

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ ОПТИМИЗАЦИИ ДЛЯ ЗАДАЧ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМ ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СРЕДЫ MESSAGE

А.А. Андрианов, И.С. Купцов, Т.В. Утянская

НИЯУ «МИФИ», 115409, г. Москва, Каширское ш., 31



Описываются разработанные для оптимизационной среды энергетического планирования МАГАТЭ MESSAGE дополнительные вычислительные модули, предназначенные для многокритериальной и робастной оптимизации сценариев развертывания ядерно-энергетических систем с учетом неопределенностей в технико-экономических параметрах. Показаны результаты применения модулей в исследованиях по многокритериальной оптимизации структуры ядерной энергетики (ЯЭ). Разработанный инструментарий позволяет найти компромиссы между конфликтующими системными факторами, определяющими развитие ЯЭ, провести сравнительный многокритериальный анализ вариантов развития ЯЭ с учетом неравновесной динамики развития, особенностей структуры и организации топливного цикла и наиболее значимых системных ограничений.

Применение методов многокритериальной и робастной оптимизации, а также статистических методов позволяет выработать более обоснованные суждения относительно привлекательности возможных структур ЯЭ при сопоставлении альтернативных вариантов развития. Разработанный инструментарий на базе программных средств МАГАТЭ позволяет определить варианты стратегий развития ЯЭ по совокупности конфликтующих системных факторов с учетом неопределенностей в основных технико-экономических параметрах.

Ключевые слова: энергетическое планирование, многокритериальная оптимизация, ядерно-энергетическая система, ядерный топливный цикл, неопределенность.

ВВЕДЕНИЕ

Задача оценки эффективности направлений совершенствования и оптимизации параметров объектов, технологий и структур ядерной энергетики (ЯЭ) является многокритериальной [1 – 4]. Эффективность ядерно-энергетической системы (ЯЭС) определяется широким спектром критериев, характеризующих безопасность, потребление ресурсов, экономику, риски несанкционированного распространения и обращения с отходами. При определении приоритетов развития ядерных технологий и сопоставлении инновационных ЯЭС необходимо учитывать конфликтующий характер критериев, поскольку улучшение значения одного из критериев приводит, как правило, к ухудшению значений других.

© А.А. Андрианов, И.С. Купцов, Т.В. Утянская, 2016

С ограниченностью области применения расчетных моделей связана проблема получения итогового результата, определяющего наиболее эффективный вариант развития ЯЭС, где до настоящего времени не было общепризнанных алгоритмов и методических подходов. Решение задачи оценки эффективности направлений совершенствования и оптимизации параметров объектов и технологий ЯЭ в многокритериальной постановке позволило бы осуществить поиск согласованных технических, институциональных, структурных решений, определить компромиссные значения параметров системы, сбалансированных по различным выгодам и рискам, провести сравнительный многокритериальный анализ возможных альтернативных вариантов с количественной оценкой их сильных и слабых сторон.

Для повышения степени обоснованности суждений, формируемых на основе расчетов, необходим анализ неопределенностей. Результаты отдельного расчета не являются абсолютно точными, так как всегда содержат неопределенности. Поэтому актуальной становится задача определения интервала, в котором может находиться оцениваемая величина, характеризующая отклик системы на изменение параметров расчетной модели в пределах их неопределенностей.

Возникла необходимость в разработке специального инструментария для проведения исследований по многокритериальной оценке эффективности ЯЭС на национальном и глобальном уровнях, позволяющих определить согласованные стратегии развития по совокупности конфликтующих системных факторов с учетом неопределенностей в основных технико-экономических параметрах. В рамках работ по разработке методов, алгоритмов и информационно-аналитических систем многокритериальной оценки эффективности направлений совершенствования и оптимизации параметров объектов и технологий ЯЭ созданы дополнительные программные модули для оптимизационной среды энергетического планирования МАГАТЭ MESSAGE [5, 6], позволяющие расширить спектр ее возможных приложений. Эти модули реализуют многокритериальную оптимизацию, направленную на сопоставление эффективности ЯЭС и оценку влияния неопределенностей в параметрах расчетной модели на результаты расчетов. В статье дано краткое описание разработанных программных модулей и приведены демонстрационные результаты расчетов, полученных с использованием созданных инструментов оптимизации структур ЯЭС в условиях многокритериальной оценки и неопределенностей.

МЕТОДЫ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ И ОЦЕНКИ ВЛИЯНИЯ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЕЙ

Многокритериальная оптимизация – это область теории принятия решений при многих критериях, где количество альтернатив явно не задано. Любая возможная альтернатива в каждом случае может быть найдена посредством математического моделирования. Как правило, количество возможных альтернатив либо бесконечно большое и несчетное (когда некоторые переменные модели непрерывны), либо очень большое и счетное (когда все переменные модели дискретны).

