерным данным (INLN).

При проведении комплексной оценки потенциала инновационных подходов к развитию ЯЭ, оптимизации сценариев ее развития и стратегий обращения с ядерными материалами в топливном цикле по всему спектру системных факторов в работе осуществлено взаимодополняющее использование сертифицированных и одобренных международных программных средств МАГАТЭ (NFCSS, MESSAGE и DESAE), позволяющих решать имитационные и оптимизационные задачи моделирования.

В рамках системного анализа согласно общей методологии построения моделей с использованием специализированных программных средств в рамках системного анализа необходимо выделить следующие типичные этапы: 1) составление уравнений связей, отражающих реальные «физические» ограничения; 2) определение экзогенно задаваемого целевого функционала, отражающего представления о том, как должен функционировать рассматриваемый объект и 3) в случае необходимости, замыкающие систему уравнения.

Исходная система уравнений, записанная либо в дифференциальном виде, либо в виде системы неравенств, определяет балансы ядерного топлива в развивающейся системе ЯЭ. При моделировании развития ЯЭ общими являются следующие приведенные ниже выкладки и соотношения.

Глубина выгорания топлива, характеризующая использование ядерного топлива в реакторах, определяется следующим выражением:

$$B = \frac{N_t \cdot T}{G_0}, \quad (1)$$

полураспада которых не меньше одного года и не более 500 лет. Первые из них считают распадающимися моментально, вторые стабильными.

Пусть $m_i(t)$ – скорость наработки i -го изотопа системой ЯЭ, λ – постоянная распада. Тогда суммарное количество этого изотопа $M_i(t)$ с учетом его радиоактивного распада равно:

$$M_i(t) = \int_{-\infty}^t m_i(t') \exp(-\lambda(t-t')) dt'. \quad (5)$$

Реальная скорость изменения его количества в цикле определяется выражением:

$$\bar{m}_i(t) = \frac{d}{dt} M_i(t) = m_i(t) - \int_{-\infty}^t \lambda m_i(t') \exp(-\lambda(t-t')) dt'. \quad (6)$$

При описании переделов ЯТЦ руководствуются следующими соображениями. Любое звено ЯТЦ можно описать посредством входящих в него и выходящих из него материальных потоков. Следует различать два типа переделов: допускающих накопление потоков и не допускающих этого. По известным входящим и исходящим потокам может быть рассчитано количество накопленного материала на соответствующем переделе топливного цикла:

$$Q(t) = Q_0 + \int_{t_0}^t (q^{in}(t) - q^{out}(t)) dt, \quad (7)$$

где $q^{in}(t)$ – входящий поток, $q^{out}(t)$ – выходящий поток.

Очевидно, что в случае моделирования передела, не допускающего аккумуляции ядерных материалов, входящие и исходящие потоки по времени равны между собой:

$$q^{in}(t) = q^{out}(t). \quad (8)$$

Временная задержка длительностью T_{lag} (в общем случае зависящая от времени t) в определенном звене ЯТЦ имитируется следующим образом (при условии отсутствия трансформации формы входящего потока):

$$q^{out}(t) = q^{in}(t - T_{lag}). \quad (9)$$

Типичным ограничивающим неравенством, которое должно быть учтено при моделировании, является соотношение, обеспечивающее неотрицательный запас ядерного материала в хранилище:

$$\int_{-\infty}^t q^{out}(t') dt' \leq \int_{-\infty}^t q^{in}(t') dt'. \quad (10)$$

Учет ограниченности мощностей предприятий ЯТЦ может быть осуществлен следующим очевидным образом:

$$q^{in}(t) \leq C(t) \text{ или } q^{out}(t) \leq C(t), \quad (11)$$

где $C(t)$ – предельная производственная мощность передела, на вход которого поступает поток $q^{in}(t)$ или из которого выходит поток $q^{out}(t)$. С учетом этого ограничения может быть определен выходящий с рассматриваемого передела ЯТЦ поток. Частным примером является передел, не допускающий превышения имеющихся производственных мощностей (например, транспортировка):

$$q^{out}(t) = q^{in}(t) \cdot \Theta[C(t) - q^{in}(t)] + C(t) \cdot \Theta[q^{in}(t) - C(t)], \quad (12)$$

где $\Theta(t)$ – функция Хэвисайда.

Общий алгоритм проведения вычислительных экспериментов, осуществляемых в работе, представлен на рисунке 6.

