

## Научная статья

УДК 338.2

DOI: 10.25683/VOLBI.2024.68.1067

Sergey Yurievich Balakhonov

Applicant of the Department of Economics in Power Engineering and Industry, scientific specialty

5.2.3 — Regional and sectoral economy,

Senior Lecturer of the Department of Advertising,

Public Relations and Linguistics,

National Research University “MPEI”

Moscow, Russian Federation

syb-mpei@rambler.ru

Сергей Юрьевич Балахонов

соискатель кафедры экономики в энергетике и промышленности, научная специальность

5.2.3 — Региональная и отраслевая экономика,

старший преподаватель кафедры рекламы связей

с общественностью и лингвистики,

Национальный исследовательский университет «МЭИ»,

Москва, Российская Федерация

syb-mpei@rambler.ru

## ЭКОНОМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ФОРМИРОВАНИЯ ИНТЕГРИРОВАННЫХ ЭНЕРГОСИСТЕМ НА БАЗЕ ГОРОДСКИХ КОМБИНИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ

5.2.3 — Региональная и отраслевая экономика

**Аннотация.** Исследование посвящено рассмотрению экономических аспектов формирования интегрированных энергосистем на базе городских комбинированных источников энергии, осуществляющих производство тепла и электроэнергии в едином производственном цикле. В соответствии с разработанной моделью интегрированной энергосистемы предложена концепция развития тепло-электроэнергетической интеграции на уровне потребления энергии и перехода ее в ресурсно-тепло-электроэнергетическую интеграцию, позволяющую усилить синергетический эффект от совместного планирования отпуска энергетической продукции и реализовать потенциал возможного замещения одного вида энергии другим при управлении потребителем своей нагрузкой для решения задач снижения стоимости энергоснабжения и повышения его надежности. Показано, что для реализации предложенной модели интегрированной энергосистемы необходимо расширить основные виды производственно-хозяйственной деятельности комбинированного источника энергии в городском энергоснабжении и создать условия для реализации преимуществ комплексного энергоснабжения с учетом взаимозаменяемости энергетической продукции для активного потребителя. Для исследования модели интегрированной

энергосистемы рассмотрено применение теории энергетических хабов, ввиду своей наглядной графической интерпретации являющейся одним из наиболее привлекательных инструментов изучения интеграционных процессов систем энергетики. Предложены методы анализа энергобаланса системы энергообеспечения и оценки предельной стоимости конечной энергии, отпускаемой интегрированной энергосистемой при различной ее продуктовой структуре, позволяющие провести сравнительную оценку эффективности формирования интегрированной энергосистемы с другими схемами энергообеспечения города. Установлено, что развитие городского энергоснабжения по пути интеграции позволит высвободить мощности и снизить потребность в строительстве новых станций и сетей, а применение нескольких типов энергоносителей обеспечит повышение экономической доступности энергетической продукции за счет ее вариации и активного поведения потребителей.

**Ключевые слова:** интегрированная энергосистема, комбинированный источник энергии, городское энергоснабжение, ресурсно-тепло-электроэнергетическая интеграция, моделирование, теория энергетических хабов, продуктовая структура, энергобаланс, затраты конечной энергии, предельная стоимость энергии, экономическая доступность

Для цитирования: Балахонов С. Ю. Экономические аспекты формирования интегрированных энергосистем на базе городских комбинированных источников энергии // Бизнес. Образование. Право. 2024. № 3(68). С. 86—90. DOI: 10.25683/VOLBI.2024.68.1067.

## Original article

## ECONOMIC ASPECTS OF FORMING INTEGRATED ENERGY SYSTEMS BASED ON URBAN COMBINED ENERGY SOURCES

5.2.3 — Regional and sectoral economy

**Abstract.** The study is devoted to the consideration of the economic aspects of forming integrated energy systems based on urban combined energy sources that produce heat and electricity in a single production cycle. In accordance with the developed model of an integrated energy system, a concept has been proposed for the development of heat-electric power integration at the level of energy consumption and its transition to resource-heat-electric power integration, which makes it possible to enhance the synergistic effect from the joint planning of energy products supply and realize the potential of the possible replacement of one type of energy with another allowing a consumer

to manage its load to solve the problems of reducing the cost of energy supply and increasing its reliability. It is shown that in order to implement the proposed model of an integrated energy system, it is necessary to expand the main types of production and economic activities of a combined energy source in urban energy supply and create conditions for realizing the benefits of integrated energy supply, taking into account the interchangeability of energy products for an active consumer. To study the model of an integrated energy system, the application of the theory of energy hubs is considered, which, due to its clear graphical interpretation is one of the most attractive tools for studying the integration

