



ЭНЕРГЕТИКА И ЭКОЛОГИЯ

ENERGY AND ECOLOGY

ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ МЕГАПОЛИСОВ

ECOLOGICAL PROBLEMS OF INDUSTRIAL MEGAPOLISES

Статья поступила в редакцию 27.06.19. Ред. рег. № 1720-3577-1 The article has entered in publishing office 27.06.19. Ed. reg. No. 1720-3577-1

УДК 697.34:577.4

РОЛЬ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО ФАКТОРА В РАЗВИТИИ ГОРОДСКИХ ТЕПЛОСНАБЖАЮЩИХ СИСТЕМ*

О.А. Еделева

Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН (ИСЭМ СО РАН)
д. 130, ул. Лермонтова, г. Иркутск, 664033, Россия
тел.: +7 (3952) 500-646 доб. 329; e-mail: edel@isem.irk.ru

doi: 10.15518/isjaee.2019.19-21.061-069

Заключение совета рецензентов: 01.07.19 Заключение совета экспертов: 09.07.19 Принято к публикации: 15.07.19

В статье сформулирована многокритериальная задача оптимизации источников тепловой энергии, в которой рассматривается обеспечение надежного и безопасного теплоснабжения потребителей и минимальное воздействие объектов теплоснабжения на окружающую среду. Эта задача относится к задачам схемно-структурной оптимизации, является трудно формализуемой и имеет нелинейный дискретный характер.

Общепринятый подход к решению задачи развития теплоснабжающих систем на уровне города, как правило, сводится к однокритериальной задаче поиска минимума дисконтированных приведенных затрат в проектируемые энергетические объекты системы при выполнении множества ограничений. Мерами природоохранной деятельности в этом случае являются оценка причиненного ущерба от объектов энергетики окружающей среде и соответствующая этому ущербу плата за выбросы загрязняющих атмосферу веществ.

Показано, что существуют и другие методические подходы, в которых в случае сведения к однокритериальной задаче остальные критерии не теряют своей важности и могут существенно влиять как на процесс оптимизации, так и на получаемые в его результате решения.

Приведен краткий обзор таких подходов и предложен метод эpsilon-ограничений, который позволяет максимизировать суммарный эффект от проведения мероприятий по защите атмосферы в пределах выделенного для города объема затрат. Процедура динамического программирования позволяет получить семейство решений (оптимальных наборов мероприятий), каждое из которых соответствует некоторому уровню затрат, не превосходящему определенного верхнего предела. Описан алгоритм работы метода эpsilon-ограничений применительно к решаемой задаче. Приведен пример практических исследований реальной системы теплоснабжения города, проведенных с помощью предлагаемого метода, который позволил получить эффективное решение с конкретным перечнем технических и атмосфероохранных мероприятий по источникам тепла и теплоснабжающим системам в целом.

Данный методический подход может найти практическое применение при выполнении предпроектных исследований, а также при разработке схем теплоснабжения городов.

Ключевые слова: источник тепла; теплоснабжающая система; загрязнение атмосферы; многокритериальная оптимизация.

*Еделева О.А. Роль экологического фактора в развитии городских теплоснабжающих систем // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» (ISJAEE), 2019;19-21:61-69.



ROLE OF AN ENVIRONMENTAL FACTOR IN THE DEVELOPMENT OF URBAN HEATING SYSTEMS

O.A. Edeleva

Melentiev Energy Systems Institute SB RAS
130 Lermontov Str., Irkutsk, 664033, Russia
tel.: +7 (3952) 500 646/329, e-mail: edel@isem.irk.ru

doi: 10.15518/isjaee.2019.19-21.061-069

Referred 1 July 2019 Received in revised form 9 July 2019 Accepted 15 July 2019

The paper focuses on multi-objective optimization of heat sources which aims to provide reliable and safe heat supply to consumers and minimal environmental impact of heating facilities. This is a structural optimization problem of a non-linear discrete nature which is difficult to formalize.

The generally accepted approach to solving the problem of urban heating system development is usually reduced to a single-criterion problem of finding the minimum discounted costs for the designed energy facilities of the system subject to a great number of constraints. The environmental protection measures, in this case, are the assessment of environmental damage caused by the energy facilities and a related charge for emissions of air pollutants.

The study indicates that there are other methodological approaches, in which, in the case of a single-criterion problem, the other criteria do not lose their significance and can affect greatly both the optimization process and the solutions obtained.

A brief review of such approaches is presented, and the epsilon-constraint method is proposed which allows maximizing the total effect of measures aimed at protecting the atmosphere within the funds allocated to the city. The dynamic programming procedure is used to obtain a set of solutions (optimal sets of measures), each of which corresponds to some level of costs not exceeding a certain upper limit. The algorithm of the epsilon-constraint method applied to solve the problem is described. The proposed method is used in a case study of a real urban heating system. This method made it possible to obtain an effective solution with a specific list of technical and atmospheric protection measures for heat sources and heating systems.

The proposed methodological approach can find practical application in feasibility studies and in the studies on the development of urban heating systems.

