

УДК 620.9. 001.57 (470+571)

## Особенности модельных исследований проблемы обеспечения энергетической безопасности России\*

А.В. ЕДЕЛЕВ<sup>1</sup>, Н.М. БЕРЕСНЕВА<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 664033, РФ, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130, Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, кандидат технических наук, старший научный сотрудник. E-mail: flower@isem.irk.ru

<sup>2</sup> 64033, РФ, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130, Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, кандидат технических наук, научный сотрудник. E-mail: beresneav@isem.irk.ru

В статье рассмотрены методические и практические аспекты сценарных исследований проблемы обеспечения энергетической безопасности России и ее регионов. В ней раскрыта тематика энергетической безопасности, обосновано использование индикаторов энергетической безопасности в качестве специализированных критериев оценки уровня энергетической безопасности территорий. Для сценарных исследований сформулированы требования к составу формируемых сценариев, обозначены обязательные шаги проводимых вычислительных экспериментов – гибкий предварительный и экспертный анализ расчетных состояний, его многокритериальный характер. Здесь же дана краткая характеристика базовой модели исследования топливно-энергетического комплекса страны. Основной акцент в статье сделан на технологию проведения исследований с привлечением методов комбинаторного моделирования. В рамках данного материала дана практическая оценка значимости комбинаторных методов в обозначенном направлении исследований, описана складывающаяся при этом схема их проведения. Концепция применения методов комбинаторного моделирования в исследованиях энергетической безопасности наглядно отражена в онтологическом представлении. Инструментальная поддержка комбинаторных исследований энергетической безопасности вынесена в отдельный раздел статьи. В нем описан распределенный пакет прикладных программ «Коррективы», используемый для исследований надежного топливо- и энергообеспечения территорий. В описании сформулированы ключевые положения реализации «Коррективы» технического и методического характера. В частности, обозначено и типизировано графо-ориентированное представление расчетных состояний и структур задания сценариев исследований, обозначен реализованный алгоритмический аппарат (методы комбинаторного моделирования, кластерный анализ, алгоритмы определения оптимальных состояний и траекторий развития топливно-энергетического комплекса), акцентирована ориентация пакета программ на распределенные вычисления. Также в описании вынесены технические детали реализации «Коррективы» (его архитектурные решения, средства разработки), приведена технология проводимых с ее помощью исследований функционирования и развития энергетики страны с учетом фактора обеспечения ее энергетической безопасности.

---

\* Статья получена 25 февраля 2017 г.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 15-07-07412а.

**Ключевые слова:** энергетическая безопасность, индикативный анализ, топливно-энергетический комплекс, математическая модель, вычислительный эксперимент, комбинаторное моделирование, распределенные вычисления, пакет прикладных программ

DOI: 10.17212/1814-1196-2017-2-94-108

## ВВЕДЕНИЕ

Исследования проблемы обеспечения энергетической безопасности (ЭБ) России – одно из ключевых направлений исследований развития топливно-энергетического комплекса (ТЭК) страны, традиционно ориентированных на изучение вопросов надежного топливно- и энергообеспечения потребителей в условиях развития угроз ЭБ. Актуальность данных исследований обосновывается следующим [1]:

- актуальностью тематики ЭБ России, ее ключевой ролью в экономике страны и национальной безопасности;
- необходимостью идентификации стратегических угроз ЭБ, препятствующих нормальному функционированию инфраструктурных объектов территорий и выработке мероприятий по предотвращению или локализации этих угроз.

Цель исследований – выявление путей развития энергетики страны с допустимыми по уровню ЭБ состояниями ТЭК, оцениваемому с помощью системы индикаторов ЭБ. При этом уровень ЭБ больше рассматривается в контексте гарантированного достаточного обеспечения потребностей в ТЭР, в анализе устойчивости потребителей к дефицитам и нарушениям энергоснабжения [1–4].

## 1. ОСОБЕННОСТИ ИССЛЕДОВАНИЙ ПРОБЛЕМЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЭБ РОССИИ

Исследования проблемы обеспечения ЭБ России проводятся в рамках сценарных исследований развития ТЭК и включают следующие задачи:

- формирование временных сценариев возмущений для различных комбинаций угроз, применимых к различным территориям и их группам;
- оценка состояний ТЭК после реализации сформированных сценариев возмущений, выявление складывающихся «узких мест» в топливно- и энергообеспечении потребителей;
- формирование мероприятий по устранению выявленных «узких мест», оценка эффективности мероприятий;
- отбор инвариантных и наиболее эффективных мероприятий по обеспечению ЭБ территорий.

Данные исследования характеризуются следующими особенностями:

- формирование и анализ всех логически возможных состояний ТЭК для заданных сценариев развития с целью совместного рассмотрения угроз ЭБ при получении максимально возможного числа отвечающих требованию ЭБ состояний ТЭК;
- моделирование этих состояний с помощью квазидинамических линейных балансовых моделей ТЭК, имитирующих взаимосвязанную работу отраслевых систем энергетики;
- организация распределенных расчетов состояний ТЭК, информационная поддержка анализа (предварительного и экспертного) рассчитанных состояний;

– организация предварительного анализа состояний для выделения обозримого для экспертного анализа числа допустимых с позиций ЭБ состояний ТЭК;

– поддержка гибкого поиска рациональных с позиций ЭБ состояний или направлений развития ТЭК в рамках экспертного анализа отвечающих требованиям ЭБ состояний;

– многокритериальность проводимого анализа, направленная на учет различных аспектов ЭБ (с помощью отдельных индикаторов или их групп) и на оценку кризисности состояний по другим важнейшим факторам исследований (с помощью важнейших модельных характеристик).