Разработан широкий спектр методов решения задач многокритериальной оптимизации. Один из подходов к классификации данных методов основан на способах использования информации о предпочтениях лица, принимающего решения. В соответствии с этой классификацией выделяются априорные, апостериорные, адаптивные и интерактивные классы методов [7]. В основе большинства современных методов принятия решений при многих критериях лежит понятие множества неуплучшаемых решений – множества Парето.

На основании неопределенности в технико-экономических параметрах и особенности функционирования объектов и технологий ЯЭ решение задач оптимизации параметров в многокритериальной постановке может повысить степень обоснованности суждений, делаемых на основе расчетов. Методы учета неопределенности базируются на интервальной алгебре, нечетких множествах, вероятностных методах и методах Монте-Карло.

Применение методов робастной и стохастической оптимизации [8, 9] является перспективным направлением при разработке оптимизационных моделей планирования, позволяющих решить ряд проблем, связанных с учетом неопределенностей в рамках классических детерминистических методов оптимизации, требующих значительного объема точно заданных исходных данных, что практически неосуществимо. Во многих случаях даже небольшая неопределенность в исходных данных может сделать решение задачи недопустимым.

Стохастическая и робастная оптимизация являются взаимодополняющими подходами к учету неопределенности данных в задачах оптимизации; каждый из них обладает как преимуществами, так и недостатками. Эти виды оптимизации позволяют находить решение, имеющее «иммунитет» к варьированию данных в их диапазонах неопределенности. При стохастической оптимизации неопределенные значения данных предполагаются случайными и подчиняются известному закону распределения. При робастной оптимизации закон распределения неопределенных величин считается неизвестным. Решение задачи стохастической оптимизации будет верным с некоторой вероятностью, в то время как решение задачи робастной оптимизации будет оптимальным и допустимым для любых значений неопределенных данных из заданного множества.

Для реализации методов многокритериальной оптимизации и учета неопределенности в задачах динамической оптимизации необходимы серийные вычисления с различными значениями переменных параметров модели ЯЭС. Разработка динамической модели ЯЭС является отдельной задачей, для решения которой существует большое количество программных пакетов. Одним из таких пакетов для исследования в области ЯЭС и ЯТЦ является среда энергетического планирования МАГАТЭ MESSAGE (Model for Energy Supply Strategy Alternatives and their General Environmental Impacts) – крупномасштабная динамическая системно-инженерная оптимизационная модель для средне- и долгосрочного энергетического планирования, анализа энергетической политики и разработки сценариев развития энергетики [5, 6, 10]. В начале 2000-х гг. в МАГАТЭ был инициирован проект по оказанию помощи странам-участницам в освоении MESSAGE и разработан пользовательский интерфейс для MESSAGE V – последней версии, приобретенной у Института прикладного системного анализа (IIASA, Австрия), позволяющей пользователю сформулировать задачу линейного программирования, найти оптимальное решение и обработать результаты.

МОДУЛИ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ И УЧЕТА НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЕЙ ДЛЯ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ СРЕДЫ MESSAGE

С учетом растущих потребностей в инструментах решения задач оптимизации структур ЯЭС в многокритериальной постановке в 2009 г. была инициирована разработка дополнительных модулей, предназначенных для проведения многокритериальной оптимизации и учета неопределенностей в среде MESSAGE [11]. Были разработаны и программно реализованы шесть модулей, расширяющих спектр возможных приложений среды.

Разработан также набор базовых вычислительных схем открытых и замкнутых ЯТЦ (U, U-Pu, U-Pu-Th) в среде MESSAGE, адаптированных под задачи многоцелевой оптимизации и расчетов материальных потоков в ЯТЦ стационарной и развивающейся ЯЭ на национальном и глобальном уровнях. Эти схемы могут использоваться для решения задач многокритериальной оптимизации и оценки влияния неопределенностей на структуру ЯЭС.

ССМ – модуль метода критериальных ограничений. Достижение оптимального значения нескольких показателей одновременно, как правило, неосуществимо. Поэтому в качестве выхода из такого положения предлагается реализация требования поддерживать ряд показателей на уровне не ниже приемлемого, а выбранный показатель устремить к его экстремальному значению. Ограничивающие уровни являются параметрами задачи. Придавая им всевозможные значения из диапазона от абсолютного мини-

му до абсолютного максимума соответствующего показателя на исходном множестве допустимости, можно получить все эффективные (недоминируемые по Парето) решения.

