

Структурно-параметрическая оптимизация энергоисточников в задачах развития систем теплоснабжения

Ольга Еделева¹, Алексей Еделев^{1,2}

¹Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, ул. Лермонтова, д. 130, 664033, Иркутск, Россия

²Институт динамики систем и теории управления им. В.М. Матросова СО РАН, ул. Лермонтова, д. 134, 664033, Иркутск, Россия

Аннотация

В статье рассмотрено решение задачи структурно-параметрической оптимизации энергоисточников систем теплоснабжения. Среди задач развития систем теплоснабжения она является наиболее актуальной для Байкальской природной территории (БПТ) из-за жестких экологических ограничений, накладываемых на работу энергоисточников. Разработана математическая модель оптимального развития энергоснабжающей системы с учетом представительных дней с часовой тепловой и электрической нагрузкой потребителя и учётом атмосферного загрязнения. Проведена апробация модели на практическом примере развития схемы энергоснабжения небольшого поселка, находящегося на территории БПТ. Подготовка исходных данных и решение задачи структурно-параметрической оптимизации энергоисточников осуществлялась с помощью сервисов цифровой платформы экологического мониторинга БПТ.

Ключевые слова

Система теплоснабжения, энергоисточник, тепловая сеть, структурно-параметрическая оптимизация, загрязнение атмосферы, представительные дни, график нагрузки, Байкальская природная территория, экологический мониторинг, цифровая платформа.

1. Введение

В рамках цифрового мониторинга Байкальской природной территории (БПТ) [1] разрабатываются новые модели, алгоритмы и прикладное ПО для моделирования природно-технических систем (ПТС) с упором на детализацию технологических процессов. ПТС представляют собой совокупность форм и состояний различных процессов взаимодействия компонентов природной среды с инженерными сооружениями на всех стадиях ее функционирования [2]. Необходимость разработки новых моделей, алгоритмов и ПО определяется интеллектуализацией управления ПТС, которое предъявляет повышенные требования к детализации моделируемых технологических процессов и качеству получаемых данных об условиях функционирования и развития ПТС. Одним из представителей ПТС являются системы энергетики, в частности, теплоснабжающие системы.

Проектирование систем теплоснабжения является задачей структурно-параметрической оптимизации и заключается в определении типов, мест расположения и состава оборудования энергоисточников в тесной взаимосвязи со схемой и параметрами тепловой сети (т.к. состав энергоисточников, их мощности и связи с потребителями определяют объем теплоносителя, передаваемого по тепловой сети). В случае расположения проектируемых энергоисточников на

6th International Workshop on Information, Computation, and Control Systems for Distributed Environments (ICCS-DE 2024), July 01–05, 2024, Irkutsk, Russia

EMAIL: edel@isem.irk.ru (A. 1); alexedelev@gmail.com (A. 2)

ORCID: 0000-0003-2219-9754 (A. 1); 0000-0003-2219-9754 (A. 2)



© 2024 Copyright for this paper by its authors. Use permitted under Creative Commons License Attribution 4.0 International (CC BY 4.0).

ICCS-DE 2024 Workshop Proceedings

DOI: 10.47350/ICCS-DE.2024.16

территории БПТ в задачу структурно-параметрической оптимизации должна добавляться оценка их влияния на атмосферу.

Проектирование энергоисточников является многоэтапной процедурой, в данном исследовании делается допущение, что площадки для строительства определены в результате проведенного оптимационного расчета тепловых сетей и находятся в местах скопления тепловых нагрузок. Следующим этапом является определение типов и типоразмеров оборудования энергоисточников. Тип энергоисточника определяется исходя из возможностей поставки топлива различных видов, и, кроме этого исследуется потребность в комбинированной выработке тепла и электроэнергии. Типоразмер имеет при этом важное значение, потому что, с одной стороны, с увеличением числа установок появляется возможность более мягкого маневрирования нагрузками, и повышается надежность энергоисточников. С другой стороны, бесконтрольное увеличение количества установок приводит к увеличению капитальных и эксплуатационных затрат. Согласно нормам проектирования [3], установленная тепловая мощность энергоисточника определяется по расчетной тепловой нагрузке. Представительные дни, в этом случае позволяют проверить, оправдана ли такая расчётная нагрузка. Как правило, представительные дни временного периода тепловой нагрузки, представляют собой выбор определенных дней из временного ряда, состоящего из нескольких лет, в которых замечены предельно высокие и низкие нагрузки, или же нагрузки имеют характерный, неравномерный характер в течение суток (как правило, это рабочие и выходные дни).

