

УДК 621.039.003  
ББК 31.4

**ИНТЕГРИРОВАННЫЙ ПОДХОД  
НА ОСНОВЕ МЕТОДОВ ИМИТАЦИОННО-  
ДИНАМИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ  
И ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОСТРАНСТВА  
ПАРАМЕТРОВ К МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОЙ  
ОПТИМИЗАЦИИ СТРУКТУР РАЗВИВАЮЩИХСЯ  
СИСТЕМ ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ**

**Андреианов А. А.<sup>1</sup>, Купцов И. С.<sup>2</sup>, Светличный Л. И.<sup>3</sup>**  
*(Обнинский институт атомной энергетики  
НИЯУ МИФИ, Обнинск)*

*Описаны интегрированный подход на основе методов имитационно-динамического моделирования и исследования пространства параметров для решения задач многокритериальной оптимизации структуры ядерной энергетики и разработанная программная система MEDNES (Multi-criteria evaluator of developing nuclear energy systems), реализующая данный подход. Также представлены примеры использования предложенного инструментария.*

Ключевые слова: ядерный топливный цикл, многокритериальная оптимизация, ядерная энергетика, программный комплекс, имитационно-динамическое моделирование, метод исследования пространства параметров.

---

<sup>1</sup> Андрей Алексеевич Андреианов, кандидат технических наук, доцент (andriyanov@iate.obninsk.ru).

<sup>2</sup> Илья Сергеевич Купцов, кандидат физико-математических наук, ассистент (kuptsov\_ilia@list.ru).

<sup>3</sup> Леонид Игоревич Светличный, студент (l.swetlichnyj@yandex.ru).

## 1. Введение

Несмотря на существующий солидный арсенал моделей, подходов, программных средств для системных исследований перспектив развития ядерной энергетики (ЯЭ), в настоящее время ведется активная работа по поиску новых путей решения данного класса задач [1, 5, 13]. Это связано с существенным расширением круга задач и расширением спектра факторов, которые будут определять развитие ЯЭ в перспективе. К их числу следует отнести такие факторы как нераспространение, отходы, безопасность. Тогда как характерной чертой существующих моделей развивающихся систем ЯЭ является учет, главным образом, экономических аспектов.

Следует также отметить, что с ограниченностью области применения моделей связана проблема получения итогового результата, определяющего наиболее эффективный вариант ее развития, где до настоящего времени не было предложено общепризнанных алгоритмов и методических подходов.

Частично восполнить имеющиеся недостатки позволяет разработанный и описанный ниже интегрированный подход на основе методов имитационно-динамического моделирования и исследования пространства параметров, позволяющий решать задачи по оптимизации структуры ЯЭ в многокритериальной постановке.

В разделе 1 представлен способ конструирования системы уравнений, описывающих балансы материальных потоков в развивающейся системе ЯЭ (раздел 1.1), которые, будучи дополнены набором критериев эффективности, совместно с применением метода исследования пространства параметров (раздел 1.2) составляют суть предложенного интегрированного подхода.

В разделе 2 кратко описаны функциональные возможности разработанной программной системы *MEDNES (Multi-criteria evaluator of developing nuclear energy systems)* и инструментальные средства, используемые при ее разработке.

В разделе 3 качественно описаны и представлены результаты решения с использованием разработанного инструментария трех различных задач из области системно-аналитических и

прогнозных исследований в обоснование приоритетов развития ЯЭ.

## 2. Описание интегрированного подхода

### 2.1. МЕТОД ИМИТАЦИОННО-ДИНАМИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ РАЗВИТИЯ ЯЭ

#### Балансы ядерного топлива в развивающейся системе ЯЭ

Согласно общей методологии построения моделей в рамках системного анализа необходимо выделить следующие типичные этапы [9]: 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 связей представляет в агрегированном дифференциальном виде процесс топливообеспечения реакторов в конкретном регионе (рост мощностей необходимо обеспечить топливом заданного вида и количества) [2]:

$$(1) \quad F_{ik}^j(t) \frac{dN_i^{ej}(t)}{dt} + B_{ik}^j(t) N_i^j(t) = q^{ej}(t) + q^{rj}(t) (\vec{N}(t)),$$

где  $i = 1, \dots, n$  - номер установки;  $j = 1, \dots, m$  - номер региона;  $k = 1, \dots, l$  - тип топлива

Левая часть уравнения (1) определяет спрос на топливо заданного вида. Спрос складывается за счет потребностей обеспечить ввод новых мощностей (первое слагаемое) и заменить выгоревшее топливо в эксплуатирующихся энергетических реакторах (второе слагаемое). Правая часть уравнения задает предложение конкретного вида топлива. Оно определяется имеющейся структурой топливоснабжения системы ЯЭ в рассматриваемом регионе и возможностью импорта компонентов топлива из других регионов. Здесь и далее приняты условные обозначения:  $F_{ik}^j(t)$  – первичная загрузка топлива в реактор;  $B_{ik}^j(t)$  – ежегодная перегрузка топлива реактора. Функциональная зависимость параметров уравнений от времени учитывает возможное усовершенствование технологий.

Введем следующие обозначения:  $N(t)$ ,  $N^c(t)$ ,  $N^d(t)$  – соответственно установленная мощность реакторов в году  $t$ , полная мощность реакторов, введенных к году  $t$ , и полная выведенная мощности реакторов к году  $t$ . Указанные величины связаны следующими соотношениями:

$$(2) \quad N(t) = N^c(t) - N^d(t); \quad N^d(t) = N^c(t - T_f); \quad N^d(t) = \sum_{i=1}^{\lfloor \frac{t}{T_f} \rfloor} N(t - iT_f),$$

где  $\lfloor \cdot \rfloor$  - целая часть числа.

