

УДК 620.9.001.57(925.8/9)

Подход к исследованию проблем устойчивого развития энергетики Вьетнама и его энергетической безопасности*

**А.В. ЕДЕЛЕВ¹, Н.И. ПЯТКОВА², И.А. СИДОРОВ³, ДОАН ВАН БИНЬ⁴,
НГУЕН ХОАЙ НАМ⁵**

¹ 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

² 664033, РФ, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130, Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник. E-mail: nata@isem.sei.irk.ru

³ 664033, РФ, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 134, Институт динамики систем и теории управления СО РАН, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник. E-mail: ivan.sidorov@icc.ru

⁴ Вьетнам, г. Ханой, ул. Хоанг Куок Вьет, А9, 18, Институт энергетической науки ВАНТ, директор. E-mail: doanbinh@ies.vast.vn

⁵ Вьетнам, г. Ханой, ул. Хоанг Куок Вьет, А9, 18, Институт энергетической науки ВАНТ, заведующий лабораторией систем энергетики. E-mail: nhnam@ies.vast.vn

В статье описывается подход к корректировке вариантов рациональных путей развития топливно-энергетического комплекса с учетом требований обеспечения энергетической безопасности и устойчивого развития страны. Комбинаторное моделирование, являясь наглядной формой представления динамических дискретных ветвящихся альтернатив, позволяет проводить исследование множества вариантов развития энергетики страны в виде направленного графа, вершины которого будут соответствовать возможным состояниям топливно-энергетического комплекса в опорные годы, а дуги – переходам из одного состояния в другое. Каждое состояние оценивается на допустимость многоступенчатой системой ограничений, включая балансовую экономико-математическую модель топливно-энергетического комплекса и оценку уровня энергетической безопасности при помощи аппарата индикаторов энергетической безопасности: Описываемый подход реализован в пакете прикладных программ «Корректива». С целью увеличения возможностей пакета по обработке всех возможных вариантов развития топливно-энергетического комплекса страны, требующих существенных вычислительных и временных затрат, был реализован распределенный пакет прикладных программ с использованием инструментального комплекса DISCOMP. Апробация распределенного пакета прикладных программ «Корректива» для исследования развития энергетики России была проведена на вычислительном кластере «Академик В.М. Матросов». Предлагаемый подход также может быть применен для исследования развития энергетики Вьетнама с достаточно подробным рассмотрением его географических условий, экономической и инженерной инфраструктуры. Для оценки возможных состояний топливно-энергетического комплекса Вьетнама могут быть ис-

* Статья получена 13 сентября 2016 г.

пользованы индикаторы энергетической безопасности и критерии устойчивого развития страны, разработанные в Институте энергетической науки Вьетнамской академии наук и технологий. Результаты проводимых исследований могут быть использованы для получения четкого представления о возможности обеспечения энергетической безопасности в национальном и региональном масштабе.

Ключевые слова: энергетическая безопасность, индикаторы энергетической безопасности, программно-вычислительный комплекс, топливно-энергетический комплекс, комбинаторное моделирование, модель, устойчивое развитие, распределенная вычислительная среда

DOI: 10.17212/1814-1196-2016-4-175-193

ВВЕДЕНИЕ

Энергетическую безопасность (ЭБ) можно характеризовать как состояние защищенности ее граждан, общества, экономики страны от дефицита в обеспечении их обоснованных потребностей в энергии [1–4].

При формировании вариантов развития топливно-энергетического комплекса (ТЭК) государства на средне- и долгосрочную перспективу важно учитывать возможности реализации разного рода стратегических угроз ЭБ и вопросы надежного топливно- и энергообеспечения потребителей страны, особенно при возможном возникновении чрезвычайных ситуаций. Для мониторинга состояния ЭБ используются соответствующие показатели – индикаторы, сигнализирующие о наиболее важных аспектах функционирования и развития энергетического хозяйства [5, 6]. Значения этих индикаторов должны адекватно характеризовать состав и глубину угроз ЭБ государства с тем, чтобы провести анализ возможных негативных тенденций.

Для поддержания приемлемого уровня ЭБ в стране чрезвычайно важно отслеживать динамику значений и сами значения важнейших индикаторов и далее на основе их анализа формировать пути решения проблем с обеспечением ЭБ. Реализовать это можно путем рассмотрения всех возможных вариантов развития ТЭК с позиций ЭБ и выбора вариантов, удовлетворяющих ее требованиям и по возможности укладывающихся в разумные инвестиционные рамки. После этого на основе экспертного анализа рациональных с позиций ЭБ вариантов развития ТЭК возможно формирование конкретных направлений корректировки вариантов развития энергетики государства с позиций ЭБ.

Исследования проблем ЭБ России и ее регионов базируются на фундаменте общеэнергетических исследований [7, 8]. Если для последних главной задачей является разработка долгосрочных программ развития энергетики с учетом фактора неопределенности (неоднозначности) исходной информации и условий развития [9], то исследования проблем ЭБ в основном связаны с корректировкой вариантов развития ТЭК с целью обеспечения приемлемого уровня ЭБ при возможной реализации этих вариантов. Проблема исследования множества возможных вариантов развития ТЭК вызвана необходимостью рассмотрения реализации комбинаций стратегических угроз ЭБ, в отличие от общеэнергетических исследований, где обычно рассматриваются несколько основных сценариев развития.

В ходе разработки методики поиска рациональных путей развития ТЭК с позиций обеспечения ЭБ стало очевидно, что большое количество характерных сочетаний внешних условий развития и функционирования ТЭК, учет неопределенности и других факторов приводят к огромному множеству расчетных состояний ТЭК, что создает определенные трудности при проведении анализа результатов экспериментальных расчетов классическими методами исследования. Для упорядочивания и уменьшения множества расчетных состояний были использованы методы комбинаторного моделирования [10], которые, являясь наглядной формой представления динамических дискретных ветвящихся альтернатив, позволяют имитировать долгосрочный процесс развития исследуемой системы при различных возможных внешних и внутренних условиях, учитывая дискретность будущих состояний системы, определить рациональную стратегию развития исследуемой системы, разработать возможные мероприятия по адаптации в последующие временные периоды.

Ниже дано описание подхода к поиску рациональных путей развития ТЭК страны с позиций обеспечения ЭБ и его возможного применения для исследования устойчивого развития энергетики Вьетнама.

МОДЕЛЬ ТОПЛИВНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА

Эффективным инструментом для анализа возможных последствий реализации крупных угроз ЭБ и оценки эффективности некоторых превентивных мероприятий (прежде всего резервирующих) для преодоления этих угроз показала себя балансовая экономико-математическая модель ТЭК [11, 12]. По принципам построения и приемам описания связей и свойств систем энергетики данная модель похожа на обобщенную сетевую модель систем энергетики США [13], а по своим возможностям она не уступает как модели развития электроэнергетики и теплоснабжения в рамках ТЭК страны EPOS [14] (часть модельно-информационного комплекса SCANNER [15]), так и зарубежным моделям MARKAL [16], MESSAGE [17], EFOM [18], TIMES [19]. Данная модель ТЭК позволяет следующее:

- рассматривать энергетику страны как единое целое от производства энергетических ресурсов до потребления конечных энергоносителей в основных отраслях экономики, включая все стадии переработки и преобразования энергоресурсов;
- исследовать процесс развития технологической и территориальной структуры энергетики;
- предусматривать оптимизацию развития энергетики, т. е. поиск лучших с позиций ЭБ вариантов ее развития в рассматриваемой перспективе.

