

Improving the Efficiency of Energy Production in a Distributed Island Power Supply System

Myshkina L.S., Nasibova E.M.
Novosibirsk State Technical University
Novosibirsk, Russian Federation

Abstract. Reliability and cost-effectiveness of energy supply are crucial for socio-economic development and investment attractiveness of territories. In areas where there is a high demand for thermal energy, one of the ways to improve energy efficiency is using cogeneration systems with mini-CHP (combined heat and power) plants powered by gas-piston units. The main challenges preventing the full potential of these systems from being realized are the mismatches between electrical and thermal load profiles. The aim of this research is to substantiate the method and choice of technical means for reducing the installed capacity of boiler equipment at a mini-CHP and increasing the utilization rate of installed capacities of heat and electric energy sources in distributed power supply systems. To achieve this goal, we completed the following tasks: an analysis of existing methods for increasing production efficiency and the application of efficiency criteria, as well as the development of a simulation model for a distributed supply system. A methodology was developed for selecting equipment and calculating efficiency indicators, including specific fuel consumption. The paper demonstrates the feasibility of technical solutions for increasing the flexibility of the system through the integration of various equipment, such as heat pumps and heat energy storage systems. A method for selecting a combination of thermal energy sources has been developed. This method allows us to calculate and compare performance indicators for various energy supply systems. To verify our proposed solutions, we applied them to a case study of a regional energy system in a town in the Novosibirsk region. The results confirmed the viability of our approach. The obtained results have practical significance for managing the development of distributed island power systems.

Keywords: efficiency, energy supply system, specific fuel consumption, installed capacity utilization factor, cogeneration, heat pump, electric boiler, heat storage system, centralized heat supply.

DOI: <https://doi.org/10.52254/1857-0070.2025.4-68.12>

UDC: 621.311

Îmbunătățirea eficienței producției de energie într-un sistem distribuit de alimentare cu energie electrică de tip insulă

Mășkina L.S., Nasibova E.M.

Universitatea Tehnică de Stat din Novosibirsk Novosibirsk, Federația Rusă

Rezumat. Fiabilitatea și rentabilitatea aprovizionării cu energie sunt cruciale pentru dezvoltarea socio-economică și atractivitatea investițională a teritoriilor. În zonele în care există o cerere mare de energie termică, una dintre cele mai promițătoare modalități de îmbunătățire a eficienței energetice este utilizarea sistemelor de cogenerare cu mini-centrale de cogenerare (CHP) alimentate de unități cu piston pe gaz. Principalele provocări care împiedică realizarea întregului potențial al acestor sisteme sunt neconcordanțele dintre profilurile de sarcină electrică și termică. Scopul acestei cercetări este de a fundamenta metoda și alegerea mijloacelor tehnice pentru reducerea capacității instalate a echipamentelor de cazane la o mini-CHP și creșterea ratei de utilizare a capacităților instalate ale surselor de energie termică și electrică în sistemele de alimentare distribuită cu energie. Pentru a atinge acest obiectiv, am finalizat următoarele sarcini: o analiză a metodelor existente pentru creșterea eficienței producției și aplicarea criteriilor de eficiență, precum și dezvoltarea unui model de simulare pentru un sistem de alimentare distribuită. A fost elaborată o metodologie pentru selectarea echipamentelor și calcularea indicatorilor de eficiență, inclusiv consumul specific de combustibil. Lucrarea demonstrează fezabilitatea soluțiilor tehnice pentru creșterea flexibilității sistemului prin integrarea diverselor echipamente, cum ar fi pompele de căldură și sistemele de stocare a energiei termice. A fost dezvoltată o metodă pentru selectarea unei combinații de surse de energie termică. Această metodă ne permite să calculăm și să comparăm indicatorii de performanță pentru diverse sisteme de alimentare cu energie. Pentru a verifica soluțiile propuse, le-am aplicat unui studiu de caz al unui sistem energetic regional dintr-un oraș din regiunea Novosibirsk. Rezultatele au confirmat viabilitatea abordării noastre. Aceste constatări sunt relevante pentru managementul sistemelor energetice regionale, deoarece oferă o modalitate de a îmbunătăți eficiența energetică. Acest lucru ajută la asigurarea viabilității economice a energiei și a alimentării neîntrerupte.

Cuvinte-cheie: eficiență energetică, sistem de alimentare cu energie, consum specific de combustibil, factor de utilizare a capacității instalate, cogenerare, cazan electric, sistem de stocare a căldurii, alimentare centralizată cu căldură, metodologie.

Повышение эффективности производства энергии в распределенной островной системе энергоснабжения

Мышкина Л.С., Насибова Е.М.

Новосибирский государственный технический университет

Новосибирск, Российская Федерация

Аннотация. Надежность и экономическая доступность энергоснабжения являются фундаментальными факторами социально-экономического развития и инвестиционной привлекательности территорий. На территориях, характеризующихся высоким спросом на тепловую энергию, наиболее перспективным решением для повышения эффективности энергопроизводства является переход к когенерации посредством мини-ТЭЦ на основе газопоршневых установок. Однако ключевым ограничением, препятствующим реализации потенциала таких систем, является несовпадение профилей электрической и тепловой нагрузки. Это приводит к снижению эксплуатационной эффективности когенерационного оборудования. Целью исследования является обоснование способа и выбор технических средств для снижения установленной мощности котельного оборудования на мини-ТЭЦ и повышения коэффициента использования установленных мощностей источников выработки тепловой и электрической энергии в распределенных системах энергоснабжения. Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи: произведен анализ существующих способов повышения эффективности производства и применяемых критериев эффективности; разработана имитационная модель распределенной системы теплоснабжения; создана методика выбора структуры оборудования и расчёта показателей эффективности, включая удельный расход топлива. В работе показана целесообразность технических решений повышения гибкости системы за счет интеграции различного оборудования, включая тепловые насосы и системы накопления тепловой энергии. Наиболее важным результатом является методика выбора состава источников тепловой энергии. Применение данной методики обеспечивает возможность рассчитывать и сопоставлять показатели эффективности различных системах энергоснабжения. Верификация предложенных решений на примере распределенной системы энергоснабжения населенного пункта в Новосибирской области подтвердила ее состоятельность. Было продемонстрировано повышение коэффициента использования установленных мощностей газопоршневого оборудования при одновременном снижении требуемой мощности котельного оборудования. Полученные результаты имеют практическое значение для управления развитием распределенных островных энергосистем. Они предоставляют инструментарий для повышения эффективности производства энергии и одновременного увеличения энергосбережения при ее транспортировке, что в совокупности способствует обеспечению экономической доступности энергии и бесперебойности энергоснабжения для конечных потребителей.

Ключевые слова: эффективность, система энергоснабжения, удельный расход топлива, коэффициент использования установленной мощности, когенерация, тепловой насос, электрический котел, система накопления тепла, централизованное теплоснабжение.

ВВЕДЕНИЕ

Энергоснабжение, определяемое как процесс обеспечения потребителей энергоресурсами, включая первичные энергоносители и преобразованные виды энергии, является основой функционирования современного общества [1]. В общем виде данный процесс включает стадии производства, передачи, распределения и хранения энергии [2]. В контексте настоящего исследования энергоснабжение рассматривается как комплексное тепло- и электроснабжение территорий. Электрическая энергия представляет собой универсальный ресурс, необходимый для всех секторов экономики, в то время как тепловая энергия

имеет критическое значение для территорий с выраженной сезонностью.

Актуальность исследований, направленных на повышение энергоэффективности, энергосбережения и экологической безопасности систем тепло- и электроснабжения, обусловлена их прямой связью с социально-экономическим развитием территорий. Особую значимость эта проблема приобретает в странах, где централизованные системы теплоснабжения играют важную роль. На таких территориях спрос на тепловую энергию в 1,25–2 раза превышает спрос на электрическую, а пиковая тепловая нагрузка превосходит электрическую в 3–5 раз. Централизованные

системы теплоснабжения наиболее распространены в России, Белоруссии (70% доля), странах Скандинавии и Балтии: Дании (65%), Литве (56%), Словакии (53%), Эстонии (52%), Швеции (50%), Польше (42%) и Чехии (40%), (рис. 1).

