

Эмиссия CO₂ при работе автономных водяных систем
теплоснабжения

Алексей Леонидович Торопов

Инженерный центр «Апрель» (ИЦ «Апрель»); г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Эмиссия CO₂ при работе тепловых генераторов автономных систем теплоснабжения — один из важнейших показателей техногенного воздействия на атмосферу Земли. Генерация тепла выполняется тепловыми насосами (ТН), газовыми и электрическими котлами, системами на твердом и жидком углеводородном топливе. Цель исследования — оценка показателя эмиссии CO₂ на киловатт тепловой энергии указанных генераторов систем теплоснабжения при реальной энергетической эффективности работы тепловых генераторов (ТГ) систем теплоснабжения с отопительными приборами радиаторного типа.

Материалы и методы. Используются официальные сведения Росстата РФ, доклады министерств энергетики, экономического развития, действующие ГОСТы и нормативные документы. При расчете коэффициентов энергетической эффективности ТГ автономных систем теплоснабжения применялись экспериментальные данные. Расчеты проводились методами математического моделирования.

Результаты. Определены значения эмиссии CO₂ на киловатт тепловой энергии для автономных систем водяного теплоснабжения при генерации тепловой энергии ТН (воздух–вода) (ASHP), газовыми конденсационными и конвекционными котлами, котлами на твердом и жидком топливе.

Выводы. Оценка эмиссии CO₂ тепловых генераторов автономного водяного теплоснабжения показала зависимость от структуры производства и транспортировки электрической энергии, климата и используемых отопительных приборов. Все указанные параметры отличаются для разных стран. При анализе данных по конкретным странам минимальный углеродный след имеют разные тепловые агрегаты.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: углеродный след, углеродоемкость, эмиссия CO₂, тепловой насос, газовый котел, электрический котел, гибридный тепловой насос, энергетическая эффективность

Благодарности. Автор благодарит рецензентов за замечания по стилю изложения и научно-технической сути, способствующие более глубокому раскрытию темы научной работы.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Торопов А.Л. Эмиссия CO₂ при работе автономных водяных систем теплоснабжения // Вестник МГСУ. 2024. Т. 19. Вып. 11. С. 1779–1788. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.11.1779-1788

Автор, ответственный за переписку: Алексей Леонидович Торопов, toropov@aprilgroup.ru.

CO₂ emissions during the operation of autonomous water
heating systems

Alexey L. Toropov

Engineering Center “April”; Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. CO₂ emissions during the operation of heat generators of autonomous heat supply systems is one of the most important indicators of the man-made impact on the Earth's atmosphere. Heat generation is carried out by heat pumps, gas and electric boilers, solid and liquid hydrocarbon fuel systems. The purpose of the work — Assessment of the CO₂ emission indicator per kilowatt of heat energy of the specified generators of heat supply systems with real energy efficiency of heat generators of heat supply systems with radiator-type heating devices.

Materials and methods. Official data of the Federal State Statistics Service of the Russian Federation, reports of the Ministry of Energy, the Ministry of Economic Development, current GOST and regulatory documents are used. Experimental data were used to calculate the energy efficiency coefficients of heat generators of autonomous heat supply systems. The calculations were carried out by methods of mathematical modelling.

Results. The values of CO₂ emissions per kilowatt of heat energy for autonomous water heating systems in the generation of heat energy by heat pumps (ASHP), gas condensing and convection boilers, solid and liquid fuel boilers were determined.

Conclusions. The assessment of CO₂ emissions of heat generators of autonomous water heat supply showed dependence on the structure of production and transportation of electric energy, climate and heating devices used. All of these parameters are different for different countries. When analyzing country-specific data, different thermal units have minimal carbon footprint.

KEYWORDS: carbon footprint, carbon intensity, CO₂ emissions, heat pump, gas boiler, electric boiler, hybrid heat pump, energy efficiency

Acknowledgements. The author thanks the reviewers for their comments, both in terms of the style of presentation and the scientific and technical essence, which contribute to a deeper disclosure of the topic of scientific work.

FOR CITATION: Toropov A.L. CO₂ emissions during the operation of autonomous water heating systems. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2024; 19(11):1779-1788. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.11.1779-1788 (rus.).

Corresponding author: Alexey L. Toropov, toropov@aprilgroup.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Эмиссия CO₂ при работе тепловых генераторов (ТГ) автономных систем теплоснабжения — один из важнейших показателей техногенного воздействия на атмосферу Земли. Величина данного показателя, выраженная в килограммах CO₂ на произведенный тепловым генератором киловатт тепловой энергии, определяет тенденции в развитии современной отопительной техники. В настоящее время в качестве основных типов генераторов тепла для автономных систем водяного теплоснабжения домохозяйств применяются:

- настенные газовые конвекционные котлы с атмосферной горелкой;
- настенные газовые конденсационные котлы с горелкой полного предварительного смешивания;
- электрические котлы;
- котлы на жидком и твердом углеводородном топливе;
- тепловые насосы (ТН);
- гибридные установки, использующие разные виды топлива при работе в различных температурных диапазонах атмосферного воздуха.

В общепринятой терминологии гибридная (двухтопливная) система теплоснабжения сочетает в себе газовый котел и ТН. Сегодня эти системы теплоснабжения домохозяйств считаются наиболее энергетически эффективными. Гибридные системы в автоматическом режиме переключают работу на наиболее эффективный вид топлива, дающий минимальный углеродный след при генерации тепловой мощности. Считается, что применение ТН для систем теплоснабжения снижает зависимость человечества от углеводородного топлива, а гибридная установка с газовыми котлами — вынужденная мера для работы при низких температурах окружающей среды, когда эффективность ТН падает. Тепловые насосы используют электрическую энергию, которая в первичном виде на планете не существует и является вторичной энергией, полученной в результате генерации с частичным применением углеводородного топлива. Структура использования первичного топлива в получении электрической энергии для каждой страны разная. Без комплексного анализа углеродоемкости производства электрической энергии и анализа энергоэффективности работы ТГ невозможно сделать однозначное заявление об экологичности того или иного способа теплоснабжения помещений. Структура потребления первичной энергии в каждой стране формируется ее