В [4] авторами был предложен один из возможных способов решения задачи структурно-параметрической оптимизации энергоисточников с помощью методологии энергетических хабов [5]. В данном исследовании этот способ был апробирован на примере небольшой энергоснабжающей системы с учетом представительных дней и оценкой атмосферного загрязнения.

2. Постановка задачи

В [6] была предложена двухуровневая модель выбора типа и состава оборудования энергоисточников (ЭИ) для решения задач перспективного развития энергоснабжающих систем различной размерности. На первом уровне модели происходит формирование множества структур ЭИ по их типу, на втором уровне подбирается оптимальный состав оборудования ЭИ с учетом надежности и рассчитываются затраты на сооружение и эксплуатацию микросети, включающие затраты в ЭИ и тепловую сеть (ТС). На этом же уровне оцениваются объемы выбросов загрязняющих веществ.

Основная идея применения методологии энергетических хабов в задачах развития систем теплоснабжения заключается в моделировании структуры варианта энергоисточника в виде энергетического хаба, $h = \{1, \dots, H\}$, который имеет множество входов M_h и множество выходов N_h . Каждый элемент из множеств M_h , N_h , связан с одним определенным энергоресурсом $k \in K$. Также хаб h имеет набор преобразователей в количестве J_h .

В хабе $h = \{1, \dots, H\}$ в период времени $t = \{1, \dots, T\}$ поток энергоресурса P_{hm}^t на входе $m \in M_h$ разделяется на потоки F_{hmj}^t к преобразователям $j = \{1, \dots, J_h\}$, связанными со входом $m \in M_h$

$$P_{hm}^t = \sum_{j \in \Theta_h(m)} F_{hmj}^t, \quad (1)$$

$$F_{hmj}^t \leq \bar{F}_{hmj}, \quad (2)$$

где \bar{F}_{hmj}^t – пропускная способность связи преобразователя j со входом m хаба h , $\Theta_h(m)$ – множество, содержащее преобразователи хаба h , связанные со входом m .

Образование потока энергоресурса L_{hn}^t на выходе $n \in N_h$ хаба $h = \{1, \dots, H\}$ показано на Рисунке 1. В период времени $t = \{1, \dots, T\}$ преобразователь энергии $j = \{1, \dots, J_h\}$ хаба h конвертирует поток F_{hmj}^t с коэффициентом преобразования η_{hmjn}^{con} и направляет его к выходу n . Поток L_{hn}^t на выходе $n \in N_h$ определяется как

$$L_{hn}^t = \sum_{m \in M_h} \sum_{j \in \Theta_h(m,n)} \eta_{hmjn}^{con} F_{hmj}^t, \quad (3)$$

где $\Theta_h(m, n)$ – множество, состоящее из преобразователей, посредством которых вход $m \in M_h$ соединяется с выходом n хаба h .



Рисунок 1: Переток энергии в энергетическом хабе от преобразователей к выходу

Коэффициент преобразования η_{hmjn}^{con} , помимо удельного расхода топлива, может также представлять удельные выбросы загрязняющих веществ в атмосферу.

Энергоисточники соединяются между собой и с потребителями с помощью сетей транспорта энергоресурсов (Рисунок 2). Каждая сеть представляет собой граф $G_k = (V_k, E_k)$, где V_k – множество узлов, E_k – множество ориентированных дуг, k – энергоресурс из множества K . На граф G_k могут накладываться дополнительные ограничения, связанные с физическими законами перемещения энергоресурса k .