Технически исследования проблемы обеспечения ЭБ России проводятся в рамках многоитерационных вычислительных экспериментов с помощью комплекса программ, ориентированных на работу с балансовой территориально-производственной моделью ТЭК страны [1–2, 5]. В этой модели, отвечающей ключевым принципам формирования общенергетических систем (принцип последовательного описания основных стадий преобразования энергоресурсов, принцип сетевого представления территориальных связей), реализованы блоки основных отраслевых систем (блок газоснабжения, угле-снабжения, нефте- и нефтепродуктоснабжения, электроэнергетики), блок проранжированных потребителей продукции отраслей ТЭК. Эта модель имитирует работу объектов территориально-производственной структуры ТЭК России с учетом структурной избыточности в виде резервов мощностей, запасов топлива, взаимозаменяемости энергоресурсов, дает комплексную оценку особенностей развития энергетики территорий.

Схема проведения исследований проблем обеспечения ЭБ России представлена на рис. 1. В ней выделены механизм проведения исследований (вычислительный эксперимент), инструменты его реализации (программные и модельные средства), аппарат оценки допустимости состояний ТЭК (индикативный анализ, модельные оценки), непосредственно эксперт, формирующий сценарии проведения исследований.

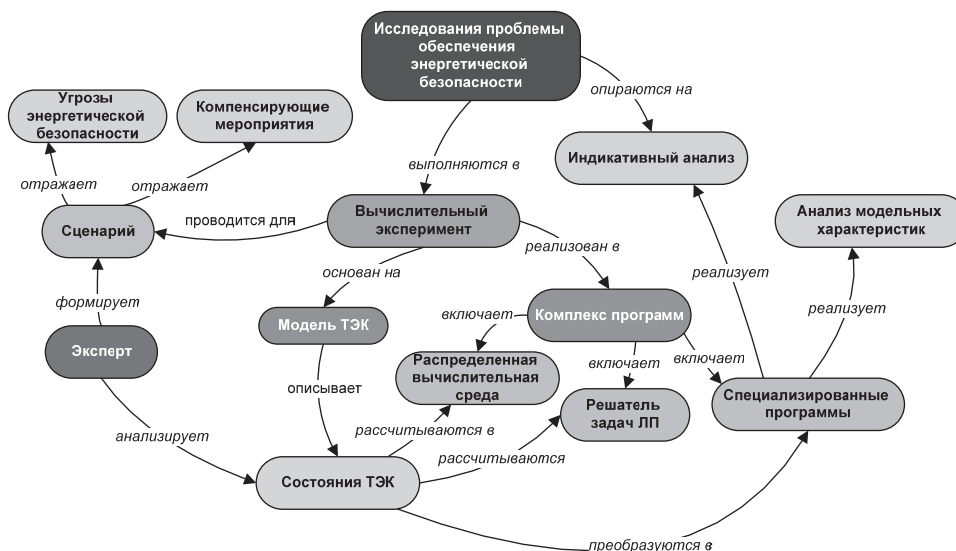


Рис. 1. Обобщенная схема сценарных исследований энергетической безопасности России

## 2. ТЕХНОЛОГИЯ ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ ПРОБЛЕМЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЭБ РОССИИ

В основе исследований проблемы обеспечения ЭБ России лежат методы комбинаторного моделирования, ранее апробированные в исследованиях отраслей энергетики отдельных территориальных объединений с различной степенью агрегирования смоделированных объектов. Пример этих исследований – оценка перспектив развития энергетики европейского северо-востока с выделением роли электроэнергетики на уровне ввода (по отдельным станциям) и вывода (по отдельным типам станций) генерирующих мощностей [6, 7]. Методика проведения этих исследований характеризуется следующими особенностями:

- она инвариантна применительно к объектам исследования (это могут быть отдельные отрасли или ТЭК в целом);
- она реализована в идеологии сценарных исследований, ориентирована на комплексный учет экспертно заданных возмущающих воздействий (критических ситуаций, компенсирующих мероприятий);
- она ориентирована на решение задач развития, в том числе с учетом фактора неопределенности.

Основные преимущества применения этой методики (а именно методов комбинаторного моделирования):

- возможность задания множества временных сценариев исследований, автоматическое формирование на их основе всех возможных состояний ТЭК;
- возможность полного и наглядного задания учитываемых сценариев, поддержка многоэтапного во времени процесса принятия решений в рамках граф-ориентированного представления сценариев и формируемого множества состояний ТЭК;
- наличие контроля экспоненциального роста числа состояний с помощью проработанной системы ограничений (общесистемных и ограничений по динамике развития) для состояний ТЭК и временных переходов между ними;
- проработанность алгоритмов гибкого выбора оптимальных и близких к ним направлений развития ТЭК.

