

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР “КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ”

На правах рукописи

Андрианова Елена Александровна

**РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ И ПРОГРАММ ДЛЯ
СИСТЕМНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ РАЗВИТИЯ АТОМНОЙ
ЭНЕРГЕТИКИ**

Специальность 05.13.18. – Математическое моделирование, численные методы и
комплексы программ

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва, 2012

Работа выполнена в Национальном исследовательском центре “Курчатовский институт”

Научный руководитель: доктор технических наук
Цибульский Виктор Филиппович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Клименко Анатолий Васильевич

доктор технических наук, профессор
Зайцев Игорь Владимирович

Ведущая организация:
ОАО «Головной институт «ВНИПИЭТ»

Защита диссертации состоится «__» _____ 2012 г. в __ ч. __ мин. на заседании диссертационного совета Д 520.009.06 в Национальном исследовательском центре “Курчатовский институт” по адресу: 123182, г. Москва, г. Москва, пл. Курчатова, д.1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИЦ “Курчатовский институт”

Автореферат разослан «__» _____ 2012 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
доктор технических наук, профессор

В.Г. Мадеев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы.

Масштабное развитие атомной отрасли в России и мире становится все более актуальным. Выбор наиболее привлекательных вариантов развития атомной энергетики, ее структурного наполнения реакторами разных типов, оценка временных факторов развития различных технологий является одной из приоритетных задач современного развития экономики. В этих условиях, учитывая специфику атомной энергетики - ее большую инерционность, потребность в организации замкнутого топливного цикла, решения проблем обращения с РАО и нераспространения, системные исследования на основе математического моделирования являются безальтернативными вариантами выбора приемлемых вариантов развития. Работы в области системных исследований перспективного развития атомной энергетики активно поддерживаются в МАГАТЭ. Разработка математических моделей и программных средств, ориентированных на системные исследования перспективного развития атомной энергетики, определяет актуальность диссертационной работы.

Цели и задачи работы.

1) Разработка методик математического моделирования и программных средств, ориентированных на описание технологических процессов, которые являются составной частью атомно-энергетического комплекса, и на системные исследования перспектив развития атомной энергетики.

2) Создание вычислительных программных модулей, облегчающих поиск решений в зависимости от выбранного критерия оптимизации.

3) Выполнение расчетно-аналитических исследований сценариев развития атомной энергетики в России и мире, и определение ее структуры с учетом ресурсных и технологических ограничений.

Результаты работы, выносимые на защиту.

1. Математические модели и программный комплекс DESAE-2 для системных исследований перспектив развития атомной энергетики.

2. Алгоритмы, помогающие проводить поиск согласованного сценария.

3. Исследование сценариев перспективного развития атомной энергетики при учете различных ограничений и предпочтений.

Научная новизна работы.

- в разработке математической модели, ориентированной на системное изучение проблем развития атомной энергетики;
- в разработке алгоритмов поиска решений на основе стохастических методов применительно к задачам повышения качества расчетов и эффективности вычислительных процедур;
- в оценке степени влияния различных параметров на структуру атомно-энергетического комплекса в результате расчетно-аналитических исследований.

Достоверность.

Достоверность результатов, представленных в диссертации, подтверждается расчетами тестовых сценариев и их согласием с аналитическими вычислениями для простых моделей, а также с аналогичными расчетами по другим программным комплексам.

Практическая значимость работы.

- Разработанный программный комплекс DESAE-2 активно используется в рамках проекта ИНПРО научными коллективами разных стран при выполнении расчетно-аналитических исследований перспективного развития атомной энергетики.

- Созданные алгоритмы существенно ускоряют выполнение расчетов и позволяют более полно анализировать результаты, полученные при различных ограничениях.

- Результаты расчетно-аналитических исследований представляют интерес для выработки основных направлений развития атомной энергетики в России.

Апробация работы.

Материалы, представленные в диссертации, были доложены на следующих конференциях:

- 4-ая Курчатовская молодежная научная школа (20-22 ноября 2006 г., Москва),
- 5-ая Курчатовская молодежная научная школа (19-21 ноября 2007 г., Москва).

Личный вклад автора.

- Автором разработан и реализован в виде программного продукта комплекс DESAE-2 с оптимизационным алгоритмом, который позволяет получать согласованную расчетную информацию для заданного сценарного варианта предполагаемого развития атомной энергетики.

- Автором выполнены и проанализированы результаты всех расчетных исследований, представленных в диссертации, для разных вариантов развития атомной энергетики в России и мире.

Публикации.

Список основных публикаций приведен в конце автореферата.

Структура и объем диссертации.

Материал диссертационной работы изложен на 140 страницах, содержит список литературы из 82 наименований, 16 таблиц и 56 рисунков.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обсуждается необходимость изучения перспектив развития атомной энергетической отрасли. Ввиду наличия большого числа неопределенностей существующих в энергетических потребностях разных стран и традиционной сырьевой базы, такие исследования представляются целесообразными. Наиболее подходящим способом, позволяющим выполнить эти расчеты, является математическое моделирование. Несмотря на существенные приближения, которые используются в таких моделях, в конечном итоге они позволяют выявить критические места в развитии, оценить в численном выражении потребности в различных ресурсах и последствия с точки зрения экологии.

Также во введении рассмотрены основные сценарии развития АЭ в мире. Показано как масштабы установленных мощностей и запасы природного урана влияют на структуру атомной отрасли.

В первой главе дано обоснование целесообразности моделирования системы АЭ, которое в своих результатах предоставляет не только качественную, но и количественную оценку при наличии большого числа неопределенностей. Для этого были рассмотрены аспекты, присущие энергетической отрасли:

- структура энергетики;
- инфраструктурные производства;
- структура произведенной энергии;
- ресурсная база;
- экологическое воздействие;
- региональное и глобальное рассмотрение;
- экономика энергетического комплекса.

Отдельно рассмотрены особенности атомной энергетики:

- структура генерирующих мощностей АЭС;
- ресурсная база;
- инфраструктурные производства;
- экологическое воздействие.

Кроме того, приводится описание топливных циклов АЭ и технологических этапов, из которых они состоят. Это позволяет оценить необходимую детализацию будущей модели, понять, чем можно пренебречь, чтобы не делать работу с программой излишне сложной, а расчет длительным. Показано, что не все этапы можно описать численно, ввиду их сложности и многоступенчатости, например химические процессы. Но зачастую, это и не требуется, так как результаты программы, моделирующей систему АЭ, носят оценочный характер.

Все вышеперечисленное позволяет сделать вывод, что для учета всевозможных проблем, при выборе параметров ТЦ, а в дальнейшем и для поиска наиболее приемлемого ТЦ, лучше всего подходят компьютерные модели.

Современные системные математические модели позволяют не только подробно анализировать материальные или финансовые балансы, но и предоставляют исследователю возможность учитывать множество неформализуемых предпочтений в интерактивном диалоговом режиме вычислений. Результатом таких исследований является согласованный расчетно-аналитический сценарный вариант, в котором математическая среда выполняет функции экспертной системы. Конечно, возможность создания таких программных средств обусловлена развитием компьютерных технологий, которые позволяют задействовать в расчетах достоверные базы данных, быстро проводить большой объем вычислений, учитывать длинные цепочки взаимовлияния расчетных функционалов, представлять информацию в удобном для восприятия виде, оперативно управлять вычислительным процессом.

Рассмотрены существующие программные комплексы для моделирования АЭ: NFCSS (VISTA), DANESS, MESSAGE, COSI - и приближения, которые в них используются.