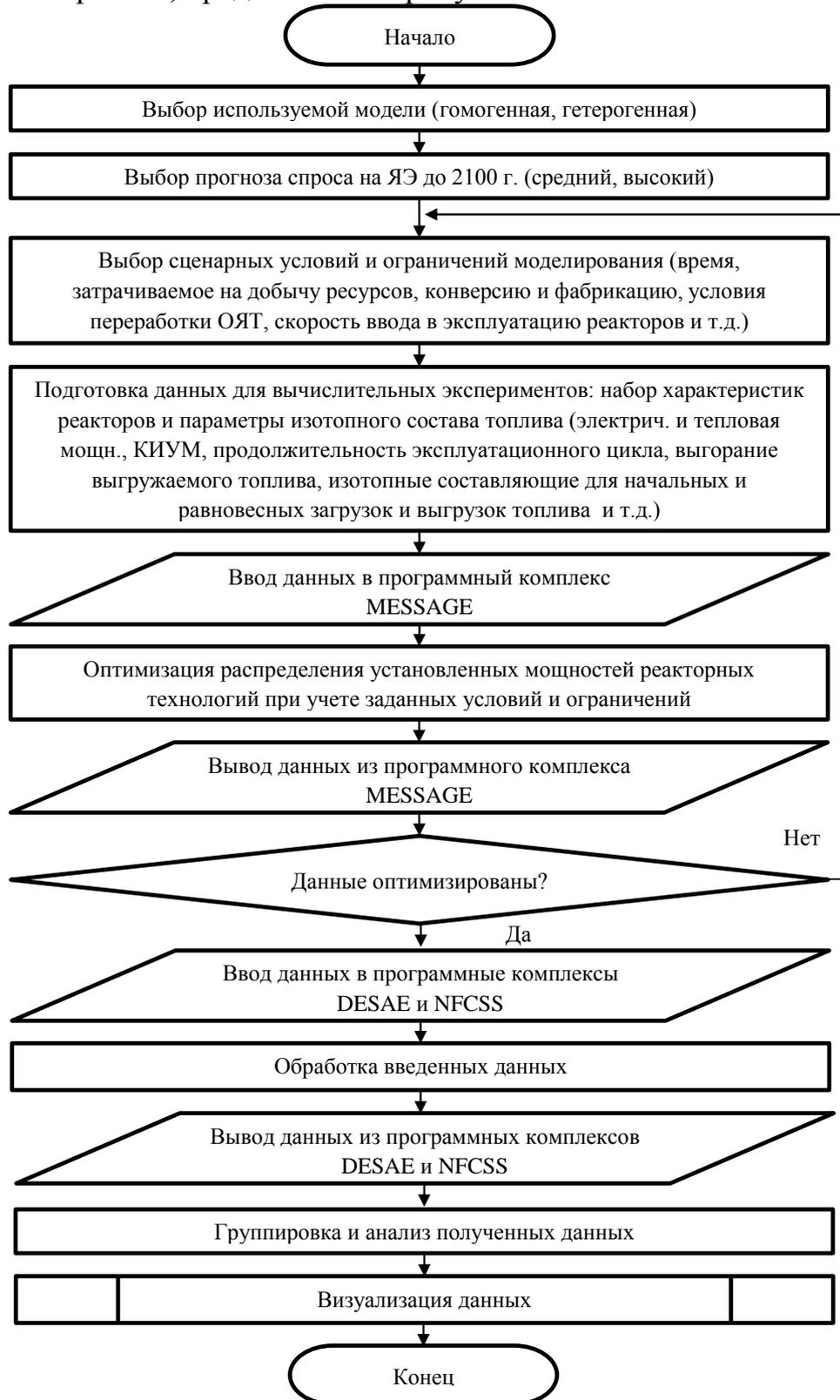


Рисунок 6 – Схема алгоритма проведения вычислительных экспериментов

Таким образом, во второй главе разработан общий подход к моделированию мировой ЯЭ как целостной системы на основе гомогенной и гетерогенной моделей, обозначены конкретные условия развития спроса на атомные установленные мощности в XXI веке и определены информационная система,

программные средства и подходы, используемые в работе для проведения вычислительных экспериментов.

В третьей главе представлены результаты анализа и моделирования трех видов сценариев гомогенной модели. Рассмотрены как сценарии открытого ЯТЦ на основе современных ядерных установок (сценарии ВАУ), так и с использованием усовершенствованных легководных реакторов (базисные сценарии ВАУ-plus). Определены основные показатели развития ЯЭ в гомогенной и гетерогенной моделях: распределение ядерных установленных мощностей в соответствии со спросом на ЯЭ, ежегодный кумулятивный спрос на природный уран, количество единиц разделительной работы (ЕРР) и количество ОЯТ в долгосрочных хранилищах, а также в случае сценариев с быстрыми реакторами – количество перерабатываемого ОЯТ.

Необходимость замыкания ЯТЦ оказывает существенное влияние на прогнозные оценки структурного развития ядерной энергетики. Для открытого ЯТЦ существенно большее внимание уделяется проблемам обращения с ОЯТ без его переработки, при этом приоритетными являются современные проблемы развития ядерной энергетики, связанные с ограничением распространения ядерных технологий военного назначения или захоронением высокоактивных отходов.

Решение этих задач, в первую очередь, носит политический и технологический характер, а, во-вторых, не зависит от ограничений природного характера. В противовес этому ограниченный ресурс урана является непреодолимым природным фактором. Неверно выбранный стратегический путь, не обеспечивающий достаточно быстрого вовлечения в топливный цикл урана-238, приведет к исчерпанию нейтронного потенциала, а также природного ресурса урана аналогично ситуации с традиционными энергетическими ресурсами (нефть, природный газ, уголь и т.п.).