*processes of energy systems. Methods are proposed for analyzing the power balance of the energy supply system and estimating the marginal cost of the final energy supplied by the integrated energy system with its different product structure, allowing for a comparative assessment of the effectiveness of the formation of the integrated energy system with other urban energy supply schemes. It has been established that the development of urban energy supply through the integration will free up capacity and*

*reduce the need for the construction of new power plants and transport networks, and the use of several types of energy carriers will ensure increased economic accessibility of energy products due to their variation and active behavior of consumers.*

**Keywords:** *integrated energy system, combined energy source, urban energy supply, resource-heat-electricity integration, modeling, theory of energy hubs, product structure, power balance, final energy costs, marginal cost of energy, economic accessibility*

**For citation:** Balakhonov S. Yu. Economic aspects of forming integrated energy systems based on urban combined energy sources. *Biznes. Obrazovanie. Pravo = Business. Education. Law.* 2024;3(68):86—90. DOI: 10.25683/VOLBI.2024.68.1067.

## Введение

**Актуальность.** Энергетическая отрасль несет социальную нагрузку в виде обеспечения экономической доступности энергии для потребителя. На уровне города основной энергетической продукцией является природный газ, используемый в бытовых и технологических целях, а также электроэнергия и тепло, получаемые в процессе его преобразования на электрических и тепловых станциях. Среди станций особую роль играют комбинированные источники энергии (теплоэлектроцентрали, ТЭЦ), реализующие концепцию тепло-электроэнергетической интеграции, что позволяет за счет производства электроэнергии и тепла в едином цикле повысить эффективность использования топлива до 82 % и снижает стоимость энергии для потребителя.

Несмотря на преимущества тепло-электроэнергетической интеграции, ее роль в системе городского энергоснабжения в последние годы снижается. Это уже привело к экспоненциальному росту цен на отпускаемую энергетическую продукцию. Такая ситуация вызвана сложившимися правилами функционирования генерации на оптовом энергорынке, не позволяющими реализовать преимущества совместной выработки продукции на ТЭЦ, и недостаточной реализации ее потенциала в части интеграции систем городского энергоснабжения.

Решение вышеперечисленных проблем возможно за счет формирования интегрированных энергосистем на базе ТЭЦ путем расширения их основных видов деятельности и создания условий для реализации преимуществ комплексного снабжения потребителей энергетической продукцией с учетом ее взаимозаменяемости. Под интегрированной энергосистемой понимается объединение объектов городского энергетического комплекса в единую метасистему, в рамках которой осуществляется совместное планирование систем газо-, тепло- и электроснабжения с учетом наличия сложной взаимосвязи между режимами их работы и отпускаемой ими энергетической продукции. Это позволит сдерживать рост цен для потребителей за счет реализации синергетического эффекта от совместного производства энергетической продукции и усилить межпродуктовую конкуренцию между ее видами.

**Изученность проблемы.** Исследованием экономических аспектов развития городских систем энергоснабжения занимались такие ученые, как Т. А. Макареня [1], Ю. Е. Николаев [2], С. В. Жарков [3]. В своих работах авторы отмечают, что снижение экономической доступности энергетической продукции для потребителей, в первую очередь, связаны с ростом капитальных и эксплуатационных затрат на обслуживание городской энергосистемы.

Интеграционным процессам в городских энергосистемах существенное внимание уделено в трудах Н. И. Воропая [4], В. А. Стенникова [5], Е. В. Сердюковой [6]. Отмечается, что целью формирования интегрированных энергосистем

является организация комплексного энергоснабжения потребителей при обеспечении высокого КПД производства энергетической продукции с возможностью замещения ее одного вида другим. В то же время методическое обеспечение их создания на сегодняшний день не проработано.