Keywords: heat source; heating systems; air pollution; multi-criteria optimization problem.



Olga Alekseevna Edeleva
Olga Edeleva

Сведения об авторе: канд. техн. наук, старший научный сотрудник отдела трубопроводных систем Института систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН.

Образование: Иркутский национальный исследовательский технический университет (1998 г.).

Область научных интересов: формирование методических подходов, моделей и методов комплексного анализа и выбора направлений развития теплоснабжающих систем с учетом экологических и экономических факторов.

Публикации: 25.

Information about the author: Ph.D. in Engineering Sciences, Senior Researcher at the Department of Pipeline Energy Systems of the Melentiev Energy Systems Institute SB RAS.

Education: Irkutsk National Research Technical University, 1998.

Research interests: formation of methodological approaches, models and methods of complex analysis and selection of areas for the development of heating systems, considering environmental and economic factors.

Publications: 25.

1. Введение

Проектирование теплоснабжающих систем (ТСС) традиционно было связано с решением задач повышения их надежности, управляемости и экономичности [1–5]. В настоящее время наблюдается тенденция к изменению подходов в развитии технических систем – они перестают быть только технико-экономическими в своей основе, и все больше ори-

ентируются на максимальное повышение качества и уровня жизни населения, минимальное антропогенное воздействие объектов этих систем на окружающую среду [6–9]. Нередко эти цели становятся приоритетными для определенного круга инвесторов и ставятся выше экономической выгоды от реализации технического проекта.

Минимизация затрат на развитие ТСС и снижение их нагрузки на окружающую среду при постоян-

но увеличивающемся энергопотреблении вступают в противоречие, поскольку часто использование экологически чистых технологий обходится дорого [10, 11]. Общепринятый подход к решению таких многоцелевых задач в энергетике, как правило, сводится к однокритериальной задаче [12–15]. При этом основной функцией является поиск минимума дисконтированных приведенных затрат на проектируемые объекты энергетики при выполнении множества ограничений. Ключевым механизмом учета природоохранной деятельности может быть оценка причиненного ущерба и соответствующей ему платы за выбросы загрязняющих атмосферу веществ [16].

Вместе с тем существуют и другие методические подходы, в которых в случае сведения к однокритериальной задаче критерии не теряют своей важности и могут существенно влиять как на процесс оптимизации, так и на получаемые в его результате решения [6, 17, 18]. В статье [6] авторы предлагают один из возможных методических подходов «экологизации экономики»: в полной мере согласование экономического развития и охраны окружающей среды не мо-

жет быть достигнуто только в рамках чистых экономических методов оценки, – и решают многокритериальную задачу такого вида. В этом случае в качестве основного критерия может выступать уровень минимального воздействия технических систем на окружающую среду.

Целью данной работы является методическое обоснование решения задач развития ТСС на основе оптимального выбора параметров и структуры источников тепла (ИТ) и их минимального воздействия на окружающую среду.

Впервые формализуется проблема выбора состава оборудования ИТ развивающихся ТСС и их минимального атмосферного воздействия в виде многокритериальной задачи, причем эта задача решается одновременно с оценкой загрязнения окружающей среды и выбором конкретных мероприятий, обеспечивающих минимальное воздействие ИТ на атмосферу. Предложенный методический инструментальный опробован в практических исследованиях, подтверждающих его работоспособность на уровне решения предпроектных задач развития ТСС.



Список обозначений	
<i>Буквы греческого алфавита</i>	
γ	Целевая функция многокритериальной задачи оптимизации структуры источников тепла
<i>Буквы латинского алфавита</i>	
A	Набор мероприятий для всех источников тепла по загрязнителю s
A^m	Одно из мероприятий для технологии m
A_λ^{opt}	Эффективный набор мероприятий для предела затрат Z_λ
C_s^p	Концентрация s -го загрязнителя в точке p ячейки сетки, накладываемой на план города
E_s	Уровень загрязнения атмосферы в рассматриваемом городе по загрязнителю s
I	Существующая технология производства тепла
J	Новая технология производства тепла
P_s^m	Подмножество номеров ячеек, в которых определяется концентрация по загрязнителю s для рассматриваемой технологии m
Q	Выработка тепла, Гкал/год
<i>Буквы русского алфавита</i>	
Z	Суммарные дисконтированные приведенные затраты на источники тепла и тепловые сети для набора мероприятий A
$Z_{зад}$	Объем выделенных (заданных) для города затрат на развитие систем теплоснабжения
Z^{III}	Дисконтированные приведенные затраты на источники тепла, руб.
Z^{TC}	Дисконтированные приведенные затраты на тепловые сети, руб.
Z_{max}	Верхняя граница дисконтированных приведенных затрат
Z_{min}	Нижняя граница дисконтированных приведенных затрат
$\{Z_\lambda\}$	Последовательность затрат на мероприятия A
<i>Индексы нижние</i>	
λ	Номер предела затрат, $\lambda = \overline{1, \dots, \Lambda}$, Λ – общее количество пределов затрат
s	Номер загрязнителя, $s = \overline{1, \dots, S}$, S – общее количество загрязнителей
<i>Индексы верхние</i>	
m	Номер технологии, $m = \overline{1, \dots, M}$, $M = I + J$, M – общее количество технологий
p	Номер ячейки, накладываемой на план города, в центре которой рассчитывается концентрация загрязнителей, $p = \overline{1, \dots, P}$, P – общее количество ячеек
<i>Аббревиатуры</i>	
ГГУ	Газогенераторная установка
ГТУ	Газотурбинная установка
ИТ	Источник тепла