Во второй главе приведено описание программного комплекса DESAE-2, разработанного в НИЦ “Курчатовский институт”.

В качестве языка программирования программы DESAE-2 выбран пакет MatLab. В настоящее время MatLab является мощным и универсальным средством решения задач. Круг проблем, исследование которых может быть осуществлено при помощи Matlab, охватывает: матричный анализ, задачи математической физики, оптимизационные задачи, обработку и визуализацию данных и др. MatLab интегрируется с Microsoft Word и Excel.

Работу с программой DESAE-2 можно разбить на три этапа. Первый этап обеспечивает формирование задания на расчет, при этом допускается возможность редактирования любой из величин, характеризующих элементы системы (мощности реакторов, заводов по переработке, их КИУМ и т.д.). Редактирование выполняется в графическом режиме с помощью специального программного модуля, являющегося составной частью программы.

Второй этап обеспечивает расчет всех изменяющихся во времени величин и характеризуется временем счета порядка 1 минуты.

На третьем этапе информация выводится в графическом и табличном виде на монитор. Вся выходная информация имеет два типа представления:

- на экране монитора отображаются графики любой из расчетных величин, любого функционала по требованию пользователя,
- на экране монитора выводится информация, сгруппированная по содержательному смыслу в виде нескольких графиков на одном экране.

Все графики и расчетные величина представляются на временном интервале, определяемом пользователем.

Программа DESAE-2 достаточно проста в работе и многофункциональна. Она получила свое признание в МАГАТЭ, наряду с такими программами как NRCSS (VISTA, DANESS, MESSAGE). За рубежом регулярно проводятся различные обучающие мероприятия. Программа постоянно проверяется бенчмарками и полученные в ходе расчетов результаты хорошо согласуются с результатами других программ и практически совпадают с расчетами, выполненными аналитически.

Математическая модель программы DESAE-2

В математической модели DESAE-2 атомная энергетика (региональная или глобальная) представлена как существующими реакторами различных типов, так и инновационными реакторными технологиями (реакторами и топливными циклами). Основные задачи, которые решаются в рамках системных исследований, заключаются в расчете материальных и финансовых балансов системы для заданных масштабов и структуры мощностей атомных станций и предприятий топливного цикла.

При исследовании перспективных сценариев развития атомной энергетики программа DESAE-2 предоставляет следующие возможности:

- проводить исследования, как на региональном, так и на глобальном уровнях;
- варьировать масштаб и структуру будущей атомной энергетике, т.е. вводить в нее разные типы реакторов с разными темпами;
- изменять характеристики реакторов и изучать их влияние на изменение системных параметров АЭ;
- дополнять библиотеку реакторов новыми реакторами;
- проводить исследования, как для открытого, так и замкнутого топливных циклов АЭ;
- изменять масштаб мощностей по переработке облученного топлива и длительность внешнего топливного цикла.

Компьютерная модель АЭ применяется для проведения расчетов, как на уровне отдельного региона, так и для проведения расчетов на глобальном уровне.

При анализе межрегиональных транспортных потоков свежего и облученного топлива, поставок урана из региона в регион и т.д. для проведения расчетов удобно использовать следующую схему: на первом этапе выполнить расчет на глобальном уровне, на последующих этапах - для каждого из регионов в отдельности. Расчет на глобальном уровне позволяет оценить общую сбалансированность сценария и при необходимости его можно сразу скорректировать. Расчеты на региональном уровне могут выявить несогласованность с ожидаемыми результатами. Отсюда возникает необходимость корректировки входных данных для рассматриваемого региона. А это в свою очередь влечет за собой необходимость коррекции данных и для остальных регионов. Таким образом, используемый в программе алгоритм решения задачи на глобальном и региональном уровнях позволяет получать сбалансированные результаты.

В программном комплексе DESAE-2 реализованы математические модели, описывающие отдельные технологические этапы ТЦ:

- модель ввода новых мощностей (с возможностью дискретного и непрерывного ввода)
- модель потребления топлива
- модель расчета объема работ по разделению изотопов
- модель использования рециклированного урана
- модель использования регенерированного плутония
- модель для расчета выгорания топлива
- модель для расчета остаточного энерговыделения
- модель завода по переработке топлива
- модель хранилища
- экономические расчеты

Для математического описания отдельных моделей (модели использования рециклированных урана и плутония) были проведены нейтронно-физические расчеты по программе UNK. Это позволило подобрать аппроксимационные функции, отражающие изменение изотопного состава в процессе выгорания топлива.

Для повышения эффективности расчетов и расширения возможностей анализа различных сценариев, разработан и интегрирован в программу DESAE-2 автоматизированный модуль для поиска согласованного решения по топливным балансам. Схема работы этого модуля подобна работе стандартного оптимизационного алгоритма, используемого для поиска экстремума заданного функционала: определяется функционал, для которого достижение его минимального (или максимального) значения будет означать, что найдено решение задачи.

Необходимость реализации оптимизационной процедуры обусловлена, в том числе и следующими причинами:

- при выполнении расчетов в интерактивном режиме на каждом временном интервале необходимо вручную корректировать установленные мощности различных типов реакторов для строгого выполнения топливного баланса в системе. Как показывают расчеты, такие сценарии существенно зависят, и от предыстории ввода реакторов разного типа и мощностей по переработке топлива. С практической точки зрения такие вычисления удобнее проводить в автоматическом режиме, когда алгоритм обеспечивает получение решения с заданной степенью точности. При этом, естественно, в расчетах выполняются различные ограничения на характер изменения различных функционалов. Например, ограничения на темп ввода мощностей реакторов определенного типа.

- наличие такого модуля позволяет провести сравнение вариантов развития атомной энергетики в условиях, когда целевые функционалы будут различны. Например, можно рассматривать традиционно используемый экономический функционал: минимум приведенных затрат - и в рамках таких вычислений построить

сценарии, которые наилучшим образом будут удовлетворять этому критерию. В то же время можно рассмотреть функционал, связанный со скорейшим достижением режима самообеспечения атомной энергетики топливом с учетом ограничения на ресурс природного урана. В таком виде полученные финансовые показатели и материальные балансы позволяют использовать процедуры экспертных оценок для выбора наиболее перспективных вариантов.

Управляющие переменные

В качестве управляющих переменных ТЦ, которые оказывают влияние на структуру АЭ, ее экономичность и сбалансированность, обычно рассматриваются:

- темп ввода мощностей реакторов различного типа (влияет на структуру АЭ и возможность замыкания ТЦ);

- сроки и темп ввода заводов по переработке облученного топлива (влияет на возможность замыкания ТЦ);

- длительность выдержки ОЯТ после облучения в реакторе до его переработки и поступления нового топлива в систему (влияет на возможность замыкания ТЦ);

Представленный список неполон и в нем приведены наиболее часто рассматриваемые параметры.

Ограничения

Для составления математической модели необходимо определить ограничения:

- Мощности всех производств неотрицательны;
- Материальные балансы неотрицательны;
- Суммарный объем введенных мощностей должен быть равен общей установленной мощности (устанавливается пользователем);

Некоторые ограничения по своему содержанию могут выступать в качестве дополнительных параметров, уточняющих целевую функцию. Например:

- Интегральное количество потребляемого природного урана не больше объема запасов природных ресурсов для рассматриваемого региона (устанавливается пользователем);
- Невозможность ввода некоторого типа реакторов на определенном промежутке времени, например из-за отсутствия топлива (устанавливается пользователем и уточняется в ходе расчетов).