Характерные особенности реализации методов комбинаторного моделирования в контексте ЭБ:

- детерминированное описание условий развития ТЭК в силу отсутствия или низкой достоверности данных о вероятностных характеристиках угроз ЭБ;
- реализация системы ограничений только на уровне состояний ТЭК;
- применение индикаторов ЭБ для состояний ТЭК в качестве логических общесистемных ограничений;
- привлечение индикаторов ЭБ для выбора рациональных с позиций ЭБ направлений развития ТЭК;
- использование дополнительных алгоритмов для отбора представительных состояний ТЭК для каждого перспективного момента времени;
- необходимость комплексной многокритериальной оценки траекторий развития ТЭК.

При этом претерпела изменения схема проведения исследований в силу множественного характера выполнения однотипных операций в рамках от-

дельных этапов вычислительного эксперимента. Сложилась технология проведения исследований проблемы обеспечения ЭБ России со следующими ключевыми этапами.

1. Подготовка и отработка графа базисных (бездефицитных) состояний ТЭК по опорным годам рассматриваемого временного периода.

2. Индивидуальное задание по опорным годам множества сценариев развития возмущений в виде отдельных графов развития объектов ТЭК. Каждый такой граф описывает изменения отдельной характеристики базисного состояния по территориальным единицам или территориальным объединениям с учетом временного аспекта.

3. Формирование по опорным годам графа развития ТЭК, каждое состояние которого – скорректированное базисное состояние для определенного момента времени. Корректировки – комбинация изменений параметров базисного состояния, заданных в графах развития объектов ТЭК для данного момента времени.

4. Проведение массовых распределенных расчетов состояний графа развития ТЭК.

5. Формирование графа допустимых состояний ТЭК, включающего наиболее представительные, допустимые с позиций ЭБ состояния рассчитанного графа развития ТЭК.

6. Выбор рациональных с позиций ЭБ и близких к ним направлений развития ТЭК.

Концепция применения методов комбинаторного моделирования в рамках исследований проблемы обеспечения ЭБ России, инструментально реализованных в пакете прикладных программ (ППП) «Корректива», наглядно представлена на рис. 2.

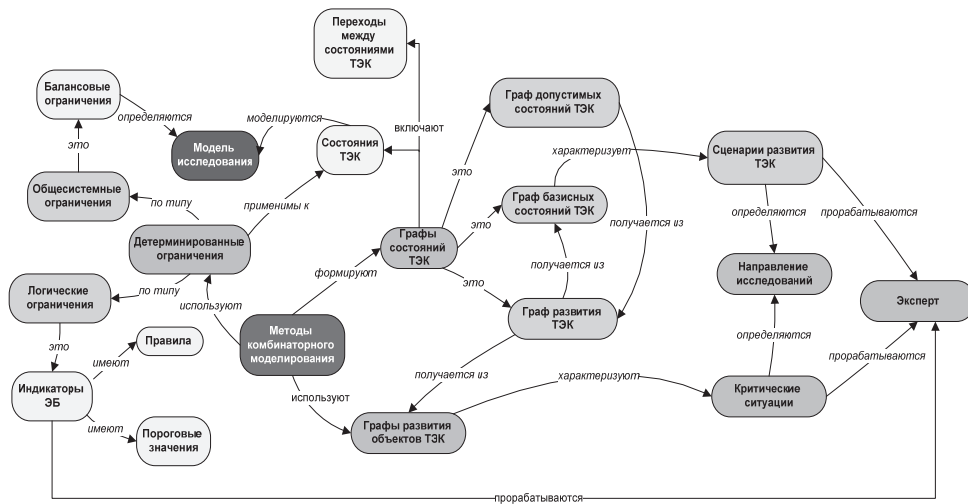


Рис. 2. Концепция применения методов комбинаторного моделирования в исследованиях энергетической безопасности России

### 3. ИНСТРУМЕНТАРИЙ ИССЛЕДОВАНИЙ ПРОБЛЕМЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЭБ РОССИИ

Условия, при которых подходы являются асимптотически эквивалентными, в случае состоятельных оценок исследованы в работе [9]. Рассмотрим кратко полученные там результаты и докажем новые.

Распределенный пакет прикладных программ «Корректива» используется для исследований надежного топливо- и энергообеспечения территорий, в том числе в исследованиях ЭБ России. В нем реализованы универсальные механизмы формирования состояний ТЭК, единые алгоритмы их анализа с настраиваемым выбором критериев оценки (в исследованиях ЭБ – индикаторов ЭБ). Пакет прикладных программ состоит из четырех программных модулей, один из которых («универсальный») может использоваться как самостоятельный инструмент исследования в локальном режиме вычислений. В целом «Корректива» характеризуется следующими ключевыми положениями.

1. ППП предназначен для исследований развития и функционирования ТЭК территорий по различным направлениям исследований, ориентирован на использование балансовых территориально-производственных моделей ТЭК. Основная задача «Коррективы» – поиск оптимальных состояний и направлений развития ТЭК, допустимых по критериям и определяемых спецификой исследований.

2. ППП ориентирован на распределенные вычисления состояний ТЭК и может быть использован в условиях локальных вычислений. Характер вычислений зависит от цели исследований и требований к набору формируемых состояний, предполагает использование различного состава программных модулей «Коррективы».