Продолжение списка обозначений

ЛК	Локальная котельная
МЗА	Мероприятия по защите атмосферы
ПВК	Программно-вычислительный комплекс
ПДК	Предельно-допустимая концентрация
ТМ	Технические мероприятия
ТС	Тепловые сети
ТСС	Теплоснабжающие системы
ЦК	Центральная котельная

2. Постановка задачи многокритериальной оптимизации структуры источников тепла с учетом экологических ограничений

Многокритериальную задачу оптимизации типа и основных параметров и структуры ИТ можно представить в виде набора критериев:

$$\gamma = [z^{ИТ}, z^{ТС}, E_s], \quad (1)$$

$$z^{ИТ} = f(Q) \Rightarrow \min, \quad (2)$$

$$z^{ТС} = f(Q) \Rightarrow \min, \quad (3)$$

$$E_s = f(C_s^p) \Rightarrow \min, \quad s \in S, \quad p \in P, \quad (4)$$

где γ – целевая функция многокритериальной задачи оптимизации структуры ИТ, которая может быть представлена набором критериев (2), (3) и (5); $z^{ИТ}$ – затраты на ИТ, руб.; Q – выработка тепла ИТ, Гкал/год; $z^{ТС}$ – затраты на тепловую сеть (ТС), руб.; E_s – величина, показывающая уровень загрязнения атмосферы в рассматриваемом городе, определяется как сумма концентраций C_s^p s -го загрязнителя в точке p ячейки сетки, накладываемой на план города.

Задача многокритериальной оптимизации ИТ городских территорий (1)–(4) относится к задачам схемно-структурной оптимизации, является трудно формализуемой и имеет нелинейный дискретный характер. Эта задача заключается в определении рациональных затрат на ИТ (2) (затраты связаны с местом расположения, типом и составом оборудования), на ТС (3), состав ИТ и их оптимальные связи с существующими и новыми потребителями определяет самую выгодную конфигурацию ТС (3). Одним из важнейших пунктов при этом является минимальное воздействие ИТ на состояние атмосферы (4).

Задачу (1)–(4) необходимо решать при выполнении ряда ограничений, наиболее важными из которых являются обеспечение баланса производства и потребления тепла и электроэнергии городом, а также ограничения на установленную мощность ИТ, допустимую концентрацию загрязнителей и т.д.

3. Методы многокритериальной оптимизации

На практике методы решения многокритериальных задач можно разделить на две основные группы: методы, сводящие многокритериальную задачу тем или иным способом к однокритериальной; методы, использующие другие принципы оптимальности [17, 19].

В задачах энергетики к первой группе чаще всего относится метод весовых коэффициентов и метод уступок [17, 18].

Одним из распространенных методов второй группы является оптимизация по Парето, заключающаяся в поиске эффективных решений, каждое из которых нельзя улучшить сразу по всем критериям. Множество таких решений и называется множеством Парето. К методам оптимизации второй группы относятся принцип жесткого приоритета [20–21] и метод эpsilon-ограничений (или субоптимизации) [17, 20].

Более подробно остановимся на применении метода эpsilon-ограничений к данной задаче. Модель, приведенная в [6], максимизирует суммарный эффект от проведения мероприятий по защите атмосферы (МЗА) в пределах выделенного для города объема затрат. Процедура динамического программирования позволяет получить семейство решений (оптимальных наборов), каждое из которых соответствует некоторому уровню затрат, не превосходящему определенного верхнего предела [17].

3.1. Методический подход к решению задачи развития ТСС с учетом экологических ограничений

Рассмотрим более подробно алгоритм работы предлагаемого метода эpsilon-ограничений для поставленной задачи. Применительно к описанной задаче, константами будут являться значения дисконтированных приведенных затрат на системы теплоснабжения, для каждого такого значения будет проведена минимизация уровня загрязнения приземного слоя атмосферы.

Для определения эффективных наборов технических мероприятий (ТМ) и МЗА из числа возможных вариантов на основе [6] предлагается алгоритм, включающий следующие положения:

1. Выбор загрязнителя s из списка загрязнителей, выбрасываемых ИТ. Как правило, этот список включает твердые частицы, оксиды серы, азота и углерода, углеводороды, которые в основном и определяют



валовой выброс загрязнителей в городах от ИТ.

2. Выбор допустимых мероприятий для загрязнителя s , не содержащих ни одной пары несовместных мероприятий. Каждый созданный набор после проверки на допустимость заносится в группу мероприятий ИТ.

