

ПРИМЕНЕНИЕ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА MESSAGE ДЛЯ ЗАДАЧ ОПТИМИЗАЦИИ ДВУХКОМПОНЕНТНОЙ СТРУКТУРЫ КРУПНОМАСШТАБНОЙ ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

М.Н. Бок*, В.В. Коробейников*, С.В. Югай*, А.А. Андрианов,
Ю.А. Коровин**, Е.В. Федорова**, Г.А. Фесенко****

** ГНЦ РФ-Физико-энергетический институт им. А.И. Лейпунского, г. Обнинск,*

*** Обнинский государственный технический университет атомной энергетики,
г. Обнинск*



Приведены результаты моделирования двухкомпонентной структуры ядерно-энергетического комплекса России, с оценкой доли каждой из его составляющих в общей выработке электроэнергии на атомных станциях. Результаты, полученные в рамках данного исследования, демонстрируют возможности пакета MESSAGE применительно к задачам оптимизации структуры энергосистем с замкнутым топливным циклом.

ВВЕДЕНИЕ

Спектр задач, связанных с планированием и принятием решений в энергетике, весьма обширен. Большинство этих задач основывается на экономическом расчете, с учетом технологических особенностей производства энергии, а также дополнительных условий (таких, как ограничения на выбросы вредных веществ и требования по нераспространению делящихся ядерных материалов).

Для решения задач общенационального и локального масштаба, долгосрочного и краткосрочного планирования, связанных с общими тенденциями развития энергетики или с детальным моделированием одной из ее подотраслей, используются разные методики и программные средства. И хотя накоплен уже немалый опыт разработки и применения моделей различных типов для анализа проблем энергетики, данная сфера приложений математического моделирования находится в непрерывном развитии.

Выбор модельного представления задачи далеко не всегда является однозначным. Многие задачи допускают несколько альтернативных представлений, и иногда полезным оказывается их комбинированное применение с последующим сопоставлением результатов.

В настоящем исследовании сделана попытка моделирования двухкомпонентной структуры ядерно-энергетического комплекса России, с оценкой доли каж-

© М.Н. Бок, В.В. Коробейников, С.В. Югай, А.А. Андрианов, Ю.А. Коровин, Е.В. Федорова, Г.А. Фесенко, 2007

дой из его составляющих в общей энерговыработке АЭС. В рамках используемого модельного подхода ставится задача о поиске оптимального соотношения компонентов ЯЭ, математически сформулированная в виде задачи линейного программирования¹; критерием оптимизации служит минимум полных приведенных затрат системы. Именно такой подход реализован в MESSAGE – универсальном программном пакете энергетического планирования.

КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ MESSAGE

MESSAGE (Model for Energy Supply Strategy Alternatives and their General Environmental Impacts) – инструмент моделирования систем энергетики, позволяющий проводить комплексные оценки различных способов производства целевых форм энергии.

Этот инструмент разработан Международным институтом прикладного системного анализа (IIASA). В настоящее время MESSAGE распространяется МАГАТЭ и рекомендован к использованию в составе набора программных средств международного проекта по инновационным реакторам и топливным циклам (ИНПРО).

Гибкость и многофункциональность пакета энергетического планирования заключается в том, что он позволяет конструировать по единой методике разнообразные системы топливо- и энергообеспечения. Системы любого масштаба и состава могут быть описаны в MESSAGE с любой требуемой степенью детализации.

Основу построения модели составляет набор *уровней энергии*, на каждом из которых определена одна или несколько *форм энергии*. Число уровней может задаваться произвольно; границы задачи могут охватывать полный путь преобразования энергии, от добычи ресурсов до конечного потребления, или только часть этой последовательности, представляющую интерес для исследования.

Роль связующих звеньев между уровнями выполняют *технологии*, осуществляющие перевод энергии из одних форм в другие. Сведения о входных и выходных потоках технологий используются для расчета динамики топливно-энергетических балансов в системе (расхода ресурсов, загрузки/разгрузки хранилищ, производства/потребления промежуточных форм энергии).

Для описанных в модели форм энергии конечного уровня на интервале прогнозирования задается *вектор спроса*, определяющий внешние требования к энергосистеме.