историко-технологическим развитием. По данным на 2018 г., в РФ доля газа составляет 60 %, угля — 16 %, нефтепродуктов — 13 %, ядерного топлива — 8 %, гидроэнергии — 3 %, все виды возобновляемых источников энергии составляют 0,03 %¹. В период с 2010 по 2016 г. углеродоемкость российской электроэнергии снизилась на 59,5 г CO₂/кВт·ч до 358 г CO₂/кВт·ч (–9 %), что эквивалентно снижению выбросов CO₂ в электроэнергетике за указанный период на 42,7 млн т (–10 %) при увеличении ее выработки на 51 млрд кВт·ч (+5 %) [1]. В 2021 г. общая годовая выработка электроэнергии в США электростанциями коммунального масштаба происходила при выбросе CO₂ 388 г/кВт·ч², в Китае — 660, в ФРГ — 435, в среднем по миру — 520 г CO₂/кВт·ч [2, 3]. Указанные значения соответствуют углеродному следу при производстве электрической энергии. При анализе влияния воздействия техногенных факторов на атмосферу Земли, связанных с теплоснабжением помещений, необходимо учитывать потери электрической энергии при ее транспортировке от места производства до места конечного потребления. Эти потери делятся на отчетные, технологические, коммерческие. В ходе анализа углеродного следа при работе систем теплоснабжения целесообразно учитывать только технологические потери, связанные с физическими процессами в электрооборудовании при передаче электроэнергии и расходами на собственные нужды подстанций, поскольку они носят объективный характер. Приемлемый уровень потерь — 4–5 %, но он зависит от расстояния транспортировки электрической энергии, температуры воздуха, напряжения в сети [4]. Предельный уровень технологических потерь при транспортировке электроэнергии составляет по оценкам специалистов 10 % [5]. При больших значениях есть вероятность неучтенного забора энергии. Величина потерь электри-

¹ О состоянии энергосбережения и повышении энергетической эффективности в Российской Федерации : государственный доклад // Министерство экономического развития Российской Федерации. М., 2020. URL: <https://www.economy.gov.ru/material/file/c3901dba442f8e361d68bc019d7ee83f/Energyefficiency2020.pdf>

² How much carbon dioxide is produced per kilowatthour of U.S. electricity generation? // U.S. Energy Information Administration. URL: <https://www.eia.gov/tools/faqs/faq.php?id=74&t=11>

ческой энергии — целевой нормативный показатель, устанавливаемый документами Правительства³.

При изучении вопросов эмиссии CO₂ тепловых генераторов автономных систем теплоснабжения в РФ следует учитывать, что наиболее распространенные приборы отопления — радиаторы и конвекторы, имеющие эффективную температуру теплоносителя напорной магистрали, равную 55–65 °С. Именно эти отопительные приборы наиболее применимы в системах водяного теплоснабжения, поскольку равномерно прогревают помещение, бесшумны и не создают большого движения воздушных масс. Другой особенностью, по сравнению с работой систем отопления в Европе, Северной Америке, Китае, Турции, Англии и других стран, служит климат — продолжительность и средняя температура атмосферного воздуха. Водяное отопление домохозяйства может быть выполнено низкотемпературными приборами типа «теплый пол», и в ряде случаев этот способ дает экономический эффект и возможность использовать ТН воздух–вода при температуре атмосферы до –10 °С [6]. Но «теплый пол» обладает высокой тепловой инерционностью и стандартные системы управления отоплением, такие как термостат температуры воздуха в помещении, при данном типе отопительных приборов неэффективен. К тому же «теплый пол», как единственный тепловой прибор в отапливаемом помещении, неприменим при температурах атмосферы ниже –15–20 °С,

поскольку для компенсации теплопотерь помещения при стандартных значениях теплопроводности ограждающих конструкций требуется температура «теплого пола» выше 40 °С, что вызывает проблемы с точки зрения комфорта пребывания человека в таком помещении и ряд технических вопросов, связанных с используемыми материалами поверхности пола, расстановкой мебели и др. Сравнение эффективности нагрева помещений радиаторами и «теплым полом» проводилось многими авторами [7–12], но они не показали однозначного преимущества одного перед другим, кроме того, они выполнялись для более мягкого климата, чем в России.

В настоящем исследовании рассматривается нагрев помещений наиболее распространенным в РФ способом — отопительными приборами радиаторного типа. Для сравнения углеродного следа при работе разных ТГ автономных систем теплоснабжения в качестве единицы сравнения возьмем количество углекислого газа, выделяемого при сжигании природного газа при выделении одного киловатта тепловой энергии в час, равное 197 г [13, 14]. Энергоэффективность котлов на углеводородном топливе в диапазоне изменения тепловой нагрузки непостоянна. При использовании радиаторов отопления коэффициент энергетической эффективности у конвекционных газовых котлов составляет 80–82 % (GCV) и соответствует максимальной номинальной тепловой нагрузке. Настенные газовые конвекционные котлы с атмосферной горелкой имеют коэффициент модуляции не более 2,5 и неспособны работать в режиме плавной модуляции при тепловой нагрузке менее 40 % от номинальной [15–17]. При функционировании в диапазоне плавной модуляции тепловой мощ-