В этой связи в работе основным критерием эффективности использования ядерно-энергетических систем является количество природного урана (кумулятивные показатели), необходимое в качестве энергетического ресурса для пуска и эксплуатации реакторных технологий на протяжении рассматриваемого периода времени. В качестве референсных значений используются авторитетные данные отчета МАГАТЭ и АЯЭ ОЭСР о мировых оценках ресурсов урана.

В этом случае основное балансовое уравнение для ЯЭ будет иметь вид:

$$F \frac{dN^c(t)}{dt} + BN(t) = q(t). \quad (13)$$

Первое слагаемое определяет потребность в топливе для первичных загрузок реакторов, второе – ежегодных перегрузок. Задавшись экспоненциальным темпом роста мощностей ЯЭ, можно определить интегральное потребление урана к моменту T :

$$G_U(t) = \frac{x - x_{отвал}}{0.71 - x_{отвал}} \cdot N_0 \cdot \left(\frac{B}{\omega} + F \right) \cdot (\exp(\omega(t - t_0)) - 1), \quad (14)$$

где ω – темп развития ЯЭ, t_0 – начальный момент, N_0 – мощность ЯЭ в момент t_0 .

Таким образом, основным условием, определяющим критерий эффективности использования ресурсов природного урана в моделируемых сценариях развития ЯЭ в рамках заданных временных ограничений (до 2100 г.), будет являться следующее выражение:

$$\frac{G_U(t)}{k_{\text{реф}}} \leq 1, \quad (15)$$

где $k_{\text{реф}}$ – референсное значения мировых запасов природного урана, а t – конечный момент (2100 г.).

В этой главе также проведен чувствительный анализ с целью определения чувствительности модели к изменению параметров моделирования. В рамках чувствительного анализа определены возможные изменения результатов моделирования в зависимости от изменения таких параметров, как хвосты обогащения урана; обогащение начальной загрузки легководных реакторов (LWR); время, затрачиваемое на добычу ресурсов, конверсию и фабрикацию; внедрение в сценарии реактора ALWR с более высокой степенью выгорания (таблица 2).

Таблица 2 – Краткие характеристики реакторов, используемых в моделировании структуры ЯТЦ

Название реактора	Электр. мощн. (ГВт)	КИУМ	Ср. выгорание выгруз. топл. (ГВт*сутки/т)	Краткое описание
Light Water Reactor (LWR)	1	0,8	45	Легководный реактор со среднестатистическими параметрами существующих легководных реакторов под давлением
Heavy Water Reactor (HWR)	0,6	0,8	7	Прототип тяжеловодного реактора CANDU
Advanced Light Water Reactor (ALWR)	1,5	0,8	60	Усовершенствованный легководный реактор
Fast Breakeven Reactor	0,87	0,85	37,7	Самообеспечивающийся быстрый реактор, прототип демонстрационного российского реактора БН-800 с КВ ≈ 1
Fast Breeder Reactor	0,5	0,85	31,1	Быстрый реактор-наработчик Pu, прототипа индийского реактора PFBR (Prototype Fast Breeder Reactor) с КВ $\approx 1,16$
Fast High Burnup Breeder Reactor	1,5	0,85	53,5	Быстрый реактор-наработчик Pu с высоким выгоранием и способностью трансмутировать минорные актиниды, прототип японского коммерческого быстрого реактора с КВ $\approx 1,2$
High Flux Molten Salt Reactor (MSR)	1	0,95	1044,6	Жидкосолевой реактор с быстрым спектром нейтронов, предназначенный для трансмутации минорных актинидов
Accelerator Driven System (ADS)	0,16	0,95	107,4	Подкритический реактор (электроядерная установка) для трансмутации минорных актинидов, прототип Европейской установки для промышленной трансмутации (EFIT)

В частности, вычислительные эксперименты показали, что кумулятивное потребление урана в базисных сценариях ВАU-plus к 2100 году достигнет 37,8 млн. тонн для высокого прогноза и 22,6 млн. тонн для среднего. Дешевых выявленных ресурсов урана по цене $<130\$/\text{кгU}$ (при заявленных темпах развития ЯЭ и с данным парком ядерных установок) хватит примерно до сороковых годов XXI века. При дополнительном использовании неразведанных ресурсов природного урана должно хватить до семидесятых годов в случае высокого прогноза и до восьмидесятых годов в рамках среднего прогноза.

В данной главе был также проведен анализ замкнутого ЯТЦ с внедрением в него трех различных типов быстрых реакторов (сценарии ВАU-plus с FR Breakeven, FR Breeder, FR High Burnup Breeder) (рисунок 7). Моделирование сценариев показывает, что использование в структуре ЯЭ быстрых реакторов позволяет существенно снизить потребности в природном уране (примерно в 1,5 раза для сценариев ВАU-plus с FR Breakeven и в 1,6-1,7 раз для сценариев ВАU-plus с FR Breeder/FR High Burnup Breeder) и в обогащении (в 1,8-2 раза – в ВАU-plus с FR Breakeven и более чем в 2-3 раза для ВАU-plus с FR Breeder/FR High Burnup Breeder). Такое сокращение потребностей позволяет продлить использование относительно дешевых выявленных и неразведанных ресурсов урана до восьмидесятых годов XXI века в рамках высокого прогноза и до конца века – для среднего прогноза.