3. Задание диапазона допустимых дисконтированных приведенных затрат $[Z_{\min}, Z_{\max}]$ на реализацию мероприятий, где Z_{\min} и Z_{\max} – нижняя и верхняя границы диапазона затрат соответственно. Исследователем задается возрастающая последовательность затрат $\{Z_\lambda\}$ на $[Z_{\min}, Z_{\max}]$.

4. Определение эффективного набора мероприятий A_λ^{opt} для каждого λ методом динамического программирования. Для этого решается задача минимизации уровня загрязнения приземного слоя атмосферы, оцениваемого по загрязнителю s :

$$E_s = \sum_{p=1}^{P_s^m} (C_s^p(A^m)) \rightarrow \min, \quad (5)$$

при условии

$$Z(A) \leq Z_\lambda, \quad (6)$$

где A^m – одно из мероприятий для технологии m ; P_s^m – подмножество номеров ячеек, в которых определяется концентрация по загрязнителю s для рассматриваемой технологии m ; Z – дисконтированные приведенные затраты на набор мероприятий A .

5. Построение графика зависимости $E_s = f(Z)$ по загрязнителю s на основе полученных наборов мероприятий A_λ^{opt} (рис. 1).

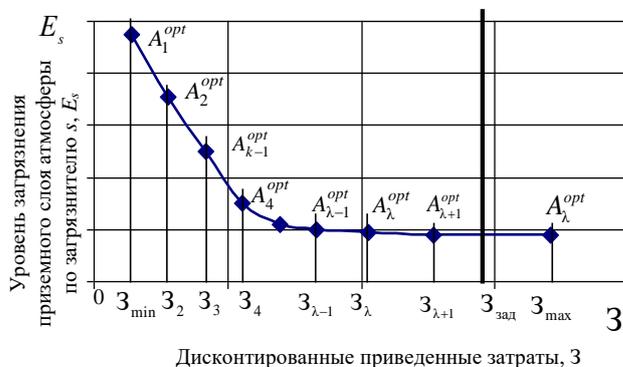


Рис. 1– Кривая рационального распределения затрат по наборам мероприятий и снижения концентрации s -го загрязнителя
 Fig. 1 – Curve of the distribution of costs across sets of measures and a decrease in the concentration of the s^{th} pollutant

Для некоторого объема выделенных затрат $Z_{\text{зад}}$ по этому графику выбирается ближайший набор мероприятий по загрязнителю s , затраты на который меньше или равны заданному.

Далее выбирается следующий загрязнитель из списка и происходит повторение алгоритма 1–5, в результате по каждому из загрязнителей получаем список эффективных наборов мероприятий. Эти наборы включают ТМ, связанные, например, с реконструкцией или модернизацией ИТ и ТС, а также МЗА, включающие, в частности, установку систем очистки дымовых газов от загрязняющих атмосферу веществ. Причем ТМ также могут влиять на загрязнение. Так, модернизация угольной котельной, связанная с повышением эффективности ее работы, значительно снизит количество загрязняющих веществ, поступающих в атмосферу. Эти списки имеют большую размерность, и возникает вопрос их объединения с целью исключения одинаковых мероприятий и поиска наиболее эффективных из них среди альтернатив. Такое объединение предлагается сделать в два этапа.

Первый этап объединения основан на применении одного из методов многокритериального выбора [22]. На этом этапе подготавливается список альтернативных наборов мероприятий для второго этапа с учетом приоритетов эксперта.

На втором этапе экспертом производится объединение наборов мероприятий согласно априорно принятым приоритетам выбора для конкретной практической задачи [23]. Для каждого варианта развития и реконструкции ТСС города составляется единый набор мероприятий для заданного исследователем уровня затрат.

Затем осуществляется выбор эффективного варианта реконструкции и развития ТСС по критерию минимума дисконтированных приведенных затрат.

3.2. Практическое применение данного методического подхода

Решение задачи продемонстрируем на примере ТСС небольшого города (население 13 000 чел.) в Европейской части России. Основные проблемы функционирования этой ТСС связаны с неудовлетворительным качеством теплоснабжения города от центральной котельной (ЦК) и с устаревшим оборудованием в коммунальных и промышленных котельных. Концентрации суммарного количества твердых частиц, оксида серы превышают предельно-допустимые концентрации (ПДК) [24–27].

При формировании вариантов развития ТСС были использованы следующие типы мероприятий для ИТ и ТС города. Доведение ТСС от ЦК до нормаль-



ного уровня эксплуатации (реконструкция ТС и возможные ограничения радиуса теплоснабжения от ЦК путем установки двух небольших локальных котельных (ЛК) на газе вблизи конечных потребителей). Эти расчеты были выполнены с помощью вычислительного инструментария, описанного в [28], в лаборатории систем теплоснабжения ИСЭМ СО РАН. Реконструкция включала строительство мини ТЭЦ на котельных на базе газотурбинной установки (ГТУ); установка газогенератора (ГГУ), работающе-

го на отходах льнозавода; установка турбин ПРОМ на ЦК с целью использования перепада давления для выработки электроэнергии.

На основе разработанных типов мероприятий для ТСС города было составлено 8 вариантов развития ТСС города (табл. 1).