Техническая политика в области энергоснабжения формируется под влиянием климатических, исторических и ресурсных особенностей. Существующие научные исследования можно условно разделить на два

направления: организационно-экономические и технико-технологические.

К первому направлению относятся исследования, анализирующие успешные примеры реализации энергетической политики на муниципальном уровне, стимулирующей городское развитие (например, в Дании, Германии, Нидерландах) [3], организационные инновации в управлении районными системами энергоснабжения [4] и усиление роли крупных генерирующих компаний в экономике регионов [5].

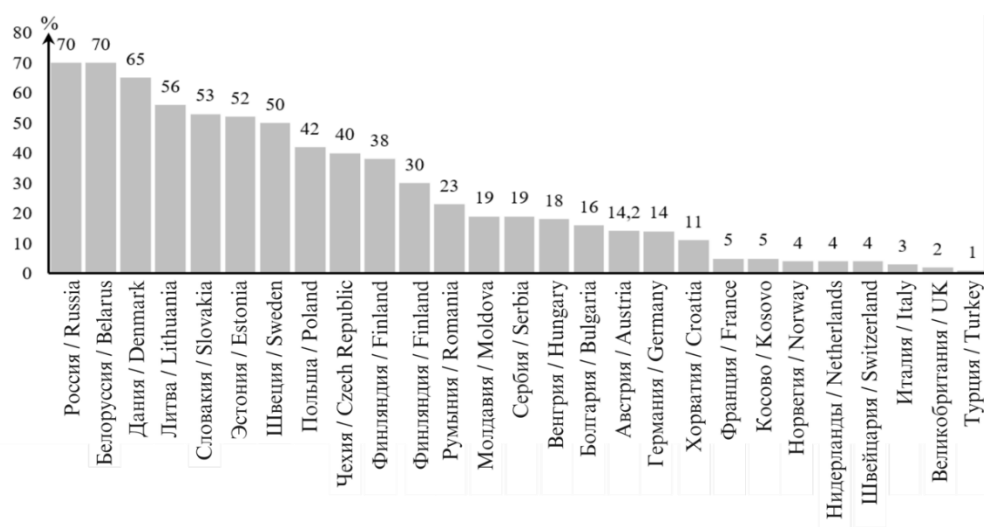


Рис. 1. Доля централизованного теплоснабжения в некоторых странах Европы и Средней Азии. ¹

Fig. 1. The share of district heating in some countries of Europe and Central Asia. ¹

Второе направление сфокусировано на технологических решениях. Здесь выделяются два основных вектора развития. Первый связан с декарбонизацией и переходом на возобновляемые источники энергии (ВИЭ) в рамках концепции распределенной генерации, часто в сочетании с системами накопления энергии [6]. Практические примеры реализации таких «умных» городских энергосистем существуют в Лондоне, Сингапуре, Барселоне и других мегаполисах [7]. Однако увеличение доли ВИЭ, несмотря на ресурсосбережение и снижение выбросов CO₂, предъявляет повышенные требования к точности прогнозирования выработки [8] и маневренности генерирующих мощностей [9].

Технологический вектор, остающийся крайне актуальным, направлен на повышение эффективности использования углеводородного топлива, на долю которого приходится около 84% мирового энергопотребления [10]. В условиях доступности ископаемых ресурсов, в

частности природного газа, приоритетным становится развитие когенерационных технологий малой мощности [11]. Этот подход предполагает формирование гибких систем энергоснабжения, интегрирующих углеводородные источники энергии, ВИЭ, накопители тепловой и электрической энергии (СНТЭ и СНЭЭ) [12-15] и интеллектуальные системы управления в рамках концепции «умного города» [16-20].

Широкое распространение получили мини-ТЭЦ, функционирующие на базе газопоршневых установок (ГПУ) и котельного оборудования [21-24]. Их высокая эффективность обусловлена комбинированной выработкой энергии, позволяющей утилизировать до 87% энергии первичного топлива, что почти вдвое превышает показатели раздельного производства тепловой и электрической энергии.

Внедрение когенерационных технологий малой мощности (до 25 МВт) на базе ГПУ

приводит к формированию распределенных систем энергоснабжения, в рамках которых электрическая и тепловая энергия для потребителей определенной территории производится на мини-ТЭЦ в непосредственной близости с потреблением. Отличительной особенностью является выдача электрической энергии и мощности потребителям энергорайона на среднем напряжении. При этом рассматривается островной режим работы, не предусматривающий возможность выдачи электрической энергии в другие энергорайоны через сети высокого напряжения. Распространенной практикой формирования подобных систем является трансформация существующих отопительных котельных.

Объектом исследования выступает распределенная система энергоснабжения, где основным источником является мини-ТЭЦ, включающая ГПУ общей мощностью до 25 МВт и котельное оборудование.

Предметом исследования является повышение технической эффективности мини-ТЭЦ в составе распределенной системы энергоснабжения, на которую влияют установленная мощность оборудования и режим работы ГПУ и котельного оборудования.

В качестве ключевого показателя эффективности рассматривается время использования установленной мощности ГПУ, величина которого определяет размер выработки тепловой энергии на ГПУ. Благодаря максимизации показателя снижается расход топлива на отпускаемые

тепло и электроэнергию. Основной энергетической характеристикой мини-ТЭЦ является удельный расход условного топлива (УРУТ), который зависит от выбора состава оборудования мини-ТЭЦ. Коэффициент использования установленной мощности (КИУМ) ГПУ определяет их загрузку и расход топлива на производство энергии. Выбор состава оборудования и его режим работы влияют на операционные (ОРЕХ) и капитальные (CAPEX) затраты в распределенной системе энергоснабжения.

Цель исследования — обоснование способа и выбор технических средств для снижения установленной мощности котельного оборудования на мини-ТЭЦ и повышения КИУМ источников выработки тепловой и электрической энергии в распределенных системах энергоснабжения.

МЕТОДЫ И СОПОСТАВЛЕНИЕ ВАРИАНТОВ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ

Значительной проблемой при функционировании когенерационных установок в распределенных системах энергоснабжения является существенное различие профилей потребления тепловой и электрической энергии (рис. 2).

График тепловой нагрузки, являясь относительно стабильным в суточном разрезе, характеризуется ярко выраженной сезонной неравномерностью. В то же время график электропотребления отличается значительной неравномерностью в суточном разрезе времени

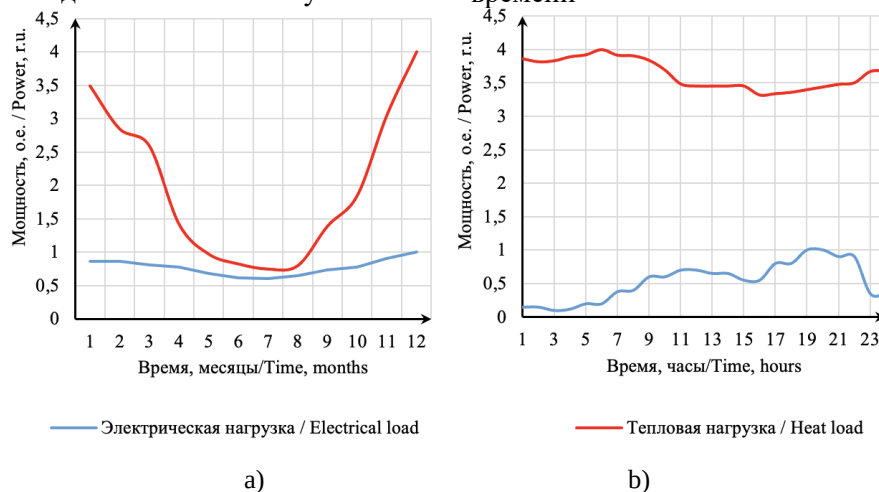


Рис. 2. Модельный обобщенный график электрической и тепловой коммунально-бытовой нагрузки, а – годовой, б – суточный.²

Fig. 2. Model generalized schedule of electrical and thermal load, a – annual schedule, b – daily schedule.²

В зоне действия распределенных систем энергоснабжения мощность тепловой нагрузки обычно в 3 и более раз превышает максимум электрической нагрузки, что обуславливает необходимость включения пил² Appendix 1

тов в состав мини-ТЭЦ. У напрямую влияет на эффективность работы котельного оборудования. Если весь расход потребляемого ГПУ топлива относить на производство электроэнергии, то снижается расход топлива на производство тепловой энергии. При этом ГПУ, где электрический КПД около 42%, является эффективным источником электрической энергии.

