

## The Method of Selecting Boiler Houses under Technical Re-Equipment in a Mini-CHP

Myshkina L.S., Frolova Y.A., Ivanova E.M.

Novosibirsk State Technical University  
Novosibirsk, Russian Federation

**Abstract.** The development of the energy sector is aimed at improving the energy efficiency of heat and electricity. One way is to use cogeneration technologies. A large number of boiler houses created the preconditions for the creation of a mini-CHPP through their technical re-equipment. The purpose of the work is to develop a methodology for selecting and ranking boiler houses for transformation into a mini-CHPP. To achieve the goal, the following tasks were solved: the effects of the formation of a mini-CHP in the energy district were revealed; a system of criteria has been developed that determines the feasibility of transforming a boiler house; a ranking coefficient was proposed that reflects the potential for improving efficiency; the methodology was tested. The difference of the work is the complexity of the methodology, which takes into account both the advantages of cogeneration technologies and energy balances, as well as individual features of each boiler house. Multi-criteria selection of boiler houses is based on the purpose, fuel used, heat output and functions in heat supply systems. The technical condition, prospective balances of production and consumption of electricity in the energy district of a mini-CHPP are taken into account. The significance of the results lies in the fact that the proposed methodology makes it possible to increase the validity of decisions when transforming a boiler house into a mini-CHPP. The use of the selection results will lead to an increase in the economic efficiency of the heat supply system.

**Keywords:** cogeneration, mini-CHPP, energy efficiency, boiler house transformation, distributed energy, efficiency, reliability, environmental friendliness, economy.

DOI: <https://doi.org/10.52254/1857-0070.2023.3-59.07>

UDC: 621.311; 338.49

### Metoda de selectare a centralelor termice la reechipare tehnică într-o mini-CET

Мишчина Л.С., Фролова Я.А., Иванова Е.М.

Universitatea Tehnică de Stat din Novosibirsk, Novosibirsk, Federația Rusă

**Rezumat.** Dezvoltarea sectorului energetic are ca scop îmbunătățirea eficienței energetice a energiei termice și electrice. O modalitate este utilizarea tehnologiilor de cogenerare. Un număr mare de centrale termice au creat precondițiile pentru crearea unui mini-CET prin reechiparea lor tehnică. Scopul lucrării este dezvoltarea unei metodologii de selectare și ierarhizare a centralelor termice pentru transformare într-o mini-CET. Pentru atingerea scopului, au fost rezolvate următoarele sarcini: au fost dezvoltate efectele formării unei mini-CET în districtul energetic; a fost elaborat un sistem de criterii care determină fezabilitatea transformării unei centrale termice; a fost propus un coeficient de clasare care reflectă potențialul de îmbunătățire a eficienței; metodologia a fost testată. Diferența lucrării este complexitatea metodologiei, care ia în considerare atât avantajele tehnologiilor de cogenerare și bilanțele energetice, cât și caracteristicile individuale ale fiecărei case de cazane. Selecția cu mai multe criterii a cazanelor se bazează pe scopul, combustibilul utilizat, puterea termică și funcțiile din sistemele de alimentare cu căldură. Se ia în considerare starea tehnică, bilanțurile prospective ale producției și consumului de energie electrică în raionul energetic al unei mini-CET. Semnificația rezultatelor constă în faptul că metodologia propusă face posibilă creșterea validității deciziilor la transformarea unei centrale termice într-o mini-CET. Utilizarea rezultatelor selecției va duce la o creștere a eficienței economice a sistemului de alimentare cu căldură.

**Cuvinte-cheie:** cogenerare, mini-CET, eficiență energetică, reechipare tehnică a centralei termice, energie distribuită, eficiență, fiabilitate, ecologie, economie.

**Метод отбора котельных при техническом перевооружении в мини-ТЭЦ****Мышкина Л.С., Фролова Я.А., Иванова Е.М.**

Новосибирский государственный технический университет

Новосибирск, Российская Федерация

**Аннотация.** Развитие энергетики направлено на повышение энергоэффективности производства тепловой и электрической энергии. Одним из способов достижения является использование когенерационных технологий. Однако до настоящего времени имеет место раздельное производство тепловой энергии на котельных при производстве электрической энергии на тепловых электростанциях в конденсационном режиме. Указанное создало предпосылки создания мини-ТЭЦ на базе когенерационных установок, что возможно путем технического перевооружения котельных. Целью работы является разработка методики отбора и ранжирования котельных для последующего технического перевооружения в мини-ТЭЦ. Для достижения цели решены следующие задачи: выявлены эффекты от создания мини-ТЭЦ в энергорайоне; разработана система критериев выбора котельной для технического перевооружения в мини-ТЭЦ; предложен индекс, отражающий потенциал повышения эффективности для определения приоритетности реконструкции. Многокритериальный отбор учитывает техническое состояние и режим работы силовых трансформаторов центра питания, перспективные балансы производства и потребления электрической энергии и мощности в энергорайоне, в составе которого будет работать мини-ТЭЦ. Наиболее важным результатом является комплексная методика отбора, учитывающая не только достоинства когенерационных технологий, но и используемое топливо, назначение котельной и выполняемые ею функции, балансы энергии. Выполнение расчетов по методике на примере Новосибирской агломерации позволило определить котельные и очередность их перевода в мини-ТЭЦ, рекомендовать соответствующие решения при разработке схем теплоснабжения муниципальных образований. Полученные результаты являются значимыми при решении задач повышения энергоэффективности и экологичности отдельных территорий, что приведет к повышению экономической эффективности функционирования системы теплоснабжения. Значимость результатов заключается в том, что предложенный метод позволяет повысить эффективность принимаемых решений при техническом перевооружении котельных в мини-ТЭЦ и при развитии систем теплоснабжения.