Роли комбинированных источников энергии в организации комплексного энергоснабжения городских потребителей посвящены работы Н. Д. Рогалева [7], В. В. Молодюка [8], Е. М. Лисина [9]. В своих исследованиях авторы делают акцент на том, что ТЭЦ являются системообразующим объектом городского энергетического комплекса. При этом отмечается, что ТЭЦ должна иметь гарантированный сбыт электроэнергии, что в рыночных условиях возможно только при ее работе на розничном рынке.

Таким образом, остаются нерешенными следующие вопросы:

- разрозненность планирования городского энергоснабжения, когда при планировании одной из его подсистем не учитывается влияние другой;
- слабая реализация интеграционного потенциала ТЭЦ;
- неразвитость розничных рынков энергии.

**Цель** исследования состоит в проведении оценки эффективности формирования интегрированных энергосистем на базе комбинированных источников энергии с позиции снижения затрат на энергоснабжение потребителей. Для достижения цели необходимо решить следующие **задачи**: сформировать модель интегрированной энергосистемы на базе комбинированного источника энергии; провести анализ сравнительной эффективности организации энергоснабжения потребителей от интегрированной энергосистемы; оценить возможное снижение стоимости конечной энергии для потребителя за счет интеграции энергоснабжения.

**Научная новизна** исследования заключается в формировании модели интегрированной энергосистемы и методов экономической оценки ее эффективности на основе анализа совокупных затрат энергии на энергоснабжение потребителей и ее стоимости.

**Теоретическая значимость** работы заключается в расширении моделей и методов исследования интеграционных процессов в энергетике. Предложенные разработки способствуют развитию методического обеспечения формирования интегрированных энергосистем и обоснования их эффективности.

**Практическая значимость** обусловлена возможностью использования результатов государственными органами управления электроэнергетикой для решения задачи обеспечения экономической доступности энергетической продукции для потребителей. Также они представляют ценность для электроэнергетических холдингов, осуществляющих планирование своего развития на основе реализации экономических преимуществ топливно-энергетической интеграции.

**Основная часть**

**Методы и материалы исследования.** Наиболее привлекательным инструментом моделирования интегрированных энергосистем является теория энергетических хабов ввиду наглядности получаемых моделей и простой интерпретации физических взаимосвязей элементов системы энергоснабжения потребителей [10]. Энергетический хаб представляет собой промежуточное звено между производителями и поставщиками энергоносителей, с одной стороны, и потребителями различного вида конечной энергии, с другой стороны [11]. Он имеет несколько входов и выходов, а внутри хаба происходит преобразование энергоресурсов в энергетическую продукцию, ее накопление и распределение. При этом в хабе энергоресурсы могут передаваться от входа к выходу без изменения формы.

Основные положения теории рассмотрены в работах научной группы из Высшей технической школы Цюриха (Швейцария) в проекте *Vision of Future Energy Networks* [12]. Он был направлен на решение задачи определения структуры интегрированной энергосистемы в долгосрочной перспективе при исследовании способности ее адаптации к изменению спроса потребителей на различные виды энергетической продукции.

В математической модели энергетического хаба принимаются следующие допущения:

- энергохаб состоит из накопителей, преобразователей и систем передачи энергии;
- энергетические потоки направлены от входа к выходу энергохаба и характеризуются мощностью и коэффициентом полезного действия.

Структура энергохаба состоит из четырех частей [11; 13]:

1. Входы — потоки энергоресурсов от поставщика энергоносителей.
2. Преобразователи — видоизменение энергоресурсов или их параметров.
3. Накопитель — хранение запасов топлива и накопление энергии.
4. Выходы — потоки энергетической продукции, поступающей из хаба к потребителям.

Целевыми критериями при определении наилучшей структуры энергохаба могут быть [14]:

- снижение потребления энергоносителей;
- повышение экономической доступности энергетической продукции;
- выравнивание графиков нагрузок;
- повышение надежности снабжения потребителей.

Для проведения модельных исследований применяют следующий алгоритм:

1. Определяют входную и выходную мощности.
2. Задают выходы преобразователей энергии как функции их входов.
3. Рассчитывают балансы узловых энергий на выходе преобразователей.

**Результаты и обсуждение исследования.** В соответствии с теорией энергетических хабов была сформирована модель интегрированной энергосистемы, организованной на базе городского комбинированного источника энергии (см. рис. 1).