Учет этого обстоятельства необходим для корректного моделирования реальной потребности во вводе новых ядерно-энергетических мощностей, вызванной не только ростом потребностей в ЯЭ, но также и выводом отработавших свой срок реакторов из эксплуатации.

В общем случае сумма всех мощностей ядерно-энергетических установок в  $j$  регионе должна быть не меньше потребностей в ЯЭ в этом регионе. Это требование накладывает следующее ограничение:

$$(3) \quad N_{\text{яЭ}}^j(t) \leq \sum_i N_i^j(t).$$

Рассмотрим правую часть уравнения (1). Величина  $q_i^e(t)$  определяет расход  $i$ -го запаса топлива. На эту переменную могут быть наложены определённые ограничения в зависимости от постановки конкретной задачи. Так, например, ограничение вида

$$(4) \quad \int_{T_1}^{T_2} q_i^e(t) dt \leq Q_i$$

соответствует ограничению на общее количество топлива типа  $i$ , которое может быть потреблено в течение промежутка  $[T_1, T_2]$ . Если происходит рост емкости источника на известную величину  $\Delta Q_i(t_j)$  в последовательные моменты  $t_j$ , то ограничения (4) примут следующий вид:

$$(5) \quad \int_{T_1}^{t_j} q_i^e(t) dt \leq Q_i + \Delta Q_i(t_j).$$

Расход вторичного ядерного топлива, наработанного в процессе развертывания системы ЯЭ,

$$q^{i,j}_{ik}(\vec{N}(t)) = q^{i,j}_{ik} \left( \left\{ N_i^j(t) \right\}_{\substack{i=1..N \\ j=1..M}} \right),$$

представим в следующем общем виде:

$$(6) \quad q^{i,j}_{ik}(\vec{N}(t)) = \hat{f}^{i,j}_{ik}(\vec{q}^{out}(\vec{N}(t))).$$

Как видно из уравнения, в модели допускается обмен регенерированным топливом между реакторами различного типа в различных регионах.

Оператор  $\hat{f}^{i,j}_{ik}(\cdot)$  связывает выходящие из реакторов с входящими в реактор топливными потоками и содержит в себе информацию об особенностях организации структуры ядерного топливного цикла (ЯТЦ) и стратегии обращения с делящимися материалами. Выходящие из реактора топливные потоки могут быть представлены в следующем виде:

$$(7) \quad q^{out,j}_{ik}(N_i^j(t)) = F_{ik}^j(t) \frac{dN_i^{d,j}(t)}{dt} + B_{ik}^j(t) N_i^j(t).$$

Первое слагаемое уравнения (7) определяет последнюю выгрузку топлива из реакторов, выводящихся из эксплуатации. Второе слагаемое соответствует ежегодной выгрузке выгоревшего топлива из эксплуатирующихся энергетических реакторов.

В операторе  $\hat{f}^{i,j}_{ik}(\cdot)$  могут быть учтены такие обстоятельства, как приток ядерных материалов из других регионов и иных типов реакторных установок, задержки на различных шагах и мощности предприятий ЯТЦ, изменение свойств топливных материалов и возможные технологические модификации установок ЯТЦ в процессе развертывания ядерно-энергетической системы.

Рассмотрим более детально основные блоки, из которых конструируется этот оператор. Любой передел ЯТЦ можно описать посредством входящих в него и выходящих из него материальных потоков (рис. 1).

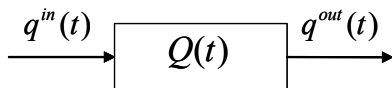


Рис. 1. Входящие и исходящие потоки

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:

$$(8) \quad Q(t) = Q_0 + \int_{t_0}^t (q^{in}(t) - q^{out}(t))dt,$$

где  $q^{in}(t)$  - входящий поток;  $q^{out}(t)$  - выходящий поток.

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

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

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):

$$(10) \quad q^{out}(t) = q^{in}(t - T_{lag}).$$

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

$$(11) \quad \int_{-\infty}^t q^{out}(t')dt' \leq \int_{-\infty}^t q^{in}(t')dt'.$$

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

$$(12) \quad q^{in}(t) \leq C(t) \text{ или } q^{out}(t) \leq C(t),$$

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):

$$(13) \quad q^{out}(t) = q^{in}(t) \cdot \Theta [C(t) - q^{in}(t)] + C(t) \cdot \Theta [q^{in}(t) - C(t)],$$

где  $\Theta[t]$  - функция Хэвисайда.

В случае необходимости также возможно принять во внимание радиоактивный распад изотопов во внешнем топливном цикле. Пусть  $m_i(t)$  - скорость наработки  $i$ -го изотопа системой ЯЭ;  $\lambda$  - постоянная распада. Тогда суммарное количество этого изотопа  $M_i(t)$  с учетом его радиоактивного распада равно

$$(14) \quad M_i(t) = \int_{-\infty}^t m_i(t') \exp(-\lambda(t-t')) dt'.$$

Реальная скорость изменения его количества в цикле определяется выражением

$$(15) \quad \bar{m}_i(t) = \frac{d}{dt} M_i(t) = m_i(t) - \int_{-\infty}^t \lambda m_i(t') \exp(-\lambda(t-t')) dt'.$$

Входящие и исходящие потоки могут быть определены двумя способами. Во-первых, введением дополнительных уравнений, связывающих их с определяемыми переменными и, в конечном счете, замыкающих исходную систему топливного баланса (1). В общем случае модель будет представлять собой набор дифференциальных уравнений с последствием (запаздывающим аргументом).

