

Энергетическая эффективность электрических котлов автономных индивидуальных систем теплоснабжения

Алексей Леонидович Торопов¹, Самвел Володяевич Саргсян²

¹ Инженерный центр «Апрель» (ИЦ «Апрель»); г. Москва, Россия;

² Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Электрические водяные котлы — один из вариантов тепловых генераторов, применяемых в автономных системах теплоснабжения. По сравнению с традиционными тепловыми генераторами на углеводородном топливе, они дешевле, проще в эксплуатации и монтаже, безопаснее. В ряде регионов страны тарифы на электрическую энергию позволяют им конкурировать с традиционными котлами по экономическим показателям. Цель исследования — определить и сравнить показатели энергетической эффективности электрических тепловых генераторов с разными типами камер нагрева с теплоносителями вода, антифриз; оценить возможность запуска системы теплоснабжения из переохлажденного состояния.

Материалы и методы. Исследования носят экспериментальный характер, испытания проведены на исследовательском стенде завода «Ардерия». Установлены характеристики энергетической эффективности электрических тепловых генераторов с объемной камерой нагрева с нагревательными элементами, контактирующими с теплоносителем и проточной камерой косвенного поверхностного нагрева. Выполнены испытания запуска системы в морозильной камере.

Результаты. Определены коэффициенты энергетической эффективности исследуемых образцов электрических тепловых генераторов, составившие в среднем 93,5 % для объемных камер нагрева и 0,97 % для камер проточного типа. Классифицированы составляющие тепловых потерь электрических генераторов. Применение антифризов снижает показатели энергетической эффективности тепловых генераторов на 2,1 %. Подтверждена возможность запуска системы теплоснабжения с электрическим тепловым генератором с проточной камерой нагрева из переохлажденного состояния с температурой –16 °С.

Выводы. Результаты исследования показали существенные преимущества электрических тепловых генераторов с камерой нагрева проточного типа с косвенным поверхностным нагревом над тепловыми электрическими генераторами с объемной камерой нагрева.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: электрический котел, энергетическая эффективность, электрический нагревательный элемент, теплоноситель, антифриз, тепловые потери

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

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Торопов А.Л., Саргсян С.В. Энергетическая эффективность электрических котлов автономных индивидуальных систем теплоснабжения // Вестник МГСУ. 2025. Т. 20. Вып. 7. С. 1104–1112. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.7.1104-1112

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

Energy efficiency of electric boilers of autonomous individual heat supply systems

Alexey L. Toropov¹, Samvel V. Sargsyan²

¹ Engineering Center “April”; Moscow, Russian Federation;

² Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU); Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Electric water boilers are one of the options for heat generators used in autonomous heat supply systems. Compared to traditional heat generators on hydrocarbon fuel, they are cheaper, easier to operate and install, and safer. In a number of regions of the country, electricity tariffs allow them to compete with traditional boilers in terms of economic indicators. The purpose of the work — to determine and compare the energy efficiency indicators of electric heat generators with different types of heating chambers with water and antifreeze coolants. To assess the possibility of starting the heat supply system from a supercooled state.

Materials and methods. The research is experimental in nature, the tests were conducted on the research stand of the “Arderia” plant. The characteristics of the energy efficiency of electric heat generators with a volumetric heating chamber with

heating elements in contact with the coolant and a flow chamber of indirect surface heating were determined. Tests of starting the system in a freezer were conducted.

Results. The energy efficiency coefficients of the studied samples of electric heat generators were determined, amounting to an average of 93.5 % for volumetric heating chambers and 0.97 % for flow-type chambers. The components of heat losses of electric generators were classified. The use of antifreezes reduces the energy efficiency of heat generators by 2.1 %. The possibility of starting a heat supply system with an electric heat generator with a flow-type heating chamber from a supercooled state with a temperature of minus 16 °C was confirmed.

Conclusions. The results of the study showed significant advantages of electric heat generators with a flow-type heating chamber with indirect surface heating over thermal electric generators with a volumetric heating chamber.

KEYWORDS: electric boiler, energy efficiency, electric heating element, heat carrier, antifreeze, heat loss

Acknowledgements. The authors thank 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., Sargsyan S.V. Energy efficiency of electric boilers of autonomous individual heat supply systems. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2025; 20(7):1104-1112. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.7.1104-1112 (rus.).

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

ВВЕДЕНИЕ

Главными факторами, определяющими выбор теплового генератора автономных индивидуальных систем теплоснабжения, являются стоимость энергии и удобство эксплуатации оборудования. С точки зрения экологии и техногенного воздействия на атмосферу Земли внимание нацелено на величину эмиссии парниковых газов, выделяемых при работе систем теплоснабжения. Важны также вопросы безопасности эксплуатации инженерных сетей и оборудования. В качестве источника сырья с целью производства тепловой энергии для автономных систем теплоснабжения наибольшее распространение получили: природный газ, жидкое и твердое углеводородное топливо, электрическая энергия. Полезная доля энергии, реализуемая для нагрева теплоносителя систем теплоснабжения, устанавливается коэффициентом энергетической эффективности теплового генератора.