3. Распределенные вычисления предполагают автоматическое создание всех возможных для заданных ситуаций состояний ТЭК, требуют использования полного пакета программ, а также внешнего инструмента организации распределенных вычислений (инструментального комплекса «DISCOMP» [8], ORLANDO [9]). Взаимодействие указанных инструментов реализовано на уровне формируемых пакетов состояний ТЭК.

4. Локальные вычисления в ППП возможны в случае использования его «универсального» модуля, предназначенного для отладки экспертно заданных (подготовленных вручную) состояний ТЭК на различных этапах вычислительного эксперимента (при проработке базисных и возмущенных состояний ТЭК). В случае распределенных вычислений этот компонент используется для отладки базисных состояний ТЭК.

5. Объектами представления состояний ТЭК в ППП являются ориентированные во времени графы двух видов:

- граф базисных состояний ТЭК со сбалансированными состояниями, задаваемыми сценариями проводимых исследований;
- автоматически создаваемые графы развития ТЭК с различными наборами состояний (это расчетный граф развития ТЭК, разреженный граф допустимых состояний ТЭК).

6. Возмущающие воздействия в ППП задаются с помощью графов развития объектов ТЭК. Каждый такой граф включает коэффициент изменения границ определенного параметра объекта ТЭК.

7. Алгоритмический аппарат комплекса представлен следующим:

- методами комбинаторного моделирования, используемого главным образом для автоматического создания полного набора состояний ТЭК в рамках заданных ситуаций;
- методами кластерного анализа для получения набора наиболее представительных состояний ТЭК для каждого момента времени;
- алгоритмами анализа состояний и траекторий развития ТЭК по направлению исследований.

8. Критериями оценки являются реализованные в ППП показатели (в том числе индикаторы ЭБ) и наиболее характерные модельные характеристики.

9. Разноплановое программное обеспечение «Коррективы» представлено специализированными программными модулями, реализованными на языках программирования Lua и C++, внешними программными средствами (универсальным решателем задач линейного программирования (ЛП) *lp\_solve*, редактором электронных таблиц Microsoft Excel, геоинформационной системой SAGA). Поддерживаемые форматы хранения данных в ППП – электронные таблицы, таблицы баз данных. Взаимодействие перечисленных компонентов реализовано с помощью сторонних связующих модулей (рис. 3).

10. Основные программные модули «Коррективы»:

- модуль формирования базисного графа развития ТЭК (ранее упомянутый «универсальный» модуль, модуль 1);
- модуль формирования графа развития ТЭК (модуль 2);
- модуль оценки допустимости состояния ТЭК (модуль 3);
- модуль экспертной оценки графа допустимых состояний ТЭК (модуль 4).

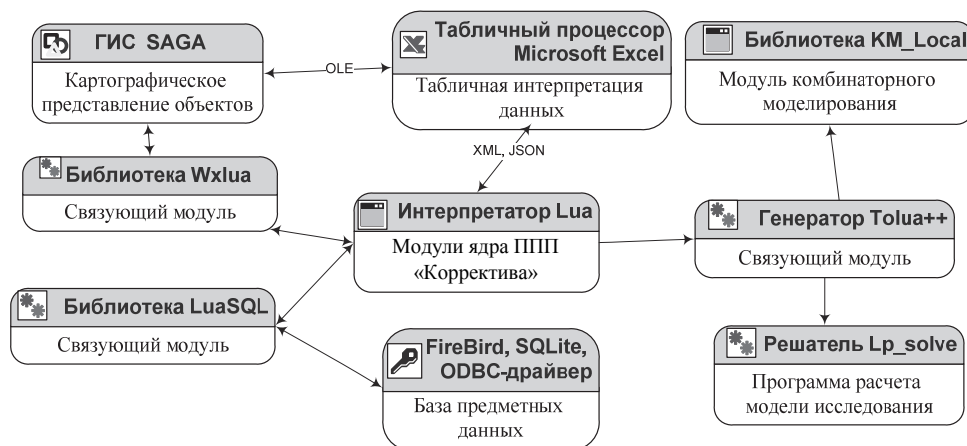


Рис. 3. Средства реализации ППП «Коррективы»

Функциональные возможности этих модулей используются в различном составе в различных схемах исследования применительно к различным видам графов развития ТЭК. Возможные схемы исследований:

- исследования функционирования ТЭК с генерацией всех возможных состояний ТЭК, с последующим распределенным расчетом, анализом;
- исследования развития ТЭК в локальном и распределенных режимах расчетов состояний.

Краткая характеристика модулей и их возможностей приведена в таблице.

