ОБЗОРНАЯ СТАТЬЯ / REVIEW ARTICLE
УДК 628.8
DOI: 10.22227/1997-0935.2023.10.1608-1616

Классификация электрических котлов резистивного нагрева автономных водяных систем теплоснабжения

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Электрические котлы рассматриваются как важный элемент энергетического перехода от использования углеводородного топлива к возобновляемой энергии. Электрический котел — одно из популярных решений технологии Power-to-Heat, широко применяется в домохозяйствах для отопления водяными системами с радиаторами и низкотемпературными приборами отопления типа «теплый пол». Анализируется вариант джоулевого нагрева теплоносителя систем отопления, посредством которого при прохождении электрического тока по токопроводящему элементу выделяется тепло.
Материалы и методы. Объект исследования — варианты конструкций теплообменников генерации тепловой энергии с помощью резисторных нагревательных элементов нормального проводникового и полупроводникового типа. Рассмотрены различные варианты косвенного нагрева теплоносителя и контактов поверхности нагревательных элементов с теплоносителем. Использованы методы сравнительного анализа и балльной оценки применимости различных конструкций.
Результаты. Представлена классификация электрических котлов по типам нагревательных резисторов, контакту, размещению нагревательных элементов в теплообменнике, форме теплообменника, варианту контакта нагревательного элемента с теплоносителем. Дан сравнительный комплексный анализ вариантов электрических тепловых генераторов.
Выводы. Результаты сравнительного анализа вариантов конструкции электрических котлов показывают перспективность использования в качестве нагревательных элементов полупроводниковых термисторов. По конструкции исполнения камеры генерации тепловой энергии с точки зрения компактности, удельной мощности и снижения условий выпадения осадков солей жесткости теплоносителя наиболее эффективными являются канальные пластинчатые электрические теплообменники.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: электрический котел, резистивный нагрев, резистор, термистор, PTC-элемент, классификация котлов, трубчатый электрический нагреватель, теплообменник

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

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: *Торопов А.Л.* Классификация электрических котлов резистивного нагрева автономных водяных систем теплоснабжения // Вестник МГСУ. 2023. Т. 18. Вып. 10. С. 1608–1616. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.10.1608-1616

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

Classification of electric resistive heating boilers for autonomous water heating systems

Alexey L. Toropov
Engineering Center "April"; Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Electric boilers are considered as an important element of the energy transition from the use of hydrocarbon fuels to renewable energy. Electric boiler is one of the popular solutions of "Power-to-Heat" technology, widely used in households for heating with water systems with radiators and low-temperature heating devices of the "floor heating" type. The paper considers a variant of Joule heating of the coolant of heating systems, by means of which heat is released when an electric current passes through a conductive element.
Materials and methods. The object of the research is the variants of designs of heat exchangers for generating heat energy using resistor heating elements of normal conductor and semiconductor type. Various variants of indirect heating of the coolant and contacts of the surface of the heating elements with the coolant are considered. Methods of comparative analysis and scoring of the applicability of various designs are used in the work.
Results. The classification of electric boilers by types of heating resistors, by contact, by placement of heating elements in the heat exchanger, by the shape of the heat exchanger, by the variant heating element contact with the coolant is presented. A comparative comprehensive analysis of variants of electric heat generators is given.
Conclusions. The results of comparative analysis of design variants of electric boilers show the prospectively of using semiconductor thermistors as heating elements. According to the design of the heat energy generation chamber in terms

Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • **Том 18. Выпуск 10, 2023**
Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • **Volume 18. Issue 10, 2023**

© А.Л. Торопов, 2023
Распространяется на основании Creative Commons Attribution Non-Commercial (CC BY-NC)

of compactness, power density and reduction of precipitation conditions for coolant stiffness, channel plate electric heat exchangers are the most effective.

KEYWORDS: electric boiler, resistive heating, resistor, thermistor, PTC element, boiler classification, tubular electric heater, heat exchanger

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. 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: 10.22227/1997-0935.2023.10.1608-1616 (rus.).