Экономические параметры модели, используемые для расчета целевой функции полных приведенных затрат системы, включают прогнозные цены на энерго-ресурсы, затраты на сооружение и эксплуатацию промышленных установок, затраты на производство единицы продукции/услуг технологических этапов топливного цикла, штрафы (представляющие собой один из видов модельных ограничений на активность технологии или группы технологий). В группе базовых характеристик модели вместе с интервалом прогнозирования указывается также обобщенный показатель внешнеэкономического развития – *ставка дисконтирования*.

На основании всего комплекса исходных данных MESSAGE генерирует формальное математическое описание задачи линейного программирования, подаваемое на вход оптимизирующего алгоритма.

Конечным результатом моделирования является оптимальный сценарий развития системы, включающий распределение долей каждого из ее компонентов в покрытии заданных потребностей, материальные балансы промежуточных этапов топливного цикла и графики ввода технологических мощностей. [1]

¹ Задача оптимизации с линейной целевой функцией и системой ограничений в виде линейных неравенств.

К числу важных достоинств MESSAGE следует отнести принцип моделирования энергосистемы без ее разделения на подсистемы топливообеспечения и топливоиспользования, возможность моделирования работы предприятий топливообеспечения в переменном режиме и работы «на склад», возможность учета нелинейной зависимости между затратами на сооружение предприятий и их производительностью. Программный комплекс позволяет моделировать работу электростанций в энергосистеме с учетом суточных, недельных и сезонных колебаний спроса на электроэнергию, многоцелевые установки, многозвенные технологические процессы, межрегиональный энергообмен и международные центры топливного цикла. Возможно проведение многокритериальной оптимизации с учетом внешних факторов, таких как экология и нераспространение. Все это позволяет использовать MESSAGE как для задач краткосрочного планирования, так и для задач долгосрочного прогнозирования развития ядерной энергетики и соответствующих топливных циклов.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Одним из возможных вариантов развития российской ЯЭ на ближайшие 50 лет является двухкомпонентная система с топливным циклом, изображенным на рис. 1. В модели этой системы осуществляется режим самообеспечения по топливу на быстрых реакторах без расширенного воспроизводства ($KB=1$). Для стартовых загрузок быстрых реакторов используется плутоний, извлекаемый при переработке ОЯТ тепловых реакторов. Объемы переработки ОЯТ и выделения плутония однозначно определяются текущей потребностью в топливе для быстрых реакторов. Выделяемый плутоний не складывается.

Базовый сценарий развития [2, 3], отвечающий высоким показателям экономического роста и повышенным требованиям к доле атомного электричества в покрытии растущих энергетических потребностей, предполагает почти пятикратное увеличение годовой энерговыработки атомных станций к 2050 г. (70,8 ГВт.г) по сравнению с 2005 г. (14,9 ГВт.г). Заданные требования к системе совместно с графиком выбывания исторически установленных мощностей (значение КИУМ в модели принято постоянным, равным 0,8 в течение всего исследуемого периода) определяют потребность в новых генерирующих мощностях.

Начиная с 2013 г., структура генерирующих мощностей может комплектоваться реакторами двух типов – тепловыми, работающими на урановом топливе, и быстрыми, работающими на МОХ-топливе. Прогнозные значения рыночной стоимости природного урана, заложенные в модель, растут от 40 до 100 долл./кг на интервале моделирования.

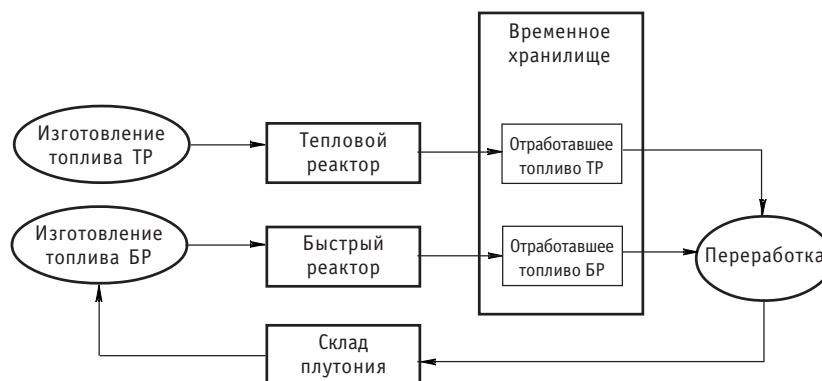


Рис. 1. Агрегированная схема ЯТЦ

Таблица 1

Показатели расхода топлива, материалов и услуг ЯТЦ для тепловых реакторов

Начальная топливная загрузка	65,4 т ТМ
Ежегодная перегрузка	24,3 т ТМ/ГВт.г
Расход природного урана на 1 кг ТМ топлива	8,3 кг
Работа разделения на 1 кг ТМ топлива	7,3 ЕРР