**Ключевые слова:** когенерация, мини-ТЭЦ, энергоэффективность, техническое перевооружение котельной, распределенная энергетика, эффективность, надежность, экологичность, экономичность.

**ВВЕДЕНИЕ**

Актуальной задачей энергетики является повышение энергоэффективности производства энергии для обеспечения потребителей недорогостоящей и чистой энергией. В мире наблюдается тенденция роста вводов объектов распределенной энергетики и включение промышленными, коммерческими, сельскохозяйственными потребителями распределенной генерации в системы собственного электроснабжения и в коммунальную инфраструктуру для энергоснабжения коммунально-бытовых потребителей [1, 2].

По экспертным оценкам суммарная установленная мощность объектов распределенной энергетики в России составляет около 23–24 ГВт, при этом ежегодные темпы ввода составляют около 1 ГВт [3, 4].

В качестве одного из объектов распределенной энергетики выделяются мини-ТЭЦ, предназначенные для совместного производства тепловой и электрической энергии.

Основной мини-ТЭЦ являются современные когенерационные установки, обеспечивающие наилучшие показатели эффективности использования углеводородного топлива при производстве тепловой и электрической энергии. Следовательно, создание мини-ТЭЦ могут обеспечить повышение энергоэффективности производства тепловой и электрической энергии. При этом появление мини-ТЭЦ и включение в региональную систему энергоснабжения оказывает положительное влияние на свойства, определяющие ее эффективность – экономичность, экологичность и надежность.

Формирование мини-ТЭЦ возможно в результате нового строительства и реконструкции котельной с переводом в мини-ТЭЦ.

Потенциал реконструкции котельных в мини-ТЭЦ заложен в структуре систем теплоснабжения на действующих отопительных и промышленных котельных [5]. К примеру, в России, количество котельных различной мощности составляет

около 76,7 тыс. Их трансформация в мини-ТЭЦ позволит обеспечить максимально возможное использование тепловых нагрузок для организации комбинированной выработки тепловой и электрической энергии, что повысит энергоэффективность производства энергии.

В связи с указанным выше актуальным становится вопрос выбора котельных, перевод которых в мини-ТЭЦ позволит повысить энергоэффективность производства энергии и получить полезные системные эффекты. Однако, на сегодняшний день отсутствуют методы, позволяющие выбрать реконструируемые в мини-ТЭЦ котельную и обосновать вариант трансформации для повышения эффективности производства энергии и получения других системных эффектов. В работе [6] предлагаются технические решения, применяемые при реконструкции, но отсутствует обоснование выбора котельной. В исследованиях [7, 8, 9, 10] решение о проведении трансформации объясняется различными достоинствами когенерационной технологии, но не учитываются отдельные характерные особенности каждого объекта. В работе [11] перевод котельных в режим мини-ТЭЦ рассматривается как способ повышения надежности электроснабжения собственных нужд котельной. В [11, 12] указывается, что установку мини-ТЭЦ целесообразно проводить при недостаточных возможностях существующих источников электроэнергии и тепла. Во многих европейских странах, исследования в этой части не проводились в силу отличий изначального принципа построения системы теплоснабжения [13]. Отсутствует комплексный подход к изменению системы теплоснабжения и выбору котельных для технического перевооружения, где все этапы методически обоснованы и выверены для достижения наилучших эффектов.

Целью исследования является разработка метода, позволяющего сделать выбор котельных, реконструируемых в мини-ТЭЦ и обосновать вариант трансформации. Для достижения цели решены следующие задачи:

- выявление признаков, определяющих целесообразность трансформации котельной в мини-ТЭЦ;
- формирование методики выбора котельных, трансформация которых

приведет к повышению эффективности систем энергоснабжения;

- апробация методики на примере муниципального образования, где в составе системы теплоснабжения действует множество различных котельных.

## МЕТОДЫ

Выбор трансформируемой в мини-ТЭЦ котельной производится с учетом различных факторов, которые могут рассматриваться как признаки. Исследование основано на методологии многофакторного анализа, что предполагает выполнение последовательных процедур:

- построение детерминированной многофакторной модели;
- выбор приема факторного анализа;
- реализация вычислительных процедур;
- формулирование выводов и рекомендаций по результатам анализа.

Решение поставленной задачи связано с применением метода группировок — выделение среди изучаемых объектов характерных групп и подгрупп по тем или иным признакам.

Для выбора трансформируемой в мини-ТЭЦ котельной обоснованы признаки, отражающие ее назначения, т.е. роль в системе теплоснабжения, а также учитываются технологические ограничения на выдачу электрической мощности при ее трансформации в мини-ТЭЦ.

Очевидно, что важную роль играет институциональная среда, определяющая правила и регламенты работы мини-ТЭЦ на оптовом и розничном рынке электроэнергии, правила технологического присоединения генерации к сети и другие нормативно-правовые акты.

Работа на розничном рынке позволяет заключать двухсторонние договора купли-продажи электроэнергии мини-ТЭЦ с коммунальными и коммерческими организациями, что сопровождается ростом доступности электроэнергии. Объясняется это возможностью сократить затраты на оплату сетевой составляющей в цене на электроэнергию, что важно для потребителей, находящихся в одном энергорайоне с котельной. В этом случае можно использовать существующую распределительную сеть среднего

напряжения, которая преобразуется в микрогрид. При этом появление в энергорайоне нового источника электроэнергии повышает гибкость и надежность электроснабжения.

В России к розничным генераторам относятся источники, не превышающие по мощности 25 МВт, что определяет максимальную мощность мини-ТЭЦ.