Научно обоснованное решение о выборе видов топлива для автономной системы теплоснабжения объектов должно базироваться на полноценных исследованиях энергетической эффективности автономных систем теплоснабжения с учетом масштаба объекта, его локации, режимов работы. Использование электрической энергии для автономного теплоснабжения объектов до настоящего времени осуществлялось в незначительных объемах. Это обусловлено тем, что в первичном виде, готовом к применению, электричество в природе отсутствует. Оно получается в результате преобразования первичного энергетического продукта (углеводородное топливо, энергия движения воды, возобновляемая энергия, атомная энергия). Коэффициент преобразования углеводородного топлива в электроэнергию составляет 0,3–0,65 [1, 2]. Указанные значения — основная причина высоких тарифов на электроэнергию и,

как итог, широкое применение углеводородного топлива в автономных системах теплоснабжения.

Изменения, связанные с важностью оценки техногенных факторов развития общества, в приоритетах экологических аспектов воздействия на атмосферу Земли, тенденциях роста размеров городов и городского населения, старения централизованных сетей теплоснабжения, актуальности вопросов безопасности эксплуатации систем теплоснабжения многоквартирных домов и объектов индивидуального строительства, актуализируют научные исследования в области водяного электрического автономного теплоснабжения. Оно дешевле в строительстве, безопаснее и проще в эксплуатации. В ряде регионов Российской Федерации стоимость электрической энергии, например для Иркутской области, составляет для городского населения 1,58 руб. за киловатт в первом диапазоне потребления, равном 7020 кВт·ч в месяц, для сельской местности аналогичный тариф составляет 1,106 руб.¹ Данные тарифы практически соответствуют тарифам на централизованное предоставление тепловой энергии в регионе². В Республике Беларусь стоимость тарифов для выделенного электрического теплоснабжения объектов нового строительства ниже тарифов на централизованное теплоснабжение в 2,2 раза³. Существуют также условия строительства объектов в горной местности, с удалением от магистралей сетевого теплоснабжения и газопроводов, при которых теплоснабжение на базе электрических водяных тепловых генераторов является актуальным. Ряд авторов рассматривают электрические котлы как важный элемент энергетического перехода с углеводородного топлива на энергию возобновляемых источников [3, 4].

Теме применения электроэнергии для систем теплоснабжения посвящены работы [5–10]. Электрические нагревательные элементы, основанные

¹ С 1 января 2025 года жители городов Иркутской области будут оплачивать электроэнергию по сельскому тарифу. URL: <https://www.irk.ru/news/20241210/rate/>

² Тарифы на тепловую энергию для ООО «Байкальская энергетическая компания» с 1 июля 2024. URL: <https://sbyt.irkutskenergo.ru/qa/6950.html>

³ Цены на электроэнергию в Беларуси 2025. URL: <https://ru.tarifas.lt/цены-на-электроэнергию-в-беларуси-2025/>

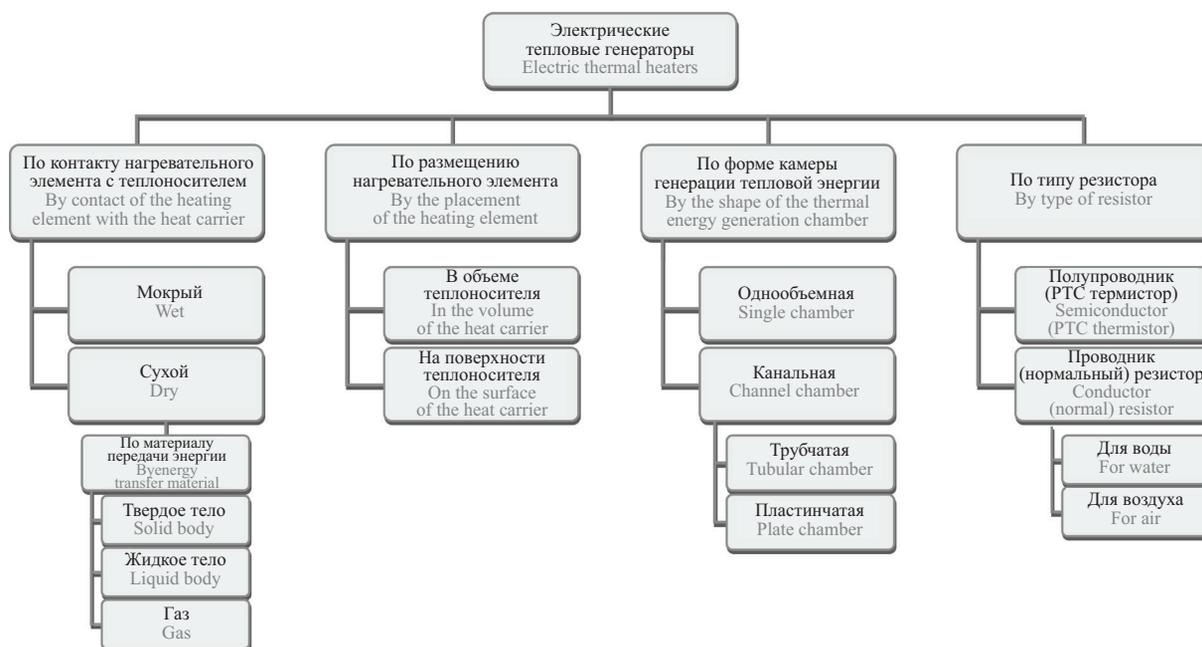


Рис. 1. Классификация устройств генерации тепловой энергии с использованием способа джоулевого нагрева теплоносителя

