

ВЫБОР МЕТОДИЧЕСКОГО ПОДХОДА ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ОПТИМАЛЬНОГО РАЗВИТИЯ ЭНЕРГОИСТОЧНИКОВ В ТЕПЛОСНАБЖАЮЩИХ СИСТЕМАХ ГОРОДСКИХ ТЕРРИТОРИЙ

О.А. Еделева

Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, г. Иркутск

Резюме: В статье предлагается к рассмотрению постановка задачи оптимального развития энергоисточников в рамках комплексного развития теплоснабжающих систем городских территорий и анализ способов ее решения на основе существующих методических подходов. Произведено сравнение этих подходов с целью их адаптации к решению поставленной задачи.

Ключевые слова: энергоисточник, тепловая сеть, теплоснабжающая система, оптимизация, развитие, структура, городская территория, избыточная схема, комплексный подход, загрязнение атмосферы, окружающая среда.

THE CHOICE OF AN APPROACH TO STUDY THE PROBLEMS OF ENERGY SOURCES OPTIMUM DEVELOPMENT IN THE URBAN HEAT SUPPLY SYSTEMS

O.A.Edeleva

**Melentiev Energy Systems Institute of Siberian Branch of the Russian Academy of
Science, Irkutsk, Russia**

Abstract: The aim of paper is to formulate a problem of energy sources optimal development within the urban heat supply systems development framework. The analysis of the existing approaches ability to solve the problem is performed. The approaches are compared and their adaptation to solve the problem is considered.

Keywords: energy source, heat network, heat supply system, optimization, development, structure, urban area, redundant scheme, integrated approach, environment pollution, environment.

Введение

Задача оптимального развития энергоисточников, относящаяся к классу задач схемно-структурной оптимизации, возникает на всех этапах развития теплоснабжающей системы городской территории, начиная с перспективного планирования и разработки схем теплоснабжения города до этапа эксплуатации этих систем [1]. При решении такой задачи необходим комплексный подход, поскольку решения, принимаемые по оптимальному развитию энергоисточников в отрыве от тепловых сетей, оказываются неэффективными. В статье на основе анализа особенностей поставленной проблемы рассматриваются методические подходы для решения задач оптимального развития энергоисточников с учетом его интеграции в разрабатываемый единый комплексный методический инструментарий по развитию теплоснабжающих систем (ТСС) городских территорий и предлагаются из них наиболее эффективные.

Постановка задачи

Задача оптимального развития энергоисточников (выбора мест расположения, типов и оптимальных производительностей) на стадии разработки схем теплоснабжения городских территорий может быть сформулирована следующим образом.

Задано:

- 1) районы города, годовые нагрузки по теплу, холоду и электроэнергии по каждому из районов, их территориальное размещение;
- 2) часовые нагрузки по теплу (в паре и горячей воде) и электроэнергии крупных промышленных предприятий, их территориальное размещение;
- 3) число существующих местных энергоисточников (тепловых электрических станций, котельных, когенерационных установок, возобновляемых источников энергии, электробойлерных и пр.), их размещение по территории города и технико-экономические характеристики;
- 4) возможные новые центральные источники энергоснабжения, варианты их территориального размещения и предельные производительности;
- 5) возможные новые источники децентрализованного энергоснабжения, варианты их территориального размещения и предельные производительности;
- 6) вид и стоимость топлива для источников (с учетом затрат на его внутригородские перевозки);
- 7) варианты типоразмеров оборудования для источников;
- 8) цена импортируемой электроэнергии;
- 9) число лет рассматриваемого расчетного периода.

Требуется определить:

- 1) число, тип источников, мощность, состав и сроки ввода оборудования источников энергоснабжения, годовой отпуск от них тепла, холода и электроэнергии;
- 2) годовой объем импорта электроэнергии от внешней энергосистемы;
- 3) необходимость объединения источников в микрогрид;
- 4) минимальные затраты в ТСС.

Условия:

- 1) балансы тепловой нагрузки для каждого рассматриваемого района (отдельно для нагрузки в горячей воде и в паре);
- 2) баланс электрической нагрузки города;
- 3) балансы электрической мощности и производства электроэнергии для каждой ТЭЦ;

- 4) балансы теплопроизводительности котельных;

Ограничения:

- 1) по значению расчетного коэффициента теплофикации;
- 2) по максимальной мощности источников теплоснабжения, если эти ограничения заданы;
- 3) по резервированию при выборе состава основного оборудования;
- 4) по предельно допустимым концентрациям (ПДК) вредных веществ, выбрасываемых в атмосферу.