Наложение ограничений в задаче позволяет сократить количество возможных решений.

Выбранные целевые функции и критерии оптимизации

Баланс делящихся изотопов

Критерий минимизации количества делящихся изотопов плутония и/или U^{233} на складе после переработки ОЯТ соответствует такому сценарному развитию атомной энергетики, при котором потребление вновь наработанных делящихся изотопов, выделенных из ОЯТ, считается приоритетным. Т.е. в системе должны присутствовать быстрые и тепловые реакторы в пропорциях, обеспечивающих

максимально полное использование переработанного топлива. Функционал для решения этой задачи будет совпадать с формулой (1):

$$\sum_{t_i=t_0}^T g(t_i)_{склад}^2 = \min \quad (1)$$

Приведенные затраты

При наличии нескольких вариантов развития АЭ наиболее эффективный вариант выбирается по минимуму так называемых приведенных затрат (2):

$$\tilde{C}_i = \sum_{k=0}^T C_i(t_k) \left(\frac{1}{1+\alpha} \right)^k = \min, \quad (2)$$

где α - ставка дисконтирования. Обычно коэффициент α лежит в диапазоне [0.1,0.2];

T – глубина прогнозного периода, год,

C_i – издержки производства (себестоимость) для i -го варианта. Издержки производства C рассчитываются по формуле (3):

$$C = C_{топ} + C_{ам} + C_{ФОТ} + \Delta, \quad (3)$$

где $C_{топ}$ – топливная составляющая, включает в себя стоимость добычи, конверсии, обогащения и т.д.;

$C_{ам}$ – амортизационная составляющая, позволяет вернуть те инвестиции, которые были затрачены;

$C_{ФОТ}$ – составляющая фонда оплаты труда;

Δ – прочие траты, куда входят различные налоги, сборы (за охрану, пожарную охрану и т.п.), командировки, повышение квалификации и т.д.

Поскольку инвестиции характеризуются одноразовостью или ограниченным периодом вложений, длительным сроком окупаемости, большой величиной, а издержки производства - это величина, как правило, годовая, то для того чтобы привести их к единой годовой размерности с помощью коэффициента дисконтирования, берут часть инвестиций (капитальных вложений).

Основная сложность целевой функции (2) состоит в большом количестве, входящих в нее переменных, отражающих экономическое состояние системы АЭ (стоимость установленных мощностей, материальные затраты (ремонт, покупка топлива), оплата труда, отчисления и т.д.). У некоторых из них есть зависимость от времени. При этом следует принимать во внимание то, что прогнозирование цен и их динамики на длительную перспективу является самостоятельной задачей, решение которой пока получить не удалось.

Метод поиска приемлемого решения

В качестве метода наиболее подходящего для нахождения минимума целевой функции выбран метод стохастического поиска минимума функции, который удобен для использования в численных методах поиска глобального экстремума целевой функции, зависящей от большого количества управляющих параметров.

В качестве примера рассмотрен поиск минимума целевой функции, где в качестве управляющих параметров выступают мощности АЭС.

При описании сценария развития АЭ пользователь задает график установленных мощностей. В программе из этих данных расчетным путем получаются приращения мощностей на каждом временном шаге. Такое преобразование позволяет учесть и ввод новых мощностей, и замещение станций, отработавших свой ресурс.

Для более полного описания системы атомной энергетики пользователем задается матрица ввода реакторов, то есть определяется возможность или невозможность ввода того или иного типа реакторов на каждом шаге оптимизации. Для этого заполняется таблица, примерный вид которой представлен ниже. (Таблица 1)

Таблица 1 Матрица ввода реакторов

	1-ый тип реактора	2-ой тип реактора	...	(n-1)-ый тип реактора	n-ый тип реактора
2000-(2000+Δ)	1	0		1	1
(2000+Δ)-(2000+2Δ)	0	0		1	1
...
(2000+(n-1)Δ)-(2000+nΔ)	0	0		0	1

Здесь в качестве начала периода оптимизации выбран 2000 год, Δ - шаг оптимизации, n – число шагов. На каждом временном интервале пользователь определяет можно ли вводить данный тип реактора (1) или нельзя (0). В этом случае, для тех реакторов, у которых стоит 0, ввод мощностей не производится, и мощности распределяются между теми реакторами, для которых ввод реакторов разрешен, при этом суммарная мощность должна оставаться прежней.

Как говорилось выше, в качестве управляющих параметров в данной задаче выступают приращения мощностей реакторов Δw. На каждом шаге оптимизации приращение мощности реактора с учетом матрицы ввода изменяется по формуле (4):

$$\Delta w = \Delta w_0 + k \Delta w_0, \quad (4)$$

где Δw₀ - начальное приращение мощности,

$k = C \cdot p \cdot M$ – величина, на которую изменяется приращение,

C - максимальный шаг изменения общей мощности реакторов, который задается пользователем на основе опыта решения аналогичных задач, или же используется стандартное значение, определенное в программе. Этот параметр влияет на скорость поиска оптимального решения и целесообразно, чтобы он постепенно уменьшался, но таким образом, чтобы интеграл (5):

$$\int_0^{\infty} f(C) dC \quad (5)$$

был расходящимся, что обеспечит возможность блуждания по всему допустимому пространству изменения управляющих параметров.

p - случайная величина [0, 1], которая генерируется датчиком случайных чисел,

M – значение из матрицы ввода, 0 – реактор не вводится, 1 – реактор вводится.

Затем новое приращение мощностей нормируется на общее установленное приращение мощностей, на рассматриваемом отрезке оптимизации по формуле (6):

$$\Delta w = \alpha \Delta w M, \quad (6)$$

где $\alpha = \frac{\sum_{i=1}^N \Delta w_{oi}}{\sum_{i=1}^N \Delta w_i}$ - нормировочный коэффициент,

N – число реакторов в системе,

На данном шаге расчет всех параметров системы производится заново с новыми значениями приращения мощностей. После чего проверяется значение целевой функции. Если новое значение функции получилось меньше, чем предыдущее, то процентное соотношение реакторов остается прежним и расчет продолжается дальше. В случае, когда значение функции увеличилось, процентное соотношение реакторов в системе генерируется с помощью датчика случайных чисел снова. Итерации продолжаются до тех пор, пока:

- не будет выполнена заданная точность ε :

$$|g^n(t_j) - g^{n-1}(t_j)| < \varepsilon, \quad (7)$$

где $g^{n-1}(t_j)$ и $g^n(t_j)$ - значения целевой функции на $n-1$ и n -ой итерации j -го оптимизационного интервала;

- или приращения мощностей перестанут меняться:

$$|\Delta w_n - \Delta w_{n-1}| < \lambda, \quad (8)$$

где λ – заданная точность.

Этот метод затретен с точки зрения вычислений, но обеспечивает получение решения с большим числом управляемых параметров, и удобен в программной реализации. Кроме того, данный способ поиска минимума позволяет учитывать дополнительные ограничения, которые накладываются на целевую функцию.

Реализация модуля по автоматическому поиску решения в программе DESAE-2

Автоматический поиск минимума целевых функций реализован в виде встроенного модуля к программе DESAE-2. Проведены расчеты различных сценариев, проверяющих качество работы модуля.

Ниже рассмотрен расчет сценария развития АЭ, в котором в качестве наиболее приемлемого, принят сценарий с максимальным потреблением плутония со склада. В этом случае потребление природного урана станет минимальным.