Предлагается методика выбора котельных для трансформации в мини-ТЭЦ и соответствующий ей алгоритм.

## ИССЛЕДОВАНИЕ И РЕЗУЛЬТАТЫ

### Предпосылки реконструкции котельных с переводом в мини-ТЭЦ и системные эффекты от технического перевооружения

Общеизвестным является то, что процесс комбинированного производства тепловой и электрической энергии характеризуется высокой энергоэффективностью: расход топлива примерно в 1,5 раза ниже относительно раздельного производства энергии на котельных и тепловых электростанциях [14].

Известно, что коэффициент полезного использования топлива на ТЭЦ с паросиловыми установками достигает 70–75% [15], что обусловило развитие технической политики теплофикации на территории СССР. Идея широкого применения комбинированной выработки электрической и тепловой энергии была заложена в Государственном плане электрификации России (ГОЭЛРО).

Однако за последние десятилетия роль ТЭЦ в системах теплоснабжения изменилась. Снижение тепловой нагрузки ТЭЦ обусловлено рядом причин [16, 17], где главная – это сокращение потребления тепловой энергии и пара промышленными предприятиями. Конечно, свой вклад внесло строительство современных зданий с высокой теплоизоляцией. В системе теплоснабжения России с 2005 года на 16,8 % увеличилось количество газовых котельных, при снижении средней установленной мощности с 9,6 до 8 МВт. Это результат перехода части потребителей из централизованных на собственные системы теплоснабжения, где основными источниками служат котельные, что оказалось экономически эффективнее в условиях тотальной газификации территорий

и появления на рынке доступного и эффективного котельного оборудования, работающего с коэффициентом полезного использования топлива около 95%.

На сегодняшний день в структуре производства тепловой энергии в России на когенерацию и котельные приходится примерно по 50%. Потенциал когенерации использован только в крупнейших городах (рис. 1). Параллельно наблюдается существенный рост количества котельных: сейчас на их долю приходится 69% тепловых мощностей в стране. О динамике котельнизации можно судить по рис. 2, где с конца 1990-х прослеживается тенденция увеличения количества котельных. Аналогичная ситуация наблюдается на территории стран СНГ [18]. В Казахстане ведется активное строительство новых котельных в крупных и малых городах. Например, в Астане строятся две газовые котельные, мощность которых в три раза превышает мощность существующего в городе источника комбинированной выработки [19]. В малых городах вводят в работу дополнительное котельное оборудование на ТЭЦ или строят новые источники тепловой энергии, не предполагающие комбинированную выработку. В Белоруссии в 2015 году около 35,7% тепловой энергии было произведено на котельном оборудовании, к 2021 году доля возросла до 37,2% [20]. Однако в стране существует тенденция возвращения к теплофикации, о чем свидетельствует увеличение числа мини-ТЭЦ [21], в том числе на базе трансформации котельных [22,23].

К наиболее распространенным типам когенерационного оборудования относятся энергоэффективные газопоршневые и газотурбинные установки [24], характеризующиеся высоким коэффициентом полезного использования топлива, значения которого достигают 85–89%.

Трансформация котельных в мини-ТЭЦ позволит увеличить долю комбинированной выработки тепловой и электрической энергии, что обеспечит повышение энергоэффективности производства энергии и, следовательно, в определенной степени ресурсосбережения. Наибольший интерес в России при этом представляют почти 2600 котельных установленной мощностью от 20 до 100 МВт.

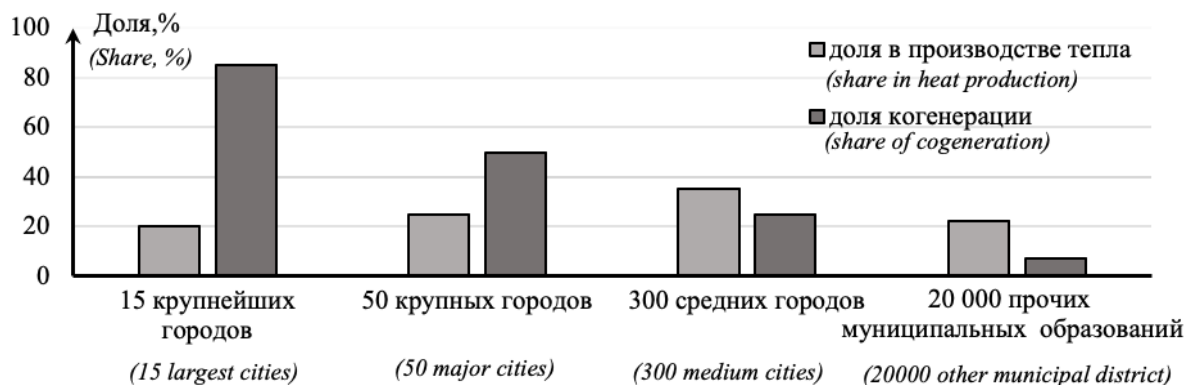


Рис. 1. Доля когенерации при централизованном производстве тепловой энергии в России.  
 Fig.1. Share of cogeneration in centralized heat production in Russia.



Рис. 2. Динамика изменения числа котельных на фоне производства электрической и тепловой энергии тепловыми электростанциями.

Fig.2. Dynamics of changes in the number of boiler houses against the background of the production of electrical and thermal energy by thermal power plants.

Создание и присоединение к существующим распределительным электрическим сетям энергорайона мини-ТЭЦ позволяет повысить надежность [25, 26], экономичность, экологичность и энергоснабжения в целом [27, 28, 29].