Модель ТЭК включает в себя модели основных систем энергетики: газоснабжения, углеснабжения, нефте- и нефтепродуктоснабжения, электроэнергетики.

В модели наряду с производственным и распределительным (транспортным) блоками присутствует блок потребления, в котором представлены основные потребители продукции отраслей ТЭК страны, ранжированные по соответствующим категориям.

Формализованно ограничения рассматриваемой задачи записываются в виде системы линейных уравнений и неравенств:

$$S_H + AX - \sum_{t=1}^T y^t - \sum_{h=1}^H S_k^h = 0, \quad (1)$$

$$0 \leq X \leq D, \quad (2)$$

$$0 \leq y^t \leq R^t, \quad (3)$$

$$0 \leq S_k^h \leq S^h, \quad (4)$$

$$\sum_{h=1}^H S^h \leq S, \quad (5)$$

где t – категория потребителей; h – категория запасов; X – искомый вектор, компоненты которого характеризуют интенсивность применения технологических способов функционирования энергетических объектов (добычи, переработки, преобразования и транспорта энергоресурсов); y^t – искомый вектор, компоненты которого характеризуют объемы потребления отдельных видов топлива и энергии отдельными категориями потребителей; S_k^h – искомый вектор, компоненты которого характеризуют объемы запасов топлива выделенной категории h на конец рассматриваемого периода; S_H – заданный вектор, компоненты которого равны исходным уровням запасов энергоресурсов; A – матрица технологических коэффициентов производства (добычи, переработки, преобразования) и транспорта отдельных видов топлива и энергии (затраты – выпуск); D – вектор, определяющий технически возможные интенсивности применения отдельных технологических и производственных способов; R^t – вектор с компонентами, равными объемам заданного потребления отдельных видов топлива и энергии отдельными категориями потребителей; S^h – вектор, компоненты которого отражают нормативный объем запасов категории h ; S – вектор с компонентами, равными объемам хранилищ (складов) данного энергоресурса.

Целевая функция при этом имеет вид

$$(C, X) + \sum_{t=1}^T (r^t, g^t) + \sum_{h=1}^H (q^h, S^h - S_k^h) \rightarrow \min. \quad (6)$$

Первая составляющая такой целевой функции отражает издержки, связанные с функционированием отраслей ТЭК, входящих в него систем и подсистем энергетики. Здесь C – вектор удельных затрат по отдельным технологическим способам функционирования действующих, реконструируемых или модернизируемых, а также вновь сооружаемых энергетических объектов.

Вторая составляющая – ущербы от дефицита по каждому виду топлива и энергии у каждой из выделенных категорий потребителей. Размеры дефицита энергоресурсов g^t у потребителей категории t соответствуют разности $R^t - y^t$. Компоненты вектора r^t с некоторой условностью названы «удельными ущербами». Стоимостная оценка реального (полного) ущерба от дефицита, как известно, вызывает определенные трудности из-за многообразия форм проявления последствий от дефицита энергоресурсов, которые не всегда можно выявить и количественно определить. В данном случае эта трудность преодолевается путем введения шкалы приоритетов в удовлетворении спроса на отдельные виды топлива и энергии потребителей рассматриваемых категорий.

Третья составляющая аналогична второй и соответствует ущербам от накопления запасов. Соотношения компонент векторов q^h отражают предпочтительность (в смысле будущих возможных условий функционирования ТЭК) в тех или иных запасах по видам топлива и в территориальном разрезе.

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАЦИОНАЛЬНЫХ ПУТЕЙ РАЗВИТИЯ ТЭК С ПОЗИЦИЙ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЭБ

Множество вариантов развития ТЭК представлено в виде направленного графа, вершины которого соответствуют состояниям ТЭК в опорные годы, а дуги – переходам из одного состояния в другое.

В начале исследования создается так называемый базовый граф, содержащий по одному узлу для каждого опорного года. Эти узлы содержат основную информацию для расчетов.

Далее структура ТЭК разбивается на несколько составляющих частей, например, по территориальному признаку (по федеральным округам) или отраслевому признаку (по системам энергетики). Для каждой выделенной части экспертами строится свой граф изменений параметров по опорным годам.

Затем путем комбинирования информации об изменениях параметров различных частей ТЭК, принадлежащих одному временному разрезу, и наложении полученного набора изменений на базовое состояние получается множество состояний ТЭК для определенного момента времени. Полученные состояния соответствуют узлам графа развития ТЭК, которые затем связываются между собой дугами-переходами.

Все варианты развития ТЭК начинаются из начального узла – общего исходного состояния. С начального узла осуществляется проход по графу для оценки допустимости состояний ТЭК. Каждое состояние оценивается на допустимость многоступенчатой системой ограничений. Балансовая экономико-математическая модель ТЭК, приведенная выше, является первой ступенью для оценки допустимости состояний ТЭК. Если модель ТЭК относительно рассматриваемого состояния имеет решение, то данное состояние могло бы считаться допустимым. Однако, для того чтобы варианты (траектории) развития ТЭК соответствовали требованиям ЭБ, в составляющих их состояниях необходимо оценить уровень ЭБ при помощи аппарата индикаторов ЭБ. Аппарат индикаторов ЭБ является следующей ступенью для оценки допу-

стимости состояний ТЭК. На этом этапе производится сравнение значения индикатора и его порогового значения.

На рис. 1 показан пример графа развития ТЭК для трех моментов времени, состоящий из девяти узлов. Проверку допустимости не прошли 4 узла. В них не обеспечивался требуемый уровень ЭБ. На последнем этапе расчетов находится оптимальный (рациональный) граф или путь развития ТЭК с позиций обеспечения ЭБ.

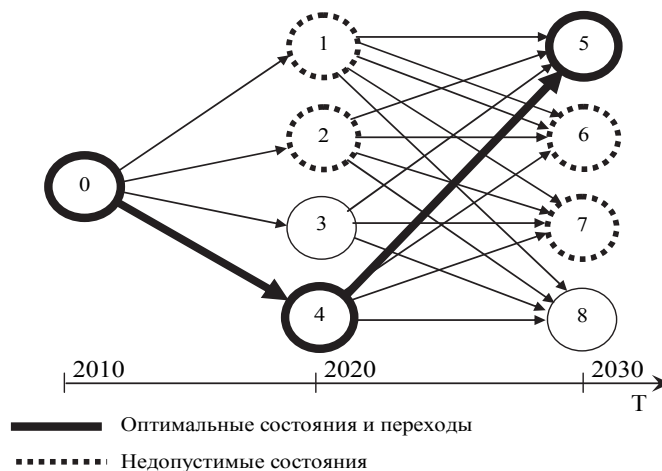


Рис. 1. Пример графа развития ТЭК

ПАКЕТ ПРИКЛАДНЫХ ПРОГРАММ «КОРРЕКТИВА»

Методика поиска рациональных путей развития ТЭК с позиций обеспечения ЭБ реализована в виде пакета прикладных программ (ППП) «Корректива» [20], в котором можно выделить следующие основные программные модули:

- модуль формирования базовых сценариев развития ТЭК (m_1);
- модуль создания графа развития ТЭК (m_2);
- модуль оценки допустимости состояния ТЭК (m_3);
- модуль поддержки экспертного анализа конечного графа развития ТЭК (m_4).