На Рис. 1 представлены начальный вариант сценария развития АЭ и объем регенерированного плутония на складе. Как видно из рисунка суммарный объем плутония становится отрицательным после 2070 года, что говорит о несбалансированности сценария. В данном варианте, начало работы оптимизационного блока задано с 2020 года. Начальные условия для расчета определены таким образом, что ввод быстрых реакторов возможен с момента начала оптимизации, т.е. с 2020 года, шаг оптимизации выбран 20 лет.

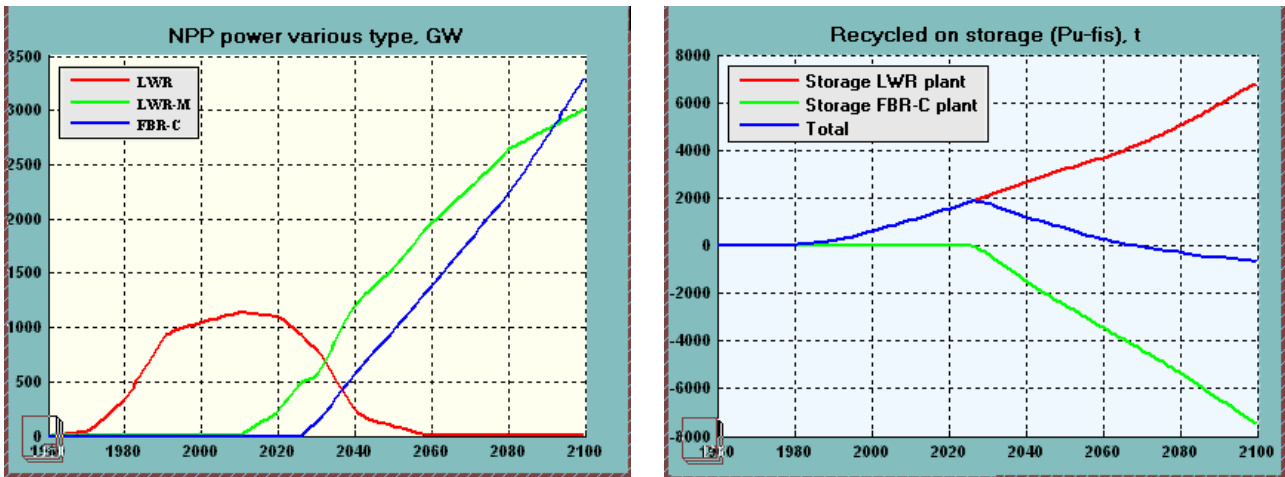


Рис. 1 Вариант развития АЭ до начала оптимизации
(а-мощности АЭС, б-объем регенерированного плутония на складе)

На Рис. 2 показан процесс работы модуля. Как видно из рисунка на каждом шаге проводится несколько итераций прежде, чем будет достигнут оптимальный результат и можно будет перейти к следующему шагу. Как говорилось выше, поиск решения идет по объему плутония на складе, то есть основная задача - минимизировать количество плутония оставшегося на складе.

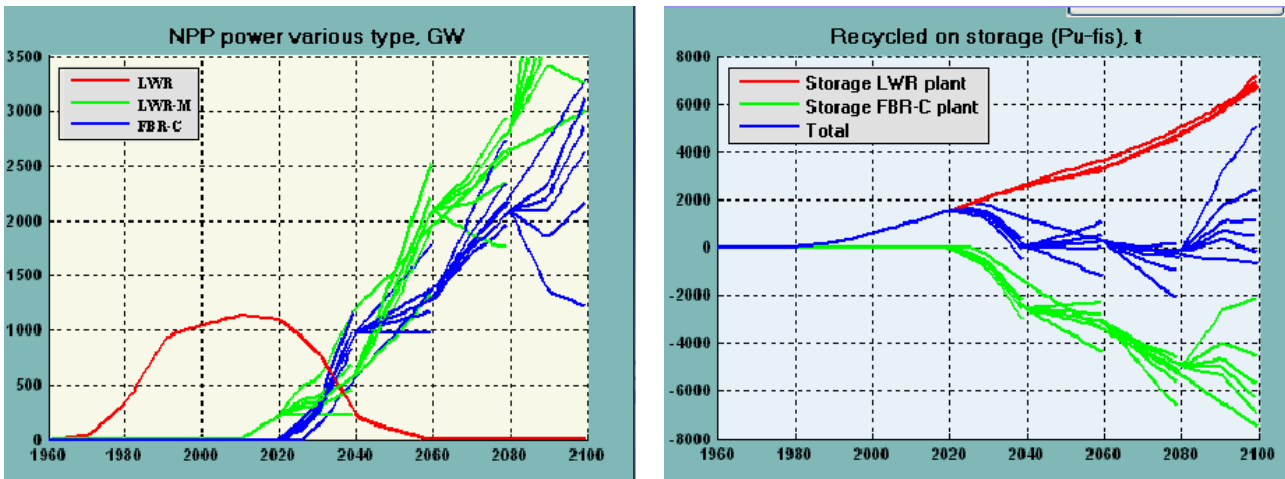


Рис. 2 Вариант развития АЭ в процессе оптимизации
(а-мощности АЭС, б-объем регенерированного плутония на складе)

На Рис. 3 представлены окончательные результаты расчета. Из рисунка видно, что структура АЭ немного изменилась. Хотя общий объем мощностей быстрых реакторов остался практически таким же, как и был, но ввод мощностей перераспределился во времени, и это позволило максимально использовать плутоний со склада.

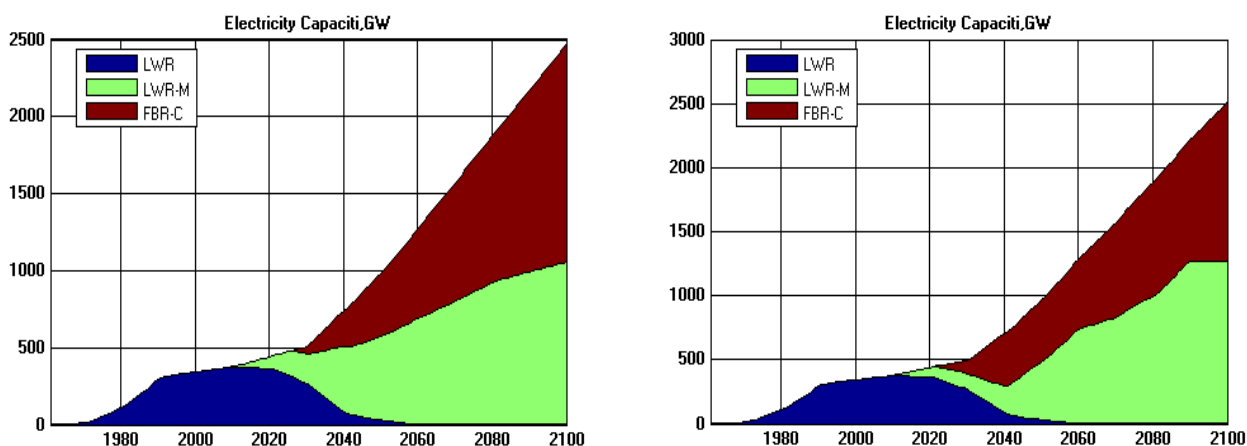


Рис. 3 Результат работы модуля

(а – мощности АЭС до оптимизации, б – мощности АЭС после оптимизации)

В третьей главе показаны возможности программы DESAE-2, для этого рассмотрены несколько сценариев развития АЭ в России и мире. В качестве вариантов мирового развития АЭ использовались сценарии, разработанные в рамках проекта ИНПРО (МАГАТЭ). Данные по этим сценариям представлены в Таблица 2.