Рост надежности энергоснабжения обеспечивается повышением:

- бесперебойности электроснабжения за счет многостороннего питания;
- долговечности электросетевого и генерирующего оборудования за счет возможности формирования облегченных режимов работы;
- управляемости и наблюдаемости за счет цифровизации энергорайона с мини-ТЭЦ для обеспечения согласованности взаимодействия централизованной и децентрализованных систем управления;
- энергобезопасности системы теплоснабжения за счет снижения риска

нарушения электроснабжения собственных нужд при крупных возмущениях в энергорайоне.

Повышение экологичности обеспечивается снижением углеродного следа при производстве энергии за счет сокращения выработки электроэнергии на угольных электростанциях [30].

Повышение экономичности обусловлено следующими факторами:

- энергоэффективностью производства тепловой и электрической энергии в когенерационном режиме на установках с высокими коэффициентами полезного использования топлива и электрическим КПД;
- сокращением потерь и затрат на передачу энергии из-за расположения энергоисточника в непосредственной близости к потребителям [3, 31];

- сокращением затрат на развитие электросетевого комплекса, связанное с техническим перевооружением и реконструкцией, особенно в дефицитных энергорайонах;
- снижением расходов на техническое обслуживание оборудования сетевого комплекса из-за повышения долговечности оборудования при обеспечении облегченного режима работы благодаря регулированию выдачи мощности мини-ТЭЦ;
- повышением наблюдаемости для контроля технического состояния оборудования и осуществления мероприятий по обеспечению показателей качества электроэнергии [32, 33].

#### **Методика отбора котельных для трансформации в мини-ТЭЦ**

Как известно, существует несколько схем технологического присоединения котельной к электрической сети. Во многом это зависит от требований к категории надежности теплоснабжения и категории надежности электроприемников котельной. Обычно котельные присоединяются к электрической сети согласно требованиям к электроприемникам первой категории надежности. Таким образом, электрическая сеть низкого напряжения, включая трансформаторные пункты, обеспечивает двустороннее независимое питание, где бесперебойность электроснабжения позволяет обеспечить функционирование котельных, как объектов первой категории надежности теплоснабжения. На крупных котельных тепловой мощностью более 100 МВт зачастую предусматривается установка резервного генератора для обеспечения собственных нужд.

Таким образом, схема внешнего электроснабжения средних отопительных котельных мощностью от 20 до 100 МВт обычно избыточна, что позволяет при отказе любого одного элемента (критерий n-1) обеспечить электроснабжения собственных нужд. Загрузка системы электроснабжения котельной даже при максимальной тепловой нагрузке не превышает 50%. Это позволяет при минимальных затратах на техническое перевооружение сети низкого напряжения осуществить на котельной установку генераторов, предназначенных обеспечить собственные нужды и выдачу электрической мощности, двукратно превышающей нагрузку собственных нужд.

Очевидно, что при установке генерации трехкратно превышающую по мощности максимальную нагрузку собственных нужд требуется реконструкция сетевого комплекса для выдачи электрической мощности в распределительную сеть среднего напряжения. Однако в этом случае выдаваемая мощность мини-ТЭЦ ограничена величиной минимальной загрузки центра питания. Это требование позволяет исключить реверсивный режим работы районной подстанции, которая обычно проектируется и строится для выполнения функции понижения напряжения.

Следует отметить актуальность трансформации котельных в мини-ТЭЦ для субъектов, выполняющих функции единой теплоснабжающей организации (ЕТО).

Исходя из требований к надежности электроснабжения, экономических и экологических эффектов можно выделить две детерминированных многофакторных моделей, по выбору котельной и использованию когенерационных установок мини-ТЭЦ.

Каждая из моделей определяет условия присоединения когенерационных установок к электрической сети при трансформации котельных (рис. 3):

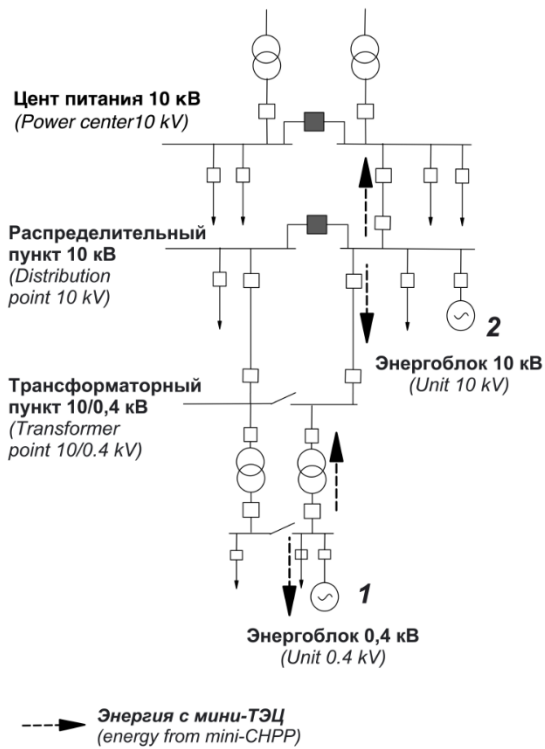
*1 модель:* Обеспечение потребности в электроэнергии системы теплоснабжения, включая собственные нужды котельной. В этом случае достаточно присоединения генераторов к сети напряжение 0,4 кВ, выдача мощности сеть среднего напряжения осуществляется без реконструкции этой сети.

*2 модель:* Обеспечение растущего спроса на электроэнергию в энергорайоне, В этом случае предполагается реконструкция сети среднего напряжения 10(6) кВ, в том числе для выдачи мощности мини-ТЭЦ. Это альтернатива развитию сети высокого напряжения.