Fig. 1. Classification of thermal energy generation devices using the Joule heating method of the heat carrier

на принципе джоулевого (резисторного) нагрева при протекании электрического тока, — наиболее популярный вариант, используемый в водяных котлах. По сравнению с другими принципами нагрева теплоносителя в тепловом генераторе (индукционный, прямого нагрева), джоулевый (резисторный) нагрев обладает следующими преимуществами:

- статистика использования в течение столетнего применения;
- низкий уровень шума при работе;
- применим к жидкостным теплоносителям различного типа;
- минимальные размеры;
- простота регулирования мощности и системы управления нагрузками;
- высокая надежность и ремонтпригодность;
- низкая стоимость.

Общая классификация применения электрических котлов для систем теплоснабжения представлена в публикации [11], классификация устройств генерации тепловой энергии на основе джоулевого нагрева приведена на рис. 1 [12].

Практика применения электрических котлов для систем теплоснабжения индивидуальных многоквартирных домов содержит случаи использования незамерзающих теплоносителей (антифризов). Применение антифризов в системах теплоснабжения рассматривалось в трудах [12–16]. Результатом этих исследований является заключение о необходимости значительной корректировки режимов циркуляции теплоносителя в отопительном контуре системы

теплоснабжения в связи с существенным отличием вязкости антифризов, их теплоемкости и теплопроводности по сравнению с водой. Исследования работы водяных электрических тепловых генераторов проводились для вариантов конструкции камеры нагрева теплоносителя объемного типа, представляющей собой емкость, заполненную теплоносителем, с расположенными внутри нее нагревательными элементами в виде трубчатых электрических нагревателей, непосредственно контактирующих с теплоносителем и нагревающих его [17–21]. В последние годы широкое распространение в автономных системах теплоснабжения получили тепловые электрические генераторы проточного типа косвенного поверхностного нагрева теплоносителя⁴.

Цель исследования — получение экспериментальных данных и сравнение коэффициентов энергетической эффективности электрических водяных генераторов с камерами генерации тепловой энергии объемного и проточного типов; определение влияния напряжения электрического тока, вида жидкостного теплоносителя, составных частей потерь тепловой энергии и их значений при работе электрических тепловых генераторов, влияния типов теплоносителя (антифриз – вода) на показатели энергетической эффективности теплового генератора.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Испытания работы электрических тепловых генераторов осуществлялись на исследовательском стенде завода «Ардерия». В состав стенда входит

⁴ АРДЕРИЯ настенный электрический котел. Руководство по эксплуатации. URL: <https://www.c-o-k.ru/library/instructions/arderia/elektricheskie-kotly/35067/126284.pdf>

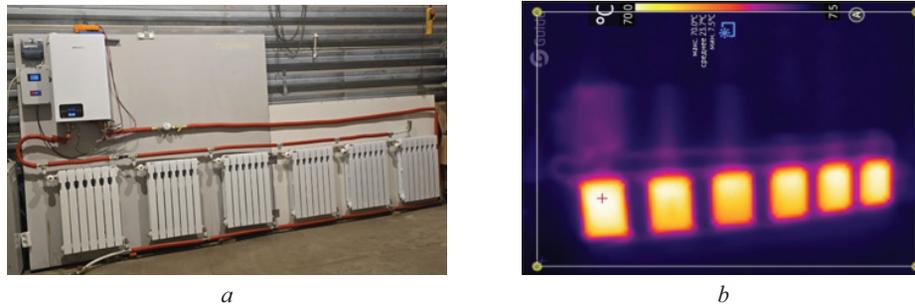


Рис. 2. Испытательный стенд определения энергетической эффективности электрических котлов: *a* — фото стенда; *b* — съемка стенда тепловизором

Fig. 2. Test bench for determining the energy efficiency of electric boilers: *a* — photo of the bench; *b* — shooting the bench with a thermal imager

ли исследуемый электрический тепловой водяной генератор, циркуляционный контур утилизации тепловой нагрузки в виде двухтрубной системы с шестью радиаторами отопления по семь секций каждый. Распределение потоков выполнено с помощью балансировочных кранов. Метод контроля распределения потоков — тепловизор. Вид стенда и съемка тепловизором показаны на рис. 2.