Для них были проведены расчеты на эколого-экономической модели, которая была разработана и реализована в составе ПВК ТЕП-ЭКО по предложенному методическому подходу [23].

Таблица 1

Формирование возможных вариантов развития ТСС города

Table 1

Formation of possible options for the development of urban heating systems

№ п/п	Варианты развития ТСС города	Мероприятия					
		Мероприятия по ЦК	Мероприятия по ТС	Строительство ЛК	Строительство мини ТЭЦ	Перевод котельных на газ	Установка систем очистки
1	Газо-угольный (с реконструкцией ТС и закрытой системой ГВС)	Турбоагрегаты ПРОМ + перевод на газ	ЦК: Реконструкция и наладка ТС, установка ТП, график 115/70, закрытая система ГВС	-	+	+	+
2	Газо-угольный (с наладкой ТС)	Турбоагрегаты ПРОМ + перевод на газ	ЦК: Наладка ТС, установка ТП, график 115/70, открытая система ГВС	-	+	+	+
3	Угольно-мазутный (с реконструкцией ТС и установкой НС)	Турбоагрегаты ПРОМ + работа на мазуте	ЦК: Реконструкция и наладка ТС, установка НС, график 95/70, открытая система ГВС	-	-	-	+
4	Угольно-мазутный (с реконструкцией ТС)	Турбоагрегаты ПРОМ + работа на мазуте	ЦК: Реконструкция и наладка ТС, график 95/70, открытая система ГВС	-	-	-	+
5	Газо-угольный (со строительством ЛК №1)	Турбоагрегаты ПРОМ + перевод на газ	ЦК: Наладка ТС, установка ТП, график 115/70, открытая система ГВС	ЛК №1	+	+	+
6	Газо-угольный (со строительством ЛК №1 и подключением коммунальных потребителей)	Турбоагрегаты ПРОМ + перевод на газ	ЦК: Наладка ТС, установка ТП, график 115/70, открытая система ГВС ЛК №1: прокладка ТС	ЛК №1, подключение коммунальных потребителей	+	+	+
7	Газо-угольный (с закрытой системой ГВС и строительством ЛК №2)	Турбоагрегаты ПРОМ + перевод на газ	ЦК: Реконструкция и наладка ТС, установка ТП, график 115/70, закрытая система ГВС	ЛК №2	+	+	+
8	Газо-угольно-мазутный (с переводом на газ только ЦК, строительством ЛК №1 и подключением коммунальных потребителей)	Турбоагрегаты ПРОМ + перевод на газ	ЦК: Наладка ТС, установка ТП, график 115/70, открытая система ГВС ЛК №1: прокладка ТС	ЛК №1, подключение коммунальных потребителей	-	-	+

Полученные результаты представлены на рис. 2 в виде диаграммы затрат на реконструкцию и развитие ТСС (с уже выбранными в результате расчета по каждому варианту наборами эффективных мероприятий) для двух методик расчета приземных концентраций вредных веществ: «МРР-2017» [25], – и методика, основанная на теории Берлянда [26].

Как видно на рис. 2, угольно-мазутные варианты имеют самую низкую экологическую эффективность. Установка систем очистки на ряде котельных позволяет снизить до уровня ПДК суммарный выброс твердых частиц, но превышение по SO_x при этом сохраняется. Полное выполнение норм ПДК по выбросам вредных веществ обеспечивают только варианты с использованием газовой генерации.

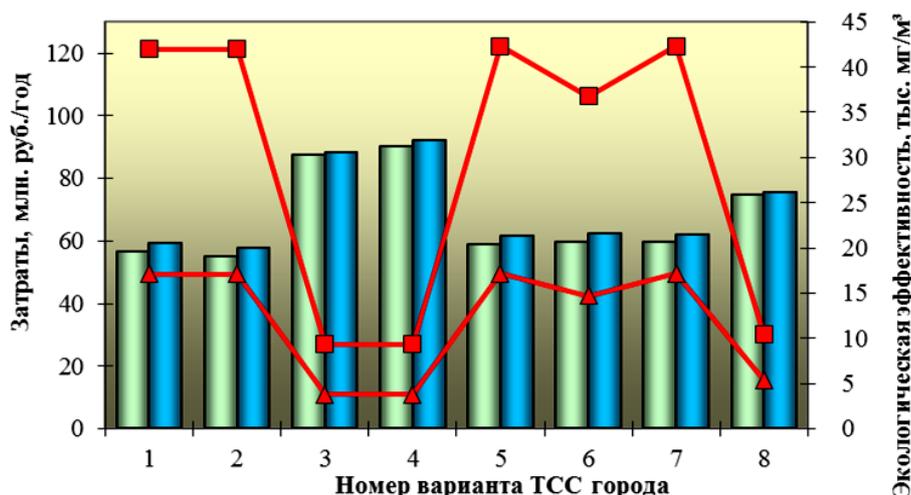


Рис. 2 – Зависимость экологической эффективности от суммарных дисконтированных затрат по вариантам развития ТСС для двух методик расчета приземных концентраций:

■ – дисконтированные приведенные затраты по Берлянду; ■ – дисконтированные приведенные затраты по MPP-2017; ▲ – экологическая эффективность по Берлянду; ▲ – экологическая эффективность по MPP-2017

Fig. 2 – Dependence of the environmental compatibility on the total discounted costs for heating systems development options for two methods for calculating surface concentrations:

■ – discounted costs for Berland; ■ – discounted costs for MPP-2017; ▲ – environmental compatibility for Berland; ▲ – environmental compatibility for MPP-2017

Следует отметить, что для угольно-мазутных вариантов характерны высокие издержки на эксплуатацию ИТ (высокие тарифы на жидкое топливо и покупную электроэнергию, низкая эффективность сжигания топлива).