Информационно-логические связи объектов предметной области пакета представлены на рис. 2 в виде двудольного ориентированного графа. На рис. 2 модули m_1 , m_2 , m_3 , m_4 представлены серыми овалами, а входные и выходные параметры – окружностями.

Основной задачей модуля m_1 является чтение информации U из базы данных (БД) и формирование на ее основе согласно целям исследования одного из конкретных сценариев развития ТЭК W . В качестве исходной информации U принимаются:

- множество допустимых (осуществимых) стратегий развития ТЭК;
- перечень критических ситуаций (сценариев возмущений), которые могут возникнуть в течение периода времени T вследствие реализации угроз ЭБ;
- заранее сформулированный набор основных индикаторов ЭБ.

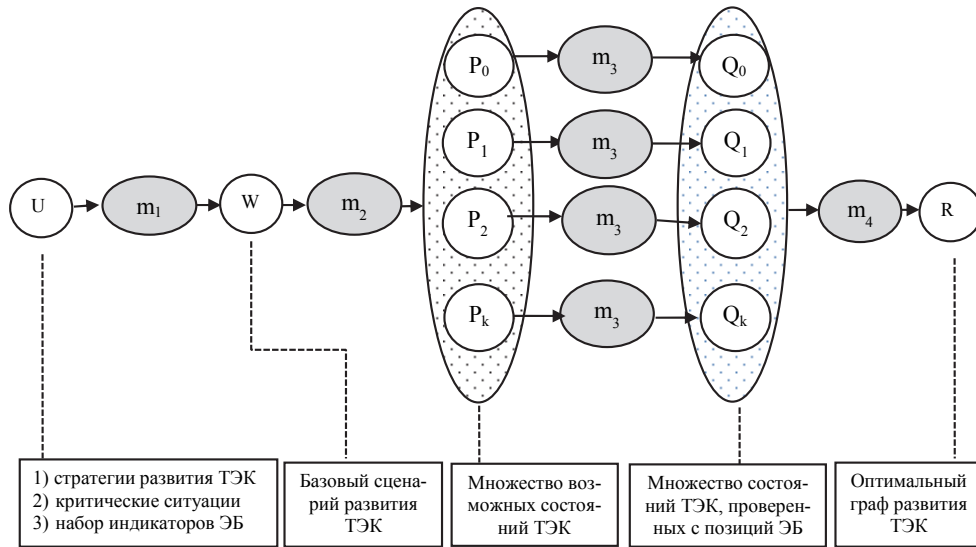


Рис. 2. Основные составляющие ППП «Корректива»

Модуль m_2 реализует методы комбинаторного моделирования, отвечающие за формирование графа развития ТЭК и его обход. Сценарий развития ТЭК W модулем m_2 преобразуется в направленный во времени T базовый граф (рис. 3), узлы $0, 1, 2, \dots, N$ которого соответствуют возможным состояниям ТЭК в опорные годы $T_1, T_2, T_3, \dots, T_{N+1}$. К каждому из узлов $0, 1, 2, \dots, N$ привязываются данные для уравнений (1)–(6), описывающие базовые состояния ТЭК в опорные годы согласно сценарию W .

Стратегии развития ТЭК, сценарии возмущений реализуются изменением по определенным законам значений компонент матрицы A и векторов, составляющих систему уравнений (1)–(6). В простейшем случае это может быть групповая замена значений компонент векторов D и R^t . Подобным образом модуль m_2 на основе базовых состояний ТЭК создает выходное множество P , состоящее из возможных состояний ТЭК $P_0, P_1, P_2, \dots, P_K$.

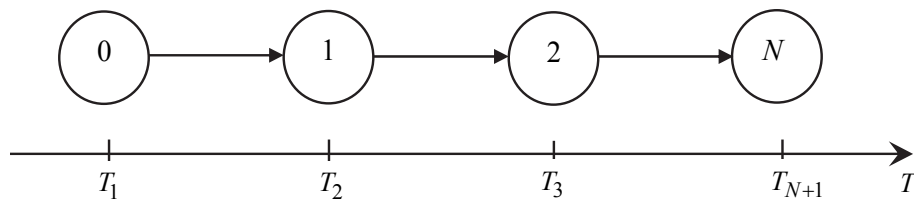


Рис. 3. Базовый сценарий развития ТЭК

Ядро модуля m_2 представляет собой несколько десятков скриптов на интерпретируемом языке программирования Lua [21]. Ключевым компонентом m_2 является генератор моделей [22], который создает новое состояние ТЭК. Генератор моделей (рис. 4) управляется набором правил, преобразующих данные сценария развития ТЭК W в векторы и матрицу A уравнений (1)–(6). Исследователь имеет возможность изменять правила преобразования исходной информации.

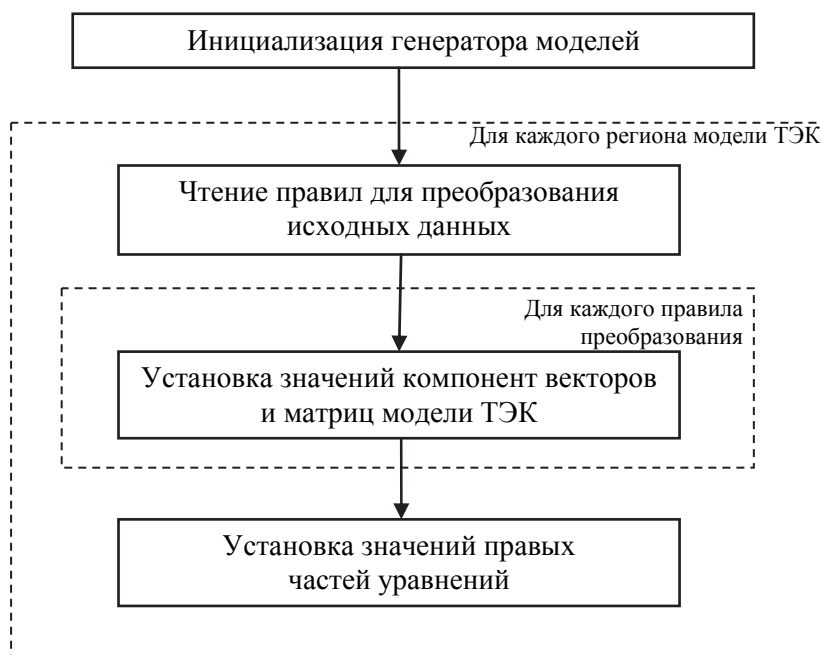


Рис. 4. Алгоритм работы генератора моделей

Модуль m_3 проводит оценку допустимости одного из множества состояний ТЭК P с помощью многоступенчатой системы ограничений.