Таблица 2 Установленные мощности по миру

Год	Установленные мощности, ГВт(эл.)		
	Низкий сценарий	Средний сценарий	Высокий сценарий
2009	370	370	370
2030	500	600	700
2050	1000	1500	2000
2100	2500	5000	10000

В расчетах структуры атомной энергетики предполагается, что доступный ресурс природного урана до конца столетия составляет ~20 млн. т. Именно так оцениваются разведанные запасы урана согласно данным “Красной” книги. В более отдаленной перспективе учитывая возможность открытия новых месторождений урана, объем запасов возможно увеличится.

Средний сценарий

В зависимости от структуры мощностей и организации ТЦ программа DESAE-2 позволяет рассчитать дополнительные величины необходимые для более полного описания варианта и дальнейшего анализа. Так в сценарии ИНПРО для “среднего сценария” предполагается наличие быстрых реакторов и соответственно замкнутого ТЦ.

Начало функционирования ЗЯТЦ: ввод в эксплуатацию перерабатывающих заводов и быстрых реакторов - в программе DESAE-2 определяется пользователем. Меняя эти данные можно проследить, как изменятся темпы ввода быстрых реакторов и востребованные объемы хранилищ ОЯТ, а также интегральное потребление природного урана. В рассматриваемом варианте принято, что переработка топлива начинается с 2025 г., начало работы замкнутого топливного цикла, а, следовательно, и

быстрых реакторов-наработчиков с 2030 года. На Рис. 4 представлен график структуры мировой атомной энергетики для данного сценария.

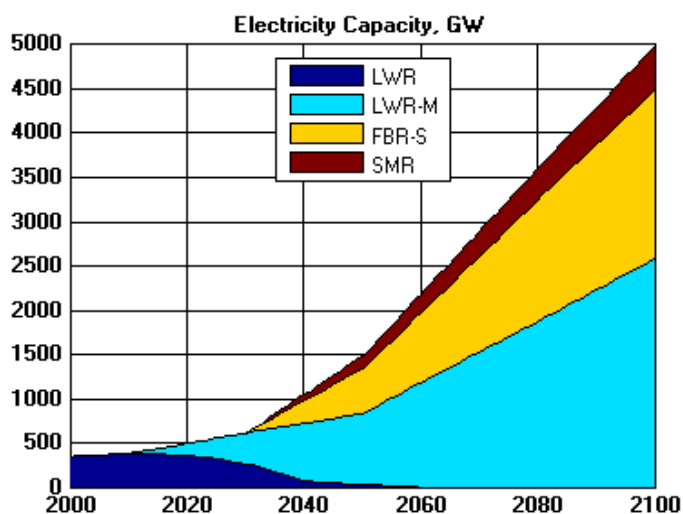


Рис. 4 Структура атомной энергетики для среднего сценария

С помощью программы DESAE-2 данный сценарий был рассчитан в двух вариантах: с рециклом урана и без него. Возврат урана в ТЦ позволит сэкономить ~ 1 млн.т. природного урана и интегральное потребление природного урана в этом случае составит 20 млн.т.

Структура мощностей атомной энергетики к концу столетия будет представлена тепловыми реакторами (порядка 60%) и быстрыми реакторами (40%). Быстрые реакторы в этом сценарии имеют умеренные параметры воспроизводства топлива ($K_B = 1.4$). Тепловые реакторы малой и средней мощности составляют примерно 10% мощностей мировой атомной энергетики. Потребность в годовой добыче природного урана и работах разделения представлена на Рис. 5.

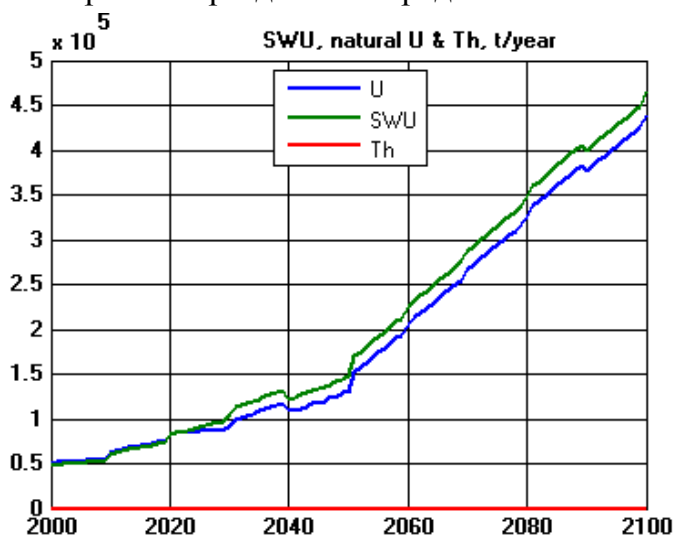


Рис. 5 Потребность в годовой добыче урана и работах разделения

Масштаб переработки облученного топлива характеризуется следующими цифрами: 30 000 т ОЯТ/год в 2050 году и 60 000 т ОЯТ/год в 2100 году.

При рассмотрении вариантов с замыканием ТЦ по плутонию, обычно учитывают баланс плутония в системе. Программа DESAE-2 представляет такую

информацию в виде графика баланса делящихся изотопов плутония (Pu^{239} , Pu^{241}) на складах переработанного топлива. (Рис. 6)

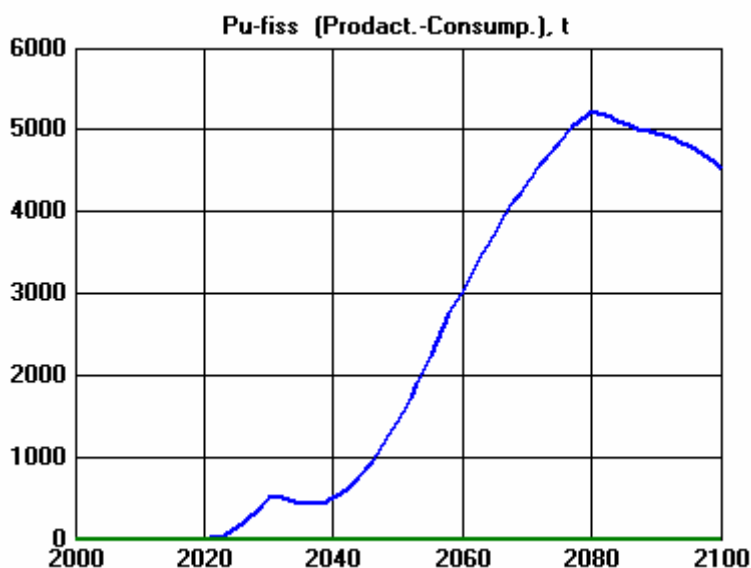


Рис. 6 Баланс делящихся изотопов плутония на складе

Такой график позволяет оценить, насколько полно используется вторичное топливо, не возникает ли в нем дефицита, и при необходимости изменить сценарий с целью получения более сбалансированного. Так изменяя структуру мощностей в сторону увеличения доли быстрых реакторов, можно получить вариант с меньшим количеством избыточного плутония на складах. Один из возможных сценариев представлен на Рис. 7.