Объектом исследования также были камеры нагрева электрических котлов объемного типа в расположенными внутри трубчатыми электрическими нагревательными элементами, контактирующие с теплоносителем по всей поверхности нагрева (камера котла ЗОТА Баланс 3), и камера нагрева в виде проточного змеевика, залитого в алюминиевую форму совместно с нагревательными элементами трубчатой формы с косвенным поверхностным нагревом змеевика без контакта с теплоносителем. Боковые поверхности обеих камер покрыты слоем теплоизоляционного материала с отражающей алюминизированной поверхностью. Внешний вид камер нагрева представлен на рис. 3.

Измерение и фиксация температуры на входе и выходе из камер проводились с помощью измери-

теля температуры 2-канального НехМіх НМ-3008Д, расход контура циркуляции определялся с помощью счетчика воды Эконом СВ 20-130, контроль напряжения, тока и мощности — электросчетчиком Меркурий 200.02 5-60А/230В кл. т. 1,0. Измерения выполнялись для установившихся режимов теплообмена. Испытания осуществлялись отдельно для напряжения сети 200 и 230 В. При сравнительных испытаниях различных камер нагрева в качестве теплоносителя системы отопления использовалась вода. При изучении параметров энергетической эффективности при применении антифризов испытания проводились для камеры нагрева котла Ардерия Е4. В качестве теплоносителя — антифриза испытания выполнялись для теплоносителя Thermagent-30С Есо на основе пропиленгликоля.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Замеры проводились на трех скоростях работы циркуляционного насоса. Результаты испытаний представлены в таблице, как средние значения по трем скоростям работы циркуляционного насоса, для получения целостной картины технических параметров.

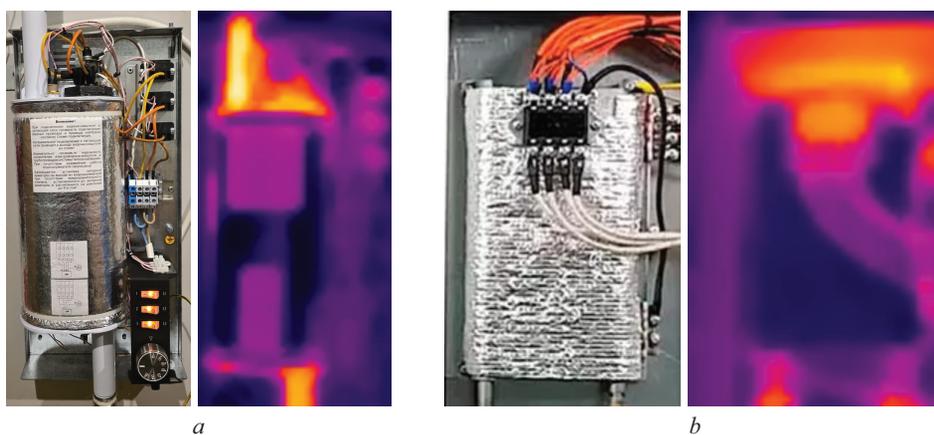


Рис. 3. Камеры нагрева теплоносителя электрических котлов и фиксация тепловых полей тепловизором при работе котлов в установившемся режиме: *a* — Зота баланс 3; *b* — Ардерия Е4

Fig. 3. Heat transfer fluid heating chambers of electric boilers and fixation of thermal fields by thermal imager during the boilers operation in steady-state mode: *a* — Zota balance 3; *b* — Arderia E4

Энергетические характеристики испытания камер нагрева электрических котлов

Energy characteristics of testing heating chambers of electric boilers

Характеристики / Characteristics	АРДЕРИЯ Е4 (4 кВт) ARDERIA E4 (4 kW)		ЗОТА БАЛАНС 3 (3 кВт) ZOTA BALANCE 3 (3 kW)	
	200 В / V	230 В / V	200 В / V	230 В / V
Мощность потребления, Вт Power consumption, W	3388	4480	2604	3380
Циркуляционный насос, Вт Circulation pump, W	42	49	41	48
Блок электроники, Вт Electronics unit, W	4,2	5,1	4,2	5,5
Блок нагрева, Вт Heating unit, W	95	80	135	150
Коэффициент энергоэффективности КПД, % Energy efficiency coefficient, %	96	97,5	93	94

Результаты испытаний показывают значительную зависимость мощности электрических котлов от напряжения. Разница составляет при напряжениях 200 и 230 В 1,3 раза. Определены основные составляющие общих тепловых потерь при анализе энергетической эффективности электрического теплового генератора. Энергетическая эффективность электрического водяного теплового генератора рассчитывается из уравнения теплового (энергетического) баланса в установившемся режиме работы:

$$Q_p/p = Q_1 + \sum Q_n,$$

где Q_p — располагаемая (подведенная) электрическая энергия, Вт·ч; Q_1 — полезная энергия теплоснабжения, Вт·ч; $Q_1 = C \cdot M(t_n - t_o)$, где C — теплоемкость теплоносителя; M — масса; t_n — температура напорной магистрали на выходе из котла; t_o — температура обратной магистрали после снятия тепловой нагрузки на входе в котел; $\sum Q_n$ — общие потери энергии при работе теплового генератора, Вт·ч; $\sum Q_n = Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5$, где Q_2 — потери энергии при работе системы управления работой котла (электронные платы управления, алгоритм, передача данных), Вт·ч; Q_3 — потери энергии на управление электрической мощностью теплового генератора, Вт·ч; Q_4 — потери энергии на обеспечение циркуляции теплоносителя, Вт·ч; Q_5 — потери энергии на нагрев окружающей среды, Вт·ч.