Во-вторых, в случае задания целевого функционала часть из потоков может быть определена посредством решения соответствующей задачи оптимального управления, остальные – на основе решения замыкающей системы уравнений. Наложение разнообразных ограничений на области допустимых значений переменных моделей или рассчитываемых с их помощью функционалов позволяет естественным образом учесть системные ограничения и тем самым в процессе расчетов не уйти в область нефизических решений [15].

На основе рассчитанных потребностей в различных видах топлива по известным соотношениям могут быть определены потребности в природном уране, услугах по конверсии, обогащению, производству топлива, переработке отработавшего

ядерного топлива (ОЯТ) и др. Так, например, балансы материалов, определяемые планами развития ЯЭ, могут быть получены, если известен момент пуска установки  $t$  и ее возраст  $\tau$ . Пусть  $g_i^j(t, \tau)$  – удельный расход материала (расход материала в расчете на единицу мощности), тогда общий расход материала всеми эксплуатируемыми установками может быть определен следующим образом:

$$(16) G_i^j(t) = \int_{-\infty}^t g_i^j(t', t-t') \frac{dN_i^j(t')}{dt'} dt'.$$

В зависимости от способа замыкания уравнений связей и задания критерия качества описанный подход может быть использован для решения различного класса задач. Если необходимо определить показатели развивающихся систем ЯЭ, такие как динамика расхода природного урана, потребности в мощностях предприятий топливного цикла и др. по заданной структуре ЯЭ, подход становится эквивалентным имитационному моделированию. Однако то обстоятельство, что в модели могут быть учтены внутрисистемные связи и ограничения, позволяет освободить исследователя от необходимости постоянного наблюдения за их соблюдением.

Если задан целевой функционал, например, общий расход природного урана, время нахождения вторичных делящихся материалов на складе, полные приведенные затраты и др., модель приводит к задаче оптимального управления. Наиболее эффективным способом решения представляется сведение ее к задаче математического программирования. Это связано с тем, что алгоритмы математического программирования эффективно справляются с ограничивающими неравенствами, наложенными как на переменные уравнений, так и на управляющие параметры.

Теоретическая ценность описанного подхода заключается в том, что он позволяет количественно учесть ряд факторов, не нашедших адекватного отражения в известных моделях системного анализа развивающейся ЯЭ. К их числу следует отнести возможность одновременного описания как неравновесного, так и равновесного этапов развития ЯЭ (по так называемым «равновесным траекториям»), учета ограничений на текущее развитие



ЯЭ из будущего (так называемые «эффекты последствия»). Также следует указать на наличие механизма выбора между альтернативными вариантами, что позволяет решать задачи в оптимизационной постановке, а также на возможность учета нелинейных ограничений, возможность определения потенциала разнообразных технологических платформ и установления взаимосвязей между внешними факторами и внутренними параметрами системы ЯЭ, позволяющими определить их наиболее целесообразные значения. Будучи объединенный с методом исследования пространства параметров он может быть использован для проведения многокритериальной оптимизации.

Описанный подход является фактически методом конструирования системы уравнений, описывающих функционирование системы ЯЭ. В зависимости от постановки конкретной задачи и сделанных предположений относительно структуры ЯЭ и особенностей ее ЯТЦ, на основе описанных соотношений может быть подготовлена модель развивающейся системы ЯЭ.

## *2.2. МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОСТРАНСТВА ПАРАМЕТРОВ*

Метод исследования пространства параметров предложен И.М. Соболев и Р.Б. Статниковым, которые показали его широкие возможности для решения инженерных оптимизационных задач и задач оптимального управления [10, 16, 17]. Метод предназначен для решения многокритериальных задач нелинейного программирования и основан на идеи случайного поиска, где в качестве случайных чисел используются так называемые равномерно-распределенные последовательности.

Метод исследования пространства параметров состоит из следующих этапов (рис. 2):

- генерация набора пробных точек, удовлетворяющих заданной системе уравнений и системе ограничений;
- составление таблиц испытаний (набор рассчитанных значений критериев для заданного набора пробных точек);
- выбор критериальных ограничений и отбор решений, удовлетворяющим им;
- проверка разрешимости задачи и формирование множества эффективных решений.

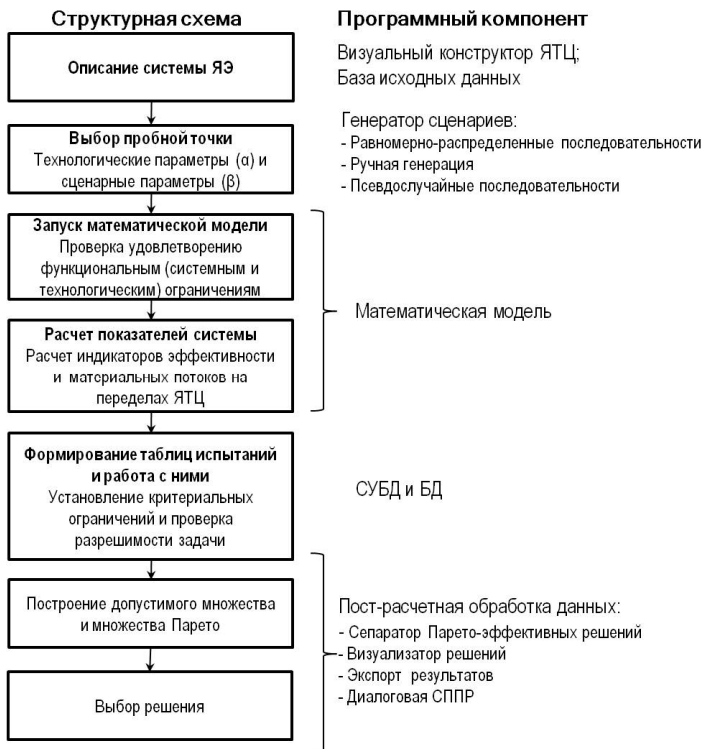


Рис. 2. Схема метода и соответствующие программные компоненты

Предположим, что имеется математическая модель системы ЯЭ, с помощью которой можно вычислять любые ее характеристики:

$$(17) \Psi(\vec{N}, \vec{N}_0, \vec{\alpha}, \vec{\beta}) = 0.$$

Под  $\Psi(\vec{N}, \vec{N}_0, \vec{\alpha}, \vec{\beta})$  понимается система уравнений, сконструированная на основе описанного в предыдущем разделе подхода.

Пусть исследуемая система зависит от  $r + s$  варьируемых параметров  $\alpha_1, \dots, \alpha_s; \beta_1, \dots, \beta_s$ , которые можно считать точкой в  $(r + s)$ -мерном пространстве. В роли  $\alpha_j$  в системе ЯЭ выступают параметры реакторных установок и объектов ЯТЦ, в роли

$\beta_j$  - системные показатели (доли реакторов в структуре ЯЭ, доля конкретного типа топлива в реакторе, доля перерабатываемого ОЯТ и пр.).

Различают три типа ограничений - параметрические, функциональные и критериальные. Параметрические ограничения имеют вид

$$(18) \alpha_j' \leq \alpha_j \leq \alpha_j'', j = 1, \dots, r, \beta_j' \leq \beta_j \leq \beta_j'', j = 1, \dots, s.$$

Функциональные зависимости  $\varphi_l(\alpha, \beta)$  и ограничения на них можно записать так:

$$(19) c_l' \leq \varphi_l(\vec{\alpha}, \vec{\beta}) \leq c_l'', l = 1, \dots, t,$$

где  $c_l'$  и  $c_l''$  – ограничения, которые могут быть заданы априори (например, отражающие нормативные требования).

В качестве индикаторов эффективности (критериев) могут выступать суммарные приведенные затраты, индикаторы риска несанкционированного распространения, объемы отходов и т.д. Эти критерии  $f_v(\vec{\alpha}, \vec{\beta})$ ,  $v = 1, \dots, k$ , требуется минимизировать.

В таблице 1 представлены некоторые из возможных критериев, отражающих представления экспертов об эффективности функционирования системы ЯЭ по каждой из проблемных областей, и которые используются в настоящее время в рамках крупнейших международных проектов по системно-аналитическим и прогнозным исследованиям в обоснование приоритетов развития ЯЭ. Очевидно, что данный список может быть расширен, для того чтобы высветить иные аспекты эффективности функционирования системы ЯЭ.

Каждый из критериев может быть оценен по следующей общей формуле, параметры которой определяются в соответствии с содержанием критерия:

$$f = \int_{t_0}^t \sum_{i=1}^N w_i(t) \cdot f_i(t) dt, \text{ где } N - \text{ количество}$$

включаемых в рассмотрение элементов;  $f_i(t)$  – годовые материальные потоки или производственные мощности ЯТЦ;  $w_i(t)$  – удельный вклад в значение критерия от соответствующих годовых материальных потоков или производственных мощностей.

Таблица 1. Возможные критерии

Область	Критерий
Экономика	<ul style="list-style-type: none"> <li>• полные приведенные затраты</li> </ul>
Ресурсы	<ul style="list-style-type: none"> <li>• общее потребление ресурсов</li> <li>• объемы годового потребления</li> </ul>
Обращение с ОЯТ	<ul style="list-style-type: none"> <li>• суммарные объемы ОЯТ</li> </ul>
Обращение с РАО	<ul style="list-style-type: none"> <li>• интегральная наработка минорных акти- нидов</li> <li>• интегральная радиотоксичность отходов</li> </ul>
Нераспространение	<ul style="list-style-type: none"> <li>• количество делящихся материалов в ЯТЦ</li> <li>• мощности ЯТЦ по производству делящих- ся материалов</li> <li>• время нахождения материалов на складе</li> </ul>

Следует отметить, что в зависимости от постановки конкретной задачи необходимо выбрать определенный набор критериев, в соответствии с которыми будет проводиться многокритериальная оптимизация. В разделе 3 качественно описаны и представлены результаты решения с использованием разработанного инструментария трех различных задач (задача векторной идентификации, задача перспективного планирования и задача поиска сбалансированных по различным критериям структур системы ЯЭ).

Для того чтобы исключить из рассмотрения варианты, для которых значения отдельных критериев оказываются неудовлетворительными, необходимо ввести критериальные ограничения:

$$(20) f'_v \leq f_v(\bar{\alpha}, \bar{\beta}) \leq f''_v, v = 1, \dots, k.$$

Разница между критериальными и функциональными ограничениями состоит в том, что значения первых, как правило, назначаются в процессе решения задачи и многократно пересматриваются. Поэтому сформулировать значения критериальных ограничений до решения задачи не возможно. Перечисленные ограничения выделяют допустимое множество в пространстве решений.

Основная задача многокритериальной оптимизации заключается в поиске подмножества множества допустимых решений (называемого множеством Парето), для которого совокупность векторов из допустимого множества нельзя одновременно улучшить по всем критериям качества. Из этого подмножества эксперт и определяет, в конечном счете, окончательное решение. Разработанная методика позволяет проводить аппроксимацию множества Парето в случае решения многокритериальных задач.