Для реализации метода критериальных ограничений в среде MESSAGE необходимо иметь возможность вводить информацию в модель развивающейся ЯЭ о совокупности дополнительных ограничений и соответствующих ограничивающих уровнях. Совокупность специфических для ЯЭС ограничений (общее количество ОЯТ и делящихся материалов в ЯТЦ, ограничения на мощности чувствительных предприятий ЯТЦ и др.), связывающих воедино различные переделы ЯТЦ в различные временные моменты, оказывается не всегда возможным внести непосредственно из среды MESSAGE из-за первоначальной ориентированности среды под описание систем традиционной энергетики. Трудоемкой при работе в среде является процедура генерации набора сценариев, отличающихся значениями ограничивающих уровней. Для решения этой проблемы был разработан специализированный модуль CCM (Criteria Constrains Method), позволяющий внести необходимые изменения в исходную модель и создать на ее основе набор сценариев для реализации метода критериальных ограничений [12, 13].

ParSAM – модуль метода достижимых целей. Метод достижимых целей был разработан исследовательской группой ВЦ РАН [7]. Основой метода является визуализация множества возможных (достижимых) векторов с использованием графических двумерных сечений. Метод предназначен, в основном, для сложных в вычислительном отношении случаев бесконечного числа возможных решений и векторов. Один из недостатков метода целевого программирования, на преодоление которого направлен данный метод, заключается в том, что идеальный вектор задается без учета реальных возможностей системы. Поэтому достижимые значения показателей, даже наиболее близкие к заданному идеалу, могут оказаться далекими от него. В соответствии с методом достижимых целей участникам процесса принятия решений в наглядной доступной для восприятия форме представляется множество реально достижимых векторов. Среди них можно выбрать определенное компромиссное решение.

Программный модуль ParSAM (Pareto Set Approximation Module) для среды MESSAGE предназначен для автоматизации аппроксимации и визуализации множества Парето. С помощью ParSAM пользователь может сформировать набор задач линейного программирования базового проекта, основанных на методе линейной свертки критериев, решение которых соответствует условию парето-эффективности. По созданному исходному набору данных модуль позволяет осуществить серийные расчеты, обработать результаты расчетов и представить их в табличном и графическом виде. Все исходные, промежуточные и итоговые файлы согласованы с форматами файлов среды MESSAGE, что позволяет, в случае необходимости, внести необходимые корректировки из среды.

NESI – модуль описания ядерно-энергетических систем. Комплекс MESSAGE, представляя собой гибкую среду для спецификации систем энергетики, не адаптирован в полной мере под описание особенностей ЯЭС. Потребности в услугах как начальной, так и заключительной стадий ЯТЦ определяются характеристиками ядерно-энергетической установки и ее топливообеспечения. Все остальные параметры системы могут быть рассчитаны при известных значениях этих величин и минимальном наборе дополнительных. В то же время при непосредственной работе в оболочке MESSAGE внесение этих параметров должно происходить независимо, что осложняет работу с моделью и создает предпосылки для возникновения ошибок. По этой причине был создан адаптированный под описание ЯЭС интерфейс к среде энергетического планирования MESSAGE – NESI (Nuclear Energy System Interface), обеспечивающий более удобный процесс описания элементов ЯЭС.

GRS – модуль метода GRS. Модуль дает возможность анализа неопределенностей, что важно для повышения степени обоснованности суждений, основанных на выполненных вычислениях. Этот модуль базируется на методике статистического анализа, предложенной в [14]. GRS позволяет определить интервал, в котором будет находиться

ся оцениваемая величина, характеризующая отклик системы на изменение параметров в пределах их неопределенностей.

RFC– модуль стохастического подхода к учету рисков недооценки стоимости новых технологий. Одним из недостатков детерминистической модели оптимизации является необходимость использования точечных оценок для технологических характеристик и ряда других важных системных параметров. Возможным подходом к учету рисков, связанных с недооценкой стоимости будущих технологий, является модель, предложенная в специальной стохастической версии MESSAGE, которая, однако, ограничена учетом неопределенностей в капитальных затратах. Основным достоинством такого подхода является то, что вычислительная сложность его реализации остается сопоставимой с оригинальной детерминистской моделью [15]. В модуле RFC реализован данный стохастический подход к учету неопределенностей в стоимости услуг ЯТЦ и реакторных технологий.

ROM– модуль робастной оптимизации. В среде MESSAGE реализована детерминистская линейная оптимизационная модель ЯЭС, в которой не предусмотрено задание неопределенностей исходных данных. Принимая во внимание то, что даже небольшое варьирование данных может существенно повлиять на решение, возникает необходимость предусмотреть возможность получения такого решения, которое имело бы определенный «иммунитет» к неопределенностям параметров задачи. Целью методов робастной оптимизации является получение такого решения, которое было бы допустимо при номинальных значениях параметров и при любых значениях параметров из множества неопределенностей [8, 9]. Метод робастной оптимизации реализован в модуле ROM.