На первом этапе с помощью решателя `lp_solve` [23] осуществляется поиск решения модели ТЭК (1)–(6) как задачи линейного программирования. Если решение существует, то на втором этапе на основе результатов решения вычисляются значения индикаторов ЭБ и осуществляется проверка уровня ЭБ. В случае Вьетнама добавляется еще один этап в виде оценки значений критериев устойчивого развития.

Результаты работы системы ограничений модуля m_3 , добавляясь к $P_0, P_1, P_2, \dots, P_K$, образуют выходное множество Q , состоящее из состояний ТЭК $Q_0, Q_1, Q_2, \dots, Q_K$ с оцененным уровнем ЭБ.

Модуль m_4 производит формирование графа развития ТЭК на основе полученного множества состояний ТЭК $Q_0, Q_1, Q_2, \dots, Q_K$, с которым далее работает исследователь предметной области с целью проведения детального анализа и формирования окончательного оптимального графа развития ТЭК.

Следует отметить, что после создания графа развития ТЭК каждый его узел является полностью независимым от других с точки зрения проведения расчетов, что обеспечивает возможность организации на данном этапе многовариантных расчетов с параллелизмом по данным. При большом размере графа развития ТЭК такой подход позволит существенно сократить время вычислений с помощью организации процесса распределенных вычислений.

ОРГАНИЗАЦИЯ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИК DISCOMP

Для организации процесса распределенных вычислений были исследованы существующие инструментарии обеспечения многовариантных расчетов в распределенной вычислительной среде (РВС), такие как ALua, Condor, BOINC, UNICORE, X-COM, DISCOMP и другие. Изначально для организации многовариантных расчетов в ППП «Корректива» был использован инструментарий X-COM [24], предназначенный для организации распределенных вычислительных экспериментов. Однако X-COM (как и ALua, Condor, BOINC, UNICORE) позволяют осуществить в РВС решение не связанных между собой задач, допускающих распараллеливание по данным, но не обладают всеми необходимыми возможностями для организации многофункциональных пакетов, поддерживающих выполнение в РВС взаимосвязанных по данным прикладных программных модулей. В настоящее время для организации процесса распределенных вычислений используется инструментальный комплекс (ИК) DISCOMP [25], ориентированный на автоматизацию разработки и применение распределенных пакетов прикладных программ (РППП) в разнородных РВС.

Архитектура ИК DISCOMP. РППП представляет собой пакет, прикладные программы которого размещены в различных узлах РВС. Прикладные программы такого пакета оформляются в виде отдельных модулей, включающих исполняемую в пакетном режиме программу, файл спецификации по назначению, применению, формату входных и выходных формальных параметров, времени выполнения и пр. Исполняемые программы модулей могут быть написаны на различных языках программирования (например, C, Fortran, Pascal и др.), привязаны к выполнению только под управлением определенных операционных систем (например, MS Windows, Linux, Mac OS X и др.) и аппаратных платформ, а также привязаны к выполнению только на определенных узлах РВС (нетиражируемое и лицензируемое ПО). Взаимодействие таких разнородных исполняемых программ в составе пакета основывается на представлении входных и выходных параметров модулей в виде файлов данных. Каждый модуль может оперировать со следующими типами параметров: тип *file*, используемый для описания параметров неопределенной структуры (блоков произвольного текста большого размера); тип *filelist*, предназначенный для поддержки распараллеливания по данным (параллельный список параметров типа *file*), тип *fileconst*, введенный с целью сокращения объемов передачи данных в РВС (значение параметра один раз передается узлу РВС и затем может неоднократно использоваться при запуске модулей, размещенных в данном узле). Спецификации модулей определяют функциональные межмодульные зависимости по входным и выходным параметрам. Множество спецификаций параметров и модулей пакета формируют описание исследуемой предметной области.

Под схемой решения задачи (СРЗ) в ИК DISCOMP понимается модель крупноблочной программы, отражающей информационно-логическую структуру вычислений в терминах предметной области. СРЗ строится в параллельно-ярусной форме из элементов следующих множеств: множества параметров; множества модулей; множества событий, возникающих в процессе вы-

полнения СРЗ; множества операций, предназначенных для управления процессом выполнения.

Функционирование РППП в РВС обеспечивается комплексом высокоуровневых системных средств (инструментов), которые позволяют разработчику РППП размещать модули функционального наполнения в узлах РВС, описывать схему взаимодействия этих модулей и в дальнейшем осуществлять решение задачи по этой схеме.

К основным составляющим программно-аппаратной архитектуры инструментального комплекса DISCOMP относятся система управления РВС, набор вычислительных клиентов РВС, система хранения данных и средства доступа пользователей к РППП. Схема взаимодействия основных компонентов представлена на рис. 5. Компоненты ИК DISCOMP являются кросс-платформенными и позволяют использовать весь потенциал доступных разнородных узлов РВС.

Система управления РВС (серверная часть ИК DISCOMP) поддерживает взаимодействие с подсистемами хранения данных и доступа пользователей к пакету, а также обеспечивает централизованное управление узлами РВС. Серверная часть ИК DISCOMP включает системное ядро, менеджеры вычислительных процессов и ресурсов, диспетчер очереди задач, подсистему журнализации и исполнительную подсистему.

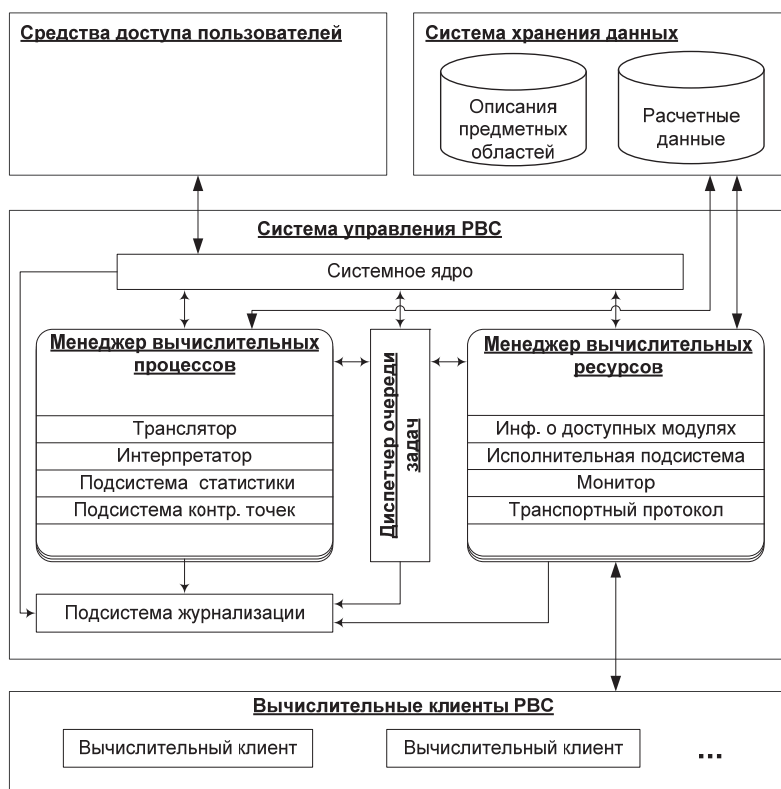


Рис. 5. Архитектура ИК DISCOMP

Вычислительный клиент реализует процесс выполнения модуля в узле РВС и осуществляет следующие функции: организацию соответствующей

среды для работы модуля (создание временных директорий, файлов входных и выходных параметров модулей, задание значений переменных окружения, перенаправление ввода/вывода и т. д.); получение значений входных параметров модуля из управляющего узла; запуск модуля; контроль процесса его выполнения; отсылку значений выходных параметров в управляющий узел после завершения работы модуля.