При отборе котельных появляется задача их оценки (ранжирования). Доминирующей в теории принятия решений является многокритериальный выбор.

Решение поставленной задачи отбора котельных для трансформации основано на детерминированном факторном анализе.

Производится попарное сравнение альтернатив и дальнейшее установление порядка на основе сравнения значений многокритериальных функций.



**Рис.3. Модели использования мини-ТЭЦ при трансформации котельной.**  
**Fig.3. Models for the use of mini-CHPP in the transformation of the boiler house.**

Множество котельных, как возможных объектов трансформации задается множеством А:

$$A = \{a_i\}_{i=1}^n \quad (1)$$

Множество критериев для оценки эффективности трансформации задается множеством В:

$$B = \{b_j\}_{j=1}^m \quad (2)$$

Далее для отбора каждой котельной  $a_i$  по всему множеству критериев выставляются оценки рамках нечеткой логики:

- удовлетворяет критерию = 1
- не удовлетворяет критерию = 0

В качестве критериев оценки эффективности трансформации котельных в данной работе предлагается анализ множества исходя из 4 критериев.

*Критерий  $b_1$ : назначение котельной*

Существуют отопительные и производственные котельные. Основными продуктами отопительной котельной

являются горячая вода и теплоноситель. Промышленные котельные являются источником пара для реализации технологического процесса производства и для них отопительные функции имеют вторичное значение.

Обычно отопительные котельные являются элементом коммунальной инфраструктуры муниципального образования. Их трансформация позволит помимо тепла осуществлять отпуск коммунальным потребителям недорогого электричества, которое во многих странах дотируется в соответствии с социальной политикой. Таким образом,

$$b_1 = 1, \text{ если котельная отопительная}$$

$$b_1 = 0, \text{ если котельная не отопительная}$$

*Критерий  $b_2$ : используемое топливо*

Ориентация на газопоршневые и газотурбинные установки с позиций технологической допустимости требует соответствующей ресурсной достаточности. Поэтому трансформация котельной в мини-ТЭЦ с ГПУ и ГТУ возможна при ее работе на природном газе, что предполагает ее присоединение к системе газоснабжения. Последнее создает благоприятные предпосылки получения дополнительного объема природного газа достаточного для работы мини-ТЭЦ.

По мнению авторов, при выборе технических решений и схемы мини-ТЭЦ, создаваемой в коммунальной энергетической инфраструктуре приоритет следует отдавать ГПУ, т.к. их электрический КПД практически не зависит от температуры, окружающей среду в отличие от ГТУ. Кроме этого, их электрический КПД не ниже, а у отдельных моделей и выше, чем у паросиловых установок. ГПУ более ремонтпригодные, не требуют специальных условий завода-изготовителя как ГТУ, не нуждаются в дополнительных затратах на повышение шумозащиты, что важно для населенных пунктов [34], следовательно,

$$b_2 = 1, \text{ если топливо газ}$$

$$b_2 = 0, \text{ если топливо не газ}$$

*Критерий  $b_3$ : отношение котельной к объектам единой теплоснабжающей организации*

Единая теплоснабжающая организация (ЕТО) – это основной поставщик тепла в определённой системе теплоснабжения, обязанностью которого является обеспечение тепловой энергией всех потребителей в зоне своей деятельности.

У источников тепловой энергии в зоне действия ЕТО существует высокая тепловая нагрузка и перевод такой котельной в мини-ТЭЦ позволит обеспечить производство тепловой энергии в когенерационном режиме [35], снизив ее стоимость, относя значительную часть расхода топлива на отпускаемую электроэнергию.

Зачастую мощность нагрузки электроприемников системы теплоснабжения, включая собственные нужды котельной, превышает 10% от тепловой и требует высокой надежности электроснабжения. Следовательно,

$$b_3 = 1, \text{ если котельная относится к ЕТО}$$

$$b_3 = 0, \text{ если котельная не относится к ЕТО}$$

*Критерий  $b_4$ : баланс энергорайона*

В дефицитных энергорайонах для подключения новых потребителей отсутствуют свободные мощности на центре питания. Для снятия ограничений на новое технологическое присоединение потребителей требуется производить реконструкцию подстанции или увеличивать пропускную способность подходящих к подстанции линий. Это связано с большими капитальными затратами, что ведет к повышению сетевого тарифа и снижению доступности электроэнергии из систем централизованного электроснабжения. Появление мини-ТЭЦ в дефицитном энергорайоне снижает указанное ограничение, не требуя существенной реконструкции сети высокого напряжения.

$$b_4 = 1, \text{ если энергорайон дефицитный}$$

$$b_4 = 0, \text{ если энергорайон избыточный}$$

Обычно указанным признакам отвечает несколько котельных из множества, находящихся в муниципальном образовании.

Результаты вынесения оценок представляются как матрица решений вида, представленного в таблице 1.

Таблица 1.

Матрица решений.

Table 1.

Decision matrix.

	$b_1$	$b_2$	$b_3$	$b_4$
$a_1$	$x_{11}$	$x_{12}$	$x_{13}$	$x_{14}$
$a_2$	$x_{21}$	$x_{22}$	$x_{23}$	$x_{24}$
$a_3$	$x_{31}$	$x_{32}$	$x_{33}$	$x_{34}$
...	...	...	...	...
$a_n$	$x_{n1}$	$x_{n2}$	$x_{n3}$	$x_{n4}$

Далее для котельных, удовлетворяющих условию:

$$x_{11} = x_{12} = x_{13} = x_{14} = 1 \quad (3)$$

вычисляется ранг, определяющих приоритет реконструкции ( $R$ ).