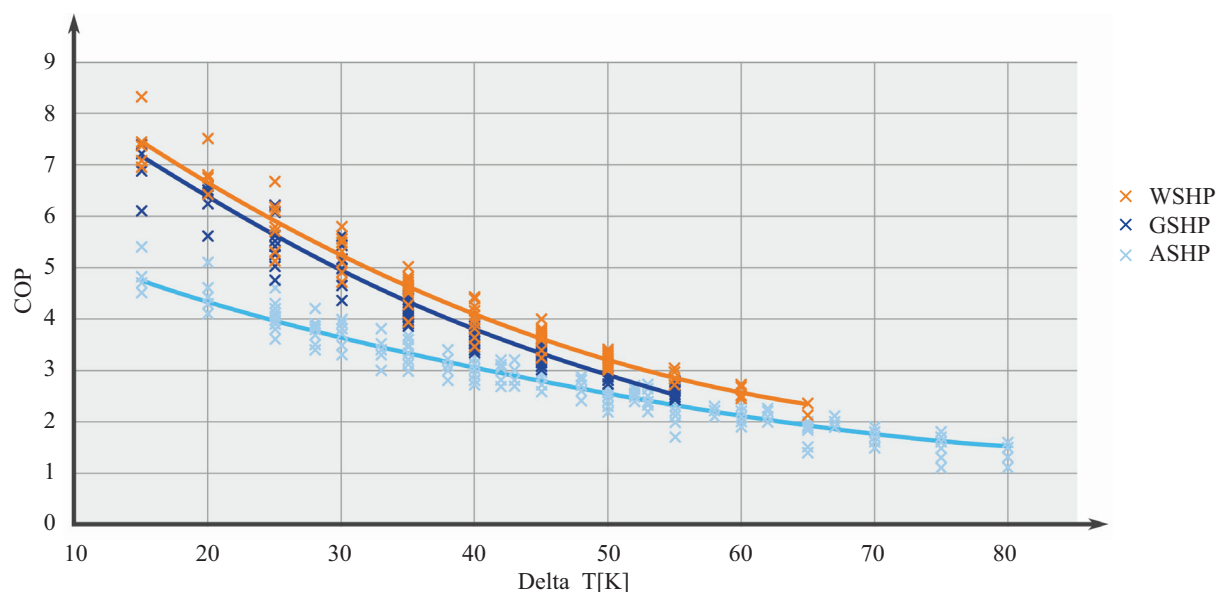


Рис. 1. Графики изменения COP в зависимости от разницы температур атмосферы и теплоносителя системы теплоснабжения: ASHP — тепловой насос с воздушным источником энергии; GSHP — тепловой насос с грунтовым источником энергии; WSHP — тепловой насос с водяным источником энергии

Fig. 1. Graphs of changes in COP depending on the difference in atmospheric temperature and heat carrier temperature of the heating system: ASHP — air source heat pump; GSHP — ground-source heat pump; WSHP — groundwater-source heat pump

ности газовых конвекционных котлов с атмосферными горелками эмиссия CO_2 составляет 240–250 г на киловатт тепловой мощности. При использовании конденсационных газовых котлов в режиме плавной модуляции тепловой мощности при радиаторном варианте отопительных приборов в атмосферу выделяется не менее 220 г CO_2 на киловатт. Конденсационные настенные газовые котлы при использовании радиаторных приборов отопления при номинальных нагрузках имеют КПД 84–86 % (GCV) [18–23].

Анализу COP (Coefficient of Performance — отношение произведенного тепла к потребленной электроэнергии) тепловых насосов при эксплуатации в разных климатических условиях посвящены работы [24–30]. Обобщенные графики зависимости COP тепловых насосов от температуры атмосферы представлены в работах [31, 32]. При использовании в качестве тепловых приборов радиаторов отопления особый интерес представляют ТН класса воздух–вода. Вариант применения воздушного источника энергии теплового насоса (ASHP) имеет наименьшую стоимость и может быть установлен в индивидуальном домохозяйстве как при новом строительстве, так и при реконструкции существующих объектов. График зависимости COP от перепада температур, полученный при анализе большого ряда ТН разных производителей, представлен на рис. 1 [33].

Цель исследования — оценка эмиссии CO_2 при работе генераторов тепла различного типа, используемых в автономных водяных системах теплоснабжения, установленных на территории РФ, с учетом полной эмиссии CO_2 при производстве и транспортировке электрической энергии до места ее применения, реальной энергетической эффективности работы тепловых генераторов систем теплоснабжения с отопительными приборами радиаторного типа.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В работе используются официальные сведения Росстата РФ, доклады министерств энергетики, экономического развития, действующие ГОСТы и нормативные документы. При расчете коэффициентов энергетической эффективности ТГ автономных систем теплоснабжения использовались экспериментальные данные. Расчеты проводились методами математического моделирования.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Коэффициент энергетической эффективности конвекционных газовых котлов при максимальной номинальной нагрузке составляет 80–82 % (GCV). При работе в нижнем диапазоне пропорциональной модуляции тепловой мощности до 40 % от максимальной номинальной мощности он понижается до значения 77–79 % (GCV). Соответственно, при работе в диапазоне плавной модуляции тепловой мощности газовых конвекционных котлов с атмосферны-

ми горелками эмиссия CO_2 составляет 255–240 грамм на киловатт тепловой мощности. При отоплении домохозяйств малой площади (до 100 м²) и особенно маломерных квартир в многоэтажных домах теплопотери на отопление составляют 1–4 кВт·ч [15, 34, 35]. Работа конвекционных газовых котлов при такой тепловой нагрузке переходит в режим цикличной работы, при которой КПД котла может снижаться до 60 % (GCV). Алгоритм функционирования всех настенных конвекционных котлов в цикличном режиме заключается в обязательной технологической паузе между соседними пусками, длительностью от 1 до 3 мин. При этом у низкотемпературных конвекционных настенных котлов с принудительным дымоудалением пауза в работе горелочного устройства сопровождается принудительным обдуванием и охлаждением первичного теплообменника котла, а следовательно, и теплоносителя в системе теплоснабжения. Сгенерированная ранее тепловая энергия в период пауз выбрасывается через дымоход в атмосферу. Средний за отопительный период времени коэффициент энергетической эффективности при работе конвекционных настенных котлов при площади отапливаемого помещения до 100 м² составляет не более 65–70 % (GCV), что эквивалентно эмиссии 300 г CO_2 на киловатт произведенной тепловой энергии. При использовании конденсационных настенных газовых котлов в режиме плавной модуляции тепловой мощности при радиаторном варианте отопительных приборов в атмосферу выделяется не менее 220 г CO_2 /кВт. Конденсационные настенные газовые котлы при использовании радиаторных приборов отопления при номинальных нагрузках имеют КПД 84–86 % (GCV). Коэффициент устойчивой модуляции конденсационных настенных газовых котлов с «пневматическим» газовым клапаном не превышает 5–6 раз, соответственно, при котле с номинальной мощностью 24 кВт·ч минимальная мощность не может быть ниже 4–5 кВт·ч. На объектах с маленькой отапливаемой площадью при температурах атмосферного воздуха выше –5–10 °С возможен выход работы конденсационного котла в тактовый режим, при этом эмиссия CO_2 также будет выше, чем при номинальной работе, достигая значений 270–280 г на киловатт тепловой энергии.