Газ поступает на комбинированный источник энергии с давлением в диапазоне 0,6—1,2 МПа. Для его понижения

используется газорегуляторный пункт (ГРП). Если классический ГРП понижает давление с помощью дросселирования, то интеграция газо- и электроснабжения предполагает применение детандер-генераторной установки (ДГУ), позволяющей вырабатывать электроэнергию за счет разницы давления. При этом природный газ охлаждается и его можно накапливать в резервуаре в сжиженном виде. Как топливо газ используется для производства тепла и электроэнергии в комбинированном цикле. В силу различия графиков потребления тепла и электроэнергии используются накопители тепловой энергии в виде баков-аккумуляторов сетевой воды (АСВ). Они усиливают интеграцию на уровне производства тепла и электроэнергии [15].



Рис. 1. Модель интегрированной энергосистемы на базе комбинированного источника энергии (составлено автором)

Для исследования эффективности модели был разработан метод оценки суммарных затрат конечной энергии на основе анализа энергобаланса. В табл. 1 приведены составляющие энергобаланса интегрированной энергосистемы.

Таблица 1

**Составляющие энергобаланса интегрированной энергосистемы**

Поступающая энергия	Средства преобразования и транспортировка	Потребление энергии
1. Природный газ. 2. Электроэнергия	1. Централизованное теплоснабжение. 2. Газоснабжение. 3. Электроснабжение	1. Отопление. 2. ГВС. 3. Технологические и бытовые потребности

Эффективность организации энергоснабжения от интегрированной энергосистемы (ИС) необходимо рассматривать через призму формирования потребителем собственных преобразователей и источников энергии. Были выделены восемь различных вариантов структуры энергоснабжения потребителей, включающие использование ими газовых (Г) и электрических (Э) котлов для отопления, ГВС, технологических и бытовых нужд (см. табл. 2).

Таблица 2

**Варианты структуры энергоснабжения потребителей с учетом формирования интегрированной энергосистемы**

Нужды	Варианты							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Отопление	ИС (г)	ИС (г)	ИС (г)	Г	ИС (г)	ИС (г)	Г	Г
ГВС	ИС (г)	ИС (г)	Г	Г	Г	Э	Э	Э
Технические и бытовые нужды	ИС (г)	ИС (э)	ИС (г)	ИС (э)	ИС (э)	ИС (э)	ИС (э)	ИС (г)

Задачу выбора наилучшей структуры системы энергообеспечения города можно представить как выбор такой схемы, которая обеспечивает минимум затрат энергии с учетом потерь:  $Q_n^0 = \min_v Q_n^v$ . Система уравнений примет следующий вид:

$$Q_n^v = \begin{cases} (Q_1^h + Q_2^h + L^h(r^h)) / \mu^{chpH} + Q^g, v = 1 \\ (Q_1^h + Q_2^h + L^h(r^h) + Q^p + L^p(r^p)) / \mu^{chp}, v = 2 \\ (Q_1^h + L^h(r^h)) / \mu^{chpH} + Q_2^h / \mu^g + Q^g, v = 3 \\ (Q_1^h + Q_2^h) / \mu^g + (Q^p + L^p(r^p)) / \mu^{chpP}, v = 4 \\ (Q_1^h + L^h(r^h) + Q^p + L^p(r^p)) / \mu^{chp} + Q_2^h / \mu^g, v = 5 \\ (Q_1^h + L^h(r^h) + Q^p + Q_2^h / \mu^{ph} + L^p(r^p)) / \mu^{chp}, v = 6 \\ Q_1^h / \mu^g + (Q^p + Q_2^h / \mu^{ph} + L^p(r^p)) / \mu^{chpP}, v = 7 \\ Q_1^h / \mu^g + (Q_2^h / \mu^{ph} + L^p(r^p)) / \mu^{chpP} + Q_g, v = 8 \end{cases} \quad (1)$$

где  $Q_1^h$  — количество теплоты на источнике для нужд отопления от ИС;  $Q_2^h$  — количество теплоты на источнике для нужд ГВС от ИС;  $L^h(r^h)$  — потери в теплосетях в зависимости от расстояния;  $\mu^h$  — КПД источника тепла;  $Q^p$  — количество теплоты на источнике для выработки электроэнергии;  $L^p(r^p)$  — потери при передаче электроэнергии;  $\mu^p$  — КПД централизованного источника электроэнергии;  $Q^g$  — расход газа на технологические и бытовые нужды;  $Q_2^h$  — количество теплоты, выработанной газовым котлом;  $\mu^g$  — КПД газового котла;  $\mu^{ph}$  — КПД электрического котла.