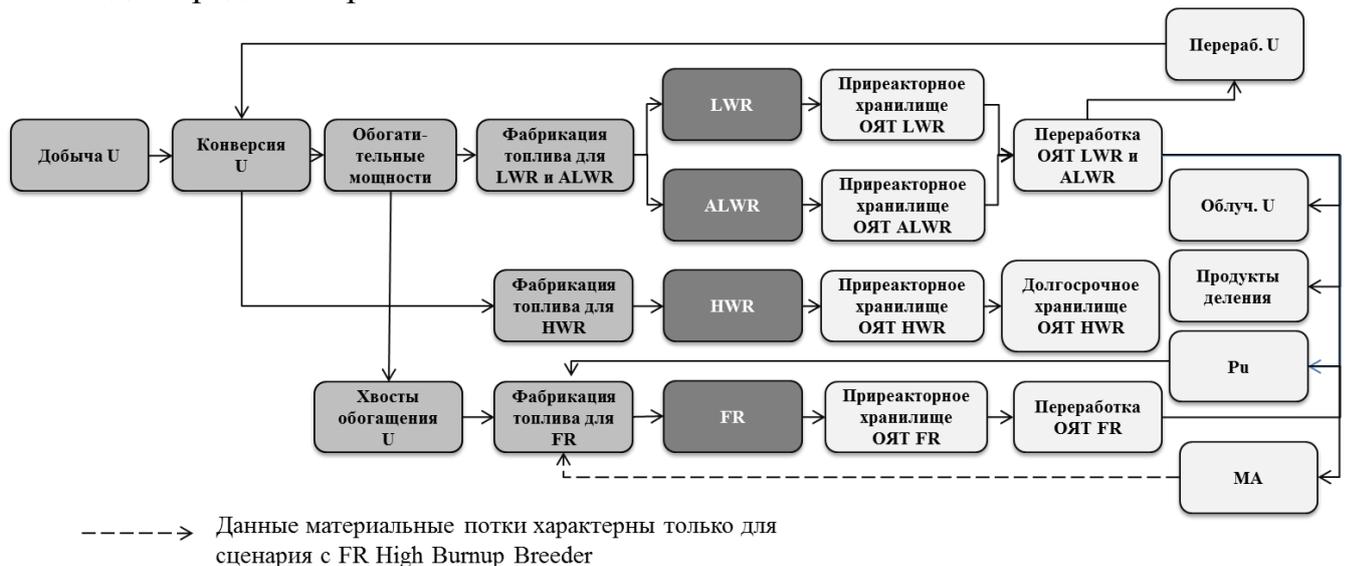


Рисунок 7 – Схема ядерного топливного цикла сценария ВАU-plus с быстрыми реакторами FR Breakeven / Breeder / High Burnup Breeder

Внедрение быстрых реакторов позволяет практически полностью решить проблему обращения с ОЯТ реакторов LWR и существенно сократить аккумуляцию ОЯТ ALWR за счет переработки их топлива с целью извлечения плутония для запуска быстрых реакторов, поэтому в рамках сценариев возникает необходимость своевременного ввода необходимого количества перерабатывающих мощностей. В противном случае ограничение перерабатывающих мощностей может существенно замедлить ввод быстрых реакторов, что продемонстрировано при проведении чувствительного анализа. В главе в рамках чувствительного анализа также рассмотрены возможные последствия,

связанные с изменением таких параметров, как потери при переработке ОЯТ; время, затрачиваемое на охлаждение и переработку ОЯТ; использование переработанного урана.

В четвертой главе проанализированы результаты вычислительного эксперимента в рамках гетерогенной модели развития ЯЭ, которая подразумевает деление стран на негеографические группы и которая, в отличие от гомогенной модели, является более реалистичной в плане взаимодействия между участниками групп за счет наличия различной степени вовлечения стран в НИОКР, готовности к внедрению ИЯЭС, разных подходов к стратегии по обращению с ОЯТ и отходами. В данной модели для сравнения было рассмотрено два варианта развития ЯЭ: при наличии межгруппового взаимодействия и при отсутствии сотрудничества между группами.

Проведенные расчеты и количественный анализ выявили, что отсутствие взаимодействия между группами существенно ограничивает возможность ввода быстрых реакторов не только на глобальном уровне, но и в рамках первой негеографической группы (НГ1), т.к. ОЯТ реакторов LWR и ALWR, эксплуатируемых в этой группе, практически полностью перерабатывается. В случае же наличия межгруппового сотрудничества к 2100 году долю быстрых реакторов возможно довести до более чем 90% в НГ1 за счет переработки ОЯТ из НГ2 и НГ3, что, в свою очередь, снижает аккумуляцию ОЯТ в хранилищах этих групп. Однако при рассмотрении глобальной структуры доля быстрых реакторов увеличивается в зависимости от прогноза с 17-24% (невзаимодействующие группы) до 36-38% (взаимодействующие группы), что меньше по сравнению со сценариями гомогенной модели с быстрыми реакторами (44-73%).