### **3. Краткое описание программной системы MEDNES**

Описанный интегрированный подход реализован в виде программного комплекса *MEDNES* (*Multi-criteria Evaluator of Developing Nuclear Energy Systems*). *MEDNES* предназначен для решения многокритериальных задач: оптимизации структуры, идентификации параметров, управления и др. *MEDNES* предполагает построение допустимого множества решений в процессе интерактивной работы эксперта с системой. Для этого в *MEDNES* имеется возможность исследования зависимостей критериев от параметров, критериев от критериев, коррекции ограничений [4].

Предусмотрена возможность установки различных генераторов пробных точек. В настоящий момент реализованы генераторы равномерно-распределенных последовательностей Холтона, Соболя, Фора. Также могут быть использованы стандартные датчики псевдослучайных чисел и равномерные последовательности.

Пользователь также имеет возможность в диалоговом режиме формировать набор критериев эффективности, имеющих в общем случае нелинейный вид, добавлять дополнительные расчетные точки для уточнения решения в определенной области, интерактивного формирования и визуального отображения структуры исследуемого ЯТЦ (рис. 3).

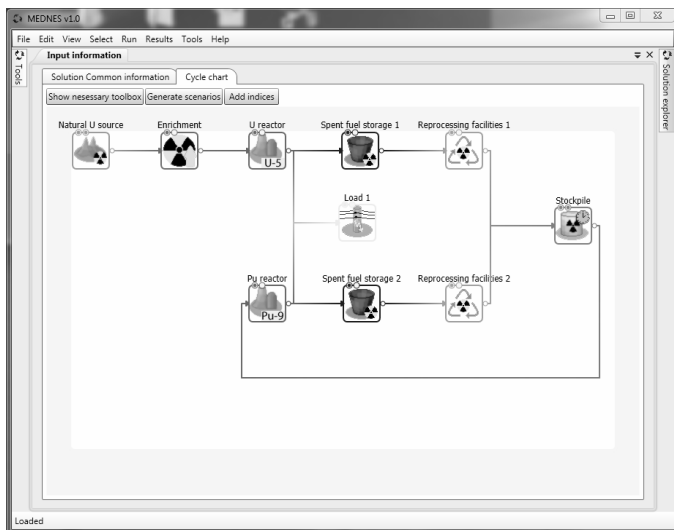


Рис. 3. Интерактивный визуализатор ЯТЦ

Наиболее предпочтительное решение эксперт выбирает на основе анализа допустимого множества и множества Парето. *MEDNES* включает в себя следующие средства анализа: таблицы испытаний, допустимые и Парето-оптимальные решения и вектора, вектора, не удовлетворившие функциональным ограничениям; зависимости «критерии-параметры» и «критерии-критерии», отражающие чувствительность критериев к параметрам и зависимости критериев от критериев, а также интерактивные карты принятия решений. Поскольку для решения многокритериальных задач с высокой размерностью вектора параметров требуется много компьютерного времени, предусмотрена возможность работы *MEDNES* в параллельном режиме.

В качестве основного языка программирования выбран язык программирования *C#*, сочетающий объектно-ориентированные и аспектно-ориентированные концепции и разработанный в 1998–2001 гг. *Microsoft* как основной язык разработки приложений для платформы *Microsoft.NET* [14]. Для хранения данных о проекте, связках внутри программы, а также для хранения схем представления, генерации и расчета схемы

используется формат *XML*. Основное хранилище данных реализовано с помощью базы данных *SQL* (*SQLite* или *MS SQL*) [7].

В заключение данного раздела коротко остановимся на скорости проведения расчетов с использованием разработанной программной системы. На компьютере с процессором *AMD Phenom X4 945 3,00 GHz* расчет 1000 сценариев модели развивающейся двухкомпонентной системы ЯЭ, состоящей из тепловых и быстрых реакторов, включающей в себя расчет балансов в ЯТЦ и трех критериев эффективности, занимает 19,3 сек. При этом  $\approx 76\%$  сценариев не удовлетворяет системным ограничениям, а из оставшихся  $\approx 10\%$  удовлетворяют условию Парето-оптимальности.

#### **4. Пример использования разработанной программной системы**

С использованием разработанного инструментария проведен ряд исследований по многокритериальной оценке эффективности структур ЯЭ на национальном и глобальном уровнях, что позволяет найти разумные компромиссы между конфликтующими системными факторами и согласованные стратегии развития [2, 3, 12].

##### **4.1. РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ ВЕКТОРНОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ**

На основе информации, доступной из авторитетных международных источников по ресурсам, добыче, производству, потреблению, импорту и экспорту основных компонентов ядерного топлива, а также предыстории ввода в эксплуатацию и вывода из нее энергетических реакторов и предприятий ЯТЦ, решена задача векторной идентификации<sup>1</sup> и проведено реконструирование ситуации в ЯЭ в глобальном и региональном разрезах по состоянию на 2005 г. и произведен прогнозный анализ развития событий на среднесрочную перспективу до 2030 г. в предположении сохранения современных тенденций развития.

---

<sup>1</sup> Под решением задачи векторной идентификации понимается поиск таких параметров модели, для которых наблюдается соответствие исследуемой математической модели реальному объекту, оцениваемому по множеству критериев близости [10].