Распределенный пакет прикладных программ «Корректива». С использованием ИК DISCOMP был реализован РППП «Корректива». Вся последовательность действий пользователя пакета от выбора оптимальных параметров генерации моделей ТЭК до непосредственного решения сформированных задач в РВС и анализа результатов автоматизирована.

Все модули РППП «Корректива» реализованы на языке Lua, являются платформо-независимыми и могут функционировать под управлением различных ОС в гетерогенной среде. Данная возможность позволяет охватить весь потенциал доступных вычислительных ресурсов с целью увеличения общей производительности пакета.

Как было отмечено, результатом работы модуля m_2 является набор вариантов базовых сценариев развития ТЭК, которые в ИК DISCOMP описываются структурным типом данных – параллельным списком. Составными частями параллельного списка являются отдельные элементы (файлы), которые представляют элементарный тип данных и могут быть использованы независимо друг от друга. На следующей стадии вычислительного процесса каждый элемент параллельного списка передается на вход модулю m_3 , просчитывающему перспективные варианты развития ТЭК для входного сценария развития. Вычисления на данной стадии независимы друг от друга и могут выполняться параллельно на доступных узлах распределенной среды. Результатом выполнения каждого модуля на данной стадии также является файл, содержащий информацию об одном из возможных вариантов развития ТЭК, проверенного с позиций ЭБ. После завершения данной стадии выходные файлы ставятся в соответствие входному сценарию развития ТЭК и объединяются в параллельный список данных, который передается на следующую стадию модулю m_3 для экспертного анализа графа развития ТЭК.

МОДЕЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

В рамках описанного подхода для России в результате комбинирования графов развития четырех систем энергетики с двумя возможными состояниями на каждом из перспективных временных срезов по девяти округам был получен граф развития ТЭК страны с числом узлом (состояний ТЭК), равным $1 + N \cdot 2^{72}$, где N – число перспективных временных уровней.

Приведенное количество состояний является весьма ресурсоемким для организации вычислительного эксперимента и сложным для последующего анализа. При определенном укрупнении информации путем объединения между собой типов генерирующих источников с незначительной относительной долей выработки электроэнергии в округе и благодаря тому, что не во всех округах присутствуют описанные энергетические системы, был получен расчетный граф, состоящий из 20 000 состояний на одном временном срезе.

Для проведения вычислительного эксперимента была организована РВС, включающая узлы высокопроизводительного вычислительного кластера «Академик В.М. Матросов» [26]. Программно-аппаратные характеристики узла РВС:

- программное обеспечение: Lua 5.1.5, ИК DISCOMP 1.2;
- два процессора AMD Opteron 6276 2,3 GHz;
- оперативная память 64 Гб.

Время расчета одного состояния ТЭК модулем m_3 РППП «Корректив» на одном вычислительном ядре составляет в среднем 10 секунд. Для РВС, включающей 160 вычислительных ядер (5 узлов), общее время расчета 20 000 сценариев состояний составило менее 20 минут.

Анализ исходных данных и, соответственно, результатов расчета показал, что имеется значительное число вариантов развития ТЭК, которые характеризуются весьма близкими значениями (с отличием в 1...5 % таких показателей, как стоимость варианта или объемы производства – потребления энергоресурсов). Соответственно, те варианты развития энергетики страны, особенности которых определялись разными значениями этого диапазона, практически не отличаются друг от друга.

С тем чтобы сделать приемлемым для анализа число полученных при расчете вариантов, все полученные решения были сгруппированы в отдельные направления, характеризующиеся близкими стоимостными характеристиками и показателями развития энергетических отраслей. При этом было сделано следующее: найдены наиболее далекие друг от друга состояния энергетики на каждом из временных срезов, т. е. состояния, наиболее отличающиеся друг от друга и по стоимости функционирования ТЭК, и по суммарным характеристикам развития энергетических отраслей по всем одноименным федеральным округам. Далее диапазон между характеристиками двух граничных (наиболее далеких) состояний энергетики страны условно делился на n максимально отличающихся друг от друга перспективных состояний. В проводимых исследованиях было принято $n = 10$. Соответственно, все состояния энергетики страны, полученные при формировании графа перспективных возможных состояний, отличающиеся от некоего среднего состояния менее чем на 5 % максимального диапазона (разницы между максимально удаленными (граничными) состояниями) как в меньшую, так и в большую сторону, считаются близкими (родственными) и формируют одно общее перспективное состояние энергетики страны на определенном временном срезе.

Таким образом, количество возможных перспективных состояний сократится до числа n , в нашем случае до 10 на каждом из временных срезов, а переходы между соседними временными срезами будут представлять усредненную (общую для всех близких вариантов) траекторию перспективного развития ТЭК страны и, соответственно, ее федеральных округов.

ОСОБЕННОСТИ ИССЛЕДОВАНИЯ УСТОЙЧИВОГО РАЗВИТИЯ ЭНЕРГЕТИКИ ВЬЕТНАМА

С использованием основных математических, технологических и структурных принципов описанной выше модели ТЭК была разработана модель развития топливно-энергетического-комплекса Вьетнама для проведения ис-

следований проблем устойчивого развития энергетики Вьетнама и его энергетической безопасности [27].

Для того чтобы проанализировать характеристики ключевых социально-экономических регионов территория страны, структура ТЭК Вьетнама и некоторые другие вопросы, связанные с балансом спроса и предложения основных энергоресурсов, представлены по восьми агрегированным регионам [28]. В модели выделены шесть экономических районов, из которых Север и центральное побережье были разделены на две части. Таким образом, территория страны представлена следующими регионами: дельта Красной реки (V1), Северо-Восточный (V2), Северо-Западный (V3), Север центрального побережья (V4), юг центрального побережья (V5), Центральное нагорье (V6), Юго-Восточный (V7) и дельта Меконга (V8).

Входные данные включают в себя технико-экономические показатели энергоснабжения (затраты, стоимость и объемы производства, импорта и экспорта), преобразования и транспорта энергоресурсов, потребления энергоресурсов по видам, включая уголь, нефть, газ и электроэнергию [29–32]. В частности, региональные параметры производственных мощностей, затрат на производство, транспортные мощности, транспортные расходы по выделенным в модели регионам представляют собой суммарные характеристики отдельных производственных и транспортных объектов энергетических систем Вьетнама. Потребление энергоресурсов по регионам сформировано на основе данных энергопотребления пяти ключевых отраслей экономики Вьетнама: промышленности, сельского хозяйства, транспорта, населения и предприятия непромышленной сферы. Объемы импорта и экспорта энергоресурсов взяты из работы [33].