Очевидно, что ранг зависит от характеристик энергорайона. Судить об этом можно по соотношению мощности центра питания с учетом критерия  $n-1(P_{\text{цп\_дон}})$  и электрической мощности создаваемой генерации, которая прямо пропорциональна тепловой мощности котельной ( $W$ ):

$$R = \frac{W}{P_{\text{цп\_дон}}} \quad (4)$$

Чем выше значение ранга, тем выше приоритетность трансформации котельной с позиции эффективности. Создание на их основе мини-ТЭЦ повысит эффективность систем тепло- и электроснабжения, что важно для социально-экономического развития территорий.

### ПРИМЕР

#### Выбор котельных для технического перевооружения в Новосибирской агломерации

В качестве примера реализации алгоритма представлены результаты отбора котельных для последующей трансформации в мини-ТЭЦ на территории Новосибирской агломерации, где есть опыт успешной работы мини-ТЭЦ.

В г. Новосибирск преобладает централизованное теплоснабжение от ТЭЦ и крупных котельных. По состоянию на 2023 год, от ТЭЦ обеспечивается около 60 % потребителей, от крупных котельных



теплопроизводительностью более 20 МВт – 35,4 %.

В муниципальных образованиях, формирующих Новосибирскую агломерацию, отсутствуют источники комбинированной выработки, вся тепловая энергия вырабатывается на котельных, что определяет актуальность перехода на когенерационные технологии.

В топливном балансе котельных преобладает природный газ, что обусловлено газификацией региона. В результате исследования была сформирована матрица решений для 360 котельных. Отобрано 134 отопительных газовых котельных мощностью от 25 до 416 МВт, выполняющих функции ЕТО и находящихся в зоне дефицитных центров питания.

Далее отобранные котельные были проранжированы по приоритетности, путем расчета ранга, 10 котельных, обладающих максимальным рангом отображены на рис. 4.

В рассматриваемом примере на первом месте стоит котельная №8, а затем следует осуществлять трансформацию котельных №9 и №7 находящихся в одном энергорайоне. Следующими по приоритету являются котельные №1, №4, №6. Замыкают рейтинг котельные №2, №3 и №5

Скорее всего, помимо установки когенерационного оборудования на выбранных котельных потребуется реконструкция сети 10 кВ.

Трансформация котельной №10 позволит получить максимальный эффект от повышения энергоэффективности, но на ее базе можно создать источник мощностью до 25 МВт для электроснабжения второй по мощности в г.Новосибирске системы централизованного теплоснабжения. Это позволит мини-ТЭЦ остаться субъектом розничного рынка электроэнергии.



Рис. 4. Десять приоритетных для трансформации котельных в Новосибирской агломерации.  
Fig.4. Ten top-priority boiler houses for transformation in the Novosibirsk agglomeration.

Трансформация отобранных котельных обеспечит повышение эффективности нескольких систем теплоснабжения, окажет положительное влияние на электроснабжение

в энергорайонах, повысив свойства экономичность, надежность и экологичность.

Полученные в работе результаты могут служить рекомендациями при разработке региональных программ «Энергосбережение

и повышение энергетической эффективности Новосибирской области», «Схема и программа развития электроэнергетики Новосибирской области», «Схема теплоснабжения города Новосибирск», что приведет к повышению инвестиционной привлекательности осуществления мероприятий по повышению когенерационной выработки тепловой и электрической энергии.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Повышение энергоэффективности производства является актуальной отраслевой задачей. Одно из средств решения – использование когенерационных технологий и создание мини-ТЭЦ. Одним из вариантов создания мини-ТЭЦ является техническое перевооружение существующих котельных. В исследовании предложена комплексная методика отбора и ранжирования котельных для последующего создания мини-ТЭЦ, что потребует реконструкции распределительной сети среднего напряжения, но позволит сократить капиталовложения в модернизацию сети высокого напряжения. Разработанная методика основана на анализе комплекса критериев, учитываемых назначение котельных, используемое топливо, установленную тепловую мощность и выполняемую функцию в системах теплоснабжения, техническое состояние и режим работы электросетевого оборудования, перспективные и балансы электроэнергии и мощности в энергорайоне, в составе которого будет работать мини-ТЭЦ.

Применение полученных результатов исследования при решении задач повышения энергоэффективности и экологичности отдельных территорий повысит эффективность принимаемых решений при развитии систем теплоснабжения.

Дальнейшие научные исследования будут направлены на разработку методов обоснования структуры и состава когенерационного оборудования мини-ТЭЦ.

### БЛАГОДАРНОСТЬ

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-29-10171, <https://rscf.ru/project/23-29-10171/> и гранта № р-57 Правительства Новосибирской области в Новосибирском государственном техническом университете.