В модель глобального ЯТЦ включены 7 типов реакторов, промышленно эксплуатирующихся в настоящий момент в мире: *AGR*, Магнокс, *PWR*, *BWR*, *CANDU*, ВВЭР, РБМК. Для реакторов типа *PWR*, *BWR* учтена возможность использования смешанного уран-оксидного топлива (1/3 загрузки *MOX*-топливом активных зон реакторов, содержащих 7% плутония). В рассмотрение включены основные переделы ЯТЦ: добыча, конверсия, обогащение урана, изготовление топлива, хранение ОЯТ (приреакторное и централизованное), переработка ОЯТ.

В качестве критериев решения задачи векторной идентификации использовались годовая наработка ОЯТ и плутония, годовые потребности в услугах по обогащению и потребление природного урана (для 2005 г.), а также интегральное количество ОЯТ и плутония на складах в 2005 г.

На основе оценки степени близости данных величин данным, опубликованным в открытых международных источниках, отбирались те значения параметров системы ЯЭ (среднее обогащение и выгорание топлива для каждого типа реакторов, доля  $^{235}\text{U}$  в отвалах обогатительных предприятий, доля перерабатываемого ОЯТ), для которых наблюдалось относительное отклонение, не превышающее 10%.

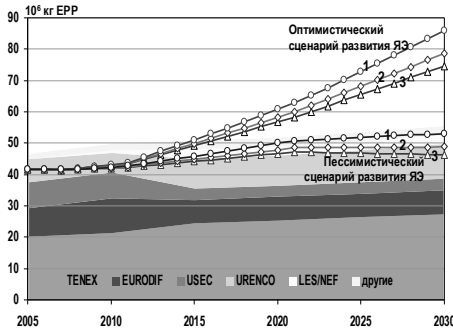
Для определенных значений параметров системы и наиболее вероятных сценариев развития определен перспективный спрос и предложение на услуги по обогащению урана, хранению ОЯТ и плутония в глобальном и региональном масштабе при условии сохранения современного формата предоставления этих услуг ЯТЦ [3].

Было показано, что наблюдается приближение к предельным производственным возможностям по наиболее критическим сегментам ЯТЦ фактически при любом варианте развития ЯЭ и необходимость существенного наращивания производственных мощностей ЯТЦ в случае интенсивного развития.

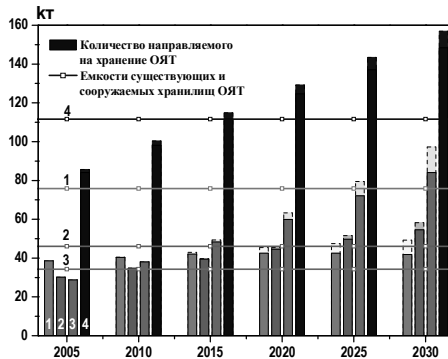
Снятие существующих коммерческих и политических ограничений на оказание услуг ЯТЦ позволит отдалить момент наступления дефицита промышленных мощностей ЯТЦ в регионах на 5–10 лет. Поэтому, как временная мера, организация глобального ядерно-энергетического рынка представляется весьма эффективной. Однако без существенного наращивания



промышленных мощностей ЯТЦ говорить о достаточности имеющейся инфраструктуры для обеспечения развития ЯЭ в перспективе нельзя. Проведенные оценки показывают, что после 2015 г. дополнительные мощности услуг по обогащению природного урана, которые должны быть введены, составляют порядка 30 млн.кг единиц разделительных работ (ЕРР) (рис. 4). Потребности в емкостях промежуточных хранилищ ОЯТ составляют порядка 150 тыс.т тяжелых металлов (тм) (рис. 5).



*Рис. 4. Спрос и предложение на услуги по обогащению урана (номинальная мощность обогатительных предприятий)*



*Рис. 5. Спрос и предложение на услуги по хранению ОЯТ по регионам: 1 – страны западной Европы, 2 – страны Восточной Европы, 3 – страны Азии и Африки, 4 – страны Латинской и Северной Америки*

#### **4.2. ОЦЕНКА ПРЕДЕЛЬНЫХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ЯЭ НА БАЗЕ РАЗЛИЧНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПЛАТФОРМ**

Определение предельно допустимых характеристик системы ЯЭ, обеспечивающих данный темп развития, является одной из задач долгосрочного прогнозирования, в частности, поиска наиболее целесообразных структурных характеристик ЯЭ и анализа взаимосвязи различных типов реакторов в развитии (так называемые «реакторные стратегии»). В этом случае опираться на формальные методы поиска оптимальных решений в подобных задачах, основываясь на известном критерии и заданных системных ограничениях, можно в меньшей степени, чем в задачах перспективного планирования, в силу большой неопределенности будущих условий развития [6]. В то же время одной из проблем, присущих равновесным моделям, является игнорирование начального и переходного этапов развития ЯЭ, когда еще существенны исходные условия развития [11].

Основываясь на описанной технике оказывается возможным учесть в равной степени как начальные условия развития, так и системные ограничения на переходном этапе развития ЯЭ, т.е. уйти, соответственно, от тех предположений, на которых основываются равновесные модели, и проследить, в конечном счете, переход на равновесную траекторию развития.

В работе [2] представлены оценки временных и мощностных пределов роста однокомпонентной и двухкомпонентной ЯЭ с различными типами тепловых и быстрых реакторов в зависимости от динамики изменения потребностей в ЯЭ, стратегии обращения с накопившимся плутонием и предыстории развития ЯЭ, а также выявлены факторы, способствующие расширению пределов.

В модель ЯТЦ включены тепловые и быстрые (как с, так и без расширенного воспроизводства топлива) реакторы. Тепловые реакторы работают на урановом топливе, быстрые – на смешанном уран-оксидном топливе. Из переделов ЯТЦ в рассмотрение включены добыча урана, изготовление топлива, хранение и переработка ОЯТ.