Краткая характеристика модулей ППП «Корректива»

Название модуля	Функции модуля	Особенности реализации
1. Модуль формирования базисного графа развития ТЭК (может использоваться самостоятельно в случае традиционной схемы задания состояний ТЭК)	1. Импорт данных из источников (БД, электронные таблицы)	Реализован в виде отдельных подпрограмм, ориентированных на конкретные форматы и структуры данных. Имортируемые данные – ограничения переменных модели исследования (ЭММ), ее технологические и стоимостные коэффициенты
	2. Формирование базисного графа развития ТЭК	Автоматическая генерация вариантов ЭММ в формате решателя (Ip_solve) в рамках принятой TRV-кодировки объектов
	3. Расчет базисного графа развития ТЭК	Расчет сгенерированных вариантов ЭММ на внешнем решателе (Ip_solve) по опорным годам. Формирование выходных таблиц Microsoft Excel
	4. Анализ графа развития ТЭК	Выбор анализируемых показателей, анализ допустимости каждого рассчитанного варианта ЭММ по выбранным показателям. Показатели – модельные характеристики или индикаторы ЭБ. Расчет и качественная оценка последних реализованы в программном модуле. Пороговые значения индикаторов задаются при их выборе с учетом территориального или временного аспектов
2. Модуль формирования графа развития ТЭК	1. Формирование графов развития объектов ТЭК	Включает задание по временным срезам изменений показателей функционирования объектов ТЭК по территориальным единицам
	2. Формирование графа развития ТЭК с помощью методов комбинаторного моделирования на базе заданных графов развития объектов ТЭ	Граф формируется автоматически. Представляет собой множество сформированных состояний ТЭК, сгруппированных по временным срезам
	3. Формирование порций данных для распределенных вычислений	Формирование архивов наборов состояний ТЭК по каждому моменту времени



Окончание таблицы

Название модуля	Функции модуля	Особенности реализации
3. Модуль оценки допустимости состояний ТЭК	1. Расчет графа развития ТЭК	Автоматическая генерация вариантов ЭММ в формате решателя в рамках принятой TRV-кодировки объектов Расчет сгенерированных вариантов ЭММ на внешнем решателе по временным срезам
	2. Разрежение графа (отсев недопустимых состояний)	Выбор анализируемых показателей (по схеме модуля 1) Анализ допустимости каждого рассчитанного варианта ЭММ по показателям Исключение из графа развития ТЭК недопустимых рассчитанных вариантов
4. Модуль экспертной оценки графа развития ТЭК	1. Выделение наиболее представительных состояний ТЭК с помощью методов кластерного анализа	Реализован с помощью метода k-средних. Выполняется автоматически, регламентируется заданным в модуле количеством кластеров
	2. Определение оптимальных траекторий развития ТЭК (по отдельным показателям)	Реализован с помощью алгоритма Флойда-Уоршала. Включает выбор показателя (по схеме модуля 1), по которому определяется путь с минимальным весом

База данных (БД) «Коррективы» вариационна (различна для различных версий моделей), структурно представлена тремя блоками таблиц:

- блоком словарей ключевых элементов территориально-производственной структуры ТЭК (ресурсов, технологий и территорий), таблиц их групп;
- блоком описания сформированных графов развития ТЭК;
- блоком детального TRV-описания [10] состояний ТЭК (на уровне ключевых технологий по территориям) с заданием соответствующих численных характеристик.

Первые два блока таблиц структурно неизменны и универсальны применительно к практикуемым принципам формирования моделей исследования энергетики, граф-ориентированному представлению состояний. Третий блок таблиц содержит реализованную в модели цепочку преобразования ресурсов и структурно зависит от степени детализации технологии преобразования ресурсов (например, учет мощностей оборудования при выработке тепловой и электрической энергии), от учета факторов нетехнологического характера (например, учет экономических показателей). Схема взаимодействия блоков БД «Корректива» и их содержательная связь с моделью исследования отражены на рис. 4.

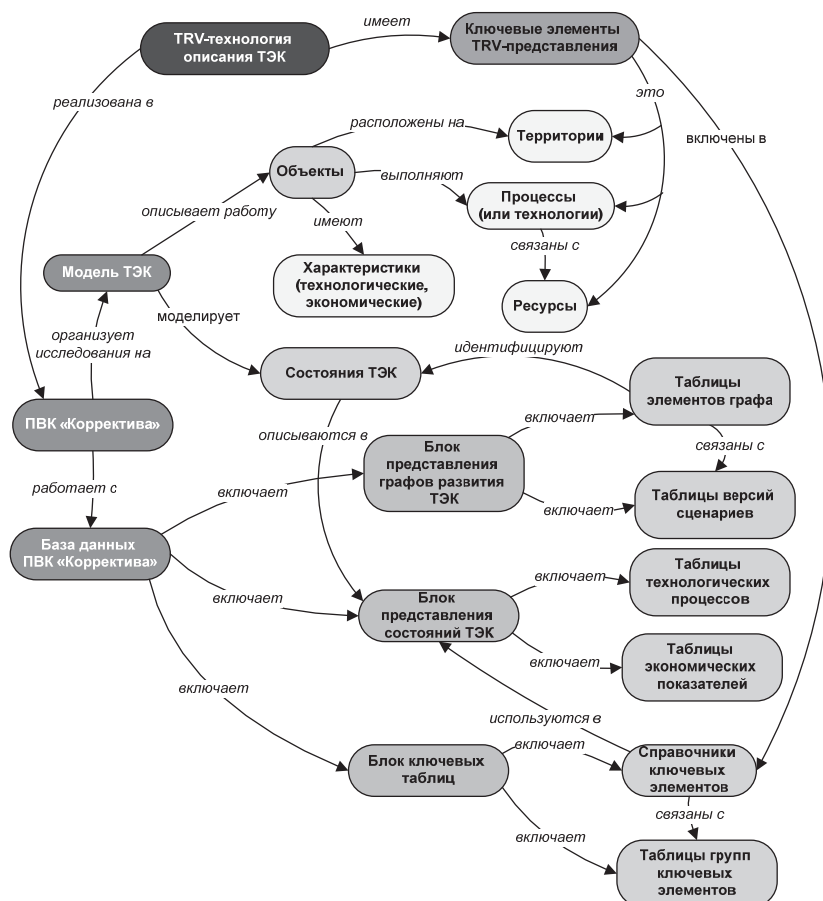


Рис. 4. Схема взаимодействия блоков базы данных ППП «Корректива»