Описанные модули предоставляют возможность на основе исходного проекта провести серию расчетов, обработать результаты вычислений и представить их в табличном и графическом видах. Все исходные файлы, файлы промежуточных и конечных результатов записаны в форматах, совместимых с форматами MESSAGE, что обеспечивает согласованную работу всех модулей среды.

Разработанный программный инструментарий позволяет решать задачи оптимизации структуры ЯЭ в многокритериальной постановке. Это дает возможность поиска компромиссов между конфликтующими системными факторами, определяющими развитие ЯЭ, проведения сравнительного многокритериального анализа вариантов развития ЯЭ с учетом неравновесной динамики развития, особенностей структуры и организации ЯТЦ и наиболее значимых системных ограничений.

ДЕМОНСТРАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ПРИМЕНЕНИЯ ПРОГРАММНЫХ МОДУЛЕЙ

Результаты, демонстрирующие работоспособность разработанных модулей, получены в серии исследований по многокритериальному сравнительному анализу эффективности ЯЭС с учетом неопределенностей в стоимостных данных. Согласно результатам исследований, технологически диверсифицированная структура ЯЭС, в которой присутствует несколько технологий, может обеспечить синергетический эффект в части повышения устойчивости и улучшения эффективности функционирования системы.

На рисунке 1 показана схема гипотетической модели российской ЯЭС. На основе этой модели проведен поиск сбалансированных структур ЯЭ по набору конфликтующих критериев, позволяющих определить экономически эффективные структуры ЯЭС, способствующие сокращению потребления урана, объемов нарабатываемого ОЯТ, рисков распространения вторичных делящихся материалов и мощностей по их производству. Все предположения, которые были сделаны при составлении гипотетической модели российской ЯЭС (спрос на электроэнергию, ресурсы урановой руды, особенности ЯТЦ и др.), описаны в [10, 16, 17].

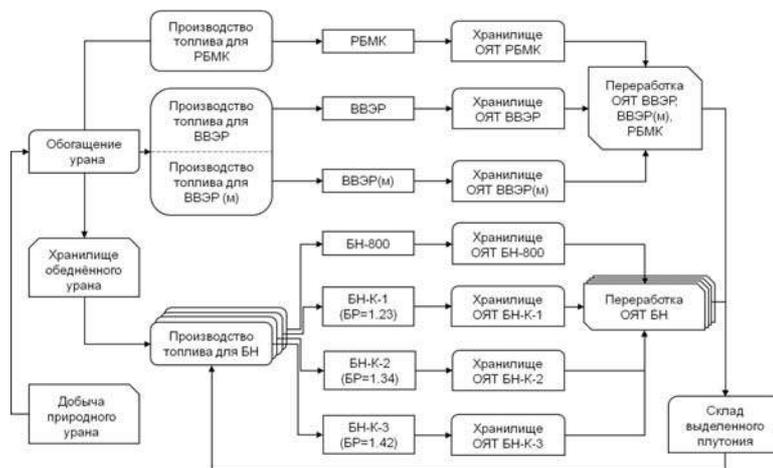


Рис.1. Структура гипотетической российской ЯЭС с различными типами реакторов

Экономически эффективное снижение потребления природного урана. Экономически эффективные структуры ЯЭС, обеспечивающие максимально возможное снижение потребления урана при заданном уровне затрат, могут быть получены путем решения двухкритериальной оптимизационной задачи с минимизацией критериев «суммарные приведенные системные затраты» и «полное потребление природного урана». Кривая критериальных замещений, демонстрирующая прирост в полных дисконтированных затратах, вызванный необходимостью снижения потребления урана, может использоваться для выбора приемлемой при заданном уровне затрат структуры ЯЭС, обеспечивающей максимально возможное снижение потребления урана. Четыре структуры ЯЭС для различных точек на кривой критериальных замещений показаны на рис. 2.

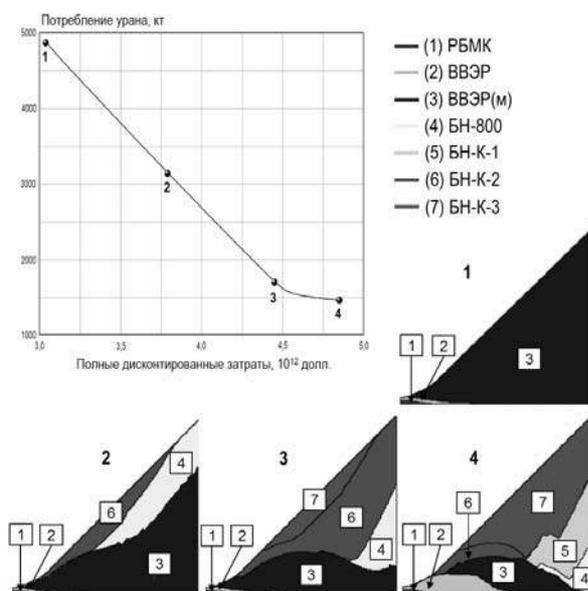


Рис. 2. Кривая критериальных замещений «потребление урана - полные дисконтированные затраты» и некоторые структуры ЯЭ, удовлетворяющие условию парето-оптимальности