### Литература (References)

- [1] Filippov S. New Technological Revolution and Energy Requirements. *Foresight and STI Governance*, vol. 12, no 4, pp. 20–33. DOI: 10.17323/2500-2597.2018.4.20.33 (accessed 02.03.2023).
- [2] Pepermans G., Driesen J., Haeseldonckx D., Belmans R., D'haeseleer W. Distributed generation: Definition, benefits and issues. *Energy Policy*, 2005, no. 33, pp.787–798. DOI: 10.1016/j.enpol.2003.10.004 (accessed 05.03.2023).
- [3] Ilyushin P., Kulikov A., Loskutov A. Application of the Wald Sequential Procedure in Automatic Network Control with Distributed Generation. In: Silhavy, R., Silhavy, P., Prokopova, Z. (eds) *Software Engineering Perspectives in Intelligent Systems. CoMeSySo 2020. Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2020. vol. 1295. Springer, Cham. DOI: 10.1007/978-3-030-63319-6\_11 (accessed 05.03.2023).
- [4] Pankrushina T., Khorshev A. Methodical approach to assessing the optimal development scale of distributed cogeneration in the UPS of Russia for the long-term. *E3S Web of Conferences. EDP Sciences*. 2019, vol.114. DOI: 10.1051/e3sconf/201911405006 (accessed 06.03.2023).
- [5] Filippov S. P., Dilman M. D., Ilyushin P. V. Distributed generation of electricity and sustainable regional growth. *Thermal Engineering*. 2019, vol. 66, pp.869-880. DOI: 10.1134/S0040601519120036 (accessed 16.03.2023).
- [6] Sednin V.A., Raiko D.M., Levin V.M. К вопросу о повышении эффективности отопительных котельных и мини-ТЭЦ [On the issue of increasing the efficiency of heating boiler houses and mini-CHPs]. *Energiya i menedzhment – Energy and management*, 2015, no.1, pp. 12-17. (In Russian) DOI: <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-6-511-523> (accessed 19.03.2023).
- [7] Churashev V. N., Markova V. M. Mini-TETs-perspektivnoe napravlenie raz-vitiya energetiki [Mini-CHPP is a promising direction for the development of energy] *Aktualnye problemy razvitiya Novosibirskoy oblasti i puti ikh resheniya*. [Actual problems of the development of the Novosibirsk region and ways to solve them], 2014, no.1, pp. 138-161. (In Russian)
- [8] Caglayan H., Caliskan H. Advanced exergy analyses and optimization of a cogeneration system for ceramic industry by considering endogenous, exogenous, avoidable and unavoidable exergies under different environmental conditions. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2021, vol. 140.

- DOI: 10.1016/j.rser.2021.110730 (accessed 15.04.2023).
- [9] García-Gusano D., Garraín D., Dufour J. Prospective life cycle assessment of the Spanish electricity production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2017, vol. 75, pp.21-34 DOI: 10.1016/j.apenergy.2017.01.011 (accessed 01.04.2023).
- [10] Beccali M., Ciulla G., Di Pietra B., Galatioto A., Leone G., Piacentino A. Assessing the feasibility of cogeneration retrofit and district heating/cooling networks in small Italian islands. *Energy*, 2017, vol. 141, pp. 2572-2686 DOI: 10.1016/j.energy.2017.07.011 (accessed 11.03.2023).
- [11] Pashnin, V.O., Zhirgalova V.O. Povyshenie effektivnosti rayonnoy ko-telnoy G. Kopeyska za schet ustanovki gazoporshnevoy mini-TETs [Improving the efficiency of the district boiler house in Kopeysk by installing a gas-piston mini-CHPP] *Energo- i resursosberezhenie v teploenergetike i sotsialnoy sfere: materialy Mezhdunarodnoy nauchno-tehnicheskoy konferentsii studentov, aspirantov, uchennykh* – [Energy and resource saving in thermal power engineering and social sphere: materials of the International Scientific and Technical Conference of Students, Postgraduates, Scientists] 2017, vol. 5, no.1, pp. 152-156. (In Russian)
- [12] Lake A., Rezaie B., Beyerlein S. Review of district heating and cooling systems for a sustainable future. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, vol. 67, pp.417-425 DOI: 10.1016/j.rser.2016.09.061 (accessed 14.04.2023).
- [13] O. Angelidis, A. Ioannou, D. Friedrich, A. Thomson, G. Falcone District heating and cooling networks with decentralised energy substations: Opportunities and barriers for holistic energy system decarbonisation // *Energy* 269, 2023. DOI: 10.1016/j.energy.2023.126740 (accessed 17.03.2023).
- [14] Lisin, E., Sobolev, A., Strielkowski, W., Garanin, I. Thermal efficiency of cogeneration units with multi-stage reheating for Russian municipal heating systems. *Energies*, vol. 9, no.4, pp. 269. DOI: 10.3390/en9040269 (accessed 01.03.2023).
- [15] Lucas K. On the thermodynamics of cogeneration. *International Journal of Thermal Sciences*. 2000, vol.39, no.9-11, pp. 1039-1046. DOI: 10.1016/S1290-0729(00)01171-6 (accessed 02.04.2023).
- [16] Zeigarnik Y. A. Some problems with the development of combined generation of electricity and heat in Russia. *Energy*. 2006, vol.31, no.13, pp. 2387-2394. DOI: 10.1016/j.energy.2006.04.003 (accessed 12.04.2023).
- [17] Wang J. Flexibility of combined heat and power plants: A review of technologies and operation strategies. *Applied energy*. 2019, vol. 252, pp. 113445. DOI:10.1016/j.apenergy.2019.113445 (accessed 11.03.2023).
- [18] Nagornov, V.N., Mantserova E.P., Korsak T.F. Ekonomicheskaya effektivnost detsentralizovannogo teplosnabzheniya dlya usloviy Respubliki Belarus [Economic efficiency of decentralized heat supply for the conditions of the Republic of Belarus] *Knowledge Economy: Theory, Practice, Prospects for Development: Proceedings of the International Scientific and Practical Conference Dedicated to the 50th Anniversary of the Institute* [Ekonomika znaniy: teoriya, praktika, perspektivy razvitiya : Sbornik materialov Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, posvyashchennoy 50-letnemu yubileyu instituta]. Donetsk, 2020, pp. 486-493. (In Russian)
- [19] *Na stroitelstvo gazovoy kotelnoy v Astane vydelyat 5 mlrd tenge* [5 billion tenge will be allocated for the construction of a gas boiler house in Astana]. Atameken business, 2023. Available at: <https://inbusiness.kz/ru/news/nastroitelstvo-gazovoj-kotelnoj-v-astane-videlyat-5-mlrd-tenge> (accessed 10.04.2023).
- [20] Pospelova T., Kuzmich V. Teplosnabzhenie v respublikе Belarus: sostoyanie i perspektivy. *Heat supply in the Republic of Belarus: state and prospects* (Brief information). Minsk, 2021
- [21] Kovalyov I. L., Kovalyov L. I. Economic realities and development perspectives of small-scale power generation in the Republic of Belarus. *Economic and Social Changes: Facts, Trends, Forecast*. 2013, no.3, pp.71-82.
- [22] Malajchuk L. M. Increase of efficiency of boiler-houses in agroindustrial complex by introduction of cogeneration technologies. *International Conference on Prospects and Directions of the Development of Energetics of the Agroindustrial Complex*, Minsk (Belarus), pp. 22-23 November 2007. – BSATU, 2007.
- [23] Bayrashevskiy B.A. Perevod vodogreynoy kotelnoy v rezhim mini-TETs [Transfer of a hot water boiler to a mini-CHPP mode]. *Energetika. Izvestiya vysshikh uchebnykh zave-deniy i energeticheskikh obedineniy SNG*. [Energy. News of higher educational institutions and energy associations of the CIS]. 2011, pp. 85-90.
- [24] Gil'Manshin, I. R., Konahina, I. A., Kashapov, N. F., & Fahreev, N. N. Mini-Central heating and Power Plant (CHP): the choice of the optimal structure and modes of operation. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2014, vol. 69, no. 1, DOI: 10.1088/1757-899X/69/1/012008 (accessed 17.03.2023).