Для проведения расчетов необходимо подготовить интегральные графики тепловой и электрической нагрузки источников; оптимальное соотношение использования централизованных и децентрализованных источников в зависимости от региона расположения проектируемой ТСС. При выборе состава основного оборудования в зависимости от типа энергоисточника стоимость вспомогательного оборудования назначать через приближенные коэффициенты.

Оценка результатов осуществляется по критерию экономической эффективности.

Методические подходы для решения поставленной задачи

В 70-х годах прошлого столетия в работе СЭИ СО АН СССР [2] впервые был предложен оптимизационный двухуровневый методический подход к решению задачи оптимального развития энергоисточников при разработке схемы теплоснабжения города. Методический подход к решению такой задачи имеет упрощенное однозначное задание схемы магистральной тепловой сети древовидной структуры, связывающей источник централизованного теплоснабжения с потребителями и использование линейной модели оптимизации ее параметров. В результате процедура перебора в достаточной мере не обеспечивает исследование всей области допустимых решений и может применяться лишь для перспективного планирования [1].

В 80-90-х годах было предложено решение такой задачи на основе выбора оптимальной конфигурации тепловой сети из ограниченного числа предварительно заданных проектных схем с совместным определением типов и мест расположения источников [3–5]. В то время задачи оптимизации, связанные с выбором мест расположения, составом или сроками ввода оборудования энергоисточников решались отдельно друг от друга, обычно результаты одной задачи становились исходными данными для другой.

В этот же период времени появился методический подход на основе комбинаторного моделирования [6]. Он заключается в том, что развитие системы представляется в виде направленного графа. В представленных выше методах предпроектного обоснования развития энергоисточников исследователи обычно основываются на сопоставлении ограниченного числа вариантов. Важным достоинством подхода на основе комбинаторного моделирования является «полная палитра» рассмотрения всех допустимых к реализации вариантов, кроме того, среди вариантов развития системы можно согласно заданным критериям выбирать не только оптимальный вариант, но и варианты, близкие к нему.

Все предложенные методические подходы того времени были ориентированы прежде всего на повышение оптимальных технических параметров источников и системы в целом. Мероприятия по снижению негативного воздействия на окружающую среду определялись для выбранных вариантов развития энергетических систем, что нередко не соответствовало рациональным решениям.

В настоящее время в ИСЭМ СО РАН разрабатывается методический подход к математическому моделированию и оптимизации параметров и выбора технологических схем и оборудования теплоэнергетических и энерготехнологических установок различного назначения на основе системы машинного построения программ (СМПП) [7]. Этот методический подход позволяет подробно рассчитывать тепловые схемы энергоисточников с оптимизацией параметров работы основного и вспомогательного оборудования. В рамках этого подхода предложена оригинальная методическая разработка [8], заключающаяся в выборе оптимального числа установленных генерирующих агрегатов, цепей линий электропередачи и других элементов, учитывая нормальные и послеаварийные режимы работы энергосистемы. Данный методический подход достаточно детален и может успешно применяться для конкретного проектирования. Оценка негативного воздействия на окружающую среду здесь осуществляется на уровне выбора технологий сжигания топлива без учета рассеивания и наложения полей концентраций вредных веществ.

Другой методический подход, разрабатываемый в ИСЭМ СО РАН [9], основанный на принципах *EFOM* [10], выполняет моделирование развития энергетики региона с помощью комплекса моделей. Эти модели позволяют рассчитывать энергетические балансы региона, выбирать первоочередные проекты в отраслях топливно-энергетического комплекса (ТЭК) и оценивать варианты развития ТЭК региона и отдельных его отраслей, включая электроэнергетическую и теплоснабжающую отрасли. Аналогичный методический подход, развиваемый в ИСЭМ СО РАН [11], оценивает последствия критических ситуаций для ТЭК и обосновывает мероприятия по обеспечению надежного топливо- и энергоснабжения

потребителей в таких ситуациях. Другая, разработанная в ИСЭМ СО РАН, динамическая модель ТЭК региональной энергетической системы [12], рассматривает развивающуюся систему комплексного энергоснабжения регионов, включая специальную систему экологических ограничений [13].