Отношение полезно используемого тепла Q_1 к располагаемому теплу Q_p представляет собой коэффициент полезного действия — КПД (коэффициент энергетической эффективности).

Предлагается выделить отдельно показатель Q_3 в связи с тем, что в электрических тепловых генераторах применяются разные устройства управления мощностью, такие как электромеханические реле (Зота) и симисторы (Ардерия). Электромеханические реле обладают небольшим током управления переключения нагрузкой, но имеют ограниченный срок службы и звуковой эффект при срабатывании. Электронные реле (симисторы) имеют практически неограничен-

ный срок службы, бесшумны в работе, но требуют охлаждения. Конструкция системы охлаждения симисторов в котле Ардерия интегрирована в трубопровод обратной магистрали теплового генератора (запатентованное решение). Охлаждение симисторов происходит за счет нагрева теплоносителя. Таким образом, процесс охлаждения симисторов совершает полезную работу по нагреву теплоносителя и повышает коэффициент энергетической эффективности котла Ардерия Е4 на 0,5 %. Величина тепловой энергии, выделяемой на симисторах, составляет 4–5 Вт/кВт мощности нагревательного элемента. Мощность блоков управлением работой котла — 4–6 Вт, циркуляционных насосов в зависимости от скорости вращения ротора — 30–60 Вт. Камера нагрева объемного типа с трубчатыми нагревательными элементами имеет потери тепловой энергии в 1,5–2 раза больше, чем камера проточного типа из-за больших геометрических размеров. В целом испытанные электрические котлы показали высокие значения коэффициентов энергетической эффективности. Для конструкций с объемной камерой нагрева коэффициент энергетической эффективности равен 0,935 (93,5 %), для конструкций проточных камер нагрева 0,97 (97 %). Данные значения можно принять как средние во всем диапазоне изменения напряжений электрической питающей сети (190–240 В) и расходов теплоносителя в системах индивидуального теплоснабжения от 0,3 до 1,2 м³/ч при мощности электрических котлов с джоулевым электрическим нагревом до 25 кВт·ч.

Камера нагрева объемного типа, заполненная теплоносителем, с нагревательными элементами имеет габаритные размеры, суммарный вес значительно больше, чем у камеры нагрева проточного типа с косвенным поверхностным нагревом. Камеры объемного типа обладают большей тепловой инерционностью, отрицательно влияющей на способность системы быстро реагировать на команды алгоритмов, управляющих работой систем теплоснабжения. В камерах нагрева объемного типа применяются трубчатые нагревательные электрические

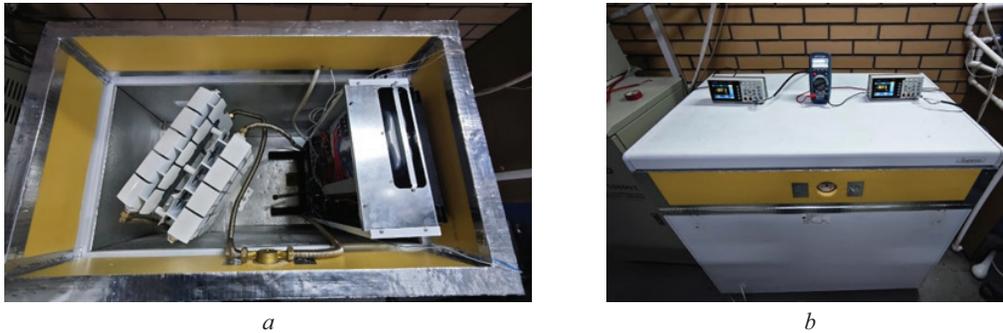


Рис. 4. Морозильный блок испытания старта работы системы отопления с электрическим котлом Ардерия Е4 из переохлажденного состояния с начальной температурой $-16\text{ }^{\circ}\text{C}$

Fig. 4. Freezing unit for testing the start of the heating system with the Arderia E4 electric boiler from a supercooled state with an initial temperature of $-16\text{ }^{\circ}\text{C}$

элементы, контактирующие с теплоносителем водяного типа с плотностью нагрева $5\text{--}7\text{ Вт/см}^2$. В камерах нагрева проточного типа с косвенным поверхностным нагревом нет контакта нагревательных элементов с теплоносителем, что позволяет применять трубчатые нагревательные электрические элементы с удельной плотностью нагрева $15\text{--}30\text{ Вт/см}^2$. Применение указанных нагревательных элементов дало возможность создания камер нагрева проточного типа с косвенным поверхностным нагревом с удельной мощностью $10\text{ кВт}\cdot\text{ч/дм}^3$.