Модуль m_1 ППП «Корректива» для Вьетнама был разработан на основе результатов исследований, полученных в ходе совместных исследований, проведенных Институтом систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук и Институтом энергетической науки Вьетнамской академии науки и технологий в период с 2011 по 2015 год [34].

Для оценки допустимости состояний ТЭК Вьетнама в модуле m_3 помимо оценки уровня ЭБ будут рассчитываться и проверяться критерии устойчивого развития страны.

Индикаторы ЭБ и критерии устойчивого развития для Вьетнама были разработаны на основе данных о балансе поставок и потребления энергоресурсов, структуры ТЭК и его компонентов, общего объема выбросов парниковых газов, общих затрат на развитие ТЭК, объема транспорта энергоресурсов между регионами и т. д. Эти данные комбинируются с показателями социально-экономического роста для расчета значения критериев.

Для того чтобы оценить уровень ЭБ Вьетнама, 16 индикаторов разделены на три группы: технологии и оборудование, баланс поставок и потребления, экономика. Аналогичным образом был создан набор критериев устойчивого развития энергетики для оценки состояния развития ТЭК Вьетнама, отслеживания изменения его состояния в процессе развития. Набор критериев помогает исследователям и политикам оценить текущее положение ТЭК по отношению к устойчивому развитию экономики, состоянию общества и окружающей среды. Всего для оценки устойчивого развития национальной

энергетики выбрано 24 критерия: 4 показателя взаимодействия энергетики и общества, 15 показателей связи энергетики с экономикой и 5 показателей воздействия энергетики на окружающую среду.

Для модели ТЭК Вьетнама с выделенными восемью регионами подобный граф развития ТЭК будет состоять из $I + N \cdot 2^{64}$ узлов. Уменьшение количества возможных состояний ТЭК может быть достигнуто как за счет применения описанных выше мер, так и за счет ужесточения требований ЭБ и устойчивого развития страны.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В предлагаемом подходе определяющими элементами для построения возможных траекторий развития ТЭК страны являются отдельные регионы и их энергетические стратегии. Данный подход может быть применим для исследования развития ТЭК Вьетнама с учетом требований ЭБ и устойчивого развития экономики Вьетнама с его географическими условиями, экономической и инженерной инфраструктурой, распределением энергетических ресурсов в современных условиях и в перспективе. Для оценки возможных состояний ТЭК Вьетнама могут быть использованы критерии устойчивого развития страны.

Результаты проводимых исследований могут быть использованы учеными, менеджерами, политиками для получения четкого представления о возможности обеспечения ЭБ в национальном и региональном масштабе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Comprehensive substantiation of the adaptive development of energy systems in terms of changing external conditions / N.I. Voropai, S.M. Klimenko, L.D. Krivorutsky, N.I. Pyatkova, V.I. Rabchuk, S.M. Senderov, V.V. Trufanov, M.B. Cheltsov // *International Journal of Global Energy Issues*. – 2003. – Vol. 20, N 4. – P. 416–424.
2. Senderov S. Energy security of the Largest Asia Pacific countries: main trends // *International Journal of Energy and Power*. – 2012. – Vol. 1, N 1. – P. 1–6.
3. Ang B.W., Choong W.L., Ng T.S. Energy security: definitions, dimensions and indexes // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2015. – Vol. 42. – P. 1077–1093.
4. Winzer C. Conceptualizing energy security // *Energy Policy*. – 2012. – Vol. 46. – P. 36–48.
5. Сендеров С.М. Модельно-индикативный подход к оценке уровня энергетической безопасности страны при различных вариантах развития энергетики // *Известия РАН. Энергетика*. – 2005. – № 4. – С. 3–9.
6. Круyt B. Indicators for energy security // *Energy Policy*. – 2009. – Vol. 37, N 6. – P. 2166–2181.
7. Восточный вектор энергетической стратегии России: современное состояние, взгляд в будущее / под ред. Н.И. Воропая, Б.Г. Санеева. – Новосибирск: Гео, 2011. – 368 с.
8. Макаров А.А., Митрова Т.А., Кулагин В.А. Долгосрочный прогноз развития энергетики мира и России // *Экономический журнал ВШЭ*. – 2012. – № 2. – С. 172–204.
9. Санеев Б.Г., Соколов А.Д., Агафонов Г.В. Методы и модели разработки региональных энергетических программ. – Новосибирск: Наука, 2003. – 140 с.
10. Зоркальцев В.И., Хамисов О.В. Равновесные модели в экономике и энергетике. – Новосибирск: Наука, 2006. – 221 с.
11. Зоркальцев В.И. Методы прогнозирования и анализа эффективности функционирования системы топливоснабжения. – М.: Наука, 1988. – 144 с.

12. Сендеров С.М., Рабчук В.И., Пяткова Н.И. Анализ выполнения требований энергетической безопасности при реализации различных направлений развития ТЭК страны до 2020 г. // Известия РАН. Энергетика. – 2009. – № 5. – С. 17–23.
13. Ibanez E., McCalley J.D. Multiobjective evolutionary algorithm for long-term planning of the national energy and transportation systems // *Energy Systems*. – 2011. – Vol. 2 (2). – P. 151–169.
14. Веселов Ф.В., Макаров А.А., Малахов В.А. Методы и инструментарий прогнозирования развития электроэнергетики // Известия РАН. Энергетика. – 2010. – № 4. – С. 82–94.
15. SCANNER. Суперкомплекс активной навигации в энергетических исследованиях / А.А. Макаров (науч. рук.), Ф.В. Веселов, О.А. Елисеева, В.А. Кулагин, В.А. Малахов, Т.А. Митрова, С.П. Филиппов. – М.: ИНЭИ РАН, 2011. – 144 с.
16. Fishbone L.G., Abilock H. MARKAL, a linear-programming model for energy systems analysis: technical description of the BNL version // *International Journal of Energy Research*. – 1981. – Vol. 5. – P. 353–375.
17. Gerking H. Modeling of multi-stage decision making process in multi-period energy models // *European Journal of Operational Research*. – 1987. – Vol. 32, N 2. – P. 191–204.
18. Energy supply modelling package EFOM-12C Mark I: mathematical description / E. Van der Voort, E. Donni, C. Thonet, E. Bois D'Enghien, G. Dechamps, J.F. Guilmot. – Louvain-La-Neuve, Belgium: Cabay, 1984. – 429 p.
19. Loulou R., Labriet M. ETSAP-TIAM: the TIMES integrated assessment model Part I: Model structure // *Computational Management Science*. – 2008. – Vol. 5, N 1. – P. 7–40.
20. Береснева Н.М., Еделева А.В. Система поддержки исследований энергетической безопасности России // Программные продукты и системы. – 2008. – № 2. – С. 76–78.
21. Ierusalimschy R., Figueiredo L.H. de, Filho W.C. Lua – an extensible extension language // *Software: Practice & Experience*. – 1996. – Vol. 26, N 6. – P. 635–652.
22. Sustainable energy development and green growth strategy for Vietnam: a suitable pathway of power sector ensuring the national energy security / A.V. Edelev, A.V. Tchemezov, H.N. Nguyen, V.B. Doan // *Proceedings of the Third International Scientific Conference "Sustainable Energy Development"*. – Hanoi, 2013. – P. 21–28.
23. Mixed Integer Linear Programming (MILP) solver Ip_solve [Electronic resource]. – URL: <http://sourceforge.net/projects/lpsolve> (accessed: 26.12.2016).
24. Еделева А.В. Применение системы X-COM для исследования развития топливно-энергетического комплекса с учетом требований энергетической безопасности // Научный сервис в сети Интернет: решение больших задач: труды Всероссийской научной конференции, Новороссийск, 22–27 сентября 2008 г. – М.: Изд-во МГУ, 2008. – С. 94–98.
25. 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.
26. Иркутский суперкомпьютерный центр СО РАН [Электронный ресурс]: web-сайт. – URL: <http://hpc.icc.ru> (дата обращения: 26.12.2016).
27. Developing “Corrective” software: 3-region model / A.V. Edelev, Q.N. Nguyen, V.T. Nguyen, V.H. Tran, T.T. Le, B.D. Doan, H.N. Nguyen // *Proceedings of International Conference Green Energy and Development*. – Hanoi, Vietnam, 2012. – P. 41–52.
28. The Government, Decree No. 92/2006/NĐ-CP dated 7 September 2006 on making, approving and managing master plan of socio-economic development, in Vietnamese.
29. Vietnam Coal and Mining Group, 2014. Master plan of coal industry development to 2020, with consideration to 2030 (Revised).
30. Petrol Vietnam, 2005. Strategy on petroleum industry development to 2015, with view to 2025.
31. Electricity Vietnam, 2011. Master plan of national power development in the period 2011–2020, with consideration to 2030.
32. APEC, Energy database [Electronic resource]. – URL: <http://www.ieej.or.jp/egeda/database/database-menu2.html> (accessed: 27.12.2016).
33. Institute of Energy, Vietnam's national master power plan for period of 2011–2020 outlook to 2030 revised. Ministry of Industry and Trade (approved in March 2016).