Таблица 2

Потребности в топливе для быстрых реакторов

Начальная топливная загрузка	12,64 т ТМ
Ежегодная перегрузка	11 т ТМ/ГВт.год
Объем переработки ОЯТ тепловых реакторов на 1 кг плутония (для стартовых загрузок быстрых реакторов)	121 кг ТМ

Состояние ЯЭ на начало модельного периода соответствует однокомпонентной системе (только тепловые реакторы). В качестве начальных данных о количестве ОЯТ, находящегося на хранении, и складских запасах выделенного плутония, модель использует значения 16 тыс. т и 60 т соответственно.

В качестве исходных данных по материальным балансам ядерных реакторов в модель были заложены условные значения, приблизительно соответствующие характеристикам реакторных установок ВВЭР-1000 и БН-800 и их топливных циклов.

Таблица 3

Ключевые экономические параметры модели

Удельные (на единицу производственной мощности) капитальные затраты основных компонентов системы	
Тепловой реактор	1500 \$/кВт(э)
Быстрый реактор	2200 \$/кВт(э)
Завод по переработке ОЯТ	5 млрд. долл./тыс. т ТМ в год
Завод по изготовлению МОХ-топлива	1,3 млрд. долл./100 т ТМ в год
Издержки основных этапов ЯТЦ	
Обогащение урана	100 долл./ЕРР
Изготовление УОХ-топлива тепловых реакторов	600 долл./кг ТМ
Изготовление МОХ-топлива быстрых реакторов	1300 долл./кг ТМ
Временное хранение ОЯТ в специальном хранилище	230 долл./кг ТМ
Переработка ОЯТ тепловых реакторов	800 долл./кг ТМ
Переработка ОЯТ быстрых реакторов	1300 долл./кг ТМ

Для расчета затрат системы в модели использовались главным образом данные исследования ОЭСР/АЯЭ по экономике ядерного топливного цикла [4].

Все переменные модели, в том числе установленные мощности технологий, определены как непрерывные величины, т.е. могут принимать любые положительные значения. Следует отметить, что постановка целочисленной задачи линейного программирования, в рамках которой ввод новых мощностей описывается дискретными переменными при заданной мощности единичного блока, возможна при установке соответствующей опции MESSAGE. Однако такая степень «реалистичности» модели не требуется на данной стадии исследования.

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Оптимальная структура энерговыработки системы, рассчитанная с помощью MESSAGE, приведена на рис. 2. График ввода новых мощностей тепловых и быстрых реакторов представлен на рис. 3.

Из графиков рис. 2, 3 видно, что доля быстрых реакторов в системе на начальном этапе их внедрения растет ускоренными темпами. Всего на участке 2013 – 2020 гг. вводится порядка 15 ГВт на быстрых реакторах (в среднем почти по 2 ГВт ежегодно). На этом этапе полностью расходуются складские запасы выделенного плутония (рис. 4).

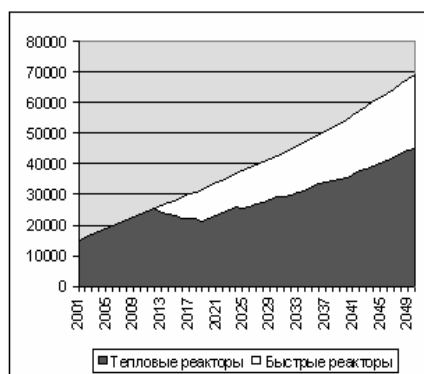


Рис. 2. Структура энерговыработки (МВт.г)



Рис. 3. Ввод новых мощностей (МВт)

Период после 2020 г. характеризуется одновременным наращиванием мощностей на тепловых и быстрых реакторах. Обе составляющих ЯЭ выходят на устойчивый темп роста, и в 2050 г. энерговыработка быстрых реакторов составляет около 35% от общей энерговыработки.