Несмотря на все вышеописанные ограничения, в рамках гетерогенной модели удастся уменьшить потребности в природном уране по сравнению с базисным сценарием гомогенной модели ВАU-plus в зависимости от прогноза на 14-21% для сценариев с невзаимодействующими группами и на 26-27% – при наличии сотрудничества. Потребности в обогащении сокращаются на 19-31% в рамках сценариев гетерогенной модели с отсутствием взаимодействия между группами и на 38-39% - для сценариев с взаимодействующими группами.

Так же как и в гомогенной, в гетерогенной модели важным фактором является наличие необходимого количества перерабатывающих мощностей в рамках НГ1. В противном случае, ввод быстрых реакторов будет еще больше ограничен.

Основные результаты вычислений в рамках гомогенной и гетерогенной моделей в соответствии с ранее определенными показателями, описывающими развитие ЯЭ, представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Итоговые результаты вычислительных экспериментов в рамках гомогенной и гетерогенной моделей в соответствии с основными показателями, описывающими развитие ЯЭ (на 2х стр.)

Модели	Сценарии	Прогноз	Группа	Ежегодное потребл. U (кВт)	Кумулят. потребл. U (Мт)	Ежегодное количество ЕРР (Мт ЕРР)	Ежегодное количество перерабат. ОЯТ (кВт ТМ)	Ежегодн. колич. извлеченного из ОЯТ Pu (кВт ТМ)		Доля быстрых реакторов (%)
								LWR+ ALWR	FR	
Гомогенная модель (на 2100 г.)	BAU	Сред.	-	475,2	23,6	389,1	-	-	-	
		Выс.	-	949,9	39,6	777,8	-	-	-	
	BAU-plus	Сред.	-	441,2	22,6	386,4	-	-	-	
		Выс.	-	866,6	37,8	776,3	-	-	-	
	BAU-plus с FR Breakeven	Сред.	-	206,6	15	181,1	48,9	0,2	3,4	52,9
		Выс.	-	491,7	25,8	431,1	93,4	0,6	5,5	43,7
	BAU-plus с FR Breeder	Сред.	-	114,6	13	100,9	63	0,2	4,8	72,9
		Выс.	-	345,6	22,9	304	115,7	0,5	7,7	59,4
BAU-plus с FR High Burnup Breeder	Сред.	-	143,9	13,5	126,4	41,3	0,2	2,1	66,5	
	Выс.	-	390,9	23,7	343,4	81,6	0,5	3,4	54,4	
Гетерогенная модель с невзаимодействующими группами (на 2100 г.)	НГ1-3 (с FR Breakeven в НГ1)	Ср.	НГ1	79,7	6,1	70,1	19,4	0,1	1,4	51,8
			НГ2	176,3	9,8	154,4	-	-	-	-
			НГ3	88,8	3	77,7	-	-	-	-
			НГ1-3	344,8	18,9	302,2	19,4	0,1	1,4	20,3
		Выс.	НГ1	189,3	10,7	166	37,8	0,2	2,3	44,3
			НГ2	354,7	16,1	310,5	-	-	-	-
			НГ3	177,4	5,7	155,4	-	-	-	-
			НГ1-3	721,4	32,5	631,9	37,8	0,2	2,3	17,4
	НГ1-3 (с FR Breeder в НГ1)	Ср.	НГ1	39,7	5,1	35	21,6	0,004	2	74,9
			НГ2	176,3	9,8	154,4	-	-	-	-
			НГ3	88,8	3	77,7	-	-	-	-
			НГ1-3	304,8	17,9	267,1	21,6	0,004	2	29,1
Выс.		НГ1	123,4	9,3	108,5	47,6	0,2	3,3	62,2	
		НГ2	354,7	16,1	310,5	-	-	-	-	
		НГ3	177,4	5,7	155,4	-	-	-	-	
		НГ1-3	655,5	31,1	574,4	47,6	0,2	3,3	24,3	