Эти методические подходы рассчитаны на существенно агрегированную постановку задачи, предлагают основные направления развития энергетического хозяйства региона, рассматривая конкретное оборудование. Экологическая оценка осуществляется расчетом валовых выбросов, например, с использованием понятия емкости атмосферы [9] или предлагается интерпретация загрязнения окружающей среды в качестве потребления воздуха, земли, воды как ограниченных ресурсов [12, 13].

По своим возможностям модели, предложенные в публикациях [9, 11, 12], во многом аналогичны зарубежным моделям развития электроэнергетики и теплоснабжения в рамках ТЭК страны и регионов [14–16]. В отличие от моделей *TIMES* [15] (*MARKAL* [14]), модельная разработка *Balmorel* [16] находится в свободном доступе, она меньше и компактнее.

В настоящее время в России и за рубежом активно развиваются подходы, связанные с использованием понятия «избыточных схем».

В России методический подход к построению избыточных схем разрабатывается в ИСЭМ СО РАН [1, 17–20]. Он основывается на построении исследователем избыточной проектной расчетной схемы системы теплоснабжения как совокупности всех допустимых вариантов конфигурации тепловой сети и расположения источников теплоты с учетом ограничений, связанных с преградами на местности и выбранными для размещения источников площадками. Метод заключается в том, что при выборе источников теплоты избыточная схема дополняется фиктивным узлом и подмножеством фиктивных связей, соединяющих его с теми узлами, в которых производится выбор оптимальной мощности источника. Количество фиктивных связей для каждого узла-источника зависит от того, сколько альтернатив по типам источников в данном узле рассматривается. Избыточная схема представляет собой многоконтурную сеть, и задача сводится к поиску наивыгоднейшего потокораспределения на заданной избыточной схеме. Ее решение позволяет найти уточненное распределение нагрузок между источниками тепла, учитывающее затраты в источники, тепловую сеть, схему тепловой сети, мероприятия по ее реконструкции и оптимальные параметры [20]. Осуществляемый направленный перебор деревьев производится путем локальной оптимизации различных деревьев начального приближения, что позволяет получить решения близкие к оптимальным. Исследователь должен заранее решить, какие альтернативы должны быть включены в избыточную схему. Тем самым имеется риск того, что оптимум будет исключён из рассмотрения.

За рубежом был предложен в 80-е годы, и развивается по настоящее время, методический подход для оптимизации процесса создания систем на основе суперструктуры (избыточной схемы) [21]. В нём различные варианты состава оборудования энергоисточников рассматриваются в единой схеме, которая содержит конечное число элементов с их возможными взаимосвязями. Для решения проблем, связанных с заданием суперструктуры, был разработан *PNS*-подход (*processnetworksynthesis*) [22]. Он использует обобщённое представление технологических схем в виде графа для создания и оптимизации суперструктуры процессов. Позже, на базе *PNS*-подхода был предложен методический подход на основе *P*-графов (*processgraph*) [23, 24]. *P*-граф представляет собой подход к моделированию процессов с целью создания альтернативных составов оборудования.

Достоинством современных зарубежных моделей [25, 26], относящихся к комплексному проектированию и функционированию энергетических систем для удовлетворения потребностей жилого сектора в электроэнергии и тепле, является совместная оптимизация генерации, распределения и потребления сразу нескольких видов энергоресурсов, одновременное определение типов энерго источников и сроков ввода

оборудования, определение площадок размещения энергоисточников. Производится одновременный расчет максимального экономического эффекта при минимальном воздействии этих систем на окружающую среду. Однако, применительно к решению рассматриваемой задачи такие модели необходимо дополнять выбором оптимальной конфигурации тепловой сети (в зарубежных моделях выбор конфигурации тепловой сети предлагается как отдельно решаемая задача).

Выбор и обоснование эффективных методов решения поставленной задачи оптимизации энергоисточников из числа рассматриваемых

Для решения задачи оптимального развития энергоисточников на стадии разработки схемы теплоснабжения городских территорий в этой статье предлагается подробнее проанализировать несколько вариантов модельных разработок: двухуровневый методический подход, методический подход, основанный на принципах комбинаторного моделирования, подход к построению избыточной схемы, основанный на P -графах, методический подход к моделированию ТЭК регионов.