Интегральный расход урана в тепловых реакторах на интервале моделирования составляет около 320 тыс. т (больше половины известных на данный момент российских запасов категорий RAR, EAR-I и EAR-II).

Объемы плутония, выделяемого при переработке, показаны на графике рис. 5. Динамика остаточных объемов ОЯТ в хранилищах представлена на рис. 6.

Начиная с 2017 г., когда складские запасы выделенного плутония оказываются израсходованными, система начинает переработку ОЯТ. Плутоний, извлекаемый при переработке ОЯТ тепловых и быстрых реакторов, представлен в модели двумя независимыми потоками, что видно из рис. 5. Рецикл топлива быстрых реакторов несколько отстает по времени от начала переработки облученного топлива тепловых реакторов, что связано с временными задержками в топливном цикле.

На графике рис. 6 показан полный объем облученного топлива, в том числе ОЯТ, находящегося в бассейнах выдержки в течение необходимого периода времени после выгрузки из реактора. С началом переработки происходит довольно значительное сокращение накопившегося к этому времени количества ОЯТ. Всего к 2050 г. на выдержке и длительном хранении находится около 23 тыс. т ОЯТ; без быстрых реакторов и переработки, при прежних темпах накоп-

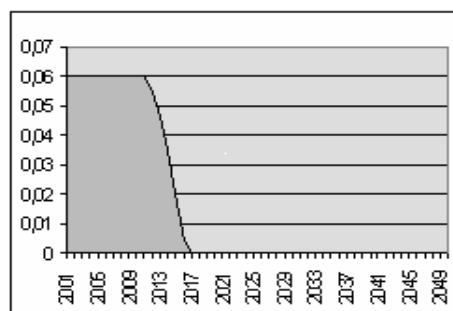


Рис. 4. Расход складских запасов выделенного плутония (тыс. т)

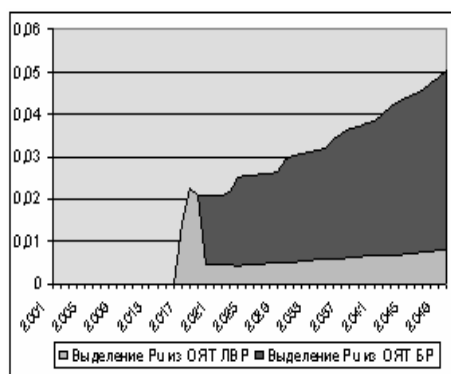


Рис. 5. Количество плутония (тыс. т), выделяемого при переработке ОЯТ

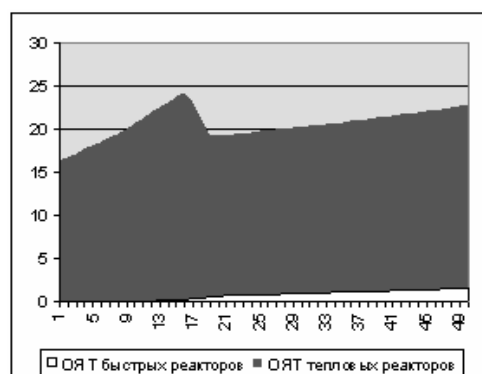


Рис. 6. Количество ОЯТ (тыс. т), находящегося на хранении

ления облученного топлива, эта величина была бы больше в два раза (порядка 50 тыс. т).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Ядерная энергетика требует решения задач, временные масштабы которых измеряются десятилетиями. Для ее ключевых проблем не существует мгновенных решений, кроме того, анализ возможных путей развития ядерно-энергетического комплекса требует учета множества взаимосвязанных факторов. Сложность задач подобного рода приводит к потребности в инструментальных средствах моделирования. К числу таких средств относится MESSAGE.

Результаты, полученные в рамках данного исследования, демонстрируют возможности пакета MESSAGE применительно к задачам оптимизации структуры энергосистем с замкнутым топливным циклом. С помощью MESSAGE удалось построить реалистичную и работоспособную модель двухкомпонентной системы ядерной энергетики. Для поставленной задачи моделирования была создана база исходных данных и выявлены проблемы, связанные с информационным наполнением модели.