Результаты оценки суммарных затрат энергии показали, что интегрированная энергосистема обеспечивает экономию 15—68 % в зависимости от альтернативного варианта энергообеспечения.

На экономическую доступность энергетической продукции влияет также ее цена. Для исследования ее влияния анализ энергобаланса дополнен методом оценки предельной стоимости конечной энергии (см. рис. 2).

Математически метод представляет собой задачу динамического программирования:

$$C(Q) = \min [C_g(Q_g) + C_e(Q_e) + C_h(Q_h)]; \quad (2)$$

$$\begin{cases} C_g(Q_g) = P_g(Q_g)Q_g = [k_g s_g + i_g]Q_g = k_g s_g Q_g + I_g \\ C_e(Q_e) = P_e(Q_e)Q_e = [k_e s_e(s_h) + i_e]Q_e = k_e s_e(s_h)Q_e + I_e \\ C_h(Q_h) = P_h(Q_h)Q_h = [k_h s_h(s_e) + i_h]Q_h = k_h s_h(s_e)Q_h + I_h \\ Q_g + Q_e + Q_h = Q \\ Q_g^{\min} \leq Q_g \leq Q_g^{\max}, Q_e^{\min} \leq Q_e \leq Q_e^{\max}, Q_h^{\min} \leq Q_h \leq Q_h^{\max} \\ P_g(Q_g) \leq T_g(Q_g), P_e(Q_e) \leq P_0(Q_e), P_h(Q_h) \leq P_{ha}(Q_h) \end{cases} \quad (3)$$

где  $Q$  — требуемая тепловая мощность ИС;  $Q_g, Q_e, Q_h$  — распределение мощности по производствам;  $C_g(Q_g), C_e(Q_e), C_h(Q_h)$  — полные затраты по подсистемам ИС.

Модельные расчеты показали, что формирование интегрированной энергосистемы только по системе теплоснабжения позволит снизить стоимость тепла относительно тарифа альтернативной котельной в среднем на 15 %.

Преимуществом предложенных методов является возможность оценки эффективности интегрированной системы энергообеспечения при изменении ее энергобаланса за счет частичного замещения потребителем одного вида энергетической продукции другой ввиду изменения ее стоимости. Формирование интегрированной энергосистемы на основе городского комбинированного источника энергии показало свою экономическую состоятельность и способность сдерживать рост стоимости энергии для потребителя.

### Выводы

Интеграция систем городского энергообеспечения является одним из способов сдерживания цен на энергетическую продукцию за счет реализации синергетического эффекта при централизации производственных процессов.

На уровне города интегрированную энергосистему возможно организовать на основе комбинированного источника энергии, расширив основные виды его производственно-хозяйственной деятельности. Предложена модель городской интегрированной энергосистемы, позволяющая обеспечить развитие тепло-электроэнергетической интеграции на уровне потребления энергии и переход ее в ресурсно-тепло-электроэнергетическую интеграцию.

Для проведения сравнительной оценки эффективности формирования интегрированной энергосистемы на базе комбинированного источника с другими схемами энергообеспечения города был разработан метод анализа энергобаланса системы энергообеспечения. Его применение показало, что интегрированная энергосистема обеспечивает экономию теплоты топлива относительно других вариантов энергообеспечения городских потребителей. С учетом того, что на доступность энергетической продукции влияют не только затраты энергии, но и цена единицы каждого ее вида, на примере системы теплоснабжения установлено, что формирование интегрированной энергосистемы снижает стоимость энергии для потребителя.

Развитие городского энергообеспечения по пути интеграции систем и процессов позволит высвободить мощности и снизить потребность в строительстве новой генерации и сетей, а применение нескольких типов энергоносителей обеспечит снижение стоимости энергетической продукции.