С целью использования электрической энергии для производства тепловой энергии в системе автономного теплоснабжения в основном применяются электрические котлы резисторного нагрева трубчатými электрическими нагревательными элементами (ТЭН) с высоким коэффициентом энергетической эффективности во всем диапазоне изменения тепловой нагрузки, равным 94–99 % [36, 37]. Для оценки углеродного следа в системах теплоснабжения с электрическим ТГ используем осредненное значение коэффициента энергетической эффективности 98 %. При электрическом водяном теплоснабжении необходимо учитывать технологические потери на транспортировку энергии

от источника до места потребления. В общем случае технологические потери зависят от напряжения в сети и их предельные значения составляют 220–110 кВ — до 6 %; 35 кВ — до 8 %, 6(10) кВ — до 10 %; 0,4 кВ — 14 % [38]. В связи с тем, что ТГ автономных систем теплоснабжения устанавливаются на конечных точках использования электрической энергии при напряжении трехфазной сети 0,4 кВ, принимаем в расчете значение технологических потерь, равное 14 %. При значении эмиссии CO₂ при выработке 1 кВт электрической энергии для РФ, равном 358 г, с учетом КПД электрических котлов, технологических потерь на транспортировку до конечного потребителя эмиссия CO₂ при производстве тепловой энергии автономного водяного электрического теплогенератора резисторного типа составит 410 г CO₂/кВт·ч.

На рис. 2 представлены графики углеродоемкости основных тепловых генераторов, применяемых для автономных систем теплоснабжения домохозяйств. Тепловые генераторы с использованием твердого и жидкого углеводородного топлива имеют высокий углеродный след и не могут конкурировать по этому показателю с газовыми, электрическими котлами, тепловыми насосами и гибридными установками. Их значения углеродоемкости приведены в справочном порядке на основании данных, представленных в труде [39]. Для угля (антрацит) — 1100 г CO₂/кВт·ч, для жидкого топлива (дизель, мазут) — 550–800 г CO₂/кВт·ч.

При работе тепловых насосов (ASHP) ниже нулевой отметки температуры атмосферного воздуха возникает необходимость в дополнительных затратах электроэнергии на размораживание конденсата, воз-

никающего на внешнем блоке. Если до температуры –5–7 °С эти вопросы решаются с помощью электрического нагревателя-размораживателя, то при более низких температурах целесообразен переход на отопление газовым котлом — гибридным тепловым насосом. Именно этот гибридный ТГ является наиболее эффективным с точки зрения минимальной эмиссии и минимального техногенного воздействия на атмосферу в рассматриваемых устройствах. На рис. 2 график эмиссии CO₂ для гибридного ТН автономной водяной системы теплоснабжения с радиаторами представлен фиолетовым цветом. Для выводов об уровне углеродоемкости при работе автономных систем теплоснабжения и преимуществах той или иной системы следует оценивать эмиссию CO₂ производства и транспортировки электрической энергии в конкретной стране и эмиссию CO₂ газовых генераторов тепловой энергии. К примеру, углеродоемкость производства электроэнергии в ФРГ кардинально изменилась. В 2021 г. она составляла 435 г CO₂/кВт·ч, в 2022 г. — 745 г CO₂/кВт·ч. Эти показатели выше, чем в ЮАР или Индии⁴. Доля ветряной энергетики снизилась до 21 %, газовая генерация возросла до 24 %, угольная до 47 %. Относительный коэффициент сравнения эмиссии CO₂, при котором показатели газовых и электрических ТГ равны, составил 3,35. При данном соотношении никакой ТН неспособен конкурировать с газовым котлом по эмиссии CO₂ при работе автономного те-

⁴ «Незеленая энергетика»: Германия опередила Индию по выбросам CO₂. URL: <https://topcor.ru/29871-nezelenaja-jenergetika-germanija-operedila-indiju-po-vybrosam-so2.html>