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

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы происходят значительные изменения в отношении целесообразности применения электричества в качестве источника тепловой энергии для автономных систем теплоснабжения домохозяйств — от полного отрицания до рекомендаций по замене централизованного теплоснабжения. В ряде случаев электрические котлы рассматриваются как важный элемент энергетического перехода от использования углеводородного топлива к возобновляемой энергии (ВЭ) [1, 2]. Первоначальное отрицание применения электричества в теплоснабжении связано с его отсутствием на планете в свободном виде. Электричество получается путем сжигания углеводородного топлива, ядерной реакции, преобразования энергии воды гидростанций, кинетической энергии ветра, энергии солнца и других видов первичной энергии. Средний КПД преобразования первичной энергии в электрическую довольно низок и составляет 30–35 % [3], что приводит к высокой стоимости электроэнергии для потребителя и склоняет к использованию централизованного теплоснабжения. Постоянный рост населения в целом и городского населения в частности ведет к увеличению площадей городской застройки и протяженности тепловых сетей. Тепловые электростанции и городские котельные имеют длительный срок службы и окупаемости, устарели и обладают низкой энергетической эффективностью [4–7]. Наблюдается повышение спроса на электро-энергию для различных сфер деятельности человека. Климат планеты теплеет. Техногенное воздействие человечества на природу планеты, в том числе количество выбросов парниковых газов, увеличивается. Все это привело к изменению критериев оценки использования электричества для теплоснабжения домохозяйств. Технологии Power-to-Heat (PtH или P2H) относятся к оборудованию, в котором электрическая энергия генерирует тепло. P2H предлагает множество преимуществ для управления энергетическим переходом. Водяные P2H с применением избыточной переменной ВЭ позволяют аккумулировать и оптимизировать энергопотребление. С этими технологиями легко интегрируются тепловые насосы, солнечные тепловые коллекторы и другие устройства, использующие энергию возобновляемых источников [8, 9]. Электрический котел — одно из популярных решений P2H, широко применяется в домохозяйствах для отопления водяными системами с радиаторами и низкотемпературными приборами отопления типа «теплый пол». Данная технология выгодна из-за комфортной, бесшумной и безопасной работы устройств, низкой начальной стоимости, простоты обслуживания.

Теме использования электроэнергии для систем теплоснабжения посвящены работы [10–15]. В общем случае распределение потребления выделенной на домохозяйство электрической энергии носит иерархический характер. Норма 15 кВт·ч достаточна для комфортной жизнедеятельности в жилых помещениях до 100 м^2. Вопрос пикового кратковременного превышения выделенной мощности и срабатывания устройств автоматического отключения электрического питания домохозяйства решается установкой приоритетного распределения выделенной мощности [16].

Существует несколько способов нагрева теплоносителя электрическим током. Общая классификация применения электрических котлов для систем теплоснабжения представлена в публикации [17]. В настоящей работе рассматривается только вариант джоулева (резистивного, омического) нагрева, посредством которого при прохождении электрического тока по токопроводящему элементу выделяется тепло. В качестве теплового генератора в котлах используются электрические нагревательные элементы. Принцип функционирования нагревательных элементов резисторного типа заключается в следующем. На нагревательный элемент с сопротивлением R, Ом, подается электрический ток I, А. Выделение тепла происходит из-за сил сопротивления, которые задерживают электрический ток от свободного протекания через проводник. Нагрев пропорционален произведению электрического сопротивления проводника на квадрат электрического тока, протекающего через проводник $P \propto I2 \cdot R$, и зависит от времени. В целях безопасности и исключения протекания тока через теплоноситель выделяемое тепло Q, Вт·ч, нагревает теплоноситель автономной системы теплоснабжения через промежуточный конструктивный элемент, отделяющий теплоноситель от нагревательного элемента, соответственно, выполняется косвенный нагрев теплоносителя. Форма нагревательного элемента может быть произвольная. По типу нагрева теплоносителя данные котлы относятся к электрическому резистивному косвенному нагреву теплоносителя. Наиболее распространенная конструкция

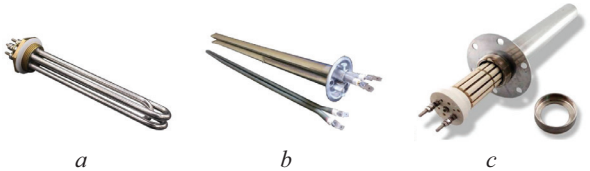
резисторного нагревательного элемента — трубчатый нагревательный элемент, состоящий из тонкой нихромовой (80 % Ni, 20 % Cr) или фехралевой проволоки, свитой в спираль. Фехраль представляет собой железный сплав с добавками меди, марганца, алюминия, титана и других металлов. В открытом виде удельная температура работы: фехралевая спираль выдерживает максимальный разогрев до 1400 °С, спирали из нихрома до 1200 °С. Корпус нагревательного элемента — медь, нержавеющая сталь или керамика [18, 19]. Наполнитель, отделяющий корпус от спирали нагревательного элемента, — периклаз, минерал, состоящий из оксида магния, иногда с примесями оксида железа, оксида марганца и оксида цинка. Керамические изоляторы, установленные по концам трубки, исключают контакт корпуса с контактными крепежными элементами спирали. Форма нагревательного элемента может быть произвольная.