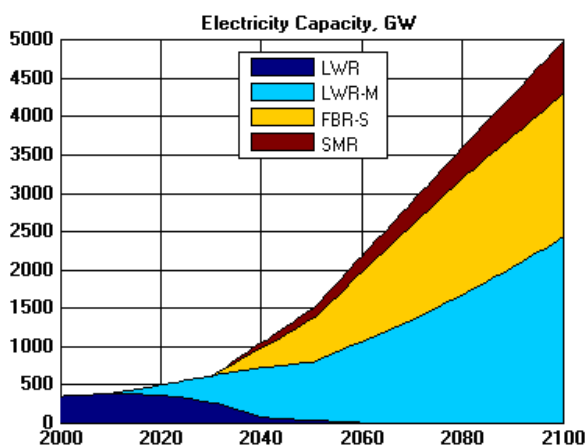


Рис. 7 Структура АЭ для среднего сценария (сбалансированная)

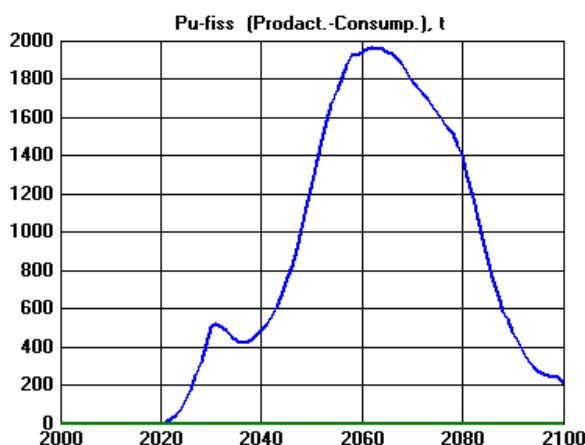


Рис. 8 Баланс делящихся изотопов плутония на складе

Основное отличие рассмотренных вариантов заключается в более интенсивном вводе быстрых реакторов во втором случае. Так в 2050 году их доля составит ~ 37 %, а не 34 % как было раньше. При этом в 2100 году структура мощностей для этих вариантов практически не отличается. Такое изменение графика ввода быстрых реакторов позволило получить более сбалансированный сценарий по делящимся изотомам плутония (Рис. 8), а также позволяет сэкономить к 2100 году ~ 600 тыс.т. природного урана.

Результаты анализа

Анализ сценариев показал, что:

- при низких темпах развития АЭ, структура мощностей представлена в основном тепловыми реакторами, работающими в открытом ТЦ. Основное внимание при рассмотрении таких сценариев уделяется объемам необходимого природного урана и накопленного ОЯТ.

- при средних темпах развития, рассматривается замкнутый ТЦ с БР с умеренным КВ. Анализ таких вариантов позволяет выявить наиболее оптимальное время для начала замыкания ТЦ, т.е. год начала переработки ОЯТ и ввода БР. Соотношение реакторов в сценарии, в том числе, определяется ограничением по интегральному потреблению урана и балансом плутония на складах.

- при высоких темпах развития, в данном случае в систему вовлекается торий. Таким образом, возникает необходимость следить не только за балансом плутония, но и за балансом U^{233} . Расчет и анализ подобных сценариев позволяет выяснить подходящее время ввода реакторов, потребляющих U^{233} .

Анализ сценариев при региональном разбиении

При анализе сценариев, полученных в глобальном аспекте, нельзя не учитывать разные начальные условия у стран развивающихся АЭ. Поэтому мировую атомную энергетику целесообразно рассматривать в региональном разрезе.

В работе в качестве примера рассмотрены два региона: Европа и Индия. Эти регионы выбраны как противоположности. Так АЭ в Европе имеет длительную историю и существенную долю в производстве электроэнергии, в Индии строительство АЭС только начинается. По опубликованным данным в развитых странах, в том числе в европейском регионе, существенного прироста мощностей не планируется, в то время как в Индии и Китае прогнозируется широкомасштабное развитие АЭ. Для того чтобы понять насколько региональные различия могут повлиять на выбор сценария ниже рассмотрены несколько вариантов.

Реализовать самообеспеченность Индии по топливу в условиях широкомасштабного развития можно только при условии замыкания топливного цикла, при этом разумно вводить реакторы с $KV > 1$. Такое структурное формирование ядерной энергетики будет привлекательно для быстрорастущих экономик развивающихся стран (Индия, Китай) и развитых стран (Япония, Корея) и позволит быстрее наработать достаточное количество плутония для ввода новых мощностей быстрых реакторов. Со временем по мере выработки срока службы реакторов с высоким КВ, их можно будет заменить быстрыми реакторами с $KV = 1$.

На Рис. 9 представлена структура АЭ для Индии (средний сценарий). Согласно сценарию реакторы LWR вводятся с 2000 года, с 2020 года они замещаются реакторами LWR-M, с 2030 года начинается ввод быстрых реакторов с $KV = 1.4$.

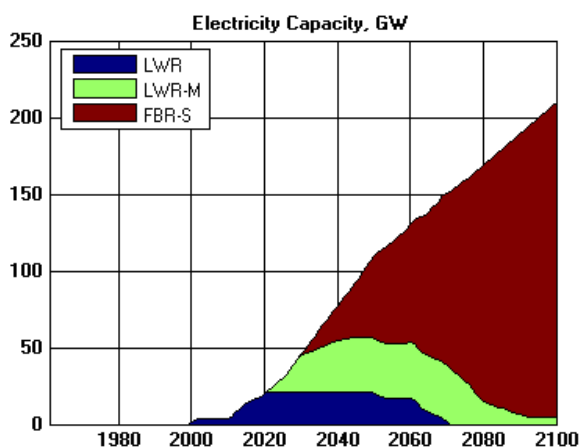


Рис. 9 Структура установленных мощностей для Индии (средний сценарий)

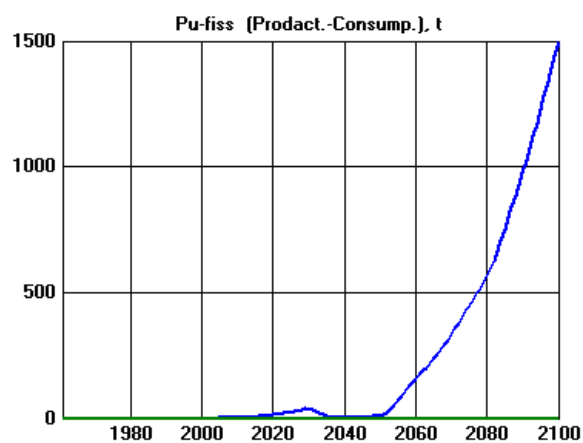


Рис. 10 Баланс делящихся изотопов плутония на складе

При таком подходе в Индии будет накоплено достаточное количество плутония, чтобы реализовать свою программу ввода мощностей, а после 2060 года в системе появляется избыточный плутоний.

Накопление плутония в системе можно избежать, изменив предполагаемую структуру АЭ Индии. Например, этот плутоний можно загружать в быстрые реакторы, нарабатывающие U^{233} . Это особенно актуально для Индии, так как в blankets этих реакторов загружается торий, запасы которого в Индии превосходят запасы природного урана. В дальнейшем наработанный U^{233} можно загрузить в реакторы HTGR.