34. Программный комплекс «Корректив» для исследований долгосрочного развития топливно-энергетического комплекса Вьетнама / А.В. Еделев, Н.И. Пяткова, А.В. Чемезов, Х.Н. Нгуен // Программные продукты и системы. – 2014. – № 4. – С. 211–216.

Еделев Алексей Владимирович, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, г. Иркутск. Область научных интересов – моделирование развития топливно-энергетического комплекса России с позиции обеспечения энергетической безопасности. Опубликовано более 35 научных работ. Email: flover@isem.irk.ru

Пяткова Наталья Ивановна, заведующий лабораторией ИСЭМ СО РАН, кандидат технических наук. Основное направление научных исследований: разработка и применение математических моделей для исследований развития и функционирования топливно-энергетического комплекса с учетом факторов энергетической безопасности. Имеет более 100 публикаций. E-mail: nata@isem.irk.ru

Сидоров Иван Александрович, кандидат технических наук, научный сотрудник лаборатории параллельных и распределенных вычислительных систем Института динамики систем и теории управления СО РАН. Основное направление научных исследований – методы организации распределенных вычислений в гетерогенных средах. Имеет более 50 публикаций. E-mail: ivan.sidorov@icc.ru

Доан Ван Бинь, директор Института энергетической науки ВАНТ, кандидат технических наук. Основные направления научных исследований: надежность электроэнергетических систем, системы энергетики, энергетическая безопасность. Имеет более 45 публикаций. E-mail: doanbinh@ies.vast.vn

Нгуен Хоай Нам, заведующий лабораторией систем энергетики Института энергетической науки ВАНТ. Основные направления научных исследований: системы энергетики, экономика топливно-энергетического комплекса. Имеет более 15 публикаций. E-mail: nhnam@ies.vast.vn

An approach to studying sustainable energy development and energy security problems of Vietna *

A.V. EDELEV¹, N.I. PYATKOVA², I.A. SIDOROV³, DOAN VAN BINH⁴, NGUYEN HOAI NAM⁵

¹*Melentiev Energy Systems Institute SB RAS, 664033, Irkutsk, 130 Lermontov St., Ph. D. E-mail: flover@isem.irk.ru*

²*Melentiev Energy Systems Institute SB RAS, 664033, Irkutsk, 130 Lermontov St., Ph. D. E-mail: nata@isem.irk.ru*

³*Matrosov Institute for System Dynamics and Control Theory SB RAS, 664033, Irkutsk, 134 Lermontov St., 134, Ph. D. E-mail: ivan.sidorov@icc.ru*

⁴*Institute of Energy Science VAST, Block A9 - No. 18 Hoang Quoc Viet Str, Hanoi, Vietnam, Ph. D. E-mail: doanbinh@ies.vast.vn*

⁵*Institute of Energy Science VAST, Block A9 - No. 18 Hoang Quoc Viet Str, Hanoi, Vietnam. E-mail: nhnam@ies.vast.vn*

The paper describes an approach to adjusting the options for rational ways of development of the fuel and energy sector to meet the requirements of energy security and sustainable development of the country. Combinatorial modeling, being a visual form of representation of dynamic discrete branching alternatives, allows studying the energy options for the development of the country in the form of a directed graph, whose vertices will correspond to the possible states of the fuel and energy complex in the reference years, and the arc

* Received 13 September 2016.

will show the transitions from one state to another. The permissibility of each state is estimated by a multi-stage system of constraints including the balance economic-mathematical model of the energy sector and assessing the level of energy security with the help of the energy security indicators: The described approach is implemented in the software package Corrective. In order to increase the packet processing capabilities of all possible options of the fuel and energy complex development which require substantial computing and are time-consuming, a distributed application package with the use of the package DISCOMP was implemented. The distributed package Corrective was tested to study the Russian energy sector development on the computer cluster "Academician V.M. Matrosov". The proposed approach can also be applied to the study of the Vietnam energy sector development with a sufficiently detailed examination of its geographical conditions as well as its economic and physical infrastructure. To assess the possible states of the fuel and energy sector in Vietnam one can use indicators of energy security and the criteria for sustainable development of the country developed at the Institute of Energy Science of the Vietnam Academy of Science and Technology. The results of the research can be used to get a clear idea of the possibility of ensuring energy security at the national and regional scale.

Keywords: energy security, energy security indicators, software and computer system, fuel and energy complex, combinatorial modeling, model, sustainable development, distributed computing environment