Экономически эффективные стратегии обращения с плутонием и сравнение структур ЯЭС по индикаторам риска несанкционированного распространения. Экономически эффективные стратегии обращения с плутонием могут быть определены

при решении оптимизационной задачи, в которой минимизируются критерии «суммарные приведенные системные затраты» и «индекс риска распространения плутония» (агрегация различных материальных потоков плутония с заданными весами). Кривая критериальных замещений, соответствующая условию парето-оптимальности, определяет дополнительные затраты, возникающие при необходимости реализации мероприятий по вовлечению плутония в энергопроизводство с целью уменьшения риска несанкционированного распространения плутония (рис. 3).

Результаты расчетов показывают, что различные структуры ЯЭС сопоставимы по индикаторам «суммарный объем делящихся материалов в ЯТЦ» и «суммарные мощности по производству делящихся материалов». Улучшение по одному индикатору приводит к ухудшению по другому. Конфликтная природа критериев приводит к невозможности однозначно заключить, какие структура ЯЭС и тип ЯТЦ были бы наиболее перспективны с точки зрения снижения риска несанкционированного распространения, основываясь только на оценке материальных потоков, не прибегая к детальному анализу пролиферационных сценариев с учетом функционирования существующих национальных и международных систем поддержки режима нераспространения.



Рис.3. Кривая критериальных замещений и стратегии обращения с плутонием

Комплексные экономически эффективные способы снижения сопряженных рисков. Чтобы в общем случае определить комплексные экономически эффективные структуры ЯЭС, способствующие снижению сопряженных рисков, необходимо рассмотреть задачу многокритериальной оптимизации с n критериями, характеризующими затраты, и другие критерии, характеризующие технологические аспекты системы и сопряженные риски. Такие сбалансированные структуры ЯЭС находятся на n -мерной поверхности недоминируемых решений, где n – число критериев, а n -мерная поверхность представляет собой обобщение кривой критериальных замещений двумерного случая. Такая поверхность позволяет определить дополнительные затраты, вызванные проведением комплексных мероприятий по изменению структуры ЯЭС с целью повышения эффективности системы посредством, например, снижения потребления урана, рисков несанкционированного распространения и накопления ОЯТ.

На рисунке 4 представлены результаты решения задачи с четырьмя критериями, характеризующими суммарные приведенные затраты, общий расход урана, общее количество ОЯТ, суммарные мощности по производству делящихся материалов. Результаты многокритериальной оптимизации показывают, что компромиссные структуры ЯЭС, сбалансированные по различным затратам и рискам, всегда имеют технологически диверсифицированную структуру с разными типами реакторов, что способно обеспечить экономически эффективный способ (при минимальных затратах, обеспечивающих максимальный эффект) снижения рисков.

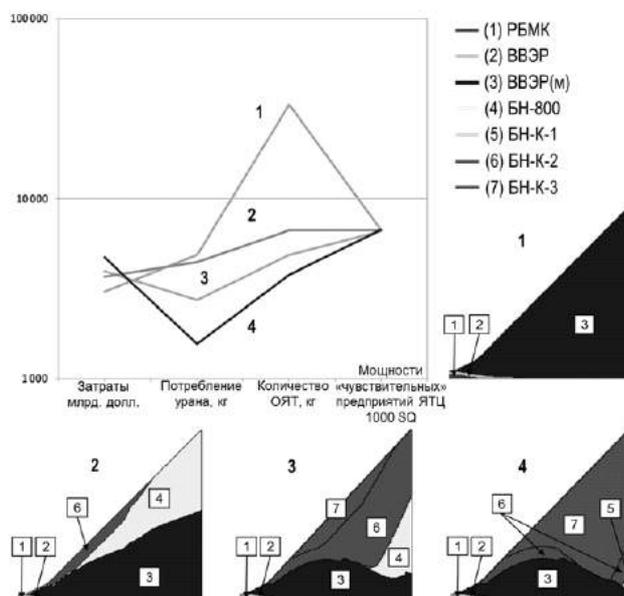


Рис. 4. Профили альтернатив и четыре возможные структуры ЯЭС для четырехкритериальной задачи оптимизации, удовлетворяющие условию парето-оптимальности