При работе по переменному электрическому суточному графику (рис. 2), следуя за электрической нагрузкой отпуск тепла от ГПУ также становится переменным. Это приводит к повышению неравномерности загрузки газовых котлов: снижается их коэффициент использования установленной мощности и возникает потребность в применении дорогостоящих горелок с широким диапазоном плавного регулирования для обеспечения требуемой маневренности. Таким образом, для повышения эффективности необходимо повысить КИУМ ГПУ, что позволит снизить их влияние на переменный режим работы котельного оборудования мини-ТЭЦ и снизить требования к его мощности.

I. СПОСОБЫ И ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ

Вопрос формирования режимов работы когенерационных источников малой мощности обширно освещается в научной литературе. Анализ существующих исследований позволил выявить несколько ключевых методологических подходов к повышению эффективности энергоснабжения исходя из принятых критериев.

При анализе эффективности производства энергии ключевое значение имеет участие оборудования в обеспечении территориальных балансов тепловой и электрической энергии. В [25] детально рассмотрены методы оптимизации энергетических потоков с применением различных технологий, таких как накопители электрической и тепловой энергии, газовые котлы и возобновляемые источники энергии в рамках суточного интервала. Однако данная

методология не в полной мере учитывает инерционность системы теплоснабжения и не охватывает годовой режим работы, что ограничивает её применимость для долгосрочного планирования.

Другая группа методов фокусируется на достижении конкретных целевых показателей. Например, некоторые исследования [26, 27] в качестве основного критерия эффективности рассматривают экономию углеводородного топлива за счёт внедрения ВИЭ. В [26] продемонстрирована эффективность интеграции солнечных коллекторов в состав мини-ТЭЦ. Авторы отмечают такие их особенности, как зависимость от климатических условий, переменный и неуправляемый характер работы, а также экологические преимущества, выражающиеся в отсутствии прямых выбросов, что является ключевым при формировании режима работы источников энергии. При этом, при минимизации расхода топлива [28, 29], применяются сложные оптимизационные инструменты, в частности генетические алгоритмы, что, значительно усложняет практическую реализацию систем управления.

Отдельное методологическое направление предлагает планирование режимов мини-ТЭЦ на основе анализа удельных выбросов CO₂ [30]. В качестве эффективного ресурса предлагается использовать в системе энергоснабжения электродоты, где ресурсом является как электроэнергия, генерируемая газопоршневыми установками, так и закупаемая на региональном рынке. Однако в определённых условиях такой подход может приводить к снижению экономической доступности энергии в силу высокой стоимости электрической энергии на розничном рынке.

Важно подчеркнуть, что в упомянутых работах [25-29], а также в исследованиях [31] процесс формирования структуры мини-ТЭЦ и определения режимов её функционирования базируется не на комплексном, а на раздельном анализе эффективности производства тепловой и электрической энергии. При решении задач по повышению эффективности теплоснабжения внедряются элементы ВИЭ-генерации и технологии производства тепла с использованием «чистого электричества», однако полноценный анализ сопутствующих

изменений в эффективности производства электроэнергии не проводится.

Таким образом, обзор литературы показал, что существующие методологии не используют напрямую такие общепринятые показатели, как КИУМ и тепловой и электрический УРУТ, для формирования структуры и определения режимов работы мини-ТЭЦ в рамках распределенных систем энергоснабжения, что указывает на наличие определенного пробела в данной области.

Для повышения КИУМ газопоршневых установок в данном исследовании рассматривается включение в состав электроустановок, преобразующих электрическую энергию в тепловую, таких как, электрические котлы, тепловые насосы [25]. Каждое из перечисленных технических средств имеет свои технические характеристики и эксплуатационные особенности. Тепловые насосы характеризуются высокой эффективностью, что вызывает интерес для внедрения их в системы энергоснабжения. К примеру, в [25] уделено большое внимание территориальному расположению тепловых насосов в системе для повышения эффективности работы, однако их работа рассматривается в рамках распределительных электрических сетей, что сопровождается ростом их загрузки. При этом для внедрения тепловых насосов требуются значительные капитальные затраты, а также высокая культура эксплуатации. Для некоторых видов тепловых насосов необходимы определенные условия, например наличие грунтовых вод и свободных территорий для скважин. Кроме того, в условиях низкой температуры окружающей среды снижается эффективность тепловых насосов [32-35]. Авторы [35] выявили, что при температуре наружного воздуха до $+10^{\circ}\text{C}$ на 1,0 Вт электрической мощности компрессора выделяется от 1,5 до 4,0 Вт тепловой мощности, а при понижении температуры до -15°C эффективность снижается в 2 и более раза. Указанная зависимость определяет во многом различия эффективности применения тепловых насосов различных климатических условиях. Очевидным является, что чем меньше разница между температурой источника тепла и температурой, до которой нужно нагреть теплоноситель, тем выше эффективность, отражаемая отношением произведённой тепловой энергии к затраченной электрической (коэффициент

преобразования COP). В [36] отмечается возможность применение тепловых насосов совместно с газовым двигателем для систем кондиционирования и горячего водоснабжения, что в системах с мини-ТЭЦ может привести к тепловым выбросам в межотопительный период. Для переноса тепла тепловому насосу в зависимости от типа необходима электроэнергия, но эта энергия в 1,5 - 4 раза меньше тепла, передаваемого нагреваемой среде. Тепловые насосы часто используются в комбинации с другим техническими средствами, например тепловым накопителем для повышения эффективности [37] его работы в различные интервалы года.

В отличие от тепловых насосов электрические котлы более просты в эксплуатации и их характеристики не зависят от температуры наружного воздуха. Однако, энергетическая эффективность электродкотлов уступает эффективности тепловых насосов, что ограничивает их применение. Электрические котлы, включаемые в часы суточного снижения нагрузки, как и тепловые насосы, можно рассматривать в качестве ресурсов управления режимом загрузки ГПУ на территориях с различными условиями. Очевидно, что преобразование электроэнергии в тепло электрическими котлами значительно менее эффективно, чем тепловыми насосами. Электродкотлы требуют малых инвестиций, просты в эксплуатации и обладают широким диапазоном допустимых режимов работы, что определяет их применимость. Можно отметить успешные проекты реализации систем централизованного теплоснабжения с применением электродкотлов в северной части Китая [38], где их функционирование определяется экологическими выгодами и стремлением увеличения доли ВИЭ-генерации электрической энергии.

Использование электрических котлов и тепловых насосов, в зависимости от решаемых в распределенных системах энергоснабжения задач позволяет получить следующее:

- Сократить требуемую установленную мощность газовых котлов и, как следствие, снизить потребление углеводородного топлива;
- Обеспечить загрузку ГПУ в часы провала графика электропотребления, что напрямую повышает их КИУМ и увеличивает

суммарную выработку тепла в когенерационном цикле;

- Выполнить функцию резервирования, повышая бесперебойность теплоснабжения.

Размещение пиковых электрокотлов и тепловых насосов целесообразно в непосредственной близости от потребителей (в центральных или индивидуальных тепловых пунктах), что позволяет снизить транспортные потери в тепловых сетях, а также уменьшить гидравлическую нагрузку на тепловые сети и как следствие повысить бесперебойность теплоснабжения, что особенно актуально в условиях эксплуатации ветхих сетей.

Режим работы газовых котлов определяется режимом отпуска тепловой энергии от других источников тепла (рис. 3). Очевидно, что с включением в систему энергоснабжения дополнительных источников снизятся требования к газовым котлам, но останется определенная неравномерность их загрузки. Поэтому для суточного и сезонного регулирования и исключения тепловых выбросов предлагается использовать системы накопления тепловой энергии (СНТЭ). Их основной функцией является перераспределение тепловой энергии в различных разрезах времени, что позволяет демпфировать колебания нагрузки (рис. 3). Это позволяет дополнительно снизить установленную мощность газовых котлов и

уменьшает зависимость системы от резких изменений температуры наружного воздуха. Данное предложение по внедрению СНТЭ в распределенные системы энергоснабжения во многом согласуется с принципом, описанном [25], однако в указанном исследовании не предложена математическая модель СНТЭ для реализации данной идеи.