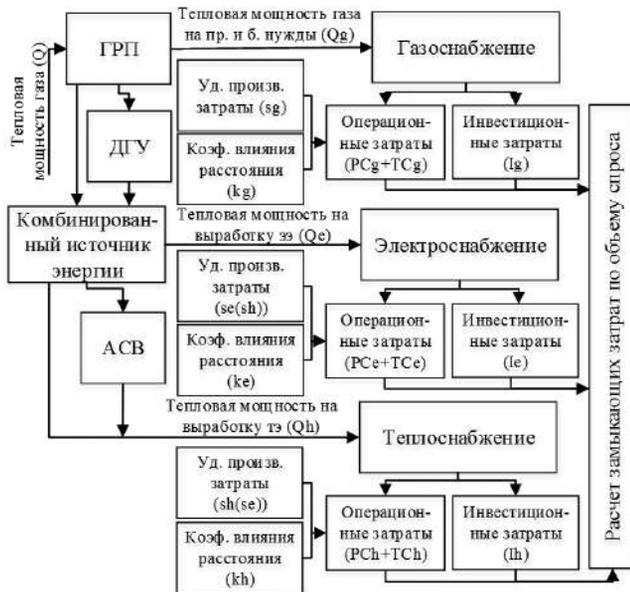


Рис. 2. Метод оценки предельной стоимости энергии интегрированной энергосистемы (составлено автором)

### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Макареня Т. А. Проблемы развития эффективной системы энергосбережения в крупных городах // Региональная экономика: теория и практика. 2011. № 10. С. 2—7.

2. Николаев Ю. Е., Дубинин А. Б., Вдовенко И. А., Сирдюков С. В. Развитие теплофикации в схемах теплоснабжения малых городов // *Промышленная энергетика*. 2013. № 7. С. 2—4.
3. Жарков С. В. Методы оценки эффективности комбинированных производств с акцентом на системы энергоснабжения // *Экономист*. 2016. № 6. С. 41—59.
4. Воропай Н. И. Направления и проблемы трансформации электроэнергетических систем // *Электричество*. 2020. № 7. С. 12—21. DOI: 10.24160/0013-5380-2020-7-12-21.
5. Стенников В. А., Барахтенко Е. А., Майоров Г. С. Управление распределением нагрузки между централизованной и распределенной генерацией в интегрированной энергетической системе с применением мультиагентных технологий // *Промышленная энергетика*. 2021. № 10. С. 2—8.
6. Сердюкова Е. В. Принципы преобразования в интегрированной энергетической системе при применении концепции энергетического хаба // *Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова*. 2021. Т. 24. № 3. С. 88—96. DOI: 10.22213/2413-1172-2021-3-88-96.
7. Рогалев Н. Д., Зубкова А. Г., Фрей Д. А. Планирование производственной программы ТЭЦ в условиях развития конкурентных отношений на энергорынках // *Инновации*. 2007. № 1. С. 77—81.
8. Молодюк В. В. Математическая модель работы ТЭЦ на рынке электроэнергии и тепла // *Энергетик*. 2014. № 11. С. 12—16.
9. Лисин Е., Рогалев Н., Оклеп П. Разработка модели оценки влияния структуры производственных мощностей энергосистемы на региональную энергобезопасность // *Terra Economicus*. 2019. Т. 17. № 2. С. 96—111. DOI: 10.23683/2073-6606-2019-17-2-96-111.
10. Исследование мультиэнергетического объекта методами имитационного моделирования / Н. И. Воропай, Е. В. Уколова, Д. О. Герасимов и др. // *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2018. Т. 22. № 12. С. 157—168. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-12-157-168.
11. Еделева О. А. Использование теории хабов в задачах оптимизации энергоисточников городских территорий // *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2017. Т. 21. № 10. С. 95—105. DOI: 10.21285/1814-3520-2017-10-95-105.
12. Kienzle F., Favre-Perrod P., Arnold M., Andersson G. Multi-energy delivery infrastructures for the future // 2008 First international conference on infrastructure systems and services: Building networks for a brighter future (INFRA). IEEE, 2008. Pp. 1—5. DOI: 10.1109/INFRA.2008.5439681.
13. Замешаева И. С. Организационно-экономический механизм развития комплексного энергоснабжения территориальных потребителей на основе теории энергетических хабов // *Экономические науки*. 2022. № 4(209). С. 90—95. DOI: 10.14451/1.209.90.
14. Герасимов Д. О., Суслов К. В., Уколова Е. В. Принципы построения модели энергетического хаба // *Вестник Казанского государственного энергетического университета*. 2019. Т. 11. № 3. С. 3—13.
15. Лисин Е. М. Совершенствование системы управления развитием энергетического комплекса на территориальном уровне // *Вопросы экономики и права*. 2018. № 121. С. 65—70.