5. Заключение

Решение многокритериальной задачи выбора структуры источников тепла в теплоснабжающих системах обеспечивает надежное и безопасное теплоснабжение потребителей и минимальное воздействие объектов теплоснабжения на окружающую среду.

Методический подход к решению этой задачи заключается в выборе эффективных мероприятий по реконструкции и развитию ТСС, а также природоохранных мероприятий, обеспечивающих максимальное выполнение требований по охране окружающей среды на предпроектном уровне. В качестве метода многокритериальной оптимизации применялся метод эpsilon-ограничений, который позволяет свести задачу к однокритериальной.

Практические исследования по выбору оптимального варианта развития ТСС показали работоспособность предлагаемого подхода и обеспечили получение оптимального решения по источникам тепла и теплоснабжающим системам в целом.

Благодарности

Исследование выполнено за счет средств гранта Российского научного фонда (проект № 17-19-01209).

Acknowledgments

The study was funded by a grant from the Russian Science Foundation (project No. 17-19-01209).

Список литературы

- [1] Сеннова, Е.В. Математическое моделирование и оптимизация развивающихся теплоснабжающих систем / В.Г. Сидлер. – Новосибирск: Наука, 1987. – 221 с.
- [2] Хрилев, Л.С. Оптимизация систем теплофикации и централизованного теплоснабжения / И.А. Смирнов – М.: Энергия, 1978. – 264 с.
- [3] Исследования систем теплоснабжения / под ред. Л.С. Попырина, В.И. Денисова. – М.: Наука, 1989. – 215 с.
- [4] Юфа, А.И. Комплексная оптимизация теплоснабжения / Д.Р. Носулько. – Киев: Тэхника, 1988. – 135 с.
- [5] Федяев, А.В. Комплексные проблемы развития теплоснабжающих систем / О.Н. Федяева. – Новосибирск: Наука, 2000. – 256 с.
- [6] Бронштейн, А.М. Экологизация экономики: методы регионального управления / В.А. Литвин, И.И. Русин – М.: Наука, 1990. – 120 с.
- [7] Еделева, О.А. Выбор методического подхода для решения задач оптимального развития энергоисточников в теплоснабжающих системах городских территорий // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2017. – № 5–6. – С. 56–68.
- [8] Mehleri, E.D. Optimal design and operation of distributed energy systems: Application to Greek residential sector / E.D. Mehleri [et al.] // Renewable Energy. – 2013. – Vol. 51. – P. 331–342.
- [9] Penoncello, Steven G. Thermal Energy Systems. Design and Analysis– Moscow, Idaho: University of Idaho, 2015. – 546 p.
- [10] Wang, L. A Review of Evaluation, Optimization and Synthesis of Energy Systems: Methodology and



Application to Thermal Power Plants / L. Wang [et al.] // *Energies*. – 2019. – Vol. 12. – No. 1. – 73 p.

[11] Goderbauer, S., An adaptive discretization MINLP algorithm for optimal synthesis of decentralized energy supply system / S. Goderbauer [et al.] // *Computers & Chemical Engineering*. – 2016. – Vol. 95. – P. 38–48.

[12] Обоснование развития электроэнергетических систем: Методология, модели, методы, их использование / под ред. Н.И. Воропая. – Новосибирск: Наука, 2015. – 448 с.

[13] Goderbauer, S. The Synthesis Problem of Decentralized Energy Systems is strongly NP-hard. // Preprint: repORt 2018-043, Operations Research/ S. Goderbauer [et al.]. – RWTH Aachen University: *Computers & Chemical Engineering*, 2019. – 18 p.

[14] Carvalho, M. Multicriteria synthesis of trigeneration systems considering economic and environmental aspects / M. Carvalho [et al.] // *Applied Energy*. – 2012. – Vol. 91. – No. 1. – P. 245–254.

[15] Atabay, D. An open-source model for optimal design and operation of industrial energy systems // *Energy*. – 2017. – Vol. 121. – P. 803–821.

[16] Закон РФ «Об охране окружающей среды (с изменениями на 29 июля 2018 года)» от 29.07.2018 № 7-ФЗ. – М.: Кремль, 2018. – 97 с.

[17] Москвин, Д.А. Перспективы использования многокритериальной оптимизации при управлении безопасностью информационных систем / Д.А. Москвин, М.О. Калинин // Доклады ТУСУРа. – 2008. – № 2. – Ч. 1. – С. 128–129.