Двухуровневый методический подход

Представляет собой двухуровневый оптимизационный методический подход к решению задачи оптимального развития энергоисточников при разработке схемы теплоснабжения города. На верхнем уровне линейная модель осуществляет расчёт производительности каждого из элементов теплофикационной системы, т.е. осуществляет переход от одного ее состояния к другому, лучшему по сравнению с предыдущим. Моделями нижнего уровня при заданном состоянии системы рассчитываются оптимальные параметры элементов системы, т. е. состав, очередность и сроки ввода оборудования. Задача решается циклами приближения, и вычислительный процесс прекращается при условии, когда состав объектов и значения функционала на двух очередных циклах совпадают полностью или с достаточной (заданной) степенью точности.

Достоинствами двухуровневого оптимизационного методического подхода являются:

- учет фактора времени (период 5-10-15 лет в годовом разрезе);
- учет преемственности решения для следующих временных этапов при выборе состава оборудования энергоисточников;
- учет оптимальной очередности ввода оборудования.

В случае использования двухуровневого подхода для решения рассматриваемой в статье задачи необходимо решить две основных проблемы. Первая проблема связана с одновременным рассмотрением только одного состава оборудования для каждого нового источника (в основном из-за ограничений в размерности задачи, несовершенства программного обеспечения того времени). Вторая проблема – это отсутствие оценки негативного воздействия получаемых решений на окружающую среду, либо ее проведение для вариантов, уже выбранных в результате оптимизации.

Методический подход на основе комбинаторного моделирования

Основу методического подхода на основе комбинаторного моделирования составляет представление процесса развития объектов моделируемой системы в форме направленного графа, узлы которого соответствуют возможным состояниям объекта в отдельные моменты времени, а связи характеризуют допустимость переходов из одного состояния в другое. Формирование и анализ вариантов развития системы в целом проводится путем рассмотрения различных сочетаний состояний и переходов состояний отдельных объектов, поэтому такой подход был назван комбинаторным моделированием.

Под объектами в предлагаемой постановке задачи предлагается понимать энергоисточники.

На этапе разработки возможных направлений развития системы теплоснабжения города или ее реконструкции описываются варианты модернизации существующих

энергоисточников, а при описании новых задаются их состояния при различных вариантах (темпах) ввода.

Формирование множества допустимых вариантов развития ТСС может происходить как автоматически, так и при участии исследователя. Вариантом развития ТСС может стать возможная траектория развития системы, поэтому исследователь может принять участие в отсеке невозможных с его точки зрения вариантов развития. В качестве расчетных ограничений выступают уравнения электрического и тепловых балансов, условия работы источников энергии по покрытию графиков нагрузок, ограничения по экологическим показателям, ограничения по объемам и видам поставки топлива.

Определение оптимальных и близких к оптимальным вариантов развития ТСС производится с помощью алгоритма выявления из множества допустимых траекторий оптимальных и близких к ним.

На этом этапе сначала рассчитываются экономические критерии по допустимым вариантам развития ТСС, включая уточнение затрат на оборудование. На последнем этапе исследователю предоставляется для анализа список найденных оптимальных и близких к оптимальным траекторий (вариантов развития ТСС).

Достоинствами методического подхода на основе комбинаторного моделирования можно назвать:

- наглядность и компактность в представлении вариантов развития объектов и затем системы в виде направленного графа. Описание вариантов в виде графа наглядно показывает их различия и общие состояния или переходы;

- представление вариантов развития ТСС в виде графа является очень удобным способом описания реально существующего многоэтапного во времени процесса принятия решений. Выходящие из данного состояния в данный момент времени дуги показывают те наборы вариантов состава оборудования энергоисточников, из которых придется выбирать, если система окажется в этом состоянии;

- возможность проверки каждого состояния системы как на линейные, так и на нелинейные ограничения;

- важным преимуществом рассмотренного способа формирования вариантов является достигаемая при «полная палитра» рассмотрения всех вариантов развития ТСС. При традиционных методических подходах обычно основываются на сопоставлении ограниченного числа вариантов;

- возможность получать, наряду с оптимальным, решения, близкие к оптимальному.