Цель работы — представить наиболее полную классификацию электрических котлов автономных водяных систем теплоснабжения, использующих принцип джоулевого нагрева теплоносителя; выполнить сравнительный анализ приведенных конструкций генерации тепловой энергии.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Объектом исследования являются варианты конструкций теплообменников генерации тепловой энергии с помощью резисторных нагревательных элементов нормального проводникового и полупроводникового типов. Рассмотрены различные варианты косвенного нагрева теплоносителя и контактов поверхности нагревательных элементов с теплоносителем. Применены методы сравнительного анализа и балльной оценки применимости различных конструкций нагревательных элементов, камер генерации тепловой энергии.

РЕЗУЛЬТАТЫ



a *b* *c*

Рис. 1. Типовые конструкции трубчатых электрических нагревательных элементов: *a* — трубчатый нагревательный элемент «мокрого» типа; *b* — трубчатый нагревательный элемент «сухого» типа с «водяным» ТЭН; *c* — трубчатый нагревательный элемент «сухого» типа с «воздушным» ТЭН и керамическим сердечником

Fig. 1. Typical designs of tubular electric heating elements: *a* — wet-type tubular heating element; *b* — Tubular heating element of “dry” type with “water” heating element; *c* — Tubular heating element of “dry” type with “air” heating element and ceramic core

В классификации электрических котлов различаются два типа резисторных нагревательных элементов: «мокрый», у которого оболочка трубчатого электронагревателя (ТЭН) контактирует с теплоносителем, и «сухой», у которого оболочка ТЭН нагревает промежуточный элемент, контактирующий с теплоносителем [15]. На рис. 1 показаны типовые конструкции трубчатых электрических нагревательных элементов «мокрого» и «сухого» типов.

Конструкции «сухих» ТЭН, представленные на рис. 1, позволяют выполнить замену ТЭН без слива теплоносителя из системы теплоснабжения. ТЭН «мокрой» конструкции нагревают теплоноситель непосредственно своей оболочкой. ТЭН «сухой» конструкции вставляются в корпус (гильза), контактирующий с теплоносителем. Трубчатые электронагреватели для «сухих» конструкций могут быть «водяными» и «воздушными».

Проектирование размеров камеры генерации тепловой энергии электрического котла, в которой расположены ТЭН, базируется на условии отсутствия касания поверхности нагревательных элементов с поверхностью камеры. Рекомендуется обеспечить расстояние от нагревательного элемента до поверхности камеры не менее 5 мм. Второе условие — размещение в камере ТЭН необходимой мощности. Размер ТЭН определяется диаметром оболочки, как правило не менее 10 мм, и максимальной удельной плотностью нагрева поверхности ТЭН, равной для «мокрых» ТЭН 15 Вт/см^2. Плотность нагрева «сухих» ТЭН (гильз) не превышает 9 Вт/см^2 [19–21]. Скорость движения теплоносителя должна обеспечивать его нагрев в зоне контакта с поверхностью оболочки «мокрого» ТЭН или гильзы «сухого» ТЭН, независимо от его конструкции, с температурой, не превышающей 100 °С. Не должно быть застойных зон теплоносителя, контактирующих с нагревательными элементами.

По расположению конструкции нагревательных элементов в камере генерации тепловой энергии возможны два варианта. В первом — нагревающие поверхности расположены внутри объема камеры, в которой движется теплоноситель системы теплоснабжения (внутренний поверхностный нагрев); во втором — снаружи (наружный поверхностный нагрев). Варианты размещения нагревательных элементов представлены на рис. 2. В варианте наружного расположения ТЭН на поверхности камеры генерации тепловой энергии применяются только ТЭН «сухого» типа.

Форма камеры генерации может быть однообъемной, в которой размещаются ТЭН (рис. 2, *a*), и трубчатой в варианте размещения ТЭН вне камеры. В свою очередь, трубчатые камеры могут быть линейной и сложной формы. Вариант камеры генерации тепловой энергии в виде спиральной трубы с размещением ТЭН сложной формы в центре спирали с заполнением пространства между ними алюминиевым сплавом (материал, обладающий высокой теплопро-

Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • Том 18. Выпуск 10, 2023
Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • Volume 18. Issue 10, 2023