[18] Захаров, И.Г. Обоснование выбора. Теория практики – СПб: Судостроение, 2006. – 528 с.

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

[20] Веников, В.А. Оптимизация режимов электростанций и энергосистем: учебник для вузов. – М.: Энергоиздат, 1981. – 464 с.

[21] Stennikov, V. Methods and models of optimal managing of district heating systems with prosumers / V. Stennikov [et al.] // *E3S Web of Conferences*. – 2017. – Vol. 25. – 5 p.

[22] Ishizaka, A., Multi-criteria decision analysis: methods and software / A. Ishizaka, Ph. Nemery. – New Delhi, India: John Wiley & Sons, Ltd, 2013. – 296 p.

[23] Баранова О.А. Методический подход к совершенствованию теплоснабжающих систем с учетом атмосфероохранных мероприятий. Автореф. дисс. ... канд. техн. наук. Иркутск, – 2004.

[24] Защита атмосферы от промышленных загрязнений / под ред. С. Калверта и Г. М. Инглунда. – Ч. 1. – М.: Металлургия, 1988. – 760 с.

[25] Методы расчетов рассеивания выбросов вредных (загрязняющих) веществ в атмосферном воздухе. Утв. приказом Минприроды России от 6 июня 2017 года, М. – 2017. – 119 с.

[26] Казимировская, Е.В., Математическая модель переноса выбросов КЭС в локальной зоне / Е.В. Казимировская, С.В. Козлов // Материалы 24-й конф.

науч. молодежи СЭИ СО РАН. – Иркутск, 1994. – С. 20–25.

[27] Климатические характеристики условий распространения примесей в атмосфере: Справочник / под ред. Э.Ю. Безуглая – Л.: Гидрометеиздат, 1983. – 328 с.

[28] Гидравлические цепи. Развитие теории и приложения / под ред. А.З. Гамма – Новосибирск: Наука, Сиб. изд. фирма РАН, 2000. – 273 с.

References

[1] Sennova E.V., Sidler V.G. Mathematical modeling and optimization of developing heating systems (Matematicheskoe modelirovanie i optimizatsiya razvivayushchikhsya teplosnabzhayushchikh sistem). Novosibirsk: Nauka Publ., 1987; 221 p. (in Russ.).

[2] Khrilev L.S., Smirnov I.A. Optimization of district heating systems and centralized heat supply (Optimizatsiya sistem teplofikatsii i tsentralizovannogo teplosnabzheniya). Moscow: Energiya Publ., 1978; 264 p. (in Russ.).

[3] Research of heating systems (Issledovaniya sistem teplosnabzheniya) / Edited by Popyrin L.S., Denisov V.I. Moscow: Nauka, 1989; 215 p. (in Russ.).

[4] Yufa A.I., Nosulko D.R. Integrated optimization of heat supply (Kompleksnaya optimizatsiya teplosnabzheniya). Kiev: Tekhnika Publ., 1988; 135 p. (in Russ.).

[5] Fedyayev A.V., Fedyayeva O.N. Complex problems of heating systems development (Kompleksnyye problemy razvitiya teplosnabzhayushchikh sistem). Novosibirsk: Nauka Publ., 2000; 256 p. (in Russ.).

[6] Bronstein A.M., Litvin V.A., Rusin I.I. Ecologization of the economy: methods of regional management (Ekologizatsiya ekonomiki: metody regional'nogo upravleniya). Moscow: Nauka Publ., 1990; 120 p. (in Russ.).

[7] Edeleva O.A. The choice of a methodological approach for solving problems of optimal development of energy sources in the heat supply systems of urban areas (Vybor metodicheskogo podkhoda dlya resheniya zadach optimal'nogo razvitiya energoistochnikov v teplosnabzhayushchikh sistemakh gorodskikh territorii). *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Problemy energetiki*, 2017; 5–6: 56–68 (in Russ.).

[8] Mehleri E.D., Sarimveis H., Markatos N.C., Papathegiou L.G. Optimal design and operation of distributed energy systems: Application to Greek residential sector. *Renewable Energy*, 2013; 51: 331–342.

[9] Penoncello Steven G. Thermal Energy Systems. Design and Analysis. Moscow, Idaho: University of Idaho, 2015; 546 p.

[10] Wang L., Yang Z., Sharma S., Mian A., Lin T.E., Tsatsaronis G., Maréchal F., Yang Y. A Review of Evaluation, Optimization and Synthesis of Energy Systems: Methodology and Application to Thermal Power Plants. *Energies*, 2019; 12(1): 73.

[11] Goderbauer S., Bahl B., Voll P., Lübbecke M.E., Bardow A., Koster A.M. An adaptive discretization MINLP algorithm for optimal synthesis of decentralized energy supply system. *Computers & Chemical Engineering*, 2016; 95: 38–48.



[12] Justification of the development of electric power systems: Methodology, models, methods, their use (Obosnovanie razvitiya elektroenergeticheskikh sistem: Metodologiya, modeli, metody, ikh ispolzovanie). Edited by Voropay N.I. Novosibirsk: Nauka, 2015; 448 p. (in Russ.).