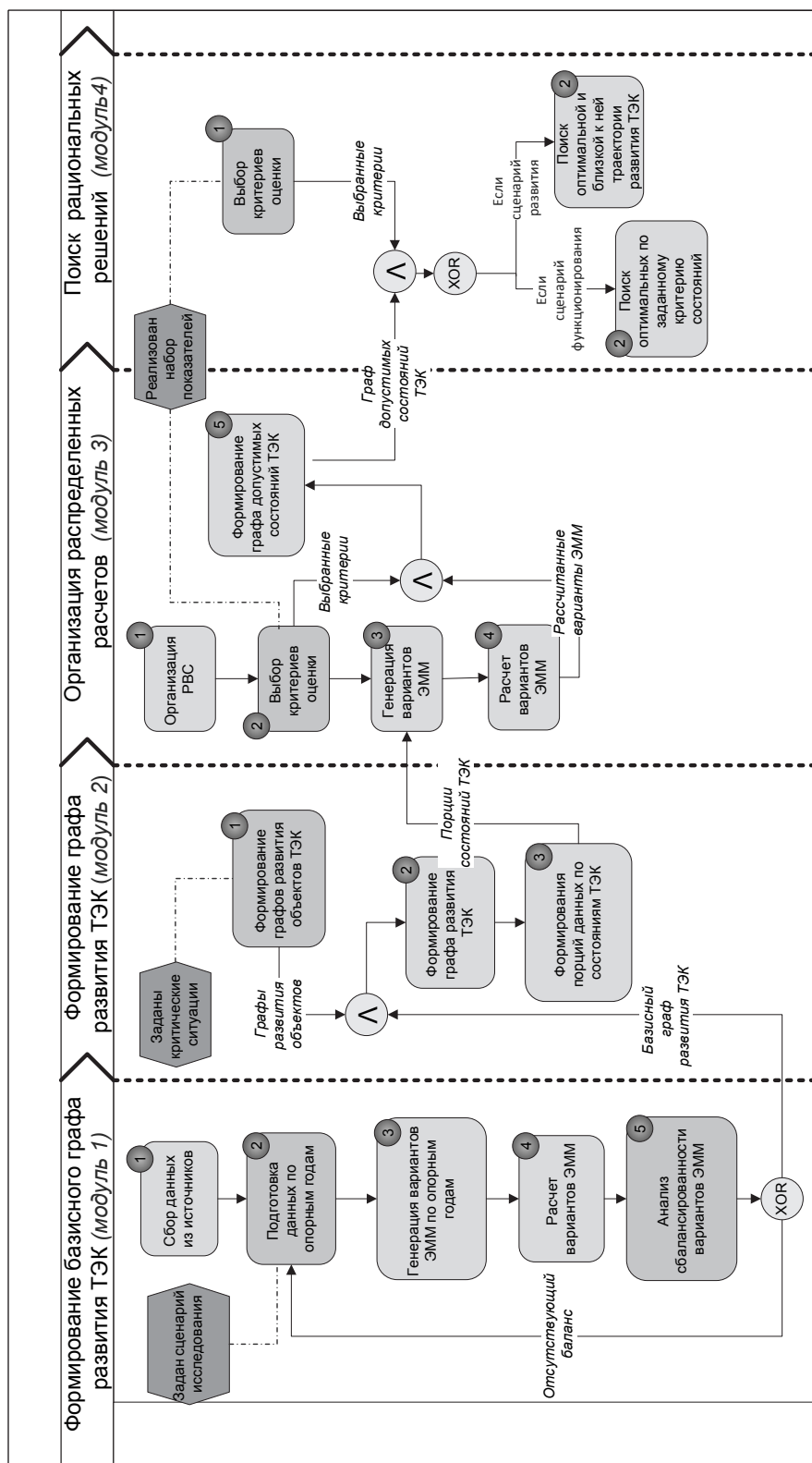


Рис. 5. Технология проведения исследований ТЭК в рамках ППП «Корректива»

Обобщенная технология проведения исследований с использованием ППП «Корректива» представлена на рис. 5. В ней выделены основные этапы проведения экспериментов с привязкой к модулям их исполнения, структура операций каждого из этапов. В схему включены факты готовности экспертно формируемой информации, зависимости ключевых операций.

Апробация ППП «Корректива» проводилась в сценарных исследованиях последствий похолоданий в различных территориальных объединениях, результаты которых наглядно представлены в [11].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В представленной статье раскрыты следующие особенности сценарных исследований проблемы обеспечения ЭБ России.