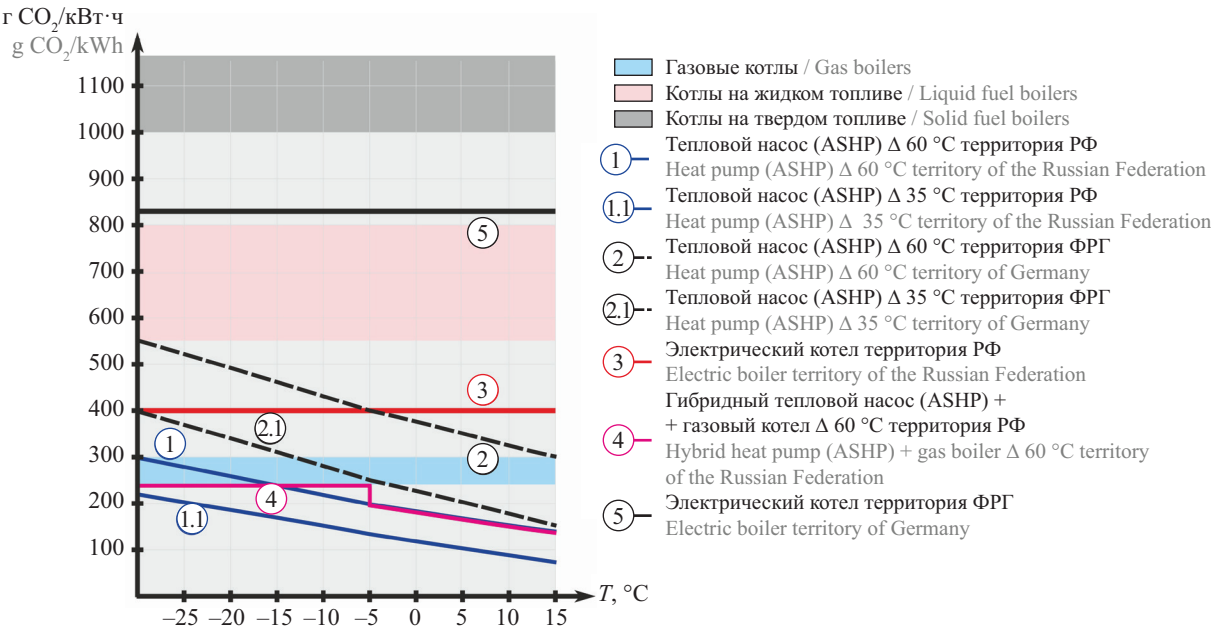


Рис. 2. Графики эмиссии CO₂ при работе тепловых генераторов автономных систем теплоснабжения в зависимости от температуры окружающего атмосферного воздуха

Fig. 2. Graphs of CO₂ emissions during the operation of heat generators of autonomous heat supply systems depending on the ambient air temperature

плоснабжения. Выбросы CO_2 при работе ТН в ФРГ превышают выбросы CO_2 при работе газовых котлов при любой температуре отопительного периода.

В РФ относительный коэффициент равенства эмиссии CO_2 для электрических устройств и газовых котлов составил около 1,5. Для тепловых насосов воздух–вода (ASHP) этот коэффициент при использовании радиаторов отопления с температурой 60 °С соответствует температуре атмосферного воздуха практически всего отопительного периода. Однако на практике эффективность воздушных ТН при температурах ниже –5 °С из-за наледи снижается и фактическое значение COP стремится к 1. В регионах, где средняя температура отопительного периода выше –5 °С, ТН работают с эмиссией ниже, чем у газовых котлов. Тепловые насосы работают на охлаждение помещений более эффективно, чем на отопление. Их целесообразно устанавливать, когда летом возникает вопрос о кондиционировании помещений, а зимой, если средняя температура отопительного периода выше нуля, для отопления. Если температура окружающего воздуха ниже –5 °С и есть ограничения на величину выделенной на домохозяйство электрической мощности, особенно при площади помещений более 100 м², целесообразно устанавливать гибридные системы (тепловой насос + газовый котел). Данные устройства обладают наивысшей энергетической эффективностью и минимальным углеродным следом. Температура перехода работы гибридных систем теплоснабжения с одного вида топлива на другой (с электричества ТН на газ котла) с экологической точки зрения для рассматриваемых систем составляет для РФ –5 °С. Для помещений площадью менее 100 м² установка газовых котлов при наличии ТН не имеет смысла. Возможна установка ТН и электрического котла, подключаемого при температурах атмосферы ниже –5 °С. При ограничениях по мощности электрической энергии, выделенной на объект, единственный путь решения — утепление зданий.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В расчете эмиссии CO_2 при производстве электрической энергии необходимо учитывать исторически сложившуюся структуру производства и типа электростанций. Различия в данных показателях для разных стран может составлять до трех раз. Стоит учитывать потери на транспортировку электрической энергии до конечной точки потребления — домохозяйство. Величина технологических потерь на транспортировку при напряжении 0,4 кВ на точке потребления энергии — не менее 10 %.

Энергетическая эффективность ТГ в отопительный период непостоянна и зависит от многих параметров, включая погодные условия, размеры и теплоизоляцию ограждающих конструкций, и систем управления тепловой мощностью генератора тепла. В РФ с тепловыми приборами радиаторного типа для газовых конвекционных котлов уровень выбросов CO_2 на 1 кВт·ч произведенной тепловой энергии составляет от 240 до 300 г, для конденсационных газовых котлов — 220–280 г, для электрических котлов с резисторными нагревательными элементами — 410 г $\text{CO}_2/\text{кВт} \cdot \text{ч}$.

Вывод о преимуществах эмиссии CO_2 при работе автономных систем теплоснабжения того или иного ТГ возможен только после анализа углеродоемкости производства электрической энергии, которая может отличаться в разных странах в несколько раз. К примеру, в ФРГ после 2022 г. эмиссия CO_2 при работе ТН (воздух–вода) в качестве генераторов тепловой энергии выше эмиссии при работе газовых котлов. Применительно к территории РФ для объектов с отапливаемой площадью более 100 м² с точки зрения энергоэффективности и углеродоемкости лучшими являются установки гибридного типа тепловой насос + конденсационный газовый котел, имеющие углеродный след в среднем 160–180 г $\text{CO}_2/\text{кВт} \cdot \text{ч}$ тепловой энергии за весь отопительный период.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Гимади В., Амирагян А., Поминова И., Курдин А., Колобов О., Мартынюк А. и др. Углеродоемкость электроэнергии в мире и России // Энергетический бюллетень. 2019. № 72. С. 82–85.
2. Белобородов С.С. Снижения эмиссии CO_2 : развитие когенерации или строительство ВИЭ? // Энергосовет. 2018. № 1 (51). С. 16–25.
3. Hussy C., Klaassen E., Koornneef J., Wigand F. International comparison of fossil power efficiency and CO_2 intensity — Update 2014. Netherlands : ECOFYS, 2014. 84 p.
4. Киселёв Г.Ю., Троценко В.М., Петрова Е.В., Криволапов В.А., Гиришин С.С., Бубенчиков А.А. и др. Потери электрической энергии в электрических сетях // Омский научный вестник. 2023. № 1 (185). С. 80–85. DOI: 10.25206/1813-8225-2023-185-80-85. EDN TIXXEB.
5. Шведов Г.В., Сипачева О.В., Савченко О.В. Потери электроэнергии при ее транспорте по электрическим сетям: расчет, анализ, нормирование и снижение. М. : Издательский дом «МЭИ», 2013. 424 с. EDN SUOPLV.
6. Vadiie A., Dodoo A., Jalilzadehazhari E. Heat supply comparison in a single-family house with radiator and floor heating systems // Buildings. 2019. Vol. 10. Issue 1. P. 5. DOI: 10.3390/buildings10010005
7. Sarbu I., Sebarchievici C. A study of the performances of low-temperature heating systems // Energy Efficiency. 2014. Vol. 8. Issue 3. Pp. 609–627. DOI: 10.1007/s12053-014-9312-4