Тепловые накопители подразделяются на системы для явного и скрытого накопления тепла. Для регулирования графика отпуска тепловой энергии применяется первая технология, которая используется в скважинных накопителях, ямах, наземных и подземных резервуарах [39]. По длительности сохранения тепловой энергии СНТЭ классифицируется на краткосрочные (сутки, недели) и сезонные (месяц, сезон). Системы накопления тепла в скважинах и ямах предназначены для сезонного перераспределения тепловой энергии. Распространение эти технологии получили в странах Скандинавии и Западной Европы [40]. Для краткосрочного перераспределения тепла используются наземные и подземные резервуары. Кроме того, они обладают рядом преимуществ перед другими технологиями: компактность, безопасность и простота в эксплуатации, легкость интеграции в существующую систему энергоснабжения.

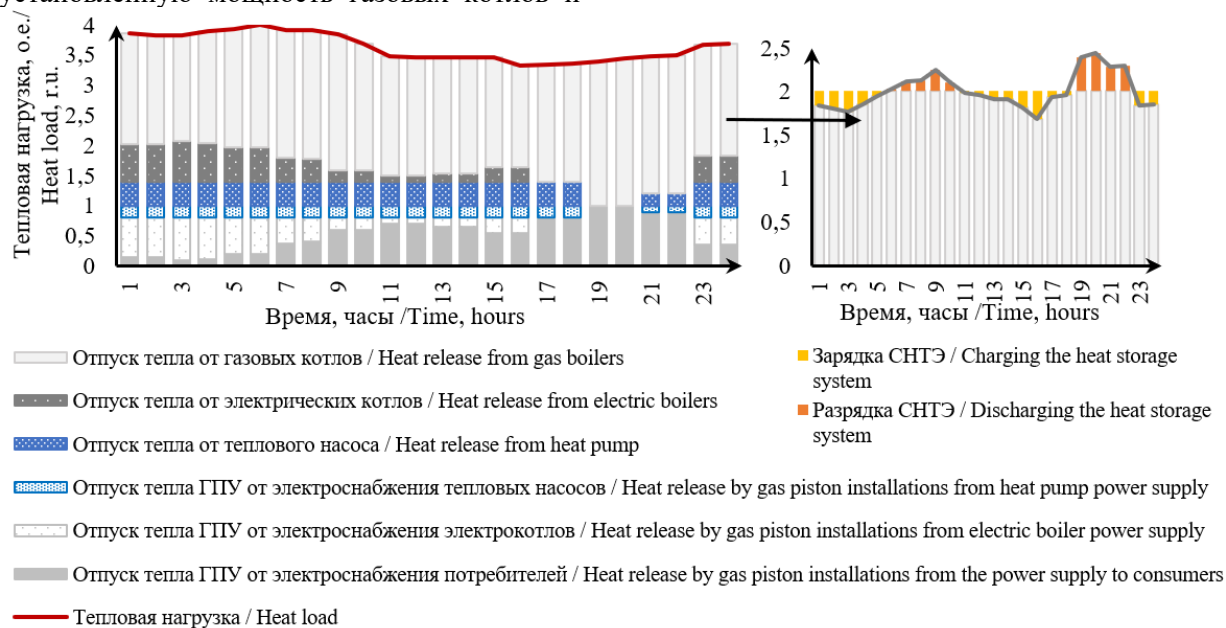


Рис. 3. Покрывание суточного графика спроса на тепло. ³

Fig. 3. Coverage of the daily heat demand schedule. ³

Разбиение системы накопления тепла на части и распределение резервуаров по системе теплоснабжения позволит повысить эффективность теплоснабжения за счет снижения транспортных потерь и износа тепловых сетей. Для этого резервуары могут располагаться в центральных тепловых пунктах, что не вызывает технических и технологических трудностей, учитывая

³ Appendix 1

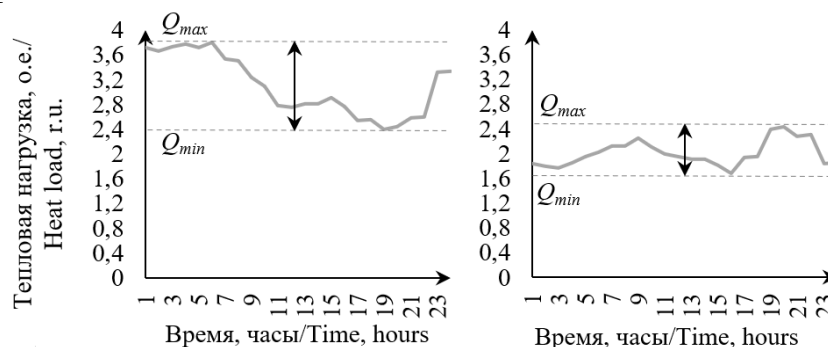


Рис. 4. Эффект сокращения требуемой энергоемкости системы накопления тепла. ⁴

Fig. 4. The effect of reducing the required energy capacity of the heat storage system. ⁴

На рисунке 5 приведена модель распределенной системы энергоснабжения с концептуальной схемой размещения основного оборудования, учитываемого в исследовании для повышения эффективности работы системы энергоснабжения. Близость СНТЭ, тепловых насосов и электродкотлов к теплоприемникам, позволяет повысить

надежность энергоснабжения. В общем случае данная модель может быть расширена также тепловыми насосами, а также абсорбционными холодильными машинами. Однако, влияние последних не учитывается в рамках данного этапа исследования в силу климатических особенности выбранной территории.

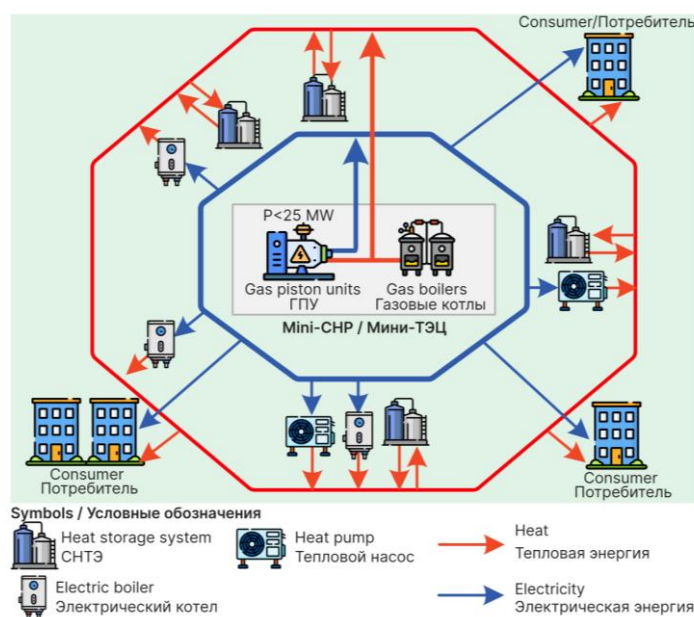


Рис. 5. Модель распределенной системы энергоснабжения с концептуальной схемой размещения основного оборудования. ⁵

Fig. 5. A model of distributed energy supply system with a conceptual layout of the main components. ⁵

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

И. ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ СИСТЕМЫ ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ

Для формирования логико-математического описания распределенной системы (рис. 5) с позиций прои^{4,5} Appendix 1 эгии предложена соответствующая методика формирования структуры источников электрической и тепловой энергии. При этом котельные установки используют углеводородное топлива и электроэнергию, отпускаемую от ГПУ, тепловые насосы – электроэнергию ГПУ.