Применение такого подхода для решения поставленной задачи обусловлено рассмотрением большого числа состояний и переходов в развитии системы. Поэтому при практической реализации необходимо сразу ориентироваться на специализированные вычислительные машины или распределенные вычисления с параллельной обработкой данных.

Методический подход к построению суперструктуры (избыточной схемы), основанный на Р-графах

Р-граф представляет собой модель процессов с тремя необходимыми составляющими элементами:

- 1) множество необходимых продуктов (топливо, тепловая энергия, электрическая энергия);

- 2) множество доступных исходных материалов (типоразмеры основного и вспомогательного оборудования энергоисточников);

- 3) множество доступных технологических блоков. Технологический блок является множеством пар из двух подмножеств (1) и (2), представляющих входные и выходные материалы технологического блока, включая промежуточные продукты, которые могут производиться и использоваться технологическими блоками (объект генерации: котельная, ТЭЦ и пр.).

Технологический блок производит выходные материалы при условии, что все входные материалы имеются в наличии. Технологический блок имеет как структурные, так и параметрические свойства. Таким образом, входные материалы потребляются, а выходные материалы производятся в соответствии с удельными расходами, заданными в дугах, которые входят или выходят из соответствующего технологического блока. Входные и выходные материалы, вышеупомянутые удельные расходы и функция общей стоимости в совокупности образуют технологический блок.

Полученная математическая модель содержит непрерывную и двоичную переменные для каждого технологического блока. Первая определяет мощность блока, последняя определяет возможность установки или работы этого блока. Математическая модель обеспечивает соблюдение баланса массы в любом материальном узле, т.е. сумма исходящих потоков равна сумме входящих потоков. Другое ограничение гарантирует, что если технологический блок не будет включен в решение, то соответствующая переменная мощности будет равна нулю. Математическая модель способна определять несколько лучших оптимальных решений.

Достоинствами методического подхода являются:

- наглядность представления всей технологической цепочки преобразования первичных ресурсов во вторичные, а также состава оборудования на энергетическом объекте – энергоисточнике;

- рассмотрение всей «палитры» вариантов состава оборудования без ограничений.

В случае реализации необходимо расширить методический подход явным учетом фактора времени и связанной с ним оптимальной очередностью ввода оборудования, а также дополнительным внесением ограничений по загрязнению окружающей среды и использованием очистного оборудования в составе природоохранных мероприятий.

Методический подход к моделированию ТЭК регионов

Все динамические модели ТЭК региональных энергетических систем рассматривают развивающиеся системы комплексного энергоснабжения регионов. Под развитием в моделях принимается изменение с течением времени типов технологий и масштабов производства конечных продуктов. При этом также могут изменяться показатели технологий, стоимостные характеристики ресурсов, внешние ограничения, системы являются открытыми и могут обмениваться энергоносителями с окружающей средой.

Методические подходы, предназначенные для решения задач развития ТЭК, можно использовать как основу, так как они, по своей сути, решают похожую задачу: минимизируют затраты на развитие энергетики региона с условиями соблюдения теплового и электрического балансов производства и потребления энергии и прочими аналогичными ограничениями. Для решения поставленной задачи необходимо, во-первых рассматривать уровень городских территорий, во-вторых дополнительно ввести в модель ТЭКа детализацию по оборудованию энергоисточников и ввести ограничения, касающиеся целочисленности единиц и мощности оборудования (модели ТЭК являются линейными). В некоторых случаях, возможно, потребуется приведение отдельных зависимостей к линейному виду (например, линеаризация затрат в зависимости от мощности энергоисточника).

Кроме этого, во многих моделях ТЭК модели разработаны специальные системы экологических ограничений. Например, в [12, 13] исходным является положение, что ущерб от антропогенного загрязнения природы представляет собой «нормальные» убытки процесса производства. Загрязнение воздуха, земли и воды можно интерпретировать как потребление этих ограниченных ресурсов. В результате расчетов определяются типы технологических установок, где эффективна организация очистки. Авторы заостряют внимание на том, что в случае определения количества валовых выбросов трудно нахождение допустимых пределов этих выбросов и предлагают метод контрольных точек,

согласно которому ограничения задаются не на объемы выбросов вредных веществ, а на их концентрации в таких точках.