В сеть G_k может входить множество узлов $V_k^g \subset V_k$, которое представляет обособленные источники энергоресурса $k \in K$, не относящиеся ни к одному из H хабов. Например, в V_k^g могут быть выделены источники топлива, которые на Рисунке 3.4 представлены прямоугольниками.

Через $V_k^d \subset V_k$ обозначается множество узлов потребления энергоресурса $k \in K$, которые на Рисунке 3.4 представлены кругами. Остальные узлы из множества $V_k^o = V_k \setminus (V_k^g \cup V_k^d)$ называются промежуточными и служат местами пересечения потоков энергоресурса в сети транспорта. Каждый узел v сети G_k должен удовлетворять одному из условий баланса потоков энергоресурса $k \in K$ в период времени $t = \{1, \dots, T\}$

$$g_{kv}^t + \sum_{(q,v) \in \Psi_k(v)} a_{kqv} f_{kqv}^t - \sum_{(v,q) \in \Omega_k(v)} f_{kvq}^t = 0, v \in V_k^g, \quad (4)$$

$$\sum_{(q,v) \in \Psi_k(v)} a_{kqv} f_{kqv}^t - \sum_{(v,q) \in \Omega_k(v)} f_{kvq}^t + u_{kv}^t = \bar{d}_{kv}^t, v \in V_k^d, \quad (5)$$

$$\sum_{(q,v) \in \Psi_k(v)} a_{kqv} f_{kqv}^t - \sum_{(v,q) \in \Omega_k(v)} f_{kvq}^t = 0, v \in V_k^o, \quad (6)$$

$$0 \leq u_{kv}^t \leq \bar{d}_{kv}^t, v \in V_k^d, \quad (7)$$

$$0 \leq f_{kvq}^t \leq \bar{f}_{kvq}, (v, q) \in E_k, \quad (8)$$

$$0 \leq g_{kv}^t \leq \bar{g}_{kv}^t, v \in V_k^g, \quad (9)$$

где $\Psi_k(v) \subseteq E_k$ – множество дуг, входящих в узел v , $\Omega_k(v) \subseteq E_k$ – множество дуг, исходящих из узла v , f_{kqv}^t – поток энергоресурса k по дуге $(q, v) \in E_k$ в период времени t , g_{kv}^t – производство энергоресурса k в узле $v \in V_k^g$ в период времени t , \bar{d}_{kv}^t – потребность узла $v \in V_k^d$ в энергоресурсе k в период времени t , u_{kv}^t – недоставка энергоресурса k в узел $v \in V_k^d$ в период времени t , a_{kqv} – коэффициент, характеризующий потери при транспорте энергоресурса k по дуге $(q, v) \in E_k$, \bar{f}_{kvq} – пропускная способность дуги $(v, q) \in E_k$.