1. Выделены ключевые особенности методики проведения исследований:

- максимальный учет последствий реализации угроз ЭБ при формировании сценариев развития ТЭК с целью получения наиболее представительных, допустимых с позиций ЭБ направлений развития ТЭК;

- комплексная оценка состояний ТЭК с помощью индикаторов ЭБ и наиболее характерных модельных характеристик на различных этапах анализа результатов расчета.

2. Выделена ключевая особенность технологии проведения исследований – применение методов комбинаторного моделирования, аргументированное, главным образом, возможностью автоматического создания состояний ТЭК для всего множества заданных сценариев развития ТЭК, наличием механизмов отбора оптимальных или близким к ним направлений развития ТЭК. Приведены особенности применения методов комбинаторного моделирования в контексте ЭБ.

3. Сформулированы особенности инструментальной поддержки исследований, а именно:

- организация распределенных расчетов с применением специализированных сред и универсального решателя задач ЛП;

- применение дополнительных алгоритмов анализа рассчитанных состояний ТЭК;

- поддержка исследований развития и функционирования ТЭК с позиций ЭБ в различных режимах расчета состояний.

Материал статьи дополнен наглядными схемами описанных процессов и объектов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Энергетическая безопасность России: проблемы и пути решения / Н.И. Пяткова, В.И. Рабчук, С.М. Сендеров и др.; отв. ред. Н.И. Воропай, М.Б. Чельцов; Рос. акад. наук, Сиб. отделение, Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2011. – 198 с.

2. Системные исследования в энергетике: ретроспектива научных направлений СЭИ–ИСЭМ / отв. ред. Н.И. Воропай. – Новосибирск: Наука, 2010. – 686 с.

3. Методика мониторинга состояния энергетической безопасности России на региональном уровне / С.М. Сендеров, Н.И. Пяткова, Г.Б. Славин, С.В. Воробьев, Е.М. Смирнова. – Иркутск: ИСЭМ СО РАН, 2014. – 146 с.

4. Методические рекомендации по оценке состояния энергетической безопасности Российской Федерации на федеральном уровне / С.М. Сендеров, В.И. Рабчук, Г.Б. Славин, Н.И. Пяткова, М.Б. Чельцов. – Иркутск: ИСЭМ СО РАН, 2013. – 36 с.

5. Макаров А.А., Мелентьев Л.А. Методы исследования и оптимизации энергетического хозяйства. – Новосибирск: Наука, 1973. – 276 с.

6. Зоркальцев В.И., Хамисов О.В. Равновесные модели в экономике и энергетике. – Новосибирск: Наука, 2006. – 221 с.

7. Зоркальцев В.И. Методы прогнозирования и анализа эффективности функционирования системы топливоснабжения. – М.: Наука, 1988. – 144 с.

8. Сидоров И.А., Опарин Г.А., Феоктистов А.Г. Разработка и применение распределенных пакетов прикладных программ // Программные продукты и системы. – 2010. – № 2. – С. 108–111.

9. Феоктистов А.Г., Горский С.А. Язык спецификации вычислительных моделей в масштабируемых пакетах прикладных программ // Современные наукоемкие технологии. – 2016. – № 7–1. – С. 84–88.

10. Криворуцкий Л.Д. Имитационная система для исследований развития топливно-энергетического комплекса. – Новосибирск: Наука, 1983. – 126 с.

11. Анализ состояния важнейших индикаторов энергетической безопасности России на федеральном уровне: основные проблемы и тенденции / С.М. Сендеров, В.И. Рабчук, Н.И. Пяткова, С.В. Воробьев // Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики / отв. ред. Н.И. Воропай, Ю.А. Чукреев. – Сыктывкар, 2016. – Вып. 67: Проблемы надежности систем энергетики. – С. 59–69.

*Еделев Алексей Владимирович*, кандидат технических наук, старший научный сотрудник ИСЭМ СО РАН. Основное направление научных исследований – моделирование развития топливно-энергетического комплекса России с позиции обеспечения энергетической безопасности. Опубликовано более 35 научных работ. Email: flower@isem.irk.ru

*Береснева Наталья Михайловна*, кандидат технических наук, научный сотрудник ИСЭМ СО РАН. Основное направление исследований – моделирование развития топливно-энергетического комплекса России с позиций энергетической безопасности. Имеет 14 публикаций. E-mail: beresneva@isem.irk.ru

### ***Features of model studies of the problem of ensuring energy security in Russia\****

*A.V. EDELEV<sup>1</sup>, N.M. BERESNEVA<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> Melentiev Energy Systems Institute SB RAS, 130, Lermontov St., Irkutsk, 664033, Russian Federation; PhD (Eng.). E-mail: flower@isem.irk.ru

<sup>2</sup> Melentiev Energy Systems Institute SB RAS, 130, Lermontov St., Irkutsk, 664033, Russian Federation; PhD (Eng.). E-mail: beresneva@isem.irk.ru

The article considers methodological and practical aspects of scenario studies of the problem of ensuring energy security of Russia and its regions. It describes various approaches to providing energy security, validates the use of energy security indicators as specialized criteria for assessing the level of energy security of the territories. For scenario studies, the require-

\* Received 25 February 2017.