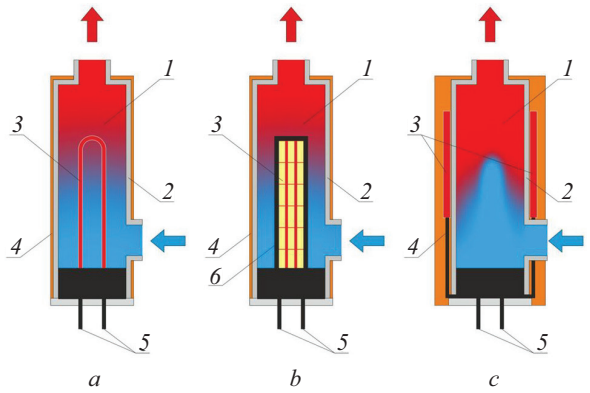


Рис. 2. Варианты размещения нагревательных элементов: *a* — «водяной» ТЭН размещен внутри объема камеры генерации тепловой энергии; *b* — «воздушный» ТЭН размещен внутри камеры генерации тепловой энергии; *c* — ТЭН размещен вне камеры генерации тепловой энергии; *1* — камера генерации тепловой энергии; *2* — корпус камеры; *3* — ТЭН; *4* — теплоизоляция; *5* — кабельный ввод; *6* — гильза «сухого» ТЭН

Fig. 2. Variants of heating elements placement: *a* — "water" heating element is located inside the volume of the heat energy generation chamber; *b* — "air" heating element is located inside the heat energy generation chamber; *c* — the heating element is located outside the heat energy generation chamber; *1* — heat energy generation chamber; *2* — the casing of the chamber; *3* — the heating element; *4* — thermal insulation; *5* — cable entry; *6* — "dry" heating element sleeve

водностью) приведен на рис. 3 [15]. В общем случае материал, заполняющий пространство между ТЭН и камерой генерации тепловой энергии, может быть любым, он должен обладать высокой теплопроводностью, в том числе в жидкой и сыпучей форме, а при использовании «воздушных» ТЭН — в виде газа.

Резисторные нагревательные элементы делятся на проводники (нормальные резисторы) и полупроводники (термисторы). В качестве проводников используется витая тонкая спиральная проволока из сплава никеля и хрома или фехраля. Термисторы — полупроводниковые приборы, электрическое сопротивление которых меняется в зависимости от температуры. В электрических котлах применяются термисторы с положительным (PTC — термисторы-позисторы (Positive Temperature Coefficient)) температурным коэффициентом. Для позисторов — с ростом температуры растет их сопротивление. PTC-термисторы изготовлены из легированной поликристаллической керамики на основе титаната бария [22, 23]. Низкое сопротивление достигается за счет легирования керамики материалами с более высокой валентностью. Часть ионов бария и титаната в кристаллической решетке замещается ионами более высокой валентности для получения определенного количества свободных электронов, которые делают керамику проводящей. Принципиальная разница нормальных резисторов и термисторов косвенного нагрева заключается в следующем. Температурный коэффициент сопротивления резистора является относительно стабильной величиной. Выделяемая тепловая энергия резисторного нагревательного элемента увеличивается при увеличении тока. У термисторного нагревательного элемента при достижении заданной температуры, определенной химическим составом и физическими свойствами элемента, а также внешним тепловым давлением, происходит скачкообразное увеличение его электрического сопротивления, и как результат происходит скачкообразное уменьшение выделяемой тепловой мощности. Фактически термисторы — это саморегулируемые нагревательные элементы. Превышение расчетной выделяемой энергии у них исключено по их физическим характеристикам. Внешний вид термисторного нагревательного элемента представлен на рис. 4.

Графически описанная выше классификация генерации тепловой энергии с использованием джоулевого нагрева может быть представлена в следующем виде (рис. 5).

Преимущества и недостатки работы генераторов тепловой энергии с использованием джоулевого нагрева связаны со способностью конструкций противостоять образованию накипи. Она образуется на поверхности нагревательных элементов в случае их расположения внутри камеры генерации тепловой энергии и контактирует с теплоносителем. Накипь так-

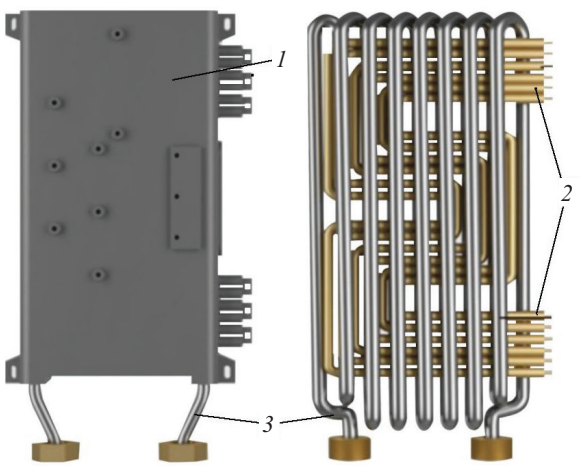