Достоинства методического подхода:

- учет фактора времени и преемственность решения между соседними моментами времени;

- динамические модели являются многоузловыми (это необходимо в случае детального моделирования экологических ограничений, а также для оптимизации потоков энергоносителей между узлами);

- представление решения задачи в линейной форме, это позволяет свести решение к задаче линейного программирования и использовать имеющиеся стандартные программы;

- учет экологических ограничений.

С другой стороны, ввод дополнительной детализации по составу оборудования энергоисточников в моделях ТЭК приведет к многократному увеличению размерности задачи, что может привести к потере наглядности модели и сложности осмысления полученных результатов.

Выводы

Для получения одного решения задачи оптимального развития энергоисточников в теплоснабжающих системах городских территорий подходят все вышеперечисленные методические подходы, т.к. в них фактически решается задача линейного программирования с большим количеством целочисленных переменных. Необходимость же учета таких факторов, как неопределённость будущих условий развития энергетики, неоднозначность исходной информации требует рассмотрения целого множества различных сочетаний оборудования, а также внешних и внутренних условий развития теплоснабжающей системы. В результате мы получаем большее количество решений, и выбор наилучшего из них для исследователя может представлять значительные трудности. Среди рассмотренных методов наиболее приспособленными к этой особенности задачи являются методы, основанные на графах, по причине их наглядности и компактности.

Литература

1. Сеннова Е.В., Сидлер В.Г. Математическое моделирование и оптимизация развивающихся теплоснабжающих систем. Новосибирск: Наука, 1987. 221с.
2. Хрилев Л.С., Смирнов И.А. Оптимизация систем теплофикации и централизованного теплоснабжения / Под ред. Соколова Е.Я. М.: Энергия, 1978. 264с.
3. Исследования систем теплоснабжения/Л.С. Попырин, К.С. Светлов, Г.М. Беляева и др. М.: Наука, 1989. 215 с.
4. Юфа А.И., Носулько Д.Р. Комплексная оптимизация теплоснабжения. Киев: Тэхника, 1988. 135с.
5. Федяев А.В., Федяева О.Н. Комплексные проблемы развития теплоснабжающих систем. Новосибирск: Наука, 2000. 256с.
6. Зоркальцев В.И., Хамисов О.В. Равновесные модели в экономике и энергетике. Новосибирск: Наука, 2006. 221 с.
7. Клер А.М., Степанова Е.Л., Максимов А.С. и др. Оптимизация режимов работы ТЭЦ с учетом реального состояния основного оборудования // Теплоэнергетика. 2009. №6. С. 53–57.
8. Клер А.М., Жарков П.В. Разработка методов оптимизации схем и параметров локальных электроэнергетических систем // Сб. статей всероссийской конференции «Энергетика России в XXI веке. Инновационное развитие и управление» (1-3 сентября 2015 г., Иркутск, Россия). Иркутск: ИСЭМ СО РАН, 2015. с. 568-577.
9. Методы и модели разработки региональных энергетических программ / Санеев Б.Г., Соколов А.Д., Агафонов Г.В. и др. Новосибирск: Наука, 2003. 140 с.