Замыкание ТЦ в развитых регионах (Европа, США и т.д.) также представляется разумным. В качестве примера, приведен анализ сценария развития АЭ для Европы (средний сценарий). Здесь, также как и в других развитых странах, не предполагается существенного увеличения масштабов АЭ. В то же время эти страны располагают достаточным количеством накопленного плутония в ОЯТ тепловых реакторов, чтобы удовлетворить свои потребности в формировании стартовых загрузок топлива для реакторов без расширенного воспроизводства. В быстрых реакторах с высоким КВ ($KB \approx 1.4 \dots 1.6$) нет необходимости, так как в данном случае они будут способствовать лишь накоплению невостребованного плутония. На Рис. 11 представлены установленные мощности: до 2020 года вводятся тепловые реакторы типа LWR, после 2020 года они замещаются модернизированными реакторами LWR-M, в 2030 году вводятся быстрые реакторы FBR-C с $KB=1.05$.

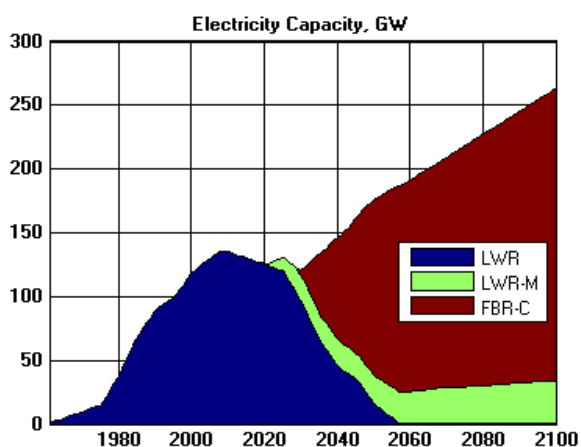


Рис. 11 Структура атомной энергетики Европы для среднего сценария

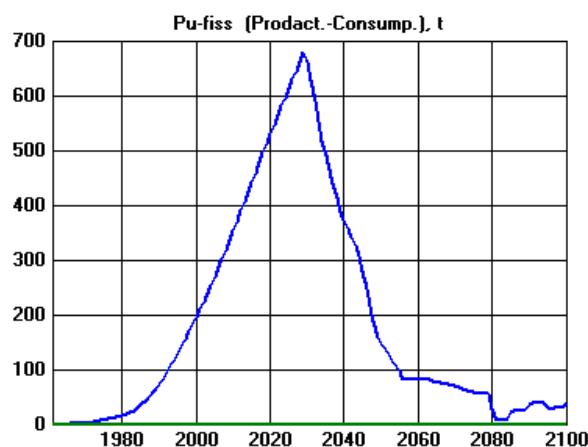


Рис. 12 Баланс делящихся изотопов плутония на складе

Из Рис. 11 видно, что к концу столетия быстрые реакторы практически полностью вытеснят тепловые. При этом сценарий получается сбалансированным по делящимся изотопам плутония на складе.

Результаты анализа

Анализ сценариев показал необходимость регионального разбиения при продумывании структуры АЭ, так как на нее могут оказать влияние региональные особенности (запасы урана, тория, накопленные запасы плутония, масштабы развития АЭ). Для стран Европы, США и Канады при незначительном росте мощностей для использования плутония можно ввести БР с КВ=1. В случае с Индией и Китаем работы этих реакторов будет недостаточно и требуется БР с более высоким КВ. Такая структура позволит быстрее наращивать мощности без привлечения топлива из вне.

Анализ сценариев развития АЭ в России

В рамках “Стратегии ядерной энергетики России” разработанной в НИЦ “Курчатовский институт” с использованием программного комплекса DESAE-2 было рассмотрено множество сценарных вариантов развития АЭ в России.

Представленных ниже результаты расчетов разбиты на три основные группы структур ядерной энергетики, различаемых в части топливоиспользования, которые в полной мере отвечают физическим свойствам реакторов их наполняющих.

Первая группа

Первая группа предполагает развитие АЭ на основе реакторов, ориентированных на природные ресурсы U^{235} (коэффициент воспроизводства меньше единицы) (Рис. 13). Это наиболее продвинутое в части технологий современные тепловые реакторы, перспективное развитие которых должно сопровождаться пропорциональным ростом добычи природного урана вне зависимости от того, в открытом или замкнутом топливном цикле они работают.

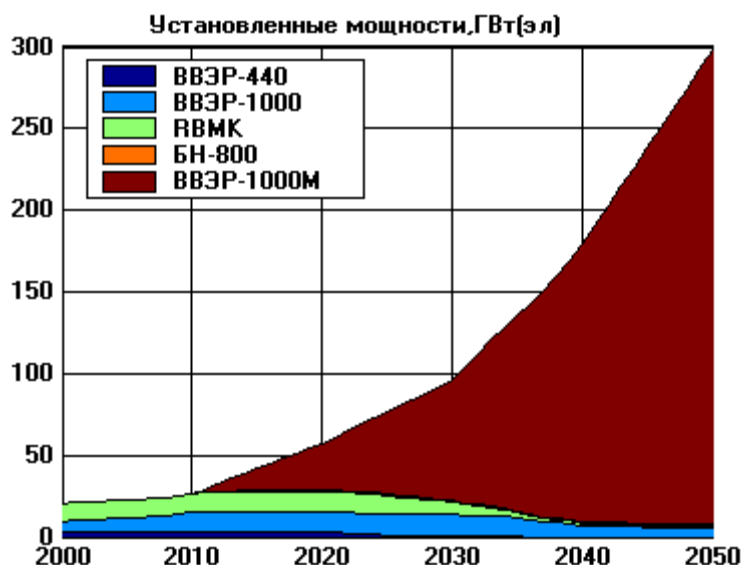


Рис. 13 Сценарий развития АЭ в России (первая группа)

Ориентация на долгосрочное развитие по такому варианту имеет наибольший риск, связанный с ограниченностью ресурсной базы природного урана.

В случае замыкания топливного цикла в этих вариантах и сжигания плутония в тепловых реакторах топливных ресурсов для перехода к другой структурной организации атомной энергетики не остается.

Вторая группа

Во вторую группу сгруппированы сценарии развития на основе быстрых реакторов конверсионного типа. Эти реакторы имеют коэффициент воспроизводства топлива, близкий к единице. (Рис. 14) Реакторы этой группы потребляют природный ресурс только для формирования стартовых загрузок, возможно с небольшой подпиткой для выхода в равновесный режим. После этого нарабатываемого ими нового топлива достаточно для обеспечения текущих топливных потребностей.

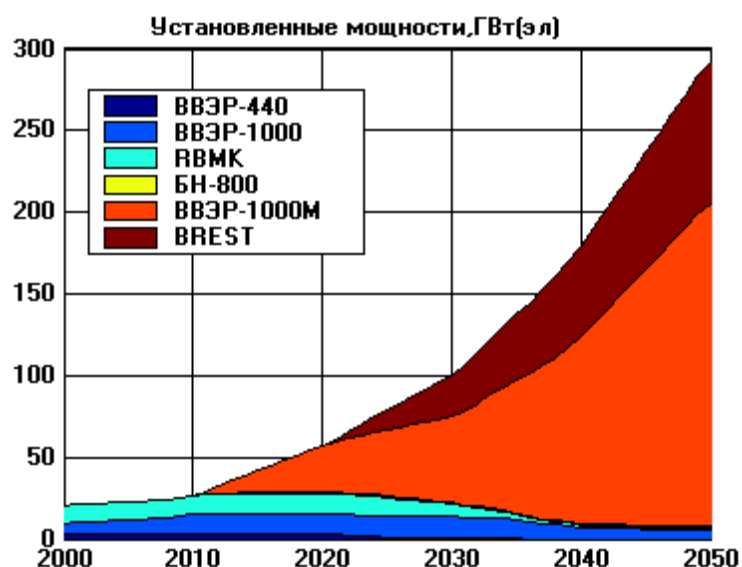


Рис. 14 Сценарий развития АЭ в России (вторая группа)

Принципиально не важно, из какого источника берется топливо для стартовых загрузок, это может быть плутоний, накопленный в ОЯТ тепловых реакторов, или

обогащенный природный уран. Темп развития в этих вариантах зависит от того, в каких объемах могут быть предоставлены топливные ресурсы для формирования стартовых загрузок.