Моделируется, что покрытие тепловой нагрузки (Q_{max}) осуществляется в общем случае ГПУ, тепловыми насосами, газовыми и электрическими котлами, с учетом резервирования:

$$Q = Re \cdot Q_{max} = Q_B + Q_C + Q_{HP} + Q_{EB}, \quad (1)$$

где: Q – суммарная тепловая мощность источников тепла в распределенной системе энергоснабжения, МВт; Q_{max} – максимум тепловой нагрузки, МВт; Re – норма резервирования, о.е.; Q_C – тепловая мощность ГПУ, МВт; Q_{HP} – установленная мощность тепловых насосов, МВт; Q_{EB} – установленная тепловая мощность электрических котлов, МВт.

Установленная тепловая мощность электрических котлов (как замыкающих при необходимости в силу наименьшей энергетической эффективности) определяется неравномерностью суточного электрического графика, покрываемого газопоршневыми установками (рис. 6) с учетом мощности, потребляемой тепловыми насосами.

$$P_{EB} = P_{max} - (P_{min} + P_{HP}), \quad (2)$$

$$Q_{EB} = P_{EB} \cdot \eta_{EB}, \quad (3)$$

$$Q_{HP} = P_{HP} \cdot COP, \quad (4)$$

где: P_{EB} – потребляемая электрическая мощность электрокотлов, МВт; P_{max} и P_{min} – максимальная и минимальная электрическая нагрузка, покрываемая ГПУ, МВт; Q_{EB} – установленная тепловая мощность электрических котлов, МВт; P_{HP} – потребляемая электрическая мощность тепловых насосов, МВт; η_{EB} – КПД электрокотлов, о.е.; Q_{HP} – установленная тепловая

мощность тепловых насосов, МВт; COP – коэффициент производительности тепловых насосов, о.е.



Рис.6. Режим работы ГПУ при наличии пиковых электрических котлов и тепловых насосов. ⁶

Fig.6. Operating mode of gas piston units in the presence of peak electric boilers and heat pump. ⁶

Для определения установленной мощности пиковых газовых котлов учитываются параметры функционирования системы накопления тепловой энергии (СНТЭ). В случае суточного регулирования объем СНТЭ рассчитывается исходя из графика теплоснабжения в наиболее холодный день. Выдаваемая накопителем тепловая энергия ($E_{TES,D}$) определяется объемом аккумулированного тепла ($E_{TES,C}$) и эффективностью сохранения тепловой энергии (η_{TES}). Продолжительность циклов заряда и разряда накопителя ($t_{TES,D}$ и $t_{TES,C}$) зависят от назначения СНТЭ в покрытии графика тепловой нагрузки (рис. 7).

$$E_{TES,D} = E_{TES,C} \cdot \eta_{TES}, \quad (5)$$

$$E_{TES,D} = \overline{Q_{TES,D}} \cdot t_{TES,D} = \sum_1^{t_{TES,D}} Q_{TES,D-i}, \quad (6)$$

$$E_{TES,C} = \overline{Q_{TES,C}} \cdot t_{TES,C} = \sum_1^{t_{TES,C}} Q_{TES,C-i}, \quad (7)$$

$$t_{TES,D} + t_{TES,C} = 24, \quad (8)$$

где: η_{TES} – КПД резервуара, $E_{TES,D}$ – тепловая энергия, выданная СНТЭ в процессе разрядки, МВт·ч; $E_{TES,C}$ – тепловая энергия, потребленная в процессе зарядки, МВт·ч; $Q_{TES,D-i}$ и $Q_{TES,C-i}$ – значение мощности разрядки

и зарядки за период времени t , МВт, $t_{TES,D}$ и $t_{TES,C}$ – время разрядки и зарядки.

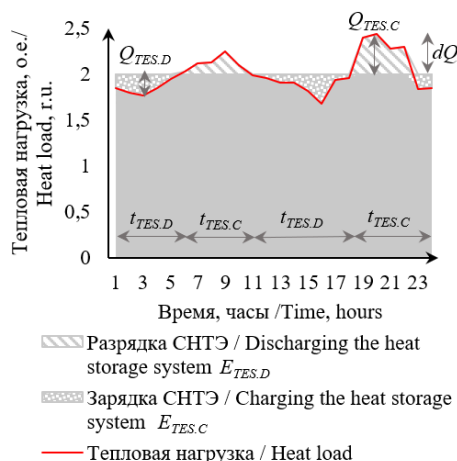


Рис.7. Суточный график отпуска тепловой энергии газовых котлов.⁷

Fig.7. Daily schedule for the release of thermal energy from gas boilers.⁷

Имея данные о величине запасенного тепла, становится возможным определить общий объем СНТЭ (V_{TES}). Данный объем определяется требуемой суточной энергоемкостью, а также зависит от КПД резервуара и параметров теплоносителя в системе теплоснабжения

При обеспечении надлежащей теплоизоляции КПД резервуара на интервале от одних суток до недели достигает значений $\eta_{TES} = 80\text{--}95\%$.

$$V_{TES} = \frac{E_{TES,C}}{c \cdot \delta \cdot (\tau - \eta_{TES} \cdot \tau)}, \quad (9)$$

где: $E_{TES,C}$ – тепловая энергия, потребленная в процессе зарядки, МВт·ч; c – теплоемкость воды, равная $1,667 \cdot 10^{-6}$ МВт/кг·°C; τ – температура воды, поступающей в резервуар, значение которой не превышает 95 °C; η_{TES} – КПД резервуара.

В модели используются резервуары, предназначенные для запасаения энергии от воды температурой не выше 95°C, так как для систем теплоснабжения, где основным источником является отопительная котельная наиболее распространенным является температурный график 95/60°C.

Тепловая мощность газовых котлов (Q_B) зависит от тепловой мощности ГПУ (определяемой на основе электрической мощности ГПУ (P_C) и коэффициента когенерации (K)), электрических котлов,

тепловых насосов и определяется с учетом наличия СНТЭ.

$$Q_B = Re \cdot (Q_{max} - dQ) - K \cdot P_C - Q_{EB} - Q_{HP} \quad (10)$$

где: Q_{max} – максимальная тепловая нагрузка, МВт; dQ – величина снижения мощности, МВт; K – коэффициент когенерации, отражающий отношение производимой тепловой и электрической энергии на ГПУ о.е.; P_C – электрическая мощность ГПУ, МВт; Q_{EB} – установленная тепловая мощность электрических котлов, МВт; Q_{HP} – установленная тепловая мощность тепловых насосов, МВт.

Далее согласно выбранной мощности и типа ГПУ учет электродкотлов и тепловых насосов рассчитывается полезно отпущенные тепловая и электрическая энергии для покрытия соответствующих графиков нагрузки.

Электрическая и тепловая энергия (E_{PC} и E_{QC}), выработанная на газопоршневой установке:

$$E_{PC} = E_P + E_{PEB} + E_{PHP} \quad (11)$$

$$E_{QC} = K \cdot E_{PC} \cdot \delta, \quad (12)$$

где: E_P – спрос на электрическую энергию потребителей территории, не включая электродкотлы и тепловые насосы, МВтч; E_{PEB} – электрическая энергия, выработанная ГПУ для электроснабжения пиковых электрических котлов, МВт·ч; E_{PHP} – электрическая энергия, выработанная ГПУ для электроснабжения тепловых насосов, МВт·ч; δ – доля полезного использования тепловой энергии, выработанной ГПУ, о.е.

Отношение полезного отпуска и произведенного тепла (δ) предлагается определять путем сопоставления графика выработки тепловой энергии на ГПУ с графиком спроса на тепловую энергию. Естественно, если ГПУ используются для выработки электроэнергии, то при превышении производства тепла над спросом будут тепловые выбросы. Такая ситуация может сложиться в период прохождения минимальных тепловых нагрузок в межотопительный период. Поэтому не все произведенное на ГПУ тепло можно считать полезно отпущенным. Очевидно, что чем больше значение доли полезного тепла, тем эффективнее использование топлива. При

полном использовании выработанного ГПУ тепла $\delta = 1$.