The reported study was supported by RFBR, research project No. 15-07-07412a.

ments for the composition of scenarios are formulated; mandatory steps of computational experiments, namely a flexible preliminary and expert analysis of the calculated states and its multicriterion nature are described. A brief description of the basic model of studying the country's fuel and energy complex is also given. The main emphasis in the article is on the technology of conducting research using methods of combinatorial modeling. Within the framework of this material, a practical assessment of the importance of combinatorial methods in the above mentioned field of research is given, and the scheme of their development is described. The concept of combinatorial modeling methods application in energy security studies is clearly reflected in the ontological representation. Instrumental support of combinatorial studies of energy security is described in a separate section of the article. It describes the distributed package of applied programs "Corrective" used for research on reliable fuel and energy supply of territories. In the description, the key provisions for the implementation of the "Corrective" technical and methodological character are formulated. In particular, a graphically oriented representation of the calculated states and structures for specifying research scenarios is designated and typified, the algorithmic apparatus (combinatorial modeling methods, cluster analysis, algorithms for determining optimal states and trajectories of the fuel and energy complex development) is described, the orientation of the program package toward distributed computing is emphasized. Also, technical details of the "Correctives" implementation (its architectural solutions, development tools) are also included in the description. In addition, the technology of analyzing the functioning and development of the country's power engineering in terms of ensuring its energy security is presented.

**Keywords:** energy security, indicative analysis, energy sector, mathematical model, computational experiment, combinatorial modeling, distributed computing, software package

DOI: 10.17212/1814-1196-2017-2-94-108

## REFERENCES

1. Voropai N.I., ed. *Energeticheskaya bezopasnost' Rossii: problemy i puti resheniya* [Energy security in Russia: problems and solutions]. Melentiev Energy Systems Institute. Novosibirsk, SB RAS Publ., 2011. 198 p.
2. Voropai N.I., ed. *Sistemnye issledovaniya v energetike: retrospektiva nauchnykh napravleniy SEI-ISEM* [System research in the energy sector: retrospective of scientific directions of the SEI-ISEM]. Novosibirsk, Nauka Publ., 2010. 686 p.
3. Senderov S.M., Pyatkova N.I., Slavin G.B., Vorob'ev S.V., Smirnova E.M. *Metodika monitoringa sostoyaniya energeticheskoi bezopasnosti Rossii na regional'nom urovne* [Methodology for monitoring the state of Russia's energy security at the regional level]. Irkutsk, ISEM SB RAS Publ., 2014. 146 p.
4. Senderov S.M., Rabchuk V.I., Slavin G.B., Pyatkova N.I., Chel'tsov M.B. *Metodicheskie rekomendatsii po otsenke sostoyaniya energeticheskoi bezopasnosti Rossiiskoi Federatsii na federal'nom urovne* [Methodological recommendations for assessing the state of energy security of the Russian Federation at the federal level]. Irkutsk, ISEM SB RAS Publ., 2013. 36 p.
5. Makarov A.A., Melent'ev L.A. *Metody issledovaniya i optimizatsii energeticheskogo khozyaistva* [Methods of research and optimization of energy facilities]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1973. 276 p.
6. Zorkal'tsev V.I., Khamisov O.V. *Ravnovesnye modeli v ekonomike i energetike* [The equilibrium model of the economy and energy]. Novosibirsk, Nauka Publ., 2006. 221 p.
7. Zorkal'tsev V.I. *Metody prognozirovaniya i analiza effektivnosti funkcionirovaniya sistem toplivnosnabzheniya* [The forecasting and analysis methods of the fuel supply system functioning efficiency]. Moscow, Nauka Publ., 1988. 144 p.
8. Sidorov I.A., Oparin G.A., Feoktistov A.G. *Razrabotka i primeneniye raspredelennykh paketov prikladnykh programm* [Development and application of distributed application packages]. *Programmye produkty i sistemy – Software & Systems*, 2010, no. 2, pp. 108–111.

9. Feoktistov A.G., Gorsky S.A. Yazyk spetsifikatsii vychislitel'nykh modelei v masshtabiruemyykh paketakh prikladnykh programm [Specification language of computational models in scalable applied software packages]. *Sovremennye naukoemkie tekhnologii – Modern high technologies*, 2016, no. 7-1, pp. 84–88.

10. Krivorutskii L.D. *Imitatsionnaya sistema dlya issledovaniy razvitiya toplivno-energeticheskogo kompleksa* [Simulation system for research of development of fuel and energy complex]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1983. 126 p.

11. Senderov S.M., Rabchuk V.I., Pyatkova N.I., Vorob'ev S.V. Analiz sostoyaniya vazhneyshikh indikatorov energeticheskoi bezopasnosti Rossii na federal'nom urovne: osnovnye problemy i tendentsii [Analysis of the state of the most important indicators of Russia's energy security at the federal level: the main problems and trends]. *Metodicheskie voprosy issledovaniya nadezhnosti bol'shikh sistem energetiki*. Vyp. 67. *Problemy nadezhnosti sistem energetiki* [Methodological issues of reliability research of large energy systems. Iss. 67. Problems of reliability of energy]. Syktyvkar, 2016, pp. 59–69.