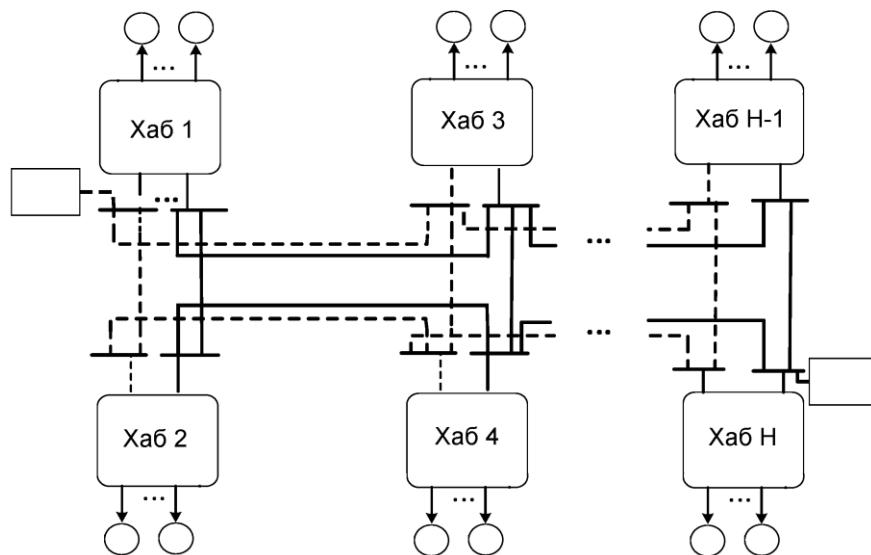


Рисунок 2: Сеть энергетических хабов

Если учитывать энергетические хабы, соединённые с G_k в узле v , то уравнения (4)-(6) для периода времени $t = \{1, \dots, T\}$ запишутся как

$$g_{kv}^t + \sum_{(q,v) \in \Psi_k(v)} a_{kqv} f_{kqv}^t + \sum_{h \in \Lambda_k^g(v)} L_{hn}^t - \sum_{h \in \Lambda_k^d(v)} P_{hm}^t - \sum_{(v,q) \in \Omega_k(v)} f_{kvq}^t = 0, v \in V_k^g, \quad (10)$$

$$\sum_{(q,v) \in \Psi_k(v)} a_{kqv} f_{kqv}^t + \sum_{h \in \Lambda_k^g(v)} L_{hn}^t - \sum_{h \in \Lambda_k^d(v)} P_{hm}^t - \sum_{(v,q) \in \Omega_k(v)} f_{kvq}^t + u_{kv}^t = \bar{d}_{kv}^t, v \in V_k^d, \quad (11)$$

$$\sum_{(q,v) \in \Psi_k(v)} a_{kqv} f_{kqv}^t + \sum_{h \in \Lambda_k^g(v)} L_{hn}^t - \sum_{h \in \Lambda_k^d(v)} P_{hm}^t - \sum_{(v,q) \in \Omega_k(v)} f_{kvq}^t = 0, v \in V_k^o, \quad (12)$$

где $\Lambda_k^d(v)$ – множество хабов, входы которых соединены с сетью G_k в узле v , P_{hk}^t – поток энергоресурса $k \in K$, поступающего на вход $m \in M_h$ хаба $h \in \Lambda_k^d(v)$ в период t , $\Lambda_k^g(v)$ – множество хабов, выходы которых соединены с сетью G_k в узле v , L_{hn}^t – поток энергоресурса $k \in K$, поступающего на выход $n \in N_h$ хаба $h \in \Lambda_k^g(v)$ в период t .

Целью оптимизации функционирования взаимосвязанных хабов является наиболее полное удовлетворение потребностей в энергоресурсах при минимальных затратах на эксплуатацию хабов и транспортных сетей на протяжении всех периодов времени $t = \{1, \dots, T\}$:

$$\sum_{t=1}^T \left[\sum_{h=1}^H \sum_{m \in M_h} C_{hk}^t P_{hm}^t Z_h^t + \sum_{k \in K} \sum_{v \in V_k^d} y_{kv} u_{kv}^t + \sum_{k \in K} \sum_{(v,q) \in E_k} c_{kvq} f_{kvq}^t \right] \rightarrow \min, \quad (13)$$

где C_{hk}^t – цена на энергоресурс $k \in K$, поступающего на вход $m \in M_h$ хаба $h = \{1, \dots, H\}$ в период t , P_{hm}^t – поток энергоресурса $k \in K$, поступающего на вход $m \in M_h$ хаба $h = \{1, \dots, H\}$ в период t , Z_h^t – булева переменная, определяющая, будет ли реализован хаб $h = \{1, \dots, H\}$, u_{kv}^t – недопоставка энергоресурса k в узел $v \in V_k^d$ в период времени t , y_{kv} – штраф за недопоставку энергоресурса $k \in K$ в узел $v \in V_k^d$ в период t , c_{kvq} – удельная стоимость транспорта энергоресурса $k \in K$ по дуге $(v, q) \in E_k$, f_{kvq}^t – поток энергоресурса $k \in K$ по дуге $(q, v) \in E_k$ в период t .