	Сценарии	Прогноз	Группа	Ежегодное потребл. U (кТ)	Кумулят. потребл. U (Мг)	Ежегодное количество ЕРР (Мг ЕРР)	Ежегодное количество перерабат. ОЯТ (кТ ТМ)	Ежегодн. колич. извлеченного из ОЯТ Pu (кТ ТМ)		Доля быстрых реакторов (%)		
								LWR+ ALWR	FR			
	НГ1-3 (с FR High Burnup Breeder в НГ1)	Ср.	НГ1	51,9	5,4	45,8	15,7	0,05	0,9	67,3		
			НГ2	176,3	9,8	154,4	-	-	-	-		
			НГ3	88,8	3	77,7	-	-	-	-		
			НГ1-3	31,7	18,2	277,9	15,7	0,05	0,9	26,2		
		Выс.	НГ1	145,3	9,7	127,6	32,9	0,2	1,5	56		
			НГ2	354,7	16,1	310,5	-	-	-	-		
			НГ3	177,4	5,7	155,4	-	-	-	-		
			НГ1-3	677,4	31,5	593,5	32,9	0,2	1,5	22		
		Гетерогенная модель с взаимодействующими группами (на 2100 г.)	НГ1-3 (с FR Breakeven в НГ1)	Ср.	НГ1	3,2	4	3	22,5	0,01	2,6	97,9
					НГ2	176,3	9,8	154,4	10,6	0,1	-	-
					НГ3	88,8	3	77,7			-	-
					НГ1-3	268,3	16,8	235,1	33,1	0,11	2,6	37,8
Выс.	НГ1			17	6,1	16	44,9	0,04	4,9	94,6		
	НГ2			354,7	16,1	310,5	30,4	0,37	-	-		
	НГ3			177,4	5,7	155,4			-	-		
	НГ1-3			549,1	27,9	481,9	75,3	0,41	4,9	36,5		
НГ1-3 (с FR Breeder в НГ1)	Ср.		НГ1	3,2	4	3	27,4	0	2,7	97,9		
			НГ2	176,3	9,8	154,4	0	0	-	-		
			НГ3	88,8	3	77,7			-	-		
			НГ1-3	268,3	16,8	235,1	27,4	0	2,7	37,8		
	Выс.	НГ1	17	6,1	16	55,7	0,04	5,2	94,6			
		НГ2	354,7	16,1	310,5	4,2	0,05	-	-			
		НГ3	177,4	5,7	155,4			-	-			
		НГ1-3	549,1	27,9	481,9	59,9	0,09	5,2	36,5			
НГ1-3 (с FR High Burnup Breeder в НГ1)	Ср.	НГ1	3,2	4	3	16,5	0,006	1,3	97,9			
		НГ2	176,3	9,8	154,4	0,6	0,006	-	-			
		НГ3	88,8	3	77,7			-	-			
		НГ1-3	268,3	16,8	235,1	17,1	0,01	1,3	37,8			
	Выс.	НГ1	17	6,1	16	33,1	0,04	2,4	94,6			
		НГ2	354,7	16,1	310,5	11,4	0,14	-	-			
		НГ3	177,4	5,7	155,4			-	-			
		НГ1-3	549,1	27,9	481,9	44,5	0,18	2,4	36,5			

В пятой главе рассмотрено и проанализировано использование имитационных и оптимизационных подходов к моделированию ЯЭ для определения потенциальной роли жидкосолевых реакторов MSR и подкритических реакторов (электроядерных установок) ADS в качестве установок по трансмутации минорных актинидов (МА). Концепции этих установок имеют ряд принципиальных отличий от других инновационных ядерных установок, предложенных для решения задач конечного этапа ЯТЦ. Однако, как и во всех других случаях, для их реализации потребуются огромные организационные и финансовые усилия, а также длительное время на проведение соответствующих НИР и НИОКР. В этой связи всесторонний анализ целесообразности развития данных технологий и их роли в глобальной архитектуре будущей ЯЭ является важной задачей системных исследований.

При проведении сценарного моделирования и анализа в этой главе предполагается, что все технологические и экономические проблемы, связанные с эксплуатацией этих установок, будут решены к третьей четверти XXI столетия, что позволит рассмотреть данные концепции реакторов в будущей структуре ЯТЦ.

Основной целью ввода MSR и ADS в глобальные сценарии было определение ниши в системе ЯЭ, которую данные реакторы могли бы занять в качестве установок по трансмутации МА в связке с другими реакторами. В этой связи для вычислительных экспериментов был определен основной показатель, характеризующий минимизацию количества МА при использовании установленных мощностей MSR и ADS в структуре ЯЭ.

Сценарный анализ показал, что в рамках заданных ограничений MSR и ADS справились с поставленной задачей по минимизации накопления МА.

Ввод определенного количества MSR в сценарии позволяет постоянно снижать аккумуляцию МА даже в растущих и изменяющихся сценариях как за счет начальных, так и с помощью равновесных загрузок MSR. Минимум накопления МА будет достигнут к началу вывода из эксплуатации первого MSR, т.к. в соответствии с ограничительными условиями баланс по МА должен быть таким, чтобы реакторы MSR обеспечивались топливом до конца эксплуатации.

Как следует из сценариев, в которых отсутствуют дополнительные установки по трансмутации помимо ADS, минимизация аккумуляции МА достигается при постоянном вводе в сценарий небольшого количества новых установленных мощностей ADS. В противном случае накопление МА в развивающемся сценарии будет, хоть и медленно, но расти. Из этого следует, что ADS системы оптимально подходят для равновесных сценариев, где реакторный парк и количество установленных мощностей не подвержены сильным изменениям. Сценарий с реактором FR High Burnup Breeder также доказывает возможность эффективного снижения накопления МА при совместном использовании в сценарии ADS и других реакторных установок, способных трансмутировать МА.