Влияние неопределенности в удельных затратах на услуги ЯТЦ и сооружение реакторных установок на приведенные затраты и структуру ЯЭС. Неопределенности в значениях удельных дисконтированных затрат (УДЗ) на всю программу развития одно- и двухкомпонентной ЯЭС, рассчитанные с учетом неопределенностей в удельных затратах на услуги ЯТЦ и сооружение реакторных установок, в соответствии с данными из международных источников [18] для двух различных ЯЭС представлены в табл. 1. Расчеты, выполненные с использованием модуля GRS, показывают, что рассмотренные ЯЭС статистически неразличимы по критерию УДЗ, так как 90%-ые доверительные интервалы неопределенностей значений этого критерия для рассмотренных ЯЭС перекрываются. Следовательно, невозможно сделать однозначное суждение о перспективности той или иной ЯЭС по экономическим показателям с учетом существующих неопределенностей в стоимостных данных.

Таблица 1

Рассмотренные ЯЭС и удельные дисконтированные затраты

Тип ЯЭС	УДЗ, цент/кВт ч
Ресурсы урана неограничены, однокомпонентная ЯЭС, открытый ЯТЦ	1.66 ± 0.185
Ресурсы урана ограничены (1.2 млн. т), двухкомпонентная ЯЭС, замкнутый ЯТЦ	1.76 ± 0.143

Применение в среде MESSAGE модулей RFC и ROM показывает, что стратегии разветвления ЯЭС, полученные в результате стохастической и робастной оптимизации, удовлетворяют требованию технологической диверсификации без добавления в модель внешних ограничений. Структуры ЯЭС в этом случае включают в себя большее количество реакторных технологий, чем структуры ЯЭС, полученные в результате детерминистического подхода, а также они обладают большей устойчивостью к варьированию основных параметров модели. Стратегии, полученные в рамках стохастического подхода, являются экономически более выгодными по сравнению со стратегиями, полученными на основании детерминистического подхода.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Применение методов многокритериальной и робастной оптимизации, а также статистических методов оценки влияния неопределенности в основных параметрах системы при проведении системно-аналитических и прогнозных исследований в обоснование стратегий развития ЯЭ обеспечивает возможность выработки более обоснованных и взвешенных суждений относительно привлекательности возможных структур ЯЭ вследствие учета всех факторов, как положительно, так и отрицательно влияющих на развертывание ЯЭС при сопоставлении альтернативных вариантов развития. Разработанный инструментарий на базе программных средств МАГАТЭ позволяет определить компромиссные стратегии развития ЯЭ по совокупности конфликтующих системных факторов с учетом неопределенностей в основных технико-экономических параметрах системы.