8. Sarbu I., Sebarchievici C. Performance evaluation of radiator and radiant floor heating systems for an office room connected to a ground-coupled heat pump // *Energies*. 2016. Vol. 9. Issue 4. P. 228. DOI: 10.3390/en9040228
9. Livonen M. The guide to radiators for low temperature heating. Zonhoven, Belgium : Radson, 2012. 85 p.
10. Persson T. Lågtemperaturvärmesystem: En kunskapsöversikt. Falun, Sweden : Högskolan Dalarna, 2000. 103 p.
11. Myhren J.A., Holmberg S. Design considerations with ventilation-radiators: Comparisons to traditional two-panel radiators // *Energy and Buildings*. 2009. Vol. 41. Issue 1. Pp. 92–100. DOI: 10.1016/j.enbuild.2008.07.014
12. Olesen B.W., de Carli M. Calculation of the yearly energy performance of heating systems based on the European Building Energy Directive and related CEN standards // *Energy and Buildings*. 2011. Vol. 43. Issue 5. Pp. 1040–1050. DOI: 10.1016/j.enbuild.2010.10.009
13. Casasso A., Capodaglio P., Simonetto F., Sethi R. Environmental and economic benefits from the phase-out of residential oil heating: a study from the Aosta valley region (Italy) // *Sustainability*. 2019. Vol. 11. Issue 13. P. 3633. DOI: 10.3390/su11133633
14. Ravina M., Gamberini C., Casasso A., Panepinto D. Environmental and health impacts of Domestic Hot Water (DHW) boilers in urban areas: a case study from Turin, NW Italy // *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2020. Vol. 17. Issue 2. P. 595. DOI: 10.3390/ijerph17020595
15. Торопов А.Л. Исследование работы газовых клапанов конвекционных котлов малой мощности // *АВОК: Вентиляция, отопление, кондиционирование воздуха, теплоснабжение и строительная теплофизика*. 2020. № 3. С. 58–71. EDN VZQWKW.
16. Хаванов П.А. Атмосферные газовые горелки автономных генераторов // *АВОК*. 2003. № 1. С. 54.
17. Торопов А.Л. Гидравлическая и тепловая устойчивость работы автономных систем поквартирного теплоснабжения // *Вестник МГСУ*. 2022. Т. 17. № 7. С. 944–953. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.7.944-953
18. Наумов Н.Р., Марьяндышев П.А., Попов А.Н., Любов В.К. Исследование работы газовых котлов малой мощности // *Вестник Череповецкого государственного университета*. 2017. № 4 (79). С. 27–33. DOI: 10.23859/1994-0637-2017-4-79-4. EDN ZCDJEB.
19. Хаванов П.А., Чуленев А.С. Климатические параметры и эффективность конденсационных котлов // *АВОК*. 2016. № 3. С. 56–63. EDN VRANFD.
20. Хаванов П.А., Чуленев А.С. Результаты испытаний конденсационного котла при различных режимах эксплуатации // *Научное обозрение*. 2015. № 10–1. С. 45–49. EDN UHPQER.
21. Табуничиков Ю.А. Конденсационные котлы в автономном теплоснабжении // *АВОК: Вентиляция, отопление, кондиционирование воздуха, тепло-*
- снабжение и строительная теплофизика. 2016. № 4. С. 26–31. EDN WANDZV.
22. Bonaros V., Gelegenis J., Haris D., Giannakidis G., Zeryas K. Analysis of the energy and cost savings caused by using condensing boilers for heating dwellings in Greece // *5th International Conference on Applied Energy ICAE2013*. 2013. DOI: 10.13140/RG.2.1.2731.4406
23. Aksenov A.K., Kosorukov D.P. Application of condensation economizers in order to increase the energy efficiency of gas boilers of a traditional type // *International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon)*. 2020. Pp. 1–4. DOI: 10.1109/fareastcon50210.2020.9271452
24. Leonzio G., Fennell P.S., Shah N. Air-source heat pumps for water heating at a high temperature: State of the art // *Sustainable Energy Technologies and Assessments*. 2022. Vol. 54. P. 102866. DOI: 10.1016/j.seta.2022.102866
25. Tabatabaei S.A., Treur J. Comparative Analysis of the Efficiency of Air Source Heat Pumps in Different Climatic Areas of Iran // *Procedia Environmental Sciences*. 2016. Vol. 34. Pp. 547–558. DOI: 10.1016/j.proenv.2016.04.048
26. Xu Y., Huang Y., Jiang N., Song M., Xie X., Xu X. Experimental and theoretical study on an air-source heat pump water heater for northern China in cold winter: Effects of environment temperature and switch of operating modes // *Energy and Buildings*. 2019. Vol. 191. Pp. 164–173. DOI: 10.1016/j.enbuild.2019.03.028
27. Kul O., Ugural M.N. Comparative economic and experimental assessment of air source heat pump and gas-fired boiler: a case study from Turkey // *Sustainability*. 2022. Vol. 14. Issue 21. P. 14298. DOI: 10.3390/su142114298
28. Pieper H., Krupenski I., Markussen W.B., Ommen T., Siirde A., Volkova A. Method of linear approximation of COP for heat pumps and chillers based on thermodynamic modelling and off-design operation // *Energy*. 2021. Vol. 230. P. 120743. DOI: 10.1016/j.energy.2021.120743
29. Колечкина А.Ю., Захаров А.В. Повышение энергоэффективности зданий за счет использования систем горизонтальных теплообменников // *Construction and Geotechnics*. 2016. Т. 7. № 1. С. 112–122. DOI: 10.15593/2224-9826/2016.1.13
30. Чичерин С.В. Место теплоснабжения в современном городе // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Строительство и архитектура*. 2018. Т. 9. № 3. С. 79–87. DOI: 10.15593/2224-9826/2018.3.08. EDN YKKDLF.
31. Pollard A., Berg B. Heat pump performance. Jungferd, New Zealand : BRANZ Ltd, 2018. 24 p. DOI: 10.13140/RG.2.2.25116.13449
32. Rossi di Schio E., Ballerini V., Dongellini M., Valdiserri P. Defrosting of air-source heat pumps: effect of real temperature data on seasonal energy performance

for different locations in Italy // *Applied Sciences*. 2021. Vol. 11. Issue 17. P. 8003. DOI: 10.3390/app11178003