- [25] Samoylenko V.O., Ilyushin P.V., Pazderin A.V. Estimating distributed generation reliability level. *Renewable Energy and Power Quality Journal*. 2020. Vol. 18. pp. 70-75. DOI: 10.24084/repqj18.225. (accessed 02.04.2023).
- [26] Alabugin A. A., Alabugina R. A., Shchelkonogov A. E. Methods for improving the reliability of power supply of enterprises based on the autonomous cogeneration sources. *International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies.. IEEE*, 2018, pp. 1-6. DOI: 10.1109/FarEastCon.2018.8602674 (accessed 12.04.2023).
- [27] Andreev V. N., Kulakov A. V. International environmental indicators of sustainable development within Russian energy companies (using the example of PJSC Inter RAO). *Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing*, 2020, vol.1683, no. 5. DOI: 10.1088/1742-6596/1683/5/052036 (accessed 10.04.2023).
- [28] Borowski P. F. Management of energy enterprises in zero-emission conditions: Bamboo as an innovative biomass for the production of green energy by power plants. *Energies*. 2022, vol.15, no. 5. DOI: 10.3390/en15051928 (accessed 11.04.2023).
- [29] He, Y., Zhu, L., Fan, J., Li, L., Liu, G. Life cycle assessment of CO<sub>2</sub> emission reduction potential of carbon capture and utilization for liquid fuel and power cogeneration. *Fuel Processing Technology*. 2021, vol. 221. DOI: 10.1016/j.fuproc.2021.106924 (accessed 10.04.2023).
- [30] Kerr T. M., Avendano F. Green loans and multinational corporations. *Natural Resources & Environment*. 2020, vol. 35, no. 2, pp. 46-49.
- [31] Dobrokhoto V. I., Zeigarnik Y. A. Cogeneration: Problems and possibilities of realization under present conditions. *Thermal engineering*. 2007, vol. 54, pp. 8-9. DOI: 10.1016/j.energy.2006.04.003 (accessed 18.04.2023).
- [32] Ilyushin P. V., Filippov S. P. Approaches to Voltage Control in Distributed Generation-Enabled Nodes of Distribution Grids. 2021 *International Ural Conference on Electrical Power Engineering.. IEEE*, 2021, pp. 223-228. DOI: 10.1051/e3sconf/201913901006 (accessed 08.04.2023).
- [33] Ilyushin P., Kulikov A., Suslov K. Ensuring Dynamic Stability of Voltage in Electric Power Systems under Critical Loads SSRN Electronic Journal. DOI: 10.2139/ssrn.4157004. (accessed 18.04.2023).
- [34] Gil'Manshin I. R. et al. Mini-Central heating and Power Plant (CHP): the choice of the optimal structure and modes of operation //IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – IOP Publishing, 2014, vol. 69, no. 1. DOI: 10.1088/1757-899X/69/1/012008 (accessed 03.07.2023).
- [35] Beiron, J., Göransson, L., Normann, F., & Johnsson, F. Flexibility provision by combined heat and power plants—An evaluation of benefits from a plant and system perspective. *Energy Conversion and Management*. 2022, vol.16. DOI: 10.1016/j.ecmx.2022.100318 (accessed 18.03.2023).

**Сведения об авторах.**



**Мышкина Людмила Сергеевна**, к.т.н., доцент каф. Автоматизированных электроэнергетических систем, вед. науч. сотрудник НОЦ «Интеллектуальная энергия» Новосибирского государственного технического университета  
E-mail: [Lsmyshkina@gmail.com](mailto:Lsmyshkina@gmail.com)



**Фролова Яна Андреевна**, ст. преподаватель каф. Автоматизированных электроэнергетических систем Новосибирского государственного технического университета.  
E-mail: [ya.abramova1991@gmail.com](mailto:ya.abramova1991@gmail.com)



**Иванова Елизавета Михайловна**, сотрудник НОЦ «Интеллектуальная энергия» Новосибирского государственного технического университета.  
E-mail: [lizai2000@mail.ru](mailto:lizai2000@mail.ru)