Полученные результаты (таблица 4) показывают значительный потенциал MSR и ADS в качестве перспективных технологий по трансмутации МА.

Наличие проверенной и конкурентоспособной технологии реакторов MSR и ADS к третьей четверти века позволит не перегружать быстрые реакторы функцией трансмутации МА и сделает оправданным переход к двухкомпонентной структуре ЯЭ (реакторы на тепловых нейтронах, реакторы на быстрых нейтронах, специализированные установки по трансмутации МА).

Таблица 4 – Процент снижения аккумуляции МА к 2100 году и доля MSR и ADS от всех установленных мощностей

Сценарии	Снижение аккумуляции МА (%)		% от всех установ. мощностей	
	Ср. прогн	Выс. прогн.	Ср. прогн	Выс. прогн.
BAU-plus с FR Breakeven и MSR	73	71	3	3
BAU-plus с FR Breakeven и ADS	93	89	3	2
BAU-plus с FR Breeder и MSR	82	79	3	2
BAU-plus с FR Breeder и ADS	87	89	3	2
BAU-plus с FR HB Breeder и MSR	48	48	<1	<1
BAU-plus с FR HB Breeder и ADS	52	56	<1	<1

Учитывая небольшую долю от всех установленных мощностей, которая приходится на MSR и ADS, в главе сделан вывод о возможности рассмотрения данных типов реакторов как составной части будущих многосторонних международных центров по оказанию услуг ЯТЦ совместно с такими типами установок по трансмутации МА, как специализированные быстрые реакторы.

В заключении приведены основные выводы выполненной работы.

В приложении вынесены акты о внедрениях, а также изотопные составляющие для начальных и равновесных загрузок и выгрузок топлива из реакторов, схемы ЯТЦ, результаты моделирования и визуализации для гетерогенной модели.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В соответствии с поставленными целями все обозначенные в рамках данной работы задачи были выполнены.

Принимая во внимание полученные в рамках системного и сенситивного анализа результаты вычислительных экспериментов, сделаны следующие выводы и рекомендации.

Учитывая введенный в работе критерий эффективности развития ЯЭ, кумулятивное потребление урана в гомогенной модели к 2100 году в сценариях BAU-plus с использованием существующих на сегодняшний день реакторных технологий (HWR, LWR и ALWR) составляет 37,8 млн. тонн для высокого прогноза и 22,6 млн. тонн для среднего. При использовании дешевых выявленных и неразведанных ресурсов природного урана должно хватить до семидесятих годов в случае высокого прогноза и до восьмидесятих годов в рамках среднего прогноза. В этой связи необходимо проведение дополнительных НИОКР для разведки и добычи урана из нетрадиционных ресурсов (фосфаты, цветные руды, карбонатит, лигнит) в промышленных масштабах на более экономичных условиях.

Вместе с тем, имитационное моделирование сценариев с использованием в структуре ЯЭ быстрых реакторов позволяет существенно снизить потребности в природном уране (примерно в 1,5-1,7 раза по сравнению с базисным сценарием ВАU-plus в зависимости от используемого реакторного парка). Данное сокращение потребностей позволяет продлить использование относительно дешевых выявленных и неразведанных ресурсов урана до восьмидесятых годов XXI века в рамках высокого прогноза и до конца века – для среднего прогноза.

В гетерогенной модели, несмотря на все введенные ограничения, потребности в природном уране по сравнению с базисным сценарием снижаются в зависимости от прогноза на 14-21% для сценариев с не взаимодействующими группами и на 26-27% – при наличии сотрудничества.

Таким образом, заданный в работе критерий эффективности соблюдается фактически только в тех сценариях, где есть возможность максимизации ввода в глобальную структуру ЯЭ установленных мощностей реакторов на быстрых нейтронах, что, в свою очередь, позволяет более рационально использовать ограниченные природные ресурсы урана, а также при заданных темпах развития ЯЭ на определенном этапе перейти к замкнутому ЯТЦ с использованием переработанного топлива для загрузок существующих и новых реакторов, минимизировав при этом потребление природного урана.

В рамках сенситивного анализа показано, что для всех сценариев с замкнутым ЯТЦ наиболее чувствительным к изменениям показателем развития ЯЭ является количество перерабатываемых мощностей. Ограничение этого показателя уменьшает возможность ввода быстрых реакторов и сильно изменяет распределение материальных потоков. Для сценариев с открытым ЯТЦ, в первую очередь, необходимо предусмотреть наличие достаточного количества услуг по обращению с ОЯТ и РАО легководных и тяжеловодных реакторов для их дальнейшего захоронения.

В работе проиллюстрирован значительный потенциал MSR и ADS в качестве перспективных технологий по минимизации количества МА. Наличие проверенной и конкурентоспособной технологии реакторов MSR и ADS к третьей четверти века позволит не перегружать быстрые реакторы функцией трансмутации МА и сделает оправданным переход к двухкомпонентной структуре ЯЭ. Небольшая доля от всех установленных мощностей (не более 3%), которая приходится на MSR и ADS, позволяет сделать вывод о возможности рассмотрения данных типов реакторов как составной части будущих многосторонних международных центров по оказанию услуг ЯТЦ.