В качестве критериев решения данной задачи использовались минимизация времени нахождения выделенного плутония

на складе (требование, обусловленное необходимостью снижения рисков хищения ядерных материалов) и максимизация времени потребления природного урана (требование эффективного использования ресурсов):  $T_{Pu} \rightarrow \min$ ,  $T_U \rightarrow \max$ .

Оцененные в соответствии с указанными критериями предельные возможности однокомпонентной и двухкомпонентной ЯЭ с различными типами тепловых и быстрых реакторов в зависимости от динамики изменения потребностей в ЯЭ представлены на рис. 6, 7.

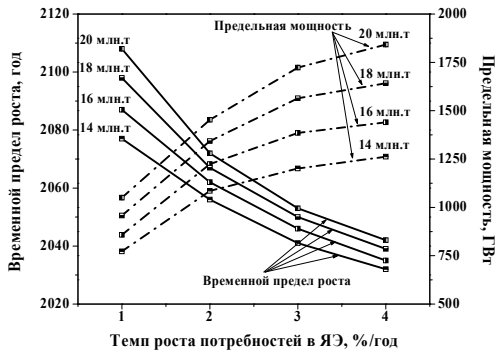


Рис. 6. Предельные возможности ЯЭ на тепловых реакторах в зависимости от запасов природного урана и темпов роста ЯЭ

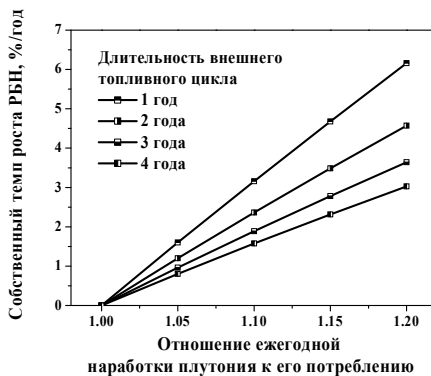


Рис. 7. Предельные темпы роста ЯЭ быстрыми реакторами с расширенным воспроизводством топлива

### 4.3. МНОГОКРИТЕРИАЛЬНЫЙ СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СТРУКТУР ЯЭ

Ядерно-энергетические системы должны отвечать следующим основополагающим требованиям: быть ресурсообеспеченными и малоотходными в долгосрочной перспективе; оставаться экономически эффективными; поддерживать необходимый уровень безопасности и надежности; обеспечивать устойчивость ЯЭ в плане нераспространения ядерного оружия и надежную физическую защиту делящихся материалов [12].

Одновременное достижение оптимального значения нескольких показателей, как правило, неосуществимо. Выходом из такого рода затруднений является реализация требования поддерживать ряд показателей на уровне не ниже приемлемого, а выбранный показатель устремить к своему экстремальному значению. Одним из подходов поиска эффективных решений является метод критериальных ограничений, представляющий собой универсальный метод, справедливый как для задач с выпуклыми, так и невыпуклыми множествами достижимости. Основная идея метода заключается в том, что значения всех критериев, кроме одного, ограничиваются и находится оптимум (в данном случае минимум) единственного выделенного критерия.

Ограничивающие уровни являются параметрами задачи. Придавая им всевозможные значения из диапазонов от абсолютного минимума до абсолютного максимума соответствующего показателя на исходном множестве допустимости можно получить все эффективные решения.

Данный подход использовался для оптимизации структуры глобальной ЯЭ с учетом региональных особенностей и наличием в ее структуре быстрых реакторов в замкнутом U-Pu-Th топливном цикле. В качестве критерия оптимизации использовались полные приведенные затраты. В качестве показателей, на которые наложены ограничения и определяющие, в конечном счете, выбор единственного решения из набора неулучшаемых, выбраны доля быстрых и тяжеловодных реакторов, запасы природного урана, количество наработанного ОЯТ и плутония.

Результаты работы показывают, что наиболее приемлемым решением, которое удовлетворяет критерию минимума приве-

денных системных затрат и одновременно удовлетворяет ограничениям по запасам природного урана, оценке перспектив рынка технологий тепловых реакторов и требованию к нераспространению технологии переработки ОЯТ, является переход к замкнутому U-Pu-Th топливному циклу.

Также выявлена сложность неограниченно долго, а при определенном наборе реакторных технологий и невозможность удовлетворять совокупности ограничений, отражающих системные требования к ЯЭ, принимая во внимание региональные ограничения. С учетом этого типа системных ограничений структура ЯЭ становится чрезвычайно чувствительной к набору реакторных технологий и теряет возможность подстраиваться под изменяющие внешние условия, удовлетворяя при этом набору противоречащих системных ограничений. В такой системе каждая технология играет важную роль, и ее исчезновение ведет к отсутствию оптимального решения при данном наборе ограничений.

В то же время система должна оставаться достаточно гибкой, чтобы приспособляться под изменяющиеся внешние условия, удовлетворяя при этом набору системных ограничений. В такой системе для балансировки противоречащих факторов представляется целесообразным внедрение специализированных многофункциональных реакторных установок, задачи которых должны определяться в зависимости от особенностей этапа развития.

## **5. Заключение**

Разработанная методика позволяет учесть нелинейные ограничения и нелинейность функционалов относительно переменных модели, проводить аппроксимацию множества Парето в случае решения многокритериальных задач. Наличие внутреннего механизма выбора между альтернативными вариантами развития позволяет выявлять наиболее эффективные направления, а динамический характер модели дает возможность исследовать переход в асимптотические сценарии развития.