Использование антифризов в качестве теплоносителей автономных систем теплоснабжения с применением электрического теплового генератора с джоулевым нагревом исследовалось в двух аспектах: оценка значений коэффициента энергетической эффективности при использовании антифриза в качестве теплоносителя по сравнению с водой и старт системы теплоснабжения из переохлажденного состояния с отрицательной температурой. В испытаниях в качестве теплоносителя использовался антифриз Thermaagent 30C Eco на основе пропиленгликоля с кинематической вязкостью при $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ $1,114\text{ мм}^2/\text{с}$ и $5,627$ при $20\text{ }^{\circ}\text{C}$, теплоемкостью $3797\text{ Дж}/(\text{кг}\cdot^{\circ}\text{C})$. Испытания проводились без изменения конструкции стенда и настроек балансировочных кранов радиаторов отопления по сравнению с испытаниями с теплоносителем вода для системы отопления с электрическим котлом с проточной камерой нагрева котла Ардерия Е4. Результаты испытаний показали, что при установившемся режиме работы системы отопления на стенде при условиях, идентичных испытаниям с теплоносителем вода, при температуре в напорной магистрали $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ при применении в качестве теплового генератора электрического котла Ардерия Е4, среднее значение коэффициента энергетической эффективности при испытаниях на трех скоростях работы циркуляционного насоса составило $94,9\%$, что на $2,1\%$ ниже значений данного параметра, чем при использовании в качестве теплоносителя воды. Испытания запуска работы системы отопления из переохлажденного состояния проводились в морозильном блоке. На рис. 4 представле-

ны фотографии морозильного блока с установленным в нем электрическим котлом Ардерия Е4, трубопроводами и секциями радиаторов отопления. Начальная температура при старте работы системы отопления составляла $-16\text{ }^{\circ}\text{C}$. Измерения осуществлялись по следующим параметрам: расход контура циркуляции, температур на напорной и обратной магистралях котла, характеристик электрической сети питания котла, токов потребления циркуляционного насоса. Результаты испытаний положительные. Система отопления показала способность выполнять старт из переохлажденного состояния и постепенный выход на номинальный режим работы. Время выхода значения тока обмотки статора циркуляционного насоса на установившееся значение составило 2 мин. В период старта системы замечено кратковременное увеличение на 40% тока обмотки статора циркуляционного насоса.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследования параметров энергетической эффективности электрических тепловых водяных генераторов двух типов камер нагрева теплоносителя показали существенные преимущества тепловых генераторов с камерой проточного типа с косвенным поверхностным нагревом перед камерой объемного типа. В зависимости от мощности теплового генератора средний коэффициент энергетической эффективности у тепловых генераторов с камерой проточного типа составляет 97% , у электрических генераторов с камерой нагрева объемного типа $93,5\%$. По результатам испытаний определены значения составных частей тепловых потерь электрического теплового генератора. Основную долю тепловых потерь составляет Q_5 — потери энергии на нагрев окружающей среды. Потери энергии (параметр Q_3) на управление электрической мощностью теплового генератора в варианте симисторного исполнения, величина которой составляет $4\text{--}5\text{ Вт/кВт}$ мощности электрического котла, может быть использована для нагрева теплоносителя, добавляя $0,5\%$ показателям энергетической эффективности систе-

мы отопления. Применение антифризов в системе теплоснабжения сказывается на технических параметрах системы. В условиях испытательного стенда с короткими длинами трубопроводов и минимальным количеством соединительных элементов при одинаковых циркуляционных насосах, работающих при одинаковом напряжении электрической сети, отличие коэффициента энергетической эффективности составило $-2,1\%$. Исследования запуска электрического котла Ардерия Е4 с камерой нагрева

проточного типа косвенного поверхностного нагрева из переохлажденного состояния с температурой $-16\text{ }^{\circ}\text{C}$, проведенные в морозильной камере, продемонстрировали возможность такого старта с постепенным выходом на установившийся режим работы без конструктивных изменений котла, что подтвердило вероятность удаленного запуска котла с камерой нагрева данного типа при периодическом использовании системы отопления в зимний период времени года при применении антифризов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Стертюков К.Г., Стародубцева О.А.* Проблемы внедрения новых технологий и технических средств с целью увеличения КПД в энергетической отрасли // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. 2018. № 25. С. 58–73. EDN UOAKVZ.

2. *Торопов А.Л.* Классификация электрических котлов резистивного нагрева автономных водяных систем теплоснабжения // Вестник МГСУ. 2023. Т. 18. № 10. С. 1608–1616. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.10.1608-1616

3. *Bloess A., Schill W.P., Zerrahn A.* Power-to-heat for renewable energy integration: A review of technologies, modeling approaches, and flexibility potentials // Applied Energy. 2018. Vol. 212. Pp. 1611–1626. DOI: 10.1016/j.apenergy.2017.12.073

4. *Pieper C.* Transformation of the German energy system — Towards photovoltaic and wind power Technology Readiness Levels 2018 : PhD Dissertation. Technische Universität Dresden, 2018. 264 p.