Тепловая энергия, отпущенная тепловыми насосами (E_{QHP}), определяется величиной потребляемой электрической энергии (E_{RHP}) и эффективностью ее преобразования в тепло (COP):

$$E_{QHP} = E_{RHP} \cdot COP \quad (13)$$

Тепловая энергия, отпущенная электрическими котлами (E_{QEB}), аналогично определяется величиной потребляемой электрической энергии (E_{PEB}) и эффективностью ее преобразования в тепло (η_{EB}). Значение E_{PEB} зависит от режима работы электрических котлов.

$$E_{QEB} = E_{PEB} \cdot \eta_{EB} \quad (14)$$

Режим работы газовых котлов в составе источников энергии определяется полезно отпущенным теплом от электрических котлов; газопоршневых установок и тепловых насосов. Очевидно, что чем больше полезный отпуск тепла от этих установок, тем меньше топлива потребуется для газовых котлов.

$$E_{QV} = E_Q - E_{QC} - E_{QEB} - E_{QHP} \quad (15)$$

где: E_{QV} - энергия, отпущенная газовыми котлами, МВтч; E_Q - спрос на тепловую энергию потребителей территории, МВтч;

II. РАСЧЕТ ПОКАЗАТЕЛЕЙ

ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОИЗВОДСТВА ЭНЕРГИИ

На основе полученных балансов энергии для системы энергоснабжения рассчитаем показатели эффективности работы. Коэффициент использования установленной мощности (T) показывает степень загрузки генерирующего оборудования в течение года или другого расчетного периода и рассчитывается по выражению:

$$T = E / (t \cdot P), \quad (16)$$

где: E - энергия, выработанная на интервале времени t , МВтч; P - установленная мощность, МВт; t - интервал времени, часы.

В зависимости от отнесения на ГПУ топлива на производство тепла и отпускаемого электричества электростанциям

можно рассчитать УРУТ на производство тепловой энергии в распределенной системе теплоснабжения. Это позволяет достичь значений УРУТ на производство тепла, превышающих существующие в средние по стране.

Для этого осуществляется минимизация средневзвешенного удельного расхода топлива на производство тепловой энергии (b_Q), размер которого взаимосвязан с УРУТ на производство электрической энергии (b_P).

Благодаря этому значение b_Q может быть меньше, чем b_B - УРУТ на современных газовых котлах с КПИТ $\eta_B = 0,92$ о.е., при этом b_P будет не меньше, чем УРУТ, достигнутый на современных парогазовых установках с КПД около $\eta_{CCGT} = 60\%$

Тогда для расчета средневзвешенного УРУТ на производства тепла воспользуемся выражением:

$$b_Q = \frac{E_{QC} \cdot b_{QC} + E_{QV} \cdot b_B + E_{QEB} \cdot \frac{b_P}{\eta_{EB}} + E_{QHP} \cdot b_P \cdot COP}{E_Q}, \quad (17)$$

При условии:

$$b_Q \leq b_B, \quad (18)$$

$$0 < b_P \leq 205 \quad (19)$$

где: E_Q - спрос на тепловую энергию потребителей территории, МВтч; E_{QC} - полезный отпуск тепловой энергии от ГПУ, МВтч; E_{QV} - отпуск тепловой энергии от газовых котлов, МВтч; E_{QEB} - отпуск тепловой энергии от электрических котлов, МВтч; b_{QC} - УРУТ ГПУ на производство тепловой энергии, г.у.т/кВтч; b_B - УРУТ газовых котлов, рассчитываемый по выражению (20), г.у.т/кВтч; b_P - УРУТ ГПУ на производство электрической энергии, зависит от принятого разнесения топлива на ГПУ, г.у.т/кВтч; η_{EB} - КПД электростанций, о.е.

$$b_B = 123 / \eta_B, \quad (20)$$

$$b_P = \frac{123}{\eta'_C} - K \left(b_{QC} - \frac{123}{\eta'_C} \right), \quad (21)$$

где: η_B - КПИТ современных газовых котлов, о.е.; η'_C - топливная эффективность ГПУ с учетом тепловых выбросов, определяемая по выражению (22), о.е; K - коэффициент когенерации, о.е.

$$\eta'_C = \eta_C \cdot \frac{1 + K \cdot \delta}{1 + K} \quad (22)$$

где: η_C - паспортный КПИТ ГПУ, %; δ - доля полезного использования тепла ГПУ, о.е.

Предложенная имитационная модель распределенной системы энергоснабжения

инвариантна к модели представления графиков тепловой и электрической нагрузки. Применяемый подход к расчету КИУМ и УРУТ позволяет обеспечить гибкий выбор оборудования в системе энергоснабжения, что позволяет обеспечить вариативность применяемого в системе оборудования.

ПРИМЕР ФОРМИРОВАНИЯ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ СИСТЕМЫ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ

Для верификации предложенной имитационной модели была рассмотрена распределенная система энергоснабжения п. Линево (Новосибирская область, Россия). Целью моделирования являлось формирование такой конфигурации системы теплоснабжения, которая обеспечивает снижение расхода топлива на производство тепла и электроэнергии. На рисунке 8 представлены линеаризованные графики тепловой и электрической нагрузки по продолжительности для рассматриваемой территории.

Исходная конфигурация системы характеризуется раздельной схемой энергоснабжения: электроэнергия поставляется централизованно гарантирующим поставщиком, а тепловая энергия от газовой котельной. Удаленность от районной подстанции, приводит к снижению экономической и технической доступности электроэнергии, что сдерживает развитие территории.

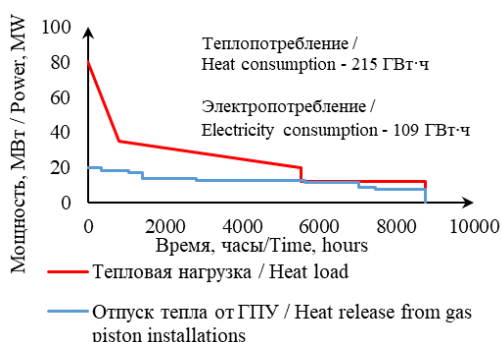


Рис.8. Спрос на энергию на территории. ⁸
Fig.8. Energy demand in the territory. ⁸

В качестве альтернативного решения рассматривался переход к энергоэффективному энергоснабжению на базе мини-ТЭЦ. В рамках исследования были смоделированы и сопоставлены два варианта конфигурации системы:

Вариант 1: Система, включающая ГПУ и газовое котельное оборудование.

Вариант 2: Система, включающая ГПУ, газовые и электрические котлы, а также системы накопления тепловой энергии (СНТЭ).

Тепловые насосы не рассматривались в данном примере в силу ограниченности возможности их приобретения из-за санкционной политики на территории России.

На основе предложенной методики для обоих вариантов была определена структура и состав оборудования и рассчитаны показатели эффективности (рис. 9–10).

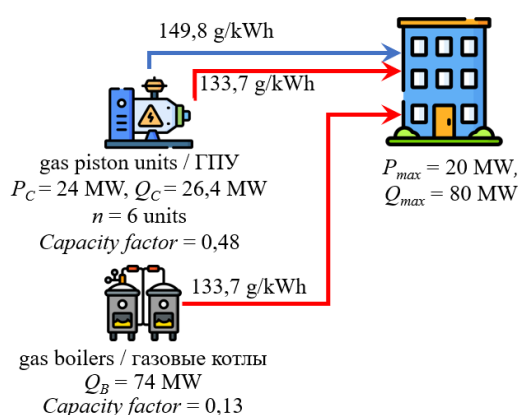


Рис.9. Характеристика функционирования системы, включающей ГПУ и газовые котлы. ⁹

Fig.9 Characteristics of the functioning of the system, including gas piston units and gas boilers. ⁹

Сопоставление результатов моделирования (рис. 9 и 10) доказывает высокую эффективность второго варианта, интегрирующего СНТЭ и электрокотлы. Для данной конфигурации средневзвешенное значение УРУТ на производство тепла составило 133,7 г.у.т./кВтч, что значительно ниже показателей, характерных для современного котельного оборудования.

Внедрение электрических котлов и СНТЭ обеспечивает следующие количественные преимущества:

- годовой КИУМ газопоршневых установок повышается на 18%;
- доля газовых котлов в покрытии спроса на тепло снижается на 32% при росте КИУМ на 53%;
- требуемая установленная мощность газовых котлов уменьшается на 12%.

Кроме того, достигается качественное улучшение: снижается потребность в высокой маневренности тепловых мощностей, что

позволяет отказаться от использования дорогостоящих горелок с плавным регулированием.