10. Energy supply modelling package EFOM-12C Mark I: mathematical description / E. Vander Voort, E. Donni, C. Thonet, E. Bois D'Enghien, G. Dechamps, J.F. Guilmot. Louvain-La-Neuve, Belgium: Cabay, 1984. 429 p.
11. 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. отд-ние, Ин-т систем энергетики им. Л.А. Мелентьева. Новосибирск: СО РАН, 2011. 198 с.
12. Системные исследования проблем энергетики / Л.С. Беляев, Б.Г. Санеев, С.П. Филиппов и др.; подред. Н.И. Воропай. Новосибирск: Наука. Сибирская издательская фирма РАН, 2000. 558 с.
13. Каганович Б.М., Филиппов С.П., Анциферов Е.Г. Эффективность энергетических технологий: термодинамика, экономика, прогнозы. Новосибирск: Наука. Сибирское отделение, 1989. 256 с.
14. Fishbone L G., Abilock H. MARKAL, a linear-programming model for energy systems analysis: technical description of the BNL version // Intern. Journal of Energy Research, 1981.vol. 5. pp. 353-375.
15. 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.
16. Balmorel: A model for analyses of the electricity and CHP markets in the Baltic Sea Region / Ravn H.F., Hindsberger M., Petersen M., Schmidt R., Bøg R.; GrohnheitPoul Erik, Larsen Helge V.,Munksgaard J.,Ramskov J.; EsopM.R., et al.Denmark:BalmorelProject, 2001.70p.
17. Некрасова О.А., Хасилев В.Я. Оптимальное дерево трубопроводной системы // Экономика и математические методы, 1970. Т.4, №3. С. 427-432.
18. Меренкова Н.Н., Сеннова Е.В., Стенников В.А. Схемно-структурная оптимизация систем централизованного теплоснабжения // Электронное моделирование, 1982. №6. С. 76-82.
19. Математическое моделирование и оптимизация систем тепло-, водо-, нефте-и газоснабжения/А.П. Меренков, Е.В. Сеннова, С.В. Сумароков и др.Новосибирск: ВО «Наука», Сибирская издательская фирма, 1992.407 с.
20. Сеннова Е.В., Стенников Н.В. Технические и методические вопросы организации совместной работы источников на общие тепловые сети // Математические модели и методы анализа и оптимального синтеза развивающихся трубопроводных и гидравлических систем. Санкт-Петербург:Ленэкспо, 2006.С. 45-47.
21. Mitra S., Sun L., Grossmann, I.E. Optimal scheduling of industrial combined heat and power plants under time-sensitive electricity prices// Energy, 2013. vol. 54,pp.194-211.
- 22.Friedler, F., Tarjan, K., Huang, Y., and Fan, L. Combinatorial algorithms for process synthesis// Computers and Chemical Engineering, 1992. vol.16 (Supplement 1). pp. 313-320.
- 23.Tan R. R., Cayamanda C. D., Aviso K. B. P-graph approach to optimal operational adjustment in polygeneration plants under conditions of process inoperability. // Applied Energy, 2014. vol.135,pp. 402-406.
24. P-Graph Approach to Allocation of Inoperabilityin Urban Infrastructure Systems / Raymond R. Tan, Kathleen B. Aviso,Krista Danielle S. Yu,Michael Angelo B. Promentilla,Joost R. Santos// Chemical Engineering Transactions,2015. Vol. 45,pp. 1339-1344.
- 25.MehleriE.D., Sarimveis H., Markatos N.C., PapageorgiouL.G. Optimal design and operation of distributed energy systems: Application to Greek residential sector. Renewable Energy, 2013.№51,pp. 331-342.
26. Steven G. Penoncello. Thermal Energy Systems. Design and Analysis.: Moscow, Idaho: University of Idaho, 2015. 546 p.

Авторы публикации

Еделева Ольга Алексеевна – канд. техн. наук, старший научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук (ИСЭМ СО РАН). E-mail: edel@isem.irk.ru.