5. *Hegazy A.A., Diab M.R.* Performance of an improved design for storage-type domestic electrical water-heaters // Applied Energy. 2002. Vol. 71. Issue 4. Pp. 287–306. DOI: 10.1016/S0306-2619(02)00006-5

6. *Lee S., Jang D., Chung Y.S., Lee S.* Cost-effective and highly efficient surface heating elements using high thermal conductive carbon fibers // Composites Part A: Applied Science and Manufacturing. 2020. Vol. 137. P. 105992. DOI: 10.1016/j.compositesa.2020.105992

7. *Пшеничников В.* Коммерческие водонагреватели на предприятиях // Сантехника, Отопление, Кондиционирование. 2011. № 6 (114). С. 40–43. EDN RHVZSV.

8. *Горкин А.П.* Энциклопедия «Техника». М. : Росмэн, 2006. 488 с.

9. *Белавин Ю.А., Евстигнеев М.А., Чернявский А.Н.* Трубчатые электрические нагреватели и установки с их применением. М. : Энергоатомиздат, 1989. 157 с.

10. *Торопов А.Л.* Энергетическая эффективность электрического котла с косвенным поверхностным резисторным нагревом теплоносителя //

Вестник МГСУ. 2023. Т. 18. № 6. С. 927–934. DOI: 10.22227/19970935.2023.6.927-934

11. *Maruf N.I., Morales-Espana G., Sijm J., Helisto N., Kiviluoma J.* Classification, potential role, and modeling of power-to-heat and thermal energy storage in energy systems : a review // Sustainable Energy Technologies and Assessments. 2022. Vol. 53. P. 102553. DOI: 10.1016/j.seta.2022.102553

12. *Muniak D.P.* The impact of the use of antifreeze substances on the heating installation thermohydraulic parameters and energy consumption // Heat Transfer Engineering. 2021. Vol. 42. Issue 3–4. Pp. 347–353. DOI: 10.1080/01457632.2019.1699305

13. *Serkani G., Poncet S.* Ethylene- and propylene-glycol based nanofluids : a Literature review on their thermophysical properties and thermal performances // Applied Sciences. 2018. Vol. 8. Issue 11. P. 2311. DOI: 10.3390/app8112311

14. *Хаванов П.А., Барынин К.П.* Особенности применения водногликолевых теплоносителей в автономных системах теплоснабжения // АВОК. 2003. № 7.

15. *Хаванов П.А.* Теплотехнические условия использования водногликолевых теплоносителей в автономных системах теплоснабжения // Сантехника, Отопление, Кондиционирование. 2003. № 8.

16. *Гольяев О.М.* Применение антифризов в системах отопления, вентиляции, кондиционирования воздуха // АВОК. 2012. № 6. С. 46–55. EDN PBWOCR.

17. *Taileb A.* A comparative study of a direct current heating system and a gas furnace heating coil // WEENTECH Proceedings in Energy. 2019. Pp. 185–194. DOI: 10.32438/WPE.3019

18. *Hegazy A., Diab M.R.* Performance of an improved design for storage-type domestic electrical water-heaters // Applied Energy. 2002. Vol. 71. Issue 4. Pp. 287–306. DOI: 10.1016/S0306-2619(02)00006-5

19. *Lee S., Jang D., Chung Y.S., Lee S.* Cost-effective and highly efficient surface heating elements using high thermal conductive carbon fibers // Composites Part A: Applied Science and Manufacturing. 2020. Vol. 137. P. 105992. DOI: 10.1016/j.compositesa.2020.105992

20. *Boldrini A., Jiménez Navarro J.P., Crijns-Graus W.H.J., van den Broek M.A.* The role of dis-

strict heating systems to provide balancing services in the European Union // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2022. Vol. 154. P. 111853. DOI: 10.1016/j.rser.2021.111853

21. Пилипенко А.И. Промышленные электронагреватели // *Промышленный электрообогрев и электроотопление*. 2012. № 1. С. 28–34. EDN YWDUPQ.

Поступила в редакцию 3 апреля 2025 г.

Принята в доработанном виде 12 мая 2025 г.

Одобрена для публикации 12 мая 2025 г.