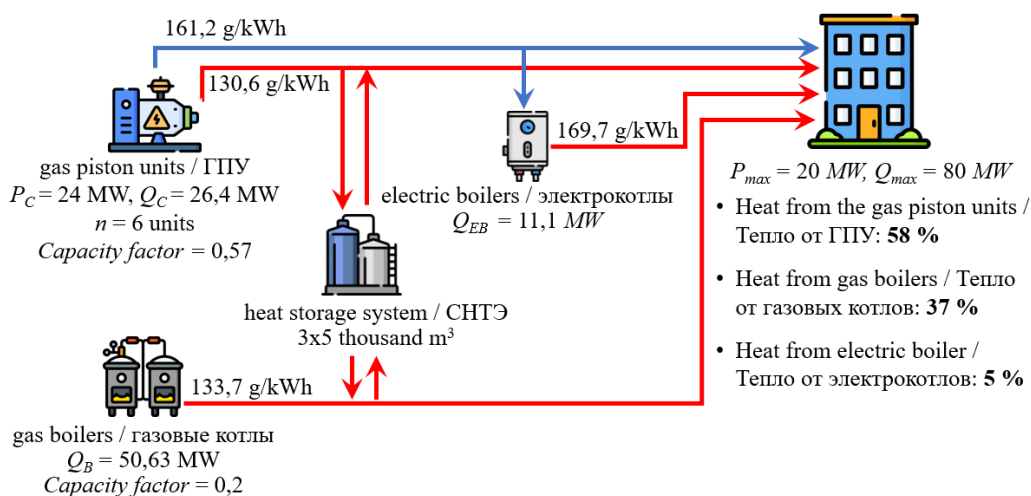


Рис.10. Характеристика функционирования системы, включающей ГПУ, газовые и электродкотлы, СНТЭ.¹⁰

Fig.10 Characteristics of the functioning of the system, including GPU and gas and electric boiler, heat storage systems.¹⁰

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для успешного социально-экономического развития любой территории необходимо обеспечить бесперебойное, а также экономически и технически доступное снабжение потребителей электрической и тепловой энергией. Ключевую роль в достижении этой цели играют эффективность производства электрической и тепловой энергии и минимизация потерь при её транспортировке.

На территориях с высоким спросом на тепло наиболее перспективным решением повышающим энергоэффективность производства энергии является переход к совместному производству энергии на мини-ТЭЦ с газопоршневыми установками. Однако данное исследование доказывает, что максимальная эффективность достигается не самими ГПУ в отдельности, а их синергетической интеграцией с тепловыми насосами, пиковыми электрическими котлами и системами накопления тепловой энергии.

Ключевым результатом настоящей работы является разработка и верификация имитационной модели для определения конфигурации распределенных систем энергоснабжения, где учитывается взаимосвязь производства тепловой и электрической энергии. В отличие от существующих подходов, которые зачастую фокусируются на одном критерии (например,

минимизация расхода топлива или удельных выбросов CO_2) или рассматривают эффективность производства тепла и электроэнергии отдельно, предложенная методика основывается на комплексном анализе. Она использует в качестве ключевых целевых показателей КИУМ ГПУ и газовых котлов и УРУТ, отнесенный на производство тепловой энергии. Предложенная имитационная модель позволяет сформировать наиболее эффективную структуру источников тепловой и электрической энергии в распределенной системе энергоснабжения.

Верификация модели на примере распределенной системы энергоснабжения р.п. Линево (Новосибирская область, Россия) подтвердила высокую эффективность предложенного комплексного решения. Внедрение электрических котлов и СНТЭ позволило снизить УРУТ на отпуск тепла до $133,7 \text{ г.у.т./кВтч}$, при этом годовой КИУМ ГПУ увеличился на 18%, доля газовых котлов в покрытии тепловой нагрузки сократилась на 32%, а их требуемая установленная мощность — на 12%.

Таким образом, согласованное применение ГПУ, тепловых насосов, газовых и электрических котлов, тепловых накопителей создает синергетический эффект. Электрические котлы, работая в часы провала электрической нагрузки, дозагружают ГПУ и

увеличивают выработку в когенерационном цикле, в то время как СНТЭ демпфируют неравномерность нагрузки на газовые котлы. Такой подход не только значительно повышает операционную эффективность и надежность энергоснабжения на территориях, где доминирует котельная, а также способствует улучшению экономической доступности и бесперебойности энергоснабжения территории.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-29-20057, <https://rscf.ru/project/24-29-20057/> и гранта № р-75 Правительства Новосибирской области.

APPENDIX 1 (ПРИЛОЖЕНИЕ 1)

¹**Fig. 1.** The share of district heating in some countries of Europe and Central Asia

²**Fig. 2.** Model generalized graph of electrical and thermal load, a – annual schedule, b – daily schedule.

³**Fig. 3.** Coverage of the daily heat demand schedule.

⁴**Fig. 4.** The effect of reducing the required energy capacity of the heat storage system.

⁵**Fig. 5.** A model of a territorial energy supply system with a conceptual layout of the main components.

⁶**Fig. 6.** Operating mode of gas piston units in the presence of peak electric boilers and heat pump.

⁷**Fig. 7.** Daily schedule for the release of thermal energy from gas boilers&

⁸**Fig. 8.** Energy demand in the territory.

⁹**Fig. 9.** Characteristics of the functioning of the system, including gas piston units and gas boilers.

¹⁰**Fig. 10.** Characteristics of the functioning of the system, including GPU and gas and electric boilers, heat storage systems.

Литература (References)

- [1] Papkov B. V., Ilyushin P. V., Kulikov A. L. "Kratkij slovar" sovremennoj jelektrojenergetiki [A short dictionary of modern electric power industry]. Nizhniy Novgorod, 2021, 414 p. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=47296596> (accessed 10.08.2025)
- [2] Rubino A., Sapio A., La Scala M. Handbook of energy economics and policy: Fundamentals and applications for engineers and energy planners, 2021, 674 p.
- [3] Petersen J. P., Heurkens E. Implementing energy policies in urban development projects: The role of public planning authorities in Denmark, Germany and the Netherlands. *Land use policy*, 2018, vol. 76, pp. 275-289. doi: <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2018.05.004>
- [4] Bale C. S. E. et al. Strategic energy planning within local authorities in the UK: A study of the city of Leeds. *Energy policy*, 2012, vol. 48, pp. 242-251. doi: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2012.05.019>
- [5] Ražniak P. et al. The role of the energy sector in the command and control function of cities in conditions of sustainability transitions. *Energies*, 2021, vol. 14, no. 22, p. 7579. doi: <https://doi.org/10.3390/en14227579>
- [6] Kulikov, A.L., Ilyushin, P.V., Suslov, K.V. and Karamov, D.N. Coherence of digital processing of current and voltage signals at decimation for power systems with a large share of renewable power stations. *Energy Reports*, 2022, Vol. 8, pp. 1464-1478. doi:10.1016/j.egy.2022.08.215
- [7] Razmjoo A. et al. The key role of clean energy and technology in smart cities development. *Energy Strategy Reviews*, 2022, vol. 44, p. 100943. doi: <https://doi.org/10.1016/j.esr.2022.100943>
- [8] Georgievskiy I., Ilyushin P. and Filippov S. Analysis of Methods and Systems of Short-Term and Operative Forecasting of Wind Power Plant Generation. *2025 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM)*, Sochi, Russian Federation, 2025, pp. 177-182, doi: 10.1109/ICIEAM65163.2025.11028284.
- [9] Kulikov, A.L., Shepovalova, O.V., Ilyushin, P.V., Filippov, S.P. and Chirkov S.V. Control of electric power quality indicators in distribution networks comprising a high share of solar photovoltaic and wind power stations. *Energy Reports*, 2022, Vol. 8, pp. 1501-1514. doi: 10.1016/j.egy.2022.08.217
- [10] Petrov E.I., Shpurov I.V., Edelman I.Ya. Zapasy uglevodorodov i jenerGOPerehod k vozobnovljaemym istochnikam jenerGii: osnovnye trendy [Hydrocarbon reserves and energy transition to renewable energy sources: key trends]. *Geologija nefti i gaza – The geology of oil and gas*, 2023, no.4, pp. 9-19. (In Russian). DOI: 10.41748/0016-7894-2023-4-9-19
- [11] Ilyushin P. V. Sistemnyj podhod k razvitiyu i vnedreniju raspredelennoj jenergetiki i vozobnovljaemyh istochnikov jenerGii v Rossii [A systematic approach to the development and implementation of distributed energy and renewable energy sources in Russia]. *Jenergetik – Powerman*, 2022, vol. 4, pp. 20-27. doi: 10.34831/EP.2022.54.87.004
- [12] Salman M. Y., Hasar H. Review on environmental aspects in smart city concept: Water, waste, air pollution and transportation smart applications using IoT techniques. *Sustainable Cities and Society*, 2023, vol. 94, p. 104567. doi: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2023.104567>
- [13] Petersen J. P. The application of municipal renewable energy policies at community level in Denmark: A taxonomy of implementation challenges. *Sustainable Cities and Society*, 2018, vol. 38, pp. 205-218. doi: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2017.12.029>