## REFERENCES

1. Makarenya T. A. The problem of the development of the efficient system power efficiency in large city. *Regional'naya ekonomika: teoriya i praktika = Regional Economics: Theory and Practice*. 2011;9(10):2—7. (In Russ.)
2. Nikolaev Yu. E., Dubinin A. B., Vdovenko I. A., Sirdyukov S. V. Development of cogeneration in heat supply schemes of small towns. *Promyshlennaya energetika*. 2013;7:2—4. (In Russ.)
3. Zharkov S. V. Methods for assessing the efficiency of combined production with an emphasis on energy supply systems. *Ekonomist*. 2016;6:41—59. (In Russ.)
4. Voropay N. I. Prospects and Problems of Electric Power System Transformations. *Elektrichestvo = Electricity*. 2020;7:12—21. (In Russ.) DOI: 10.24160/0013-5380-2020-7-12-21.
5. Stennikov V. A., Barakhtenko E. A., Mayorov G. S. Control of Load Distribution between Centralized and Distributed Generation in an Integrated Energy System Using Multi-Agent Technologies. *Promyshlennaya energetika*. 2021;10:2—8. (In Russ.)
6. Serdyukova E. V. Principles of Transformation in an Integrated Energy System when Applying the Concept of an Energy Hub. *Vestnik IzhGTU imeni M. T. Kalashnikova*. 2021;24(3):88—96. (In Russ.) DOI: 10.22213/2413-1172-2021-3-88-96.
7. Rogalev N. D., Zubkova A. G., Frei D. A. Planning the production program of a thermal power plant in the context of developing competitive relations in energy markets. *Innovatsii*. 2007;1:77—81. (In Russ.)
8. Molodyuk V. V. Mathematical model of a thermal power plant operation in the electricity and heat market. *Energetik*. 2014;11:12—16. (In Russ.)
9. Lisin E., Rogalev N., Okley P. The impact model of the production capacities structure of the energy system and the regional energy security. *Terra Economicus*. 2019;17(2):96—111. (In Russ.) DOI: 10.23683/2073-6606-2019-17-2-96-111.
10. Voropai N. I., Ukolova E. V., Gerasimov D. O. et al. Study of a multi-power facility by simulation modeling methods. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2018;22(12):157—168. (In Russ.) DOI: 10.21285/1814-3520-2018-12-157-168.
11. Edeleva O. A. Using hub-theory in optimization problems of urban energy sources. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2017;21(10):95—105. (In Russ.) DOI: 10.21285/1814-3520-2017-10-95-105.
12. Kienzle F., Favre-Perrod P., Arnold M., Andersson G. Multi-energy delivery infrastructures for the future. *2008 First international conference on infrastructure systems and services: Building networks for a brighter future (INFRA)*. IEEE, 2008:1—5. DOI: 10.1109/INFRA.2008.5439681.
13. Zameshaeva I. S. Organizational and economic mechanism for the development of integrated energy supply of territorial consumers based on the theory of energy hubs. *Ekonomicheskie nauki = Economic sciences*. 2022;4(209):90—95. (In Russ.) DOI: 10.14451/1.209.90.
14. Gerasimov D. O., Suslov K. V., Ukolova E. V. Principles of building a model energy cable. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta = Kazan State Power Engineering University Bulletin*. 2019;11(3):3—13. (In Russ.)
15. Lisin E. M. Improvement of management system development of energy complex at the territorial level. *Voprosy ekonomiki i prava = Economic and law issues*. 2018;121:65—70. (In Russ.)

Статья поступила в редакцию 24.06.2024; одобрена после рецензирования 27.07.2024; принята к публикации 05.08.2024.  
The article was submitted 24.06.2024; approved after reviewing 27.07.2024; accepted for publication 05.08.2024.