33. Ruhnau O., Hirth L., Praktiknjo A. Time series of heat demand and heat pump efficiency for energy system modeling // *Scientific Data*. 2019. Vol. 6. Issue 1. DOI: 10.1038/s41597-019-0199-y

34. Myhren J.A., Holmberg S. Design considerations with ventilation-radiators: Comparisons to traditional two-panel radiators // *Energy and Buildings*. 2009. Vol. 41. Issue 1. Pp. 92–100. DOI: 10.1016/j.enbuild.2008.07.014

35. Olesen B.W., de Carli M. Calculation of the yearly energy performance of heating systems based on the European Building Energy Directive and related CEN standards // *Nergy and Buildings*. 2011. Vol. 43. Issue 5. Pp. 1040–1050. DOI: 10.1016/j.enbuild.2010.10.009

36. Торопов А.Л. Применение электрических котлов для водяного поквартирного теплоснабжения // *Вестник МГСУ*. 2023. Т. 18. № 9. С. 1451–1465. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.9.1451-1465

37. Торопов А.Л. Энергетическая эффективность электрического котла с косвенным поверхностным резисторным нагревом теплоносителя // *Вестник МГСУ*. 2023. Т. 18. № 6. С. 927–934. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.6.927-934

38. Пузырев Е.В. Детерминированный и стохастический подходы в расчетах и анализе потерь электрической энергии при оценке эффективности функционирования распределительных сетей : автореф. дис. ... канд. техн. наук. Красноярск, 2019. 20 с.

39. Проконова Л.В., Волков Ю.В. Экологические проблемы при производстве электрической и тепловой энергии : практикум. СПб., 2019. 101 с.

Поступила в редакцию 26 марта 2024 г.

Принята в доработанном виде 26 марта 2024 г.

Одобрена для публикации 25 июня 2024 г.

ОБ АВТОРЕ: Алексей Леонидович Торопов — кандидат технических наук, генеральный директор — главный конструктор; Инженерный центр «Апрель» (ИЦ «Апрель»); 105122, г. Москва, Щелковское шоссе, д. 13; РИНЦ ID: 1030472, Scopus: 58406665800, ORCID: 0000-0002-7457-6948; Toropov@aprilgroup.ru.

REFERENCES

1. Gimadi V., Amiryagyan A., Pominova I., Kurdin A., Kolobov O., Martynyuk A. et al. Carbon intensity of electricity in the world and Russia. *Energy Bulletin*. 2019; 72:82-85. (rus.).

2. Beloborodov S.S. Reducing CO₂ emissions: development of cogeneration or construction of renewable energy sources? *Energy Council*. 2018; 1(51):16-25. (rus.).

3. Hussy C., Klaassen E., Koornneef J., Wigand F. *International comparison of fossil power efficiency and CO₂ intensity — Update 2014*. Netherlands, ECOFYS, 2014; 84.

4. Kiselyov G.Yu., Trotsenko V.M., Petrova E.V., Krivolapov V.A., Girshin S.S., Bubenichikov A.A. et al. Losses of electrical energy in electrical networks. *Omsk Scientific Bulletin*. 2023; 1(185):80-85. DOI: 10.25206/1813-8225-2023-185-80-85. EDN TIXXEB. (rus.).

5. Shvedov G.V., Sipacheva O.V., Savchenko O.V. *Electricity losses during its transport through electrical networks: calculation, analysis, rationing and reduction*. Moscow, Publishing House “MPEI”, 2013; 424. EDN SUOPLV. (rus.).

6. Vadice A., Dodoo A., Jalilzadehazhari E. Heat supply comparison in a single-family house with radiator and floor heating systems. *Buildings*. 2019; 10(1):5. DOI: 10.3390/buildings10010005

7. Sarbu I., Sebarchievici C. A study of the performances of low-temperature heating systems. *Energy Efficiency*. 2014; 8(3):609-627. DOI: 10.1007/s12053-014-9312-4

8. Sarbu I., Sebarchievici C. Performance evaluation of radiator and radiant floor heating systems for an office room connected to a ground-coupled heat pump. *Energies*. 2016; 9(4):228. DOI: 10.3390/en9040228

9. Livonen M. The Guid to Radiators for Low Temperature Heating. *Zonhoven*. Belgium, Radson, 2012; 85.

10. Persson T. *Lågtemperaturvärmesystem: En kunskapsöversikt*. Falun, Sweden, Högskolan Dalarna, 2000; 103.

11. Myhren J.A., Holmberg S. Design considerations with ventilation-radiators: Comparisons to traditional two-panel radiators. *Energy and Buildings*. 2009; 41(1):92-100. DOI: 10.1016/j.enbuild.2008.07.014

12. Olesen B.W., de Carli M. Calculation of the yearly energy performance of heating systems based on the European Building Energy Directive and related CEN standards. *Energy and Buildings*. 2011; 43(5):1040-1050. DOI: 10.1016/j.enbuild.2010.10.009

13. Casasso A., Capodaglio P., Simonetto F., Sethi R. Environmental and economic benefits from the phase-out of residential oil heating: a study from the Aosta Valley

Region (Italy). *Sustainability*. 2019; 11(13):3633. DOI: 10.3390/su11133633

14. Ravina M., Gamberini C., Casasso A., Panepinto D. Environmental and health impacts of Domestic Hot Water (DHW) boilers in urban areas: a case study from Turin, NW Italy. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2020; 17(2):595. DOI: 10.3390/ijerph17020595

15. Toropov A.L. Analysis of operation of gas valves of low-power convection boilers. *ABOK*. 2020; 3:58-71. EDN VZQWKW. (rus.).