Ограничениями для целевой функции (13) выступают уравнения (7)-(12).

3. Практический пример развития схемы энергоснабжения поселка

Продемонстрируем пример развития схемы энергоснабжения небольшого поселка с населением в 6 000 чел., находящегося на территории БПТ в Восточной Сибири. Планируемая перспективная тепловая нагрузка поселка составит 23,19 Гкал/ч, электрическая – 102,91 тыс. МВт·ч в год, что связано с перспективной застройкой (рост численности населения) и необходимостью реконструкции объектов энергоснабжения. В настоящее время в поселке функционирует одна центральная котельная на буром угле (ЭИ №1, Рисунок 3).

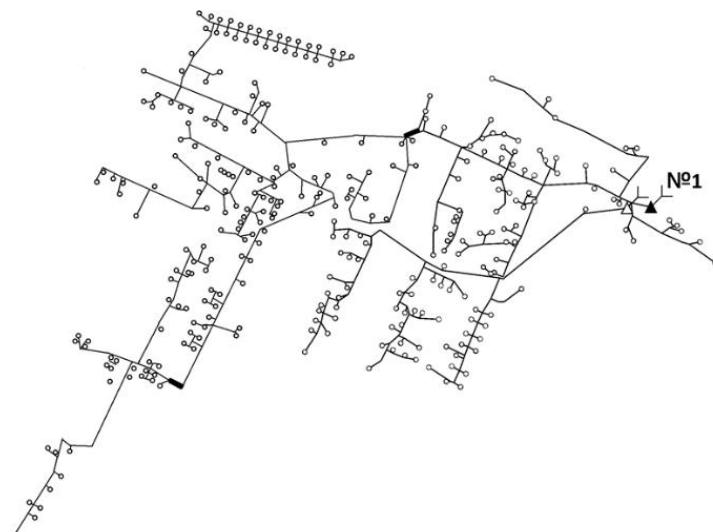


Рисунок 3: Пространственное представление конфигурации ТС с 1-им ЭИ для поселка

При формировании технологических вариантов ЭИ посёлка рассматривались два варианта топливоснабжения: подача газа на цели энергоснабжения (в рамках планируемой к реализации в регионе программы газификации) и использование щепы в качестве топлива (близкое расположение лесоперерабатывающего комбината по производству сухих пиломатериалов).

Был рассмотрен ввод 4 типов ЭИ: котельной (на газе и щепе) и мини ТЭЦ (на газе и щепе). При вводе котельных электроэнергия для поселка покупается из внешней энергосистемы, затраты на нее учтены в эксплуатационных расходах, в случае мини ТЭЦ варианты типоразмеров оборудования были подобраны с учетом полного электроснабжения поселка, при этом излишки электроэнергии заданы в качестве прибыли от ее продажи во внешнюю энергосистему.

Каждый вариант структуры ЭИ включает три типоразмера основного оборудования и задается следующим кодом: тип установки – типоразмер установки – количество установок – вариант конфигурации ТС. Для каждого варианта структуры ЭИ с учетом всех технико-экономических характеристик типоразмеров оборудования и физико-химического состава топлива были рассчитаны капиталовложения, эксплуатационные расходы и выбросы вредных веществ (твердые частицы, окись серы, окись азота, двуокись углерода, бенз(а)пирен), выбор оборудования был произведен на расчетную тепловую нагрузку с учетом нормативных документов [3].

Для задачи (7)-(13) были построены часовые графики тепловых (Рисунок 4) и электрических нагрузок (Рисунок 5), характеризующие представительные дни различных сезонов года. Представительные дни выбирались на основе анализа природно-климатических данных для места расположения для за период 10 лет. Выбор представительных дней осуществлялся с помощью сервисов получения и анализа временных рядов. Решение задачи (7)-(13) происходило с помощью сервиса структурно-параметрическая оптимизация ПТС. Результаты оптимизации приведены на Рисунке 6, где красным шрифтом выделены оптимальные варианты. Оба вышеуказанных сервиса входят в состав цифровой платформы экологического мониторинга БПТ [1].