Литература

1. MESSAGE – Model for Energy Supply Strategy Alternatives and their General Environmental Impacts. User Guide (DRAFT), International Atomic Energy Agency, October 2003.
2. Беляев Л.С., Марченко О.В., Соломин С.В. Анализ долгосрочных (до 2100 г.) тенденций развития энергетики России и мира. – М.: Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН
3. Санеев Б.Г., Лагерев А.В., Ханаева В.Н., Чemezov А.В. Энергетика России в первой половине XXI века: прогнозы, тенденции, проблемы // Энергетическая политика. – 2002. – №4. – С. 16-25.
4. The Economics of the Nuclear Fuel Cycle. OECD/NEA, Paris, 1994.

Поступила в редакцию 14.09.2006

ABSTRACTS OF THE PAPERS

УДК 621.039.543.4

Increasing of Security of Export Deliveries of Light Water Fuel due to Recycled Uranium Utilization \ P.N. Alekseev, E.A. Ivanov, V.A. Nevinitza, N.N. Ponomarev-Stepnoi, A.N. Rumyantsev, V.M. Shmelev; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher School. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2007. – 7 pages, 2 tables, 3 illustrations. – References – 9 titles.

In current paper we consider a possibility of decreasing proliferation risk, dealing with export deliveries of light water reactors fuel. It is shown, that implementation of recycled uranium make it possible to create fuel with intrinsic self-protection properties relatively diversion scenarios in case of IAEA safeguards breakdown.

УДК 621.039

Analysis of the Influence of Possible Nuclear Energy Development Scenarios on the Scale of Inspection Activity to Maintain the Nonproliferation Regime \ A.A. Andrianov, Yu.A. Korovin, G.M. Pshakin; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher School. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2007. – 10 pages, 2 tables, 8 illustrations. – References – 22 titles.

An analysis of the influence of the possible nuclear energy development scenarios on the scale of inspection activity to maintain the nonproliferation regime is presented in the paper. The study was done based on nuclear energy development models by estimating the dynamics of nuclear materials growth and composition change for different development scenarios and strategies of nuclear materials management in the nuclear fuel cycle. The analysis was performed both for the evolutionary development scenario, assuming conservation of the present-day infrastructure and extrapolation of the current trends of nuclear energy development into the future, and for the innovative development scenario, assuming introduction of innovative nuclear reactor systems into the nuclear energy mix and solution of urgent problems of nuclear energy by means of these systems.

УДК 621.039.54: 004.42

Application of Message Model for Optimization of Two-Component Structure of a Large-Scale Nuclear Power System \ S. Yugay, V. Korobeynikov, M. Bock, Yu. Korovin, E. Fedorova, A. Andrianov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher School. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2007. – 6 pages, 3 tables, 6 illustrations. – References – 4 titles.

The results of modeling the two-component structure of Russian nuclear power are presented. The assessment of each components share in total electricity generation at NPPs is made. The investigation results demonstrate the application of a software tool MESSAGE for optimizing the structure of energy systems with closed fuel cycle.

УДК 621.039.543.4

Enriched uranium with addition of ^{232}U : protection against uncontrolled proliferation \ E.F. Kryuchkov, V.A. Apse, V.B. Glebov, A.S. Krasnobaev, A.N. Shmelev; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher School. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2007. – 8 pages, 2 tables, 1 illustration. – References – 12 titles.

The work considers a way of forming of inherent protective properties of nuclear materials and, first of all, enriched uranium. Protective barriers produced by incorporation of small additions of ^{232}U into the fuel are considered. It is shown that a radiation barrier produced by decay of ^{232}U and daughter products of its radiation chain is more stable in time than a barrier produced by fissile products. At that incorporation ^{232}U into the fuel has positive effect for a system neutron balance.

It is analyzed a protective barrier on the way of unauthorized use of isotope separation technologies for enrichment of uranium which contains ^{232}U . Incorporation of ^{232}U into the uranium hexafluoride leads to make a protective radiochemical barrier on the way of possible unauthorized uranium