16. Havanov P.A. Atmospheric gas burners of autonomous heat generators. *ABOK*. 2003; 1:54. (rus.).

17. Toropov A.L. Hydraulic and thermal stability of independent systems of apartment heating. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2022; 17(7):944-953. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.7.944-953 (rus.).

18. Naumov N.R., Maryandyshev P.A., Popov A.N., Lyubov V.K. Study on gas boilers of low capacities. *Cherepovets State University Bulletin*. 2017; 4(79):27-33. DOI: 10.23859/1994-0637-2017-4-79-4. EDN ZCDJEB. (rus.).

19. Havanov P.A., Chulenev A.S. Climatic parameters and efficiency of condensation boilers. *ABOK*. 2016; 3:56-63. EDN VRANFD. (rus.).

20. Havanov P.A., Chulenev A.S. Results of condensing boiler tests under different operational regimes. *Scientific Review*. 2015; 10-1:45-49. EDN UHPQER. (rus.).

21. Tabunshchikov Y.A. Condensing boilers in autonomous heat supply. *ABOK*. 2016; 4:26-31. EDN WANDZV. (rus.).

22. Bonaros V., Gelegenis J., Haris D., Giannakidis G., Zeryas K. Analysis of the energy and cost savings caused by using condensing boilers for heating dwellings in Greece. *5th International Conference on Applied Energy ICAE2013*. 2013. DOI: 10.13140/RG.2.1.2731.4406

23. Aksenov A.K., Kosorukov D.P. Application of condensation economizers in order to increase the energy efficiency of gas boilers of a traditional type. *International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon)*. 2020; 1-4. DOI: 10.1109/fareastcon50210.2020.9271452

24. Leonzio G., Fennell P.S., Shah N. Air-source heat pumps for water heating at a high temperature: State of the art. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*. 2022; 54:102866. DOI: 10.1016/j.seta.2022.102866

25. Tabatabaei S.A., Treur J. Comparative analysis of the efficiency of air source heat pumps in different climatic areas of Iran. *Procedia Environmental Sciences*. 2016; 34:547-558. DOI: 10.1016/j.proenv.2016.04.048

26. Xu Y., Huang Y., Jiang N., Song M., Xie X., Xu X. Experimental and theoretical study on an air-source heat pump water heater for northern China in cold winter: Effects of environment temperature and switch of operating modes. *Energy and Buildings*. 2019; 191:164-173. DOI: 10.1016/j.enbuild.2019.03.028

27. Kul O., Ugural M.N. Comparative economic and experimental assessment of air source heat pump and gas-fired boiler: a case study from Turkey. *Sustainability*. 2022; 14(21):14298. DOI: 10.3390/su142114298

28. Pieper H., Krupenski I., Markussen W.B., Ommen T., Siirde A., Volkova A. Method of linear approximation of COP for heat pumps and chillers based on thermodynamic modelling and off-design operation. *Energy*. 2021; 230:120743. DOI: 10.1016/j.energy.2021.120743

29. Kolehkhina A.Yu., Zaharov A.V. Increasing the energy efficiency of buildings through the use of horizontal heat exchanger systems. *Construction and Geotechnics*. 2016; 7(1):112-122. DOI: 10.15593/2224-9826/2016.1.13 (rus.).

30. Chicherin S.V. District heating for a urban sustainable future. *Construction and Geotechnics*. 2018; 9(3):79-87. DOI: 10.15593/2224-9826/2018.3.08. EDN YKKDLF. (rus.).

31. Pollard A., Berg B. *Heat pump performance*. Jungferd, New Zealand, BRANZ Ltd, 2018; 24. DOI: 10.13140/RG.2.2.25116.13449

32. Rossi di Schio E., Ballerini V., Dongellini M., Valdiserri P. Defrosting of air-source heat pumps: effect of real temperature data on seasonal energy performance for different locations in Italy. *Applied Sciences*. 2021; 11(17):8003. DOI: 10.3390/app11178003

33. Ruhnau O., Hirth L., Praktijnjo A. Time series of heat demand and heat pump efficiency for energy system modeling. *Scientific Data*. 2019; 6(1). DOI: 10.1038/s41597-019-0199-y

34. Myhren J.A., Holmberg S. Design considerations with ventilation-radiators: Comparisons to traditional two-panel radiators. *Energy and Buildings*. 2009; 41(1):92-100. DOI: 10.1016/j.enbuild.2008.07.014

35. Olesen B.W., de Carli M. Calculation of the yearly energy performance of heating systems based on the European Building Energy Directive and related CEN standards. *Energy and Buildings*. 2011; 43(5):1040-1050. DOI: 10.1016/j.enbuild.2010.10.009

36. Toropov A.L. Application of electric boilers for water apartment heat supply. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2023; 18(9):1451-1465. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.9.1451-1465 (rus.).

37. Toropov A.L. Energy efficiency of an electric boiler with indirect surface resistive heating of the heat carrier. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construc-

tion and Architecture]. 2023; 18(6):927-934. DOI: 10.22227/19970935.2023.6.927-934 (rus.).

38. Puzyrev E.V. *Deterministic and stochastic approaches in calculations and analysis of electrical energy losses when assessing the efficiency of distribution networks : abstract of thesis for the degree of candidate of technical sciences*. Krasnoyarsk, 2019; 20. (rus.).

39. Prokopova L.V., Volkov Yu.V. *Environmental problems in the production of electrical and thermal energy : workshop*. St. Petersburg, 2019; 101. (rus.).

Received March 26, 2024.
Adopted in revised form on March 26, 2024.
Approved for publication on June 25, 2024.

B I O N O T E S: **Alexey L. Toropov** — Candidate of Technical Sciences, General Director — Chief Designer; **Engineering Center “April”**; 13 Schelkovskoe shosse, Moscow, 105122, Russian Federation; ID RSCI: 1030472, Scopus: 58406665800, ORCID: 0000-0002-7457-6948; Toropov@aprilgroup.ru.