References

1. SennovaE.V., SidlerV.G. The mathematical modeling and optimization of the developing heat supply systems. Novosibirsk: Nauka, 1987. 221 p.
2. KhrilyovL.S., Smirnov I.A. The optimization of heat supply systems and centralized heat supply / Ed. SokolovaE.Ya. Moscow: Energia, 1978. 264 p.
3. The research of the heat supply systems. Popyrin, K.S. Svetlov, G.M. Belyaeva et al. Moscow: Nauka, 1989. 215 p.
4. YufaA.I., NosulkoD.R. The complex optimization of heat supply. Kiev: Tekhnika, 1988. 135 p.
5. FedyaevA.V., FedyaevaO.N. Complex problems of the heat supply system development. - Novosibirsk: Science, 2000. 256 p.
6. ZorkaltsevV.I., KhamisovO.V. The equilibrium models in the economy and energy. Novosibirsk: Science, 2006. 221 p.
7. Kler A.M., StepanovaE.L., MaksimovA.S. i dr. OptimizacijarezhimovrabotyTJeC s uchetonreal'nogostojanijaosnovnogooborudovanija // Teplojenergetika, 2009. №6. S. 53-57.
8. Kler A. M., ZharkovP.V. Razrabotkametodovoptimizaciishem i parametrovlokal'nyhjelektroenergeticheskisistem // Sb. statejvserossijskojkonferencii «JenergetikaRossii v XXI veke. Innovacionnoerazvitie i upravlenie» (1-3 sentjabrja 2015 g., Irkutsk, Rossija). Irkutsk: ISJeM SO RAN, 2015. s. 568-577.
9. Methods and models for the development of regional energy programs / SaneevB.G., Sokolov A.D., AgafonovG.V. et al. Novosibirsk: Nauka, 2003. 140 p.
10. Energy supply modelling package EFOM-12C Mark I: mathematical description / E. Vander Voort, E. Donni, C. Thonet, E. Bois D'Enghien, G. Dechamps, J.F. Guilmot. Louvain-La-Neuve, Belgium: Cabay, 1984. 429 p.
11. The energy security of Russia: problems and solutions / N.I. Pyatkova, V.I. Rabchuk, S.M. Senderov et al; Ans. Ed. N.I. Voropay, M.B. Cheltsov; Institute of Energy Systems. Novosibirsk: SB RAN, 2011. 198 p.
12. System studies of energy problems / L.S. Belyaev, B.G. Saneev, S.P. Filippov. et al; Ed. N.I. Voropay. Novosibirsk: Science. Siberian Publishing Company of RAS, 2000. 558 p.
13. KaganovichB.M., FilippovS.P., AntsiferovE.G. The efficiency of energy technologies: thermodynamics, economics, forecasts. Novosibirsk: Nauka. 1989. 256 p.
14. Fishbone L G., Abilock H. MARKAL, a linear-programming model for energy systems analysis: technical description of the BNL version // Intern. Journal of Energy Research, 1981.vol. 5. pp. 353-375.
15. 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.
16. Balmorel: A model for analyses of the electricity and CHP markets in the Baltic Sea Region / Ravn H.F., Hindsberger M., Petersen M., Schmidt R., Bøg R.; GrohnheitPoul Erik, Larsen Helge V., Munksgaard J., Ramskov J.; EsopM.R., et al. Denmark :BalmorelProject, 2001. 70 p.
17. NekrasovaO.A., HasilevV.Ja. Optimal'noederevotruboprovodnojsistemy // Jekonomika i matematicheskietody, 1970. T.4, №3. S. 427-432.
18. MerenkovaN.N., SennovaE.V., Stennikov V.A. Shemno-strukturnajaoptimizacijasisistemcentralizovannogoteplosnabzhenija // Jelektronnoemodirovanie, 1982. №6. S. 76-82.
19. The mathematical modeling and optimization of the heat, water, oil and gas supply systems / A.P. Merenkov, E.V. Sennova, S.V. Sumarokov et al. Novosibirsk: VO "Nauka", Siberian Publishing Company, 1992. 407 p.
20. SennovaE.V., StennikovN.V. The technical and methodical issues of organization of the joint sources operation in the heat networks. // Mathematical models and methods of analysis and optimal synthesis of the developing pipeline and hydraulic systems. St. Petersburg: Lenexpo, 2006. pp. 45-47.
21. Mitra S., Sun L., Grossmann, I.E. Optimal scheduling of industrial combined heat and power plants under time-sensitive electricity prices// Energy, 2013. vol. 54.pp.194-211.

22. Friedler, F., Tarjan, K., Huang, Y., and Fan, L. Combinatorial algorithms for process synthesis// Computers and Chemical Engineering, 1992. vol.16 (Supplement 1). pp. 313-320.

23. Tan R. R., Cayamanda C. D., Aviso K. B. P-graph approach to optimal operational adjustment in polygeneration plants under conditions of process inoperability. // Applied Energy, 2014. vol.135.pp. 402-406.

24. P-Graph Approach to Allocation of Inoperability in Urban Infrastructure Systems / Raymond R. Tan, Kathleen B. Aviso, Krista Danielle S. Yu, Michael Angelo B. Promentilla, Joost R. Santos// Chemical Engineering Transactions, 2015. Vol. 45.pp. 1339-1344.

25. Mehleri E. D., Sarimveis H., Markatos N. C., Papageorgiou L. G. Optimal design and operation of distributed energy systems: Application to Greek residential sector. Renewable Energy, 2013. №51. pp. 331-342.

26. Steven G. Penoncello. Thermal Energy Systems. Design and Analysis.: Moscow, Idaho: University of Idaho, 2015. 546 p.

Authors of the publication

Edeleva Olga Alexeevna – Ph.D, senior researcher, Melentiev Energy Systems Institute of Siberian Branch of the Russian Academy of Science (ESI SB RAS). E-mail: edel@isem.irk.ru.

Поступила в редакцию

17 марта 2017 г.