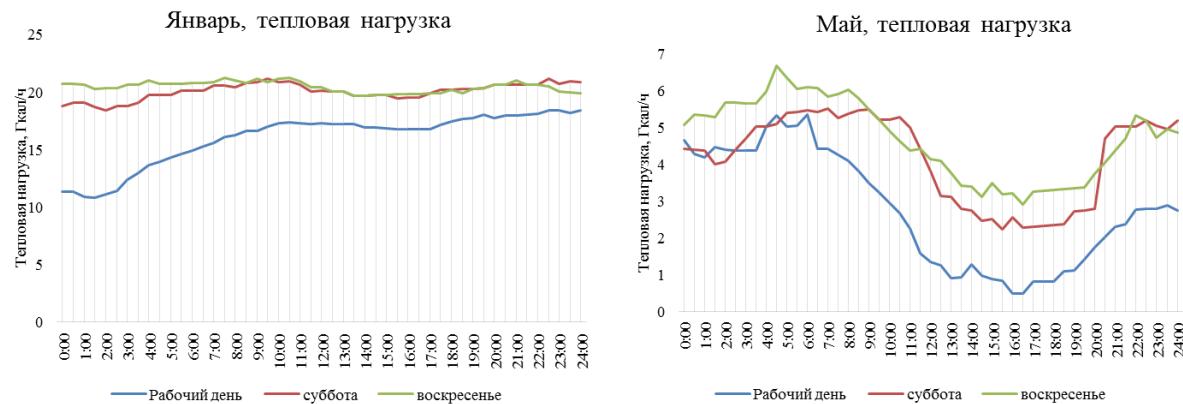


Рисунок 4: Графики часовой тепловой нагрузки представительных дней января и мая

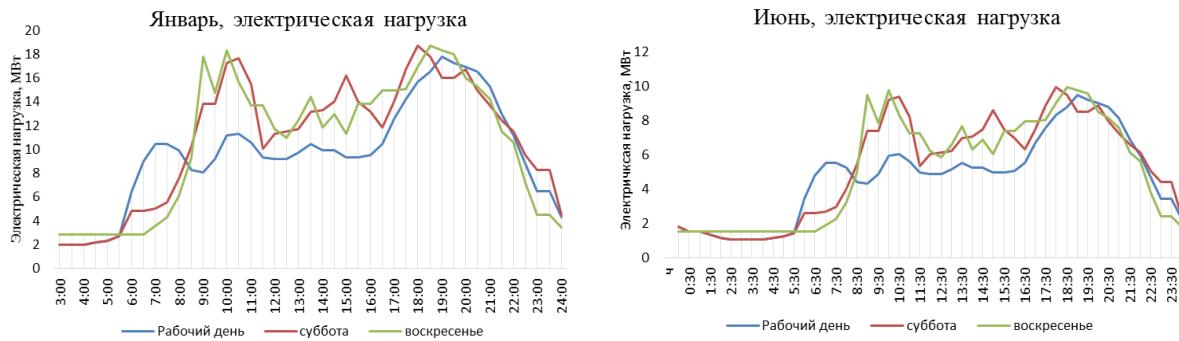


Рисунок 5: Графики часовой электрической нагрузки представительных дней января и июня