ОБ АВТОРАХ: **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;

Самвел Володяевич Саргсян — кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой теплогазоснабжения и вентиляции, директор Научно-образовательного центра «Теплогазоснабжение и вентиляция» (НОЦ «ТГВ»); **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ);** РИНЦ ID: 429896, Scopus: 57204373040, ORCID: 0000-0003-3356-9116; sargsyansv@mgsu.ru.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Stertyukov K.G., Starodubtseva O.A. Problems of introduction of new technologies and technical tools to increase efficiency in the energy sector. *PNRPU Bulletin. Electrical engineering, information technology, control systems*. 2018; 25:58-73. EDN UOAKVZ. (rus.).
2. Toropov A.L. Classification of electric resistive heating boilers for autonomous water heating systems. *Vestnik MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture]*. 2023; 18(10):1608-1616. DOI: 10.22227/19970935.2023.10.1608-1616 (rus.).
3. Bloess A., Schill W.P., Zerrahn A. Power-to-heat for renewable energy integration: A review of technologies, modeling approaches, and flexibility potentials. *Applied Energy*. 2018; 212:1611-1626. DOI: 10.1016/j.apenergy.2017.12.073
4. Pieper C. *Transformation of the German energy system – Towards photovoltaic and wind power Technology Readiness Levels 2018 : PhD Dissertation*. Technische Universität Dresden, 2018; 264.
5. Hegazy A.A., Diab M.R. Performance of an improved design for storage-type domestic electrical water-heaters. *Applied Energy*. 2002; 71(4):287-306. DOI: 10.1016/S0306-2619(02)00006-5
6. Lee S., Jang D., Chung Y.S., Lee S. Cost-effective and highly efficient surface heating elements using high thermal conductive carbon fibers. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2020; 137:105992. DOI: 10.1016/j.compositesa.2020.105992
7. Pshenichnikov V. Commercial water heaters at enterprises. *Plumbing, Heating, Air-Conditioning*. 2011; 6(114):40-43. EDN RHVZSV. (rus.).
8. Gorkin A.P. *Encyclopedia "Technology"*. Moscow, Rosmen, 2006; 488. (rus.).
9. Belavin Yu.A., Evstigneev M.A., Chernyavsky A.N. *Tubular electric heaters and installations and their application*. Moscow, Energoatomizdat, 1989; 157. (rus.).
10. Toropov A.L. Energy efficiency of an electric boiler with indirect surface resistive heating of the heat carrier. *Vestnik MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture]*. 2023; 18(6):927-934. DOI: 10.22227/19970935.2023.6.927-934 (rus.).
11. Maruf N.I., Morales-Espana G., Sijm J., Helisto N., Kiviluoma J. Classification, potential role, and modeling of power-to-heat and thermal energy storage in energy systems : a review. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*. 2022; 53:102553. DOI: 10.1016/j.seta.2022.102553
12. Muniak D.P. The impact of the use of anti-freeze substances on the heating installation thermohydraulic parameters and energy consumption. *Heat Transfer Engineering*. 2021; 42(3-4):347-353. DOI: 10.1080/01457632.2019.1699305
13. Serkani G., Poncet S. Ethylene- and propylene-glycol based nanofluids : a Litterature review on their thermophysical properties and thermal performances. *Applied Sciences*. 2018; 8(11):2311. DOI: 10.3390/app8112311
14. Khavanov P.A., Barynin K.P. Features of the use of water-glycol heat carriers in autonomous heat supply systems. *AVOK*. 2003; 7. (rus.).
15. Khavanov P.A. Thermal engineering conditions for the use of water-glycol heat carriers in autonomous heat supply systems. *Plumbing, Heating, Air-Conditioning*. 2003; 8. (rus.).
16. Goltyaev O.M. Application of antifreezes in heating, ventilation, air conditioning systems. *AVOK*. 2012; 6:46-55. EDN PBWOCR. (rus.).

17. Taileb A. A comparative study of a direct current heating system and a gas furnace heating coil. *WEENTECH Proceedings in Energy*. 2019; 185-194. DOI: 10.32438/WPE.3019
18. Hegazy A., Diab M.R. Performance of an improved design for storage-type domestic electrical water-heaters. *Applied Energy*. 2002; 71(4):287-306. DOI: 10.1016/S0306-2619(02)00006-5
19. Lee S., Jang D., Chung Y.S., Lee S. Cost-effective and highly efficient surface heating elements using high thermal conductive carbon fibers. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2020; 137:105992. DOI: 10.1016/j.compositesa.2020.105992
20. Boldrini A., Jiménez Navarro J.P., Crijns-Graus W.H.J., van den Broek M.A. The role of district heating systems to provide balancing services in the European Union. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2022; 154:111853. DOI: 10.1016/j.rser.2021.111853
21. Pilipenko A.I. Industrial electrical heaters. *Industrial Electric Heating and Electric Heating*. 2012; 1:28-34. EDN YWDUPQ. (rus.).

Received April 3, 2025.

Adopted in revised form on May 12, 2025.

Approved for publication on May 12, 2025.

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;

Samvel V. Sargsyan — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Heat and Gas Supply and Ventilation, Director of the Scientific and Educational Center “Heat and Gas Supply and Ventilation”; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RSCI: 429896, Scopus: 57204373040, ORCID: 0000-0003-3356-9116; sargsyansv@mgsu.ru.

Contribution of the authors: all authors made an equivalent contribution to the preparation of the publication.

The authors declare no conflict of interest.