Разработанный программный инструментарий позволяет решать задачи оптимизации структуры ЯЭ в многокритериаль-

ной постановке, что дает возможность осуществить поиск компромиссов между конфликтующими системными факторами, определяющими развитие ЯЭ, провести с использованием единого расчетного инструментария сравнительного многокритериального анализа вариантов развития ЯЭ с учетом неравновесной динамики развития, особенностей структуры и организации ЯТЦ и наиболее значимых системных ограничений.

Работа выполнена при поддержке гранта Президента Российской Федерации МК-6046.2012.8.

### **Литература**

1. АНДРИАНОВ А.А. *Системные исследования перспектив развития атомной энергетики: текущее состояние и тенденции* // Бюллетень «Новости мирового атомного рынка». – 2010. – №7 – С. 3–11.
2. АНДРИАНОВ А.А. *Имитационно-динамический подход к моделированию развивающихся ядерно-энергетических систем* // Труды III Международной конференции «Математические идеи П.Л. Чебышёва и их приложение к современным проблемам естествознания», Обнинск: ИАТЭ, 2008. – С. 66–71.
3. АНДРИАНОВ А.А., КОРОВИН Ю.А., МУРОГОВ В.М. *Ядерная энергетика – основа энергетической безопасности в будущем: технико-экономические и социально-политические проблемы развития энергетики.* – М.: Бюро Квантум, 2010. – 304 с.
4. АНДРИАНОВ А.А., СВЕТЛИЧНЫЙ Л.И. *Программный комплекс MEDNES для многокритериальной оценки эффективности структур ядерной энергетики* // XII Безопасность АЭС и подготовка кадров. Тезисы докладов. Т.2., 4-7 октября 2011 г. – С. 139–141.
5. АНДРИАНОВ А.А., ФЕСЕНКО Г.А. *Современные инструментальные средства прогнозирования развития ядерной энергетики. Учебное пособие.* – Обнинск: ИАТЭ, 2009. – 84 с.

6. БЕЛЕНЬКИЙ В.З., БЕЛОСТОЦКИЙ А.М. *Математическое моделирование развития ядерной энергетики*. – М.: Наука. 1979. – 160 с.
7. ГРОФФ Д., ВАЙНБЕРГ П., ОППЕЛЬ Э. *SQL: полный справочник*. – 3-е издание. – Вильямс, 2011. – 960 с.
8. МАК-ДОНАЛЬД М. *WPF: Windows Presentation Foundation в .NET 4.0 с примерами на C#* 2010. – Вильямс, 2011. – 1024 с.
9. МОИСЕЕВ Н.Н. *Математические задачи системного анализа*. – М.: Наука, 1981. – 486 с.
10. СОБОЛЬ И.М., СТАТНИКОВ Р.Б. *Выбор оптимальных параметров в задачах со многими критериями*. – М.: Дрофа, 2006. – 182 с.
11. ЧЕРНАВСКИЙ С.Я. *Системное прогнозирование ядерной энергетики: Теория и методы*. – М.: Наука. 1980. – 238 с.
12. ANDRIANOV A.A., KOROVIN YU.A., FEDOROVA E.V. *Multicriteria Optimization Software to Support Nuclear Energy System Studies // Proceedings of Global 2011, Makuhari Messe, Japan, December 11-15, 2011. Paper 357297*. – P. 1–7.
13. *Identification and Analysis of Critical Gaps in Nuclear Fuel Cycle Codes Required by the SINEMA Program // Nuclear Energy Research Initiative Project. Final Report. DOE FC07-07ID14839*. – 52 p.
14. MSDN. *Microsoft Development, Subscriptions, Resources, and More*. – URL: <http://msdn.microsoft.com>.
15. SILVENNOINEN P. *Nuclear Fuel Cycle Optimization: Methods and Modelling Techniques*. – New York: Pergamon Press, 1982. – 126 p.
16. STATNIKOV R.B., MATUSOV J.B. *Multicriteria analysis in Engineering*. – Dordrecht, Boston, London: Kluwer Academic Publishers, 2002. – 276 p.
17. STATNIKOV R.B. *Multicriteria Design. Optimization and Identification*. – Dordrecht, Boston, London: Kluwer Academic Publishers, 1999. – 203 p.

## **INTEGRATED APPROACH BASED ON SYSTEM DYNAMICS AND PARAMETER SPACE INVESTIGATION FOR MULTIOBJECTIVE OPTIMIZATION OF DEVELOPING NUCLEAR POWER SYSTEMS STRUCTURES**

**Andrey Andrianov**, Obninsk Institute for Nuclear Power Engineering NRNU MEPhI, Obninsk, Ph.D., Associate Professor (andrianov@iate.obninsk.ru).

**Ilya Kuptsov**, Obninsk Institute for Nuclear Power Engineering NRNU MEPhI, Obninsk, Ph.D., Assistant Professor (kuptsov\_ilia@list.ru).

**Leonid Svetlichny** Obninsk Institute for Nuclear Power Engineering NRNU MEPhI, Obninsk, student, (l.svetlichnyj @ yandex.ru).

*Abstract: We describe an integrated approach and the software to solve the problem of a nuclear power system structure optimization in a multi-objective formulation. The approach is based on the system dynamics and the parameter space investigation. We also provide some examples of implementation of these tools for multi-objective optimization of nuclear power structures.*

Keywords: nuclear fuel cycle, multi-criteria optimization, nuclear energy, software system, system dynamics, parameter space investigation.

*Статья представлена к публикации членом редакционной коллегии М. В. Губко*