Литература

1. *Andrianov A.A., Kuptsov I.S., Murogov V.M.* Towards sustainable nuclear power development. // International journal for nuclear power, 2014. -Vol. 59. Iss. 5. -PP. 287-293.
2. *Andrianov A.A., Kanke V.A., Kuptsov I.S., Murogov V.M.* Reexamining the Ethics of Nuclear Technology // Science and Engineering Ethics, 2015, 21(4). PP. 999-1018, DOI: 10.1007/s11948-014-9578-0.
3. *Andrianov A., Kuznetsov V., Kuptsov I., Fesenko G.* INPRO activities on development of advanced tools to support judgement aggregation for comparative evaluation of nuclear energy systems, Science and Technology of Nuclear Installations, vol. 2014, Article ID 910162, 15 pages, 2014. DOI: 10.1155/2014/910162.
4. *Kuznetsov V., Fesenko G., Schwenk-Ferrero A., Andrianov A., Kuptsov I.* Innovative Nuclear Energy Systems: State-of-the Art Survey on Evaluation and Aggregation Judgment Measures Applied to Performance Comparison // Energies. -2015. -Vol. 8. -PP. 3679-3719.
5. *Messner S., Strubergger M.* User's guide for MESSAGE III, WP-95-69, IIASA, 1995.
6. MESSAGE – "Model for Energy Supply Strategy Alternatives and their General Environmental Impacts. User Manual" (DRAFT), International Atomic Energy Agency: Vienna, Austria.
7. *Lotov A.V., Bushenkov V.A., Kamenev G.K.* Interactive Decision Maps: Approximation and Visualization of Pareto Frontier, Norwell, Kluwer Academic Publishers, 2004.
8. *Ben-Tal A., Nemirovski A.* Robust solution to uncertain programs, Oper. Res., -1999. -Lett. 25. -PP. 1-13.
9. *Bertsimas D., Sim M.* The price of robustness // Operations Research. -2004. -Vol. 52(1). -PP. 35-53.
10. *Андрюанов А.А., Коровин Ю.А., Федорова Е.В.* Оптимизация систем ядерной энергетики в среде энергетического планирования MESSAGE / Обнинск: ИАТЭ НИЯУ МИФИ, 2012. – 132 с.
11. *Andrianov A.* Approaches and Software for Multi-Objective Optimization of Nuclear Power Structures / *Sustainability*. -2012. -Iss. 4. -PP. 721-739. (Special Issue Sustainable Nuclear Energy).
12. *Андрюанов А.А., Коровин Ю.А., Федорова Е.В.* Метод критериальных ограничений в задачах оптимизации структуры глобальной ядерной энергетики в среде MESSAGE // Известия вузов. Ядерная энергетика. -2010. -№2., -С. 165-175.
13. *Andrianov A., Korovin Yu., Fedorova E.* Closed nuclear fuel cycles with fast reactors: scenarios of worldwide nuclear power expansion, Paper 9231. Proceedings of Global 2009. Paris, France, 2009.
14. *Glaeser H.* GRS Method for Uncertainty and Sensitivity Evaluation of Code Results and Applications // Science and Technology of Nuclear Installations. -2008. -Vol. 2008. - Article ID 798901. - P. 7. DOI: 10.1155/2008/798901.
15. *Golodnikov A., Gritsevskii A., Messner S.* A stochastic version of the dynamic linear programming model MESSAGE III., Laxenburg, Austria: IIASA, 1995.
16. *Andrianov A., Korovin Yu., Fedorova E.* Advanced Nuclear Fuel Cycle Modeling – an Expanded MESSAGE V Framework, Proceedings of Global 2011, Paper 392523, Makuhari Messe, Japan, 2011.
17. *Андрюанов А.А., Коробейников В.В., Поплавская Е.В., Рачкова Е.Н., Федорова Е.В.* Оптимизационные исследования структуры ядерной энергетики России с реакторами на тепловых и быстрых нейтронах с использованием пакета MESSAGE // Известия вузов. Ядерная энергетика. -2010. -№2. -С. 156-164.
18. *Advanced Nuclear Fuel Cycles and Radioactive Waste Management*, OECD and NEA, Nuclear Development, OECD Publishing, Paris.

Поступила в редакцию 17.03.2016 г.

Авторы

Андрианов Андрей Алексеевич, доцент, канд. техн. наук

E-mail: andreyandrianov@yandex.ru

Купцов Илья Сергеевич, доцент, канд. физ.-мат. наук

E-mail: iliya kuptsov_iliya@list.ru

Утянская Татьяна В.,

E-mail: tyutua@gmail.com

UDC 621.039.003

APPLICATION OF OPTIMIZATION METHODS FOR NUCLEAR ENERGY SYSTEM PERFORMANCE ASSESSMENT BY THE MESSAGE SOFTWARE

Andrianov A.A., Kuptsov I.S., Utianskaia T.V.

NRNU «MEPhI». 31 Kashirskoe sh., Moscow, 115409 Russia

ABSTRACT

The future nuclear energy systems should meet the following basic requirements: to be resource-sufficient and produce a low amount of wastes in the long run; to be cost effective; to maintain the necessary level of safety and reliability; to ensure the effective resistance to nuclear weapons proliferation. Considering the significant uncertainty specific to the problem field, the uncertainty analysis is another inevitable step expected to provide better grounds for judgments. Uncertainties may not be ignored in the assessment process and their examination should enable the decision maker to reach a conclusion regarding the stability of results.

This paper delineates the multi-objective optimization and uncertainty treatment modules for the IAEA energy planning software MESSAGE intended for multi-objective optimization and sustainability assessments of innovative nuclear energy systems with account of uncertainty. Some results of implementation of these tools for multi-objective nuclear energy system optimization studies are presented. The developed software allows searching for compromises between the conflicting factors that determine the nuclear energy systems' effectiveness and calculating corresponding trade-off rates; carrying out comparative multi-criteria analysis of alternatives as well as choosing, ranking, and sorting corresponding options taking into account the evolution dynamics, structure and organization of a nuclear fuel cycle and the most important system constraints and restrictions. The application of the state-of-the-art multi-objective optimization and uncertainty treatment methods for integrated, analytical and foresight studies on a nuclear energy system deployment provide added values to an analysis of possible options and give reasonable stable well-interpreted and decision-making oriented results clarifying the pro and cons of considered alternatives on quantitative methodologically-proven and well-elaborated foundations. Wide application of these techniques allows searching for compromises between the conflicting factors that determine nuclear energy system performance, calculating corresponding trade-off rates as well as carrying out comparative multi-criteria alternative analyses, choosing, ranking, and sorting corresponding options.