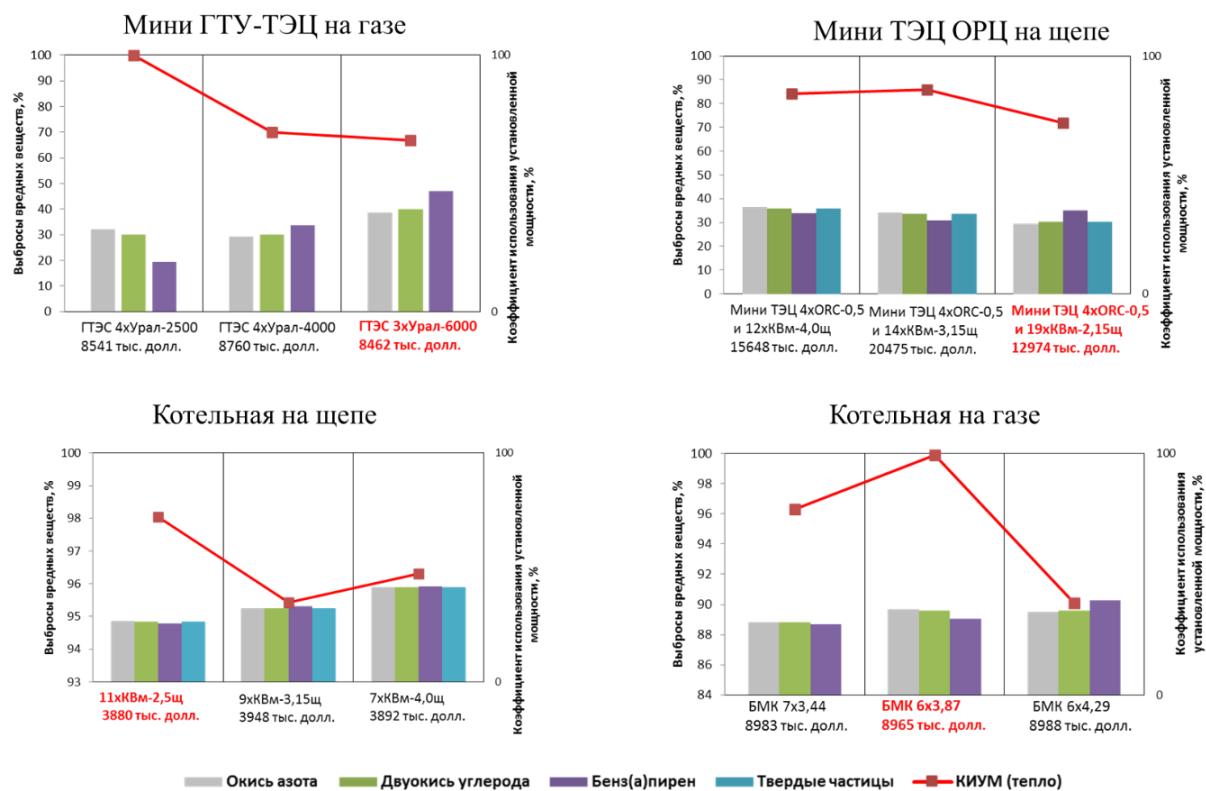


Рисунок 6: Результаты структурно-параметрической оптимизации структур ЭИ

Если сравнить оптимальные варианты между собой (Рисунок 7), можно выделить высокую степень технической эффективности и сравнительно недорогую стоимость вариантов котельных на щепе и на газе с покупкой электроэнергии из внешней энергосистемы. Варианты комбинированной выработки тепла и электроэнергии проигрывают вследствие увеличения мощности ЭИ для выработки электроэнергии (учитывалось полное покрытие потребности в перспективной электроэнергетической нагрузке поселка) и возрастания в связи с этим валовых выбросов вредных веществ, а также увеличения затрат. Кроме этого, анализируя коэффициент использования установленной мощности (КИУМ), выбранные типоразмеры оборудования по комбинированным источникам не будут обеспечивать оптимальную загрузку и эффективную работу оборудования ЭИ в течение года.