Третья группа

В эту группу входят сценарии развития ядерной энергетики на основе быстрых реакторов с расширенным воспроизводством, т.е. имеют коэффициент воспроизводства топлива заметно больше единицы. (Рис. 15) Развитие ядерной энергетики на основе таких реакторов способствует наиболее активному вовлечению в топливный цикл сырьевых изотопов U^{238} и Th^{232} , оно в наименьшей степени сдерживается ограниченностью природной ресурсной базы. Новые топливные загрузки формируются из избыточного плутония, нарабатываемого быстрыми реакторами, и потребности использования в обогащенном уране для стартовых загрузок быстрых реакторов нет.

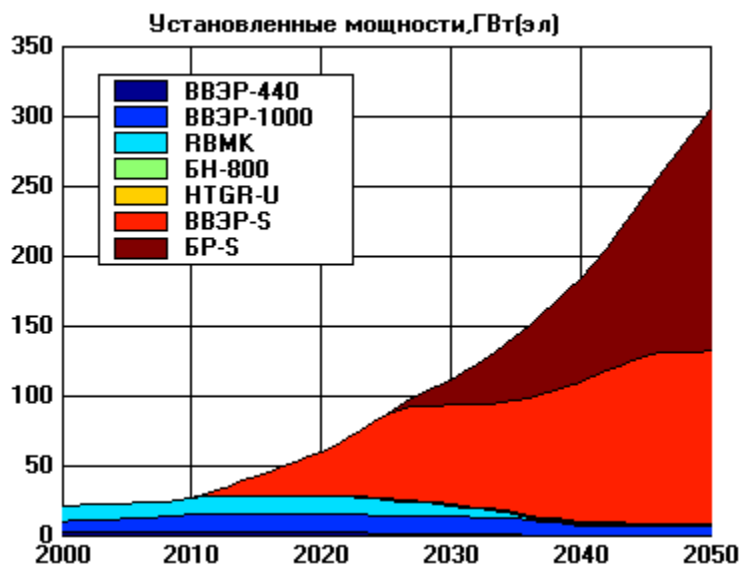


Рис. 15 Сценарий развития АЭ в России (третья группа)

Наибольшие риски этого направления развития носят технологический характер, а также связаны с глобальными политическими рисками в сфере нераспространения.

Расчет инвестиций

Используя экономический модуль программы DESAE-2 выполнены оценки годового объема инвестиций в атомно-энергопромышленный комплекс. (Рис. 16)

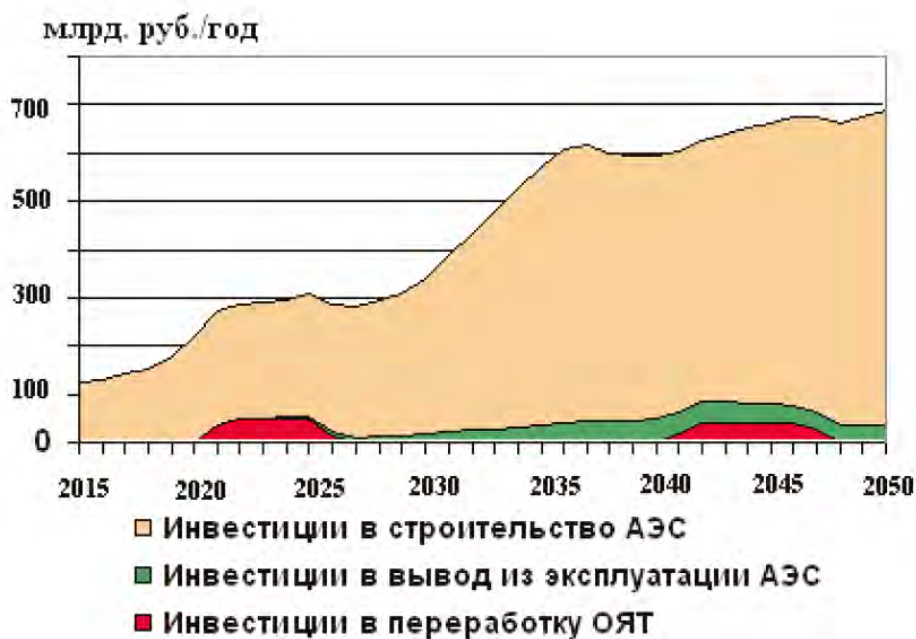


Рис. 16 Инвестиции в атомно-энергетический комплекс

Видно, что все инвестиции в инфраструктуру топливного цикла ядерной энергетики и вывод АЭС из эксплуатации будут составлять около 10–15% от затрат на строительство АЭС.

Выводы.

1. Показано, что для учета неопределенностей и многообразия вариантов развития АЭ целесообразно применять компьютерное моделирование.
2. Доработан и отлажен программный комплекс DESAE-2 для расчета вариантов развития АЭ.
3. Разработаны математические модели, моделирующие ЗЯТЦ с использованием регенерированного топлива переменного изотопного состава.
4. Разработан автоматизированный модуль для поиска приемлемого варианта развития АЭ. В качестве целевых функций рассмотрены баланс делящихся изотопов и приведенные затраты.
5. Проведены расчеты сценариев развития АЭ, демонстрирующие возможности программного комплекса DESAE-2 и объем выходной информации.
6. На примере расчетов для различных регионов и мира в целом показано влияние масштабов будущей АЭ на ее структуру, а также ограничения, которые накладываются на будущую энергетику запасами топлива в регионе и историей ввода реакторов.
7. Результаты данной работы были использованы в работах, подготовленных в рамках проекта ИНПРО (МАГАТЭ).

Основные публикации по теме диссертации:

1. **Андрианова Е.А., Цибульский В.Ф.** Исследование замкнутых топливных циклов атомной энергетики с учетом изменения изотопного состава топлива. – В сб.: 4-ая Курчатовская молодежная научная школа”, 20-22 ноября 2006 г., Москва, стр. 9
2. **Андрианова Е.А., Цибульский В.Ф.** Комплексные исследования проблемы повышения выгорания топлива в реакторах ВВЭР-1000. – В сб.: 5-я Курчатовская молодежная научная школа, 19-21 ноября 2007 г., Москва, стр.10
3. **Андрианова Е.А., Цибульский В.Ф.** Повышение выгорания топлива в ВВЭР. – Атомная энергия, том 104, вып. 3, 2008, с. 137-141.
4. **Андрианова Е.А., Давиденко В.Д., Цибульский В.Ф.** Программа DESAE для системных исследований перспектив развития ядерной энергетики. – Атомная энергия, том 105, вып. 6, 2008, с. 303-306.
5. **Andrianova E.A., Davidenko V.D., Tsibulskiy V.F.** Dynamic Energy System Atomic Energy (DESAE 2.2) – User Manual – IAEA, Vienna, 2009
6. **Андрианова Е.А., Давиденко В.Д., Цибульский В.Ф.** Динамика атомной энергетической системы (Руководство пользователя). Брошюра, НИЦ «Курчатовский институт», Москва, 2011