Key words: Energy planning, multi-criteria optimization, nuclear energy system, nuclear fuel cycle, uncertainty.

REFERENCES

1. Andrianov A.A., Kuptsov I.S., Murogov V.M. Towards sustainable nuclear power development, atw: *International journal for nuclear power*. 2014, v.59, iss. 5, pp. 287-293.
2. Andrianov A.A., Kanke V.A., Kuptsov I.S., Murogov V.M. Reexamining the Ethics of Nuclear

Technology, *Science and Engineering Ethics*. 2015, 21(4), pp. 999-1018, DOI 10.1007/s11948-014-9578-0.

3. Andrianov A., Kuznetsov V., Kuptsov I., Fesenko G. INPRO activities on development of advanced tools to support judgement aggregation for comparative evaluation of nuclear energy systems. *Science and Technology of Nuclear Installations*. 2014, v. 2014, Article ID 910162, 15 pages. DOI: 10.1155/2014/910162.

4. Kuznetsov V., Fesenko G., Schwenk-Ferrero A., Andrianov A., Kuptsov I. Innovative Nuclear Energy Systems: State-of-the Art Survey on Evaluation and Aggregation Judgment Measures Applied to Performance Comparison. *Energies*, 2015, v. 8, pp. 3679-3719.

5. Messner S., Strubergger M. User's guide for MESSAGE III, WP-95-69, IIASA, 1995.

6. MESSAGE – "Model for Energy Supply Strategy Alternatives and their General Environmental Impacts. User Manual" (DRAFT), International Atomic Energy Agency: Vienna, Austria.

7. Lotov A.V., Bushenkov V.A., Kamenev G.K. Interactive Decision Maps: Approximation and Visualization of Pareto Frontier, Norwell, Kluwer Academic Publishers, 2004.

8. Ben-Tal A., Nemirovski A. Robust solutions to uncertain programs. *Oper. Res.*, 1999, Lett. 25, pp. 1–13.

9. Bertsimas D., Sim M. The price of robustness. *Operations Research*, 2004, 52(1) pp. 35-53.

10. Andrianov A.A., Korovin Yu.A., Fedorova E.V. Optimization of nuclear energy systems by means of the energy planning tool MESSAGE. Obninsk. INPENRNUMEPHI Publ., 2012. 132 p. (in Russian).

11. Andrianov A.A. Approaches and Software for Multi-Objective Optimization of Nuclear Power Structures. *Sustainability*. 2012, no. 4, pp. 721-739. (*Special Issue Sustainable Nuclear Energy*).

12. Andrianov A.A., Korovin Yu.A., Fedorova E.V. The Method of Criteria Constraints for Optimization of Global Nuclear Energy System Structures by using MESSAGE. *Izvestia vuzov. Yadernaya energetika*, 2010, no. 2, pp. 165-175 (in Russian).

13. Andrianov A., Korovin Yu., Fedorova E. Closed nuclear fuel cycles with fast reactors: scenarios of worldwide nuclear power expansion, Paper 9231. Proceedings of Global 2009. Paris, France, 2009.

14. Glaeser H. GRS Method for Uncertainty and Sensitivity Evaluation of Code Results and Applications. *Science and Technology of Nuclear Installations*. 2008, v. 2008, Article ID 798901, p. 7, DOI: 10.1155/2008/798901

15. Golodnikov A., Gritsevskii A., Messner S. A stochastic version of the dynamic linear programming model MESSAGE III., Laxenburg, Austria: IIASA, 1995.

16. Andrianov A., Korovin Yu., Fedorova E. Advanced Nuclear Fuel Cycle Modeling – an Expanded MESSAGEV Framework, Proceedings of Global 2011, Paper 392523, Makuhari Messe, Japan, 2011.

17. Andrianov A.A., Korobeinikov V.V., Poplavskaya E.V., Rachkova E.N., Fedorova E.V. Using Package MESSAGE for Optimization Studies of Nuclear Power Structures. *Izvestia vuzov. Yadernaya energetika*. 2010, no. 2, pp. 156-164 (in Russian).

18. Advanced Nuclear Fuel Cycles and Radioactive Waste Management, OECD and NEA, Nuclear Development, OECD Publishing, Paris.

Authors

Andrianov Andrej Alekseevich, Assistant Professor, Cand. Sci. (Engineering)

E-mail: andreyandrianov@yandex.ru

Kuptsov Iliya Sergeevich, Assistant Professor, Cand. Sci. (Phys.-Math.)

E-mail: iliya kuptsov_iliya@list.ru

Utianskaia Tat'yana Vladimirovna, PhD Student

E-mail: tutian@gmail.com