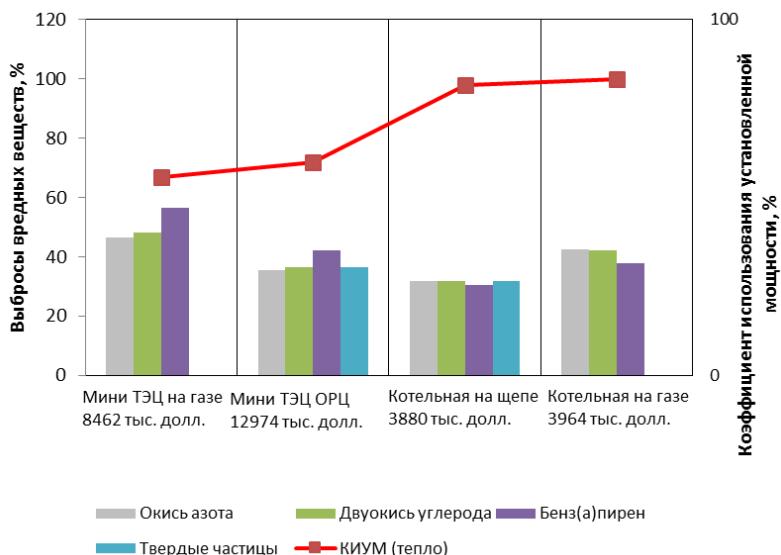


Рисунок 7: Сравнение оптимальных вариантов ЭИ

4. Выводы

Системы теплоснабжения являются одним из представителей ПТС, расположенных на территории БПТ. Традиционные энергоисточники систем теплоснабжения, сжигающие топливо для выработки тепла и электричества, относятся к экологически опасным объектам, вследствие чего необходимо оценивать влияние развития данных ПТС на экологию БПТ. Сделать это можно различными путями. В данной статье рассматривается внедрение учёта объёмов выбросов вредных веществ в постановку задачи структурно-параметрической оптимизации энергоисточников.

Предлагаемый в статье подход апробирован на примере развития схемы энергоснабжения небольшого поселка, находящегося на территории БПТ. Рассмотрено 4 варианта энергоснабжения, каждый из которых включает три типоразмера основного оборудования энергоисточников. Анализ вариантов производился на основе сравнения коэффициентов использования установленной мощности и объёмов выбросов вредных веществ, таких как твердые частицы, окись азота, двуокись углерода, бенз(а)пирен. Подготовка исходных данных и решение задачи структурно-параметрической оптимизации осуществлялась с помощью сервисов цифровой платформы экологического мониторинга БПТ.

5. Благодарности

Работа выполнена в рамках гранта № 075-15-2024-533 Министерства науки и высшего образования РФ на выполнение крупного научного проекта по приоритетным направлениям научно-технологического развития (проект «Фундаментальные исследования Байкальской природной территории на основе системы взаимосвязанных базовых методов, моделей, нейронных сетей и цифровой платформы экологического мониторинга окружающей среды», рег. № 124052100088-3).

6. Список литературы

- [1] Цифровой мониторинг Байкальской природной территории. URL: <https://baikal-project.icc.ru/>.
- [2] Т. К. Салина, Концептуальный подход к управлению устойчивым развитием ТЭК Северо-Западного федерального округа, Журнал экономической теории, 2016, № 4, с. 80–91.

- [3] Справочник по проектированию котельных установок систем централизованного теплоснабжения: (общие вопросы проектирования и основное оборудование). – М.: Энергия, 1979. – 224 с.
- [4] V. A. Stennikov, O. A. Edeleva, E. A. Barakhtenko and D. V. Sokolov Methodological Approach to the Integrated Optimization of the Heat-Source Structure in the Problems of Developing Heat-Supply Systems // Thermal Engineering. – 2020. Vol. 67, No. 12, pp. 935-946. DOI: 10.1134/S0040601520120083
- [5] Almassalkhi, M. Optimization framework for the analysis of large-scale networks of energy hubs / M. Almassalkhi, I. Hiskens // 17th Power System Computation Conference (Stockholm, Sweden, August 22-26 2011). – 2011. – 7 p.
- [6] Edeleva O., Mikheev A. and Stennikov A. An Approach for Efficient Heat Source Selection in Long-Term Expansion Planning of Urban District Heating Systems // Mathematical Models and Methods of the Analysis and Optimal Synthesis of the Developing Pipeline and Hydraulic Systems, 2022. 3S Web Conf., Volume 397, 2023, DOI 10.1051/e3sconf/202339702002