- [14] Vishnivetskaya A., Alexandrova E. "Smart city" concept. Implementation practice. *IOP conference series: materials science and engineering*, IOP Publishing, 2019, vol. 497, no. 1, p. 012019. doi: 10.1088/1757-899X/497/1/012019
- [15] Hui C. X. et al. Greening smart cities: An investigation of the integration of urban natural resources and smart city technologies for promoting environmental sustainability. *Sustainable Cities and Society*, 2023, vol. 99, p. 104985. doi: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2023.104985>
- [16] Almihat M. G. M. et al. Energy and sustainable development in smart cities: An overview. *Smart Cities*, 2022, vol. 5, no. 4, pp. 1389-1408. doi: <https://doi.org/10.3390/smartcities5040071>
- [17] Mosannenzadeh F. et al. Smart energy city development: A story told by urban planners. *Cities*, 2017, vol. 64, pp. 54-65. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cities.2017.02.001>
- [18] Lund H. et al. Smart energy Denmark. A consistent and detailed strategy for a fully decarbonized society. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2022, vol. 168, pp. 112777. doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112777>
- [19] Gui E. M., MacGill I. Typology of future clean energy communities: An exploratory structure, opportunities, and challenges. *Energy research & social science*, 2018, vol. 35, pp. 94-107. doi: <https://doi.org/10.1016/j.erss.2017.10.019>
- [20] Yarashynskaya A., Prus P. Smart Energy for a Smart City: A Review of Polish Urban Development Plans. *Energies*, 2022, vol. 15, no. 22, p. 8676. doi: <https://doi.org/10.3390/en15228676>
- [21] Filippov S. P., Dilman M. D., Ilyushin P. V. Distributed generation of electricity and sustainable regional growth. *Thermal Engineering*, 2019, vol. 66, no. 12, pp. 869-880. doi: <https://doi.org/10.1134/S0040601519120036>
- [22] Ol'khovskii G. G. The most powerful power-generating GTUs (a review), *Thermal Engineering*, 2021, vol. 68, no. 6, pp. 490-495. doi: <https://doi.org/10.1134/S0040601521060069>
- [23] Dilman M.D., Filippov S.P. Comparison of Promising Cogeneration Technologies Based on Fuel Efficiency Criteria. *Izvestiâ Akademii nauk SSSR. Énergetika – Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Energy*, 2025, no. 2, pp. 16-34. doi: 10.31857/S0002331025020025
- [24] Wang X., Duan L. Peak regulation performance study of the gas turbine combined cycle based combined heating and power system with gas turbine interstage extraction gas method. *Energy Conversion and Management*, 2022, vol. 269, p. 116103. doi: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.116103>
- [25] Ayele G. T. et al. Optimal heat and electric power flows in the presence of intermittent renewable source, heat storage and variable grid electricity tariff. *Energy Conversion and Management*, 2021, vol. 243, pp. 114430. doi: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.114430>
- [26] Islam M. T. et al. Economic and environmental impact assessment of renewable energy integration: A review and future research directions. *Cleaner Energy Systems*, 2024, vol. 9, pp. 100162. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cles.2024.100162>
- [27] Ismayilzada M. et al. Study of technical means for heat generation, its application, flow control, and conversion of other types of energy into thermal energy. *Energy Harvesting and Systems*, vol. 11, no. 1, 2024, pp. 20230125. <https://doi.org/10.1515/ehs-2023-0125>
- [28] Wen Q. et al. Applications, evaluations and supportive strategies of distributed energy systems: A review. *Energy and Buildings*, 2020, vol. 225, pp. 110314. doi: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110314>
- [29] Han J. et al. Current status of distributed energy system in China. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, vol. 55, pp. 288-297. doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.147>
- [30] Saletti C., Gambarotta A., Morini M. Development, analysis and application of a predictive controller to a small-scale district heating system. *Applied Thermal Engineering*, 2020, vol. 165, pp. 114558. doi: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.114558>
- [31] Požgaj D. et al. Research on the Implementation of a Heat Pump in a District Heating System Operating with Gas Boiler and CHP Unit. *Applied Sciences*, 2025, vol. 15, no. 13, pp. 7280. doi: <https://doi.org/10.3390/app15137280>
- [32] Willem H., Lin Y., Lekov A. Review of energy efficiency and system performance of residential heat pump water heaters. *Energy and Buildings*, 2017, vol. 143, pp. 191-201. doi: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.02.023>
- [33] Qin F. et al. Experimental investigation on heating performance of heat pump for electric vehicles at – 20° C ambient temperature. *Energy Conversion and Management*, 2015, vol. 102, pp. 39-49. doi: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.01.024>
- [34] Konrad M. E., MacDonald B. D. Cold climate air source heat pumps: Industry progress and thermodynamic analysis of market-available residential units. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2023, vol. 188, p. 113739. doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113739>
- [35] Yakovlev I. V., Iskhakova A. M. The Effectiveness of Using Air-to-Water Heat Pumps under Russian Climatic Conditions. *Thermal Engineering*, 2020, vol. 67, pp. 715-723. doi: <https://doi.org/10.1134/S0040601520100109>
- [36] Chen X. et al. Experimental investigation on characteristics of gas engine-driven heat pump system operation in cooling mode. *Applied*

- Thermal Engineering*, 2025, pp. 127668. doi: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2025.127668>
- [37] Gómez-de-Arteche-Botas M., Iturralde-Iñarga J., Fúnez-Guerra C. Heat pump integration for waste heat recovery from a 20 MWe green hydrogen plant to increase global efficiency. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2025. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2025.04.202>
- [38] Wang W., Dong Z. Economic benefits assessment of urban wind power central heating demonstration project considering the quantification of environmental benefits: A case from northern China. *Energy*, 2021, vol. 225, pp. 120246. doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.120246>
- [39] Tawalbeh M. et al. A comprehensive review on the recent advances in materials for thermal energy storage applications. *International Journal of Thermofluids*, 2023, vol. 18, p. 100326. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijft.2023.100326>
- [40] Yeh C. Y. et al. Simulation-based analysis of thermochemical heat storage feasibility in third-generation district heating systems: Case study of Enschede, Netherlands. *Renewable Energy*, 2024, vol. 221, p. 119734. doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.119734>

Сведения об авторах.



Мышкина Людмила Сергеевна, к.т.н., к.э.н., доцент каф. Автоматизированных электроэнергетических систем, вед. науч. сотрудник НОЦ «Интеллектуальная энергия» Новосибирского государственного технического университета. Область научных интересов: интеллектуализация энергосистемы, распределенная энергетика, гибкость энергосистемы, эффективность функционирования энергосистемы. E-mail: Lsmyshkina@gmail.com ORCID: 0000-0002-5121-4143



Насибова Елизавета Михайловна, младший научный сотрудник НОЦ «Интеллектуальная энергия», ассистент каф. Автоматизированных электроэнергетических систем Новосибирского государственного технического университета. Область научных интересов: системы энергоснабжения, распределенная энергетика, гибкость, моделирование. E-mail: Lizai2000@mail.ru ORCID: 0000-0002-7963-2283