DOI: 10.17212/1814-1196-2016-4-175-193

REFERENCES

1. Voropai N.I., Klimenko S.M., Krivorutsky L.D., Pyatkova N.I., Rabchuk V.I., Senderov S.M., Trufanov V.V., Cheltsov M.B. Comprehensive substantiation of the adaptive development of energy systems in terms of changing external conditions. *International Journal of Global Energy Issues*, 2003, vol. 20, no. 4, pp. 416–424.
2. Senderov S. Energy security of the Largest Asia Pacific countries: main trends. *International Journal of Energy and Power*, 2012, vol. 1, no. 1, pp. 1–6.
3. Ang B.W., Choong W.L., Ng T.S. Energy security: definitions, dimensions and indexes. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015, vol. 42, pp. 1077–1093.
4. Winzer C. Conceptualizing energy security. *Energy Policy*, 2012, vol. 46, pp. 36–48.
5. Senderov S.M. Model'no-indikativnyi podkhod k otsenke urovnya energeticheskoi bezopasnosti strany pri razlichnykh variantakh razvitiya energetiki [Model-indicator approach to assessing the energy security of the country in different types of energy development]. *Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk. Energetika – Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Power Engineering*, 2005, no. 4, pp. 3–9.
6. Krut B. Indicators for energy security. *Energy Policy*, 2009, vol. 37, no. 6, pp. 2166–2181.
7. Voropai N.I., Saneev B.G., eds. *Vostochnyi vektor energeticheskoi strategii Rossii: sovremennoe sostoyanie, vzglyad v budushchee* [The eastern vector of Russia's energy strategy: state of the art and prospects]. Novosibirsk, Geo Publ., 2011. 368 p.
8. Makarov A.A., Mitrova T.A., Kulagin V.A. Dolgosrochnyi prognoz razvitiya energetiki mira i Rossii [Long-term energy forecast for the world and Russia]. *Ekonomicheskii zhurnal Vyshei shkoly ekonomiki – Higher School of Economics Economic Journal*, 2012, no. 2, pp. 172–204.
9. Saneev B.G., Sokolov A.D., Agafonov G.V. *Metody i modeli razrabotki regional'nykh energeticheskikh programm* [Methods and models for the development of regional energy programs]. Novosibirsk, Nauka Publ., 2003. 140 p.
10. 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.
11. Zorkal'tsev V.I. *Metody prognozirovaniya i analiza effektivnosti funkcionirovaniya sistemy toplivonabtheniya* [The forecasting and analysis methods of the fuel supply system functioning efficiency]. Moscow, Nauka Publ., 1988. 144 p.

12. Senderov S.M., Rabchuk V.I., Pyatkova N.I. Analiz vypolneniya trebovaniy energeticheskoi bezopasnosti pri realizatsii razlichnykh napravlenii razvitiya TEK strany do 2020 g. [Analysis of the implementation of energy security requirements for the implementation of various areas of the country's fuel and energy complex development till 2020]. *Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk. Energetika – Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Power Engineering*, 2009, no. 5, pp. 17–23.
13. Ibanez E., McCalley J.D. Multiobjective evolutionary algorithm for long-term planning of the national energy and transportation systems. *Energy Systems*, 2011, vol. 2 (2), pp. 151–169.
14. Veselov F.V., Makarov A.A., Malakhov V.A. Metody i instrumentarii prognozirovaniya razvitiya elektroenergetiki [Methods and tools for predicting the power industry]. *Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk. Energetika – Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Power Engineering*, 2010, no. 4, pp. 82–94.
15. Makarov A.A., Veselov F.V., Eliseeva O.A., Kulagin V.A., Malakhov V.A., Mitrova T.A., Filippov S.P. SCANNER. Superkompleks aktivnoi navigatsii v energeticheskikh issledovaniyakh [Supercomplex of active navigation in energy researches]. Moscow, INEI RAN Publ., 2011. 144 p.
16. Fishbone L.G., Abilock H. MARKAL, a linear-programming model for energy systems analysis: technical description of the BNL version. *International Journal of Energy Research*, 1981, vol. 5, pp. 353–375.
17. Gerking H. Modeling of multi-stage decision making process in multi-period energy models. *European Journal of Operational Research*, 1987, vol. 32, no. 2, pp. 191–204.
18. Voort E. van der, Donni E., Thonet C., Bois D'Enghien E., Dechamps G., Guilmoit J.F. *Energy Supply Modelling Package EFOM-12C Mark I: Mathematical Description*. Louvain-La-Neuve, Cabay, 1984. 429 p.
19. Loulou R., Labriet M. ETSAP-TIAM: the TIMES integrated assessment model Part I: Model structure. *Computational Management Science*, 2008, vol. 5, no. 1, pp. 7–40.
20. Beresneva N.M., Edelev A.V. Sistema podderzhki issledovaniy energeticheskoi bezopasnosti Rossii [The support system of Russia's energy security research]. *Programmnye produkty i sistemy – Software & Systems*, 2008, no. 2, pp. 76–78.
21. Ierusalimsky R., Figueiredo L.H. de, Filho W.C. Lua – an extensible extension language. *Software: Practice & Experience*, 1996, vol. 26, no. 6, pp. 635–652.
22. Edelev A.V., Tchemezov A.V., Nguyen H.N., Doan V.B. Sustainable energy development and green growth strategy for Vietnam: a suitable pathway of power sector ensuring the national energy security. *Proceedings of the Third International Scientific Conference "Sustainable Energy Development"*, Hanoi, 2013, pp. 21–28.
23. *Mixed Integer Linear Programming (MILP) solver lp_solve*. Available at: <http://sourceforge.net/projects/lpsolve> (accessed 26.12.2016)
24. Edelev A.V. [The use of X-COM system for the study of the development of fuel and energy complex, taking into account energy security requirements]. *Nauchnyi servis v seti Internet: reshenie bol'shikh zadach: trudy Vserossiiskoi nauchnoi konferentsii* [Scientific service in the Internet: Solution of large problems. Proceedings of the International Supercomputer Conference], Novorossiisk, 22–27 September 2008. Moscow, MSU Publ., 2008, pp. 109–121.
25. Sidorov I.A., Oparin G.A., Feoktistov A.G. Razrabotka i primeneniye raspredelennykh paketov prikladnykh programm [Development and application of distributed application packages]. *Programmnye produkty i sistemy – Software & Systems*, 2010, no. 2, pp. 108–111.
26. *Irkutskii superkomp'yuternyi tsentr SO RAN* [Irkutsk Supercomputer Center of the Russian Academy of Sciences]: website. Available at: <http://hpc.icc.ru> (accessed 26.12.2016)
27. Edelev A.V., Nguyen Q.N., Nguyen V.T., Tran V.H., Le T.T., Doan B.D., Nguyen B.D. Developing "Corrective" software: 3-region model. *Proceedings of International Conference Green Energy and Development*, Hanoi, Vietnam, 2012, pp. 41–52.
28. The Government Decree no. 92/2006/NĐ-CP dated 7 September 2006 on making, approving and managing master plan of socio-economic development, in Vietnamese.
29. Vietnam Coal and Mining Group, 2014. Master plan of coal industry development to 2020, with consideration to 2030 (Revised).
30. Petrol Vietnam, 2005. Strategy on petroleum industry development to 2015, with view to 2025.

31. Electricity Vietnam, 2011. Master plan of national power development in the period 2011–2020, with consideration to 2030.

32. *APEC, Energy database*. Available at: <http://www.iecej.or.jp/egeda/database/database-menu2.html> (accessed 27.12.2016)

33. Institute of Energy, Vietnam's national master power plan for period of 2011–2020 outlook to 2030 revised. Ministry of Industry and Trade (approved in March 2016).

34. Edelev A.V., Pyatkova N.I., Chemezov A.V., Nguen X.N. Programmnyi kompleks "Korrektiva" dlya issledovaniia dolgosrochnogo razvitiya toplivno-energeticheskogo kompleksa V'etnama [The software package Corrective to study the long-term development of the fuel and energy complex in Vietnam]. *Programmnye produkty i sistemy – Software & Systems*, 2014, no. 4, pp. 211–216.