[13] Goderbauer S., Comis Martin, Willamowski Felix J. L. *The Synthesis Problem of Decentralized Energy Systems is strongly NP-hard. Preprint: report 2018-043, Operations Research*. RWTH Aachen University: Computers & Chemical Engineering, 2019; 18 p.

[14] Carvalho M., Lozano M.A., Serra L.M. Multi-criteria synthesis of trigeneration systems considering economic and environmental aspects. *Applied Energy*, 2012;91(1):245–254.

[15] Atabay D. An open-source model for optimal design and operation of industrial energy systems. *Energy*, 2017;121: 803–821.

[16] Law of the Russian Federation "On Environmental Protection (as amended on July 29, 2018)" dated July 29, 2017, No. 7-ФЗ (Zakon RF «Ob okhrane okruzhayushchei sredy (s izmeneniyami na 29 iyulya 2018 goda)» ot 29.07.2018 № 7-FZ), Moscow, 2018; 97 p. (in Russ.).

[17] Moskvina D.A., Kalinin M.O. Prospects for the use of multi-criteria optimization in managing the security of information systems. (Perspektivy ispolzovaniya mnogokriterialnoi optimizatsii pri upravlenii bezopasnost'yu informatsionnykh sistem). *Doklady TUSURa*, 2008;1:128–129. (in Russ.).

[18] Zakharov I.G. Justification of the choice. Theory of Practice (Obosnovanie vybora. Teoriya praktiki). St. Petersburg: Sudostroenie Publ., 2006; 528 p. (in Russ.).

[19] Zorkaltsev V.I., Khamisov O.V. Equilibrium models in economics and energy (Ravnovesnye modeli v ekonomike i energetike). Novosibirsk: Nauka Publ., 2006; 221 p. (in Russ.).

[20] Venikov V.A. Optimization of power plants and power systems: a textbook for universities (Optimizatsiya rezhimov elektrostantsii i energosistem: uchebnik dlya vuzov). Moscow: Energoizdat Publ., 1981; 464 p. (in Russ.).

[21] Stennikov V., Postnikov I., Penkovskii A. Methods and models of optimal managing of district heating systems with prosumers. *E3S Web of Conferences*, 2017;25:5.

[22] Ishizaka A., Nemery Ph. Multi-criteria decision analysis: methods and software, New Delhi, India: John Wiley & Sons, Ltd, 2013;296 p.

[23] Baranova O.A. Methodical approach to the improvement of heating systems, taking into account atmospheric protection measures (Metodicheskii podkhod k sovershenstvovaniyu teplosnabzhayushchikh sistem s uchetom atmosferookhrannykh meropriyatii): Ph.D. thesis. Irkutsk, 2004, (in Russ.).

[24] Protection of the atmosphere from industrial pollution: Part 1 (Zashchita atmosfery ot promyshlennykh zagryaznenii). Edited by Calvert C. and Ingunda G. Moscow: Metallurgiya Publ., 1988; 760 p. (in Russ.).

[25] Methods for calculating the dispersion of emissions of harmful (polluting) substances in atmospheric air. Approved By order of the Ministry of Natural Resources of Russia of June 6, 2017 (Metody raschetov rasseivaniya vybrosov vrednykh (zagryaznyayushchikh) veshchestv v atmosfernom vozduke. Utv. prikazom Minprirody Rossii ot 6 iyunya 2017 goda), Moscow, 2017; 119 p. (in Russ.).

[26] Kazimirovskaya, E.V., Kozlov S.V. A mathematical model for the transfer of KES emissions in the local zone (Matematicheskaya model perenosavybrosov KES v lokalnoi zone). *Materialy 24-i konf. nauch. molodezhi SEI SO RAN*, Irkutsk, 1994;24:20–25 (in Russ.).

[27] Climatic characteristics of the conditions of distribution of impurities in the atmosphere: Reference (Klimaticheskie kharakteristiki uslovii rasprostraneniya primesei v atmosfere: Spravochnik). Edited by Bezuglaya E.Yu. Leningrad: Gidrometeoizdat Publ., 1983; 328 p. (in Russ.).

[28] Hydraulic chains. Development of the theory and application (Gidravlicheskie tsepi. Razvitie teorii i prilozheniya). Edited by Gamm A.Z. Novosibirsk: Nauka Publ., Sib. izd. firma RAN, 2000; 273 p. (in Russ.).

Транслитерация по BSI



Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук является организатором **Всероссийского научного семинара «Математические модели и методы анализа и оптимального синтеза развивающихся трубопроводных и гидравлических систем»**.

Тематика семинара: межотраслевые и междисциплинарные проблемы развития и функционирования трубопроводных и гидравлических систем различного типа и назначения (тепло-, водо-, газо-, нефтеснабжения и других). Семинар проводится раз в два года (очередное заседание: сентябрь 2020 г.).

Подробная информация на сайте: <http://51.isem.irk.ru/semtps/index.php>