Основные публикации по теме диссертации

Публикации в журналах из перечня ВАК Минобрнауки России:

1. Уланов, Д.В. Роль жидкосолевых реакторов в решении проблемы трансмутации минорных актинидов в двухкомпонентной структуре глобального ядерного топливного цикла [Текст] / Д.В. Уланов, В.Н. Усанов, Г.А. Фесенко // Ядерная физика и инжиниринг. – 2011. – Т. 2. – № 2. – С. 176-184.
2. Уланов, Д.В. Потенциал подкритических реакторов (электроядерных установок) для трансмутации минорных актинидов в двухкомпонентной структуре глобального ядерного топливного цикла [Текст] / Д.В. Уланов, В.Н. Усанов, Г.А. Фесенко // Ядерная физика и инжиниринг. – 2011. – Т. 2. – № 2. – С. 185-192.
3. Уланов, Д.В. Имитационное моделирование открытых и замкнутых ядерных топливных циклов с использованием сертифицированных программно-инструментальных средств МАГАТЭ [Текст] / Д.В. Уланов // Естественные и технические науки. – 2012. – №6. – С. 453-455.

Публикации в прочих изданиях:

4. Nuclear Energy Development in the 21st Century: Global Scenarios and Regional Trends [Text] / International Atomic Energy Agency. – Nuclear Energy Series NP-T-1.8. – Vienna: IAEA, 2010. – ISBN 978-92-0-109210-6.
5. Framework for Assessing Dynamic Nuclear Energy Systems for Sustainability [Text] / International Atomic Energy Agency. – Nuclear Energy Series. – Vienna: IAEA, 2012.
6. Ulanov, D. Evaluation, Recommendations and Comments on use of Nuclear Fuel Cycle Simulation System for calculating INPRO GAINS Scenarios [Text] / D. Ulanov, G. Fesenko // IAEA Technical meeting on NFCSS. – Austria, Vienna, October 2010.
7. Ulanov, D. Introduction of Molten Salt Reactors in GAINS scenarios [Text] / D. Ulanov // 5th IAEA INPRO GAINS Consultancy Meeting. – Austria, Vienna, April 2010.
8. Ulanov, D. Introduction of Accelerator Driven Systems in GAINS scenarios [Text] / D. Ulanov // 6th IAEA INPRO GAINS Consultancy Meeting. – France, Cadarache, October 2010.
9. Уланов, Д.В. Альянсы японских атомно-промышленных корпораций как инструмент выхода на международные рынки ядерных услуг [Текст] / Д.В. Уланов, Л.В. Проничева // Научная сессия МИФИ. – 2008. – Т.15 Международное научно-технологическое сотрудничество. – С. 45-47.
10. Уланов, Д.В. Перспективы сотрудничества Российской Федерации и Японии в области мирного использования атома [Текст] / Д.В. Уланов, Л.В. Проничева // Научная сессия МИФИ. – 2009. – Т.3 Нанозифика и нанотехнологии. – С. 241.
11. Уланов, Д.В. Гомогенная модель взаимодействия при моделировании развития ЯТЦ [Текст] / Д.В. Уланов, Б.Н. Оныкий // Научная сессия МИФИ. – 2012. – Т.3 Экономические и правовые проблемы инновационного развития атомной отрасли. – С. 14.
12. Уланов, Д.В. Гетерогенная модель взаимодействия при моделировании развития ЯТЦ [Текст] / Д.В. Уланов, Б.Н. Оныкий // Научная сессия МИФИ. –

2012. – Т.3 Экономические и правовые проблемы инновационного развития атомной отрасли. – С. 15.

13. Уланов, Д.В. Сенситивный анализ материальных потоков ЯТЦ с использованием программного комплекса энергетического планирования NFCSS и MESSAGE [Текст] / Д.В. Уланов, Б.Н. Оныкий // Научная сессия МИФИ. – 2012. – Т.3 Экономические и правовые проблемы инновационного развития атомной отрасли. – С. 16.

14. Уланов, Д.В. Имитационное моделирование глобальных потоков ядерных материалов при различных вариантах использования ядерно-энергетических систем [Текст] / Д.В. Уланов // Научная сессия МИФИ. – 2013. – Т.3 Экономические и правовые проблемы инновационного развития атомной отрасли. – С. 39.

15. Уланов, Д.В. Анализ ядерной энергетики Японии и перспектив выхода японских атомно-промышленных корпораций на международные рынки ядерных услуг [Текст] / Д.В. Уланов, Б.Н. Оныкий, Л.В. Проничева // Научный отчет кафедры «Анализ конкурентных систем» НИЯУ МИФИ. – М.: МИФИ, 2008.

Подписано в печать 21.08.2013

Объем 1,6 усл.п.л.

Тираж: 100 экз. Заказ №898

Отпечатано в типографии «Реглет»

101000, г. Москва, Пл. Мясницкие ворота, д.1, стр. 3

(495)971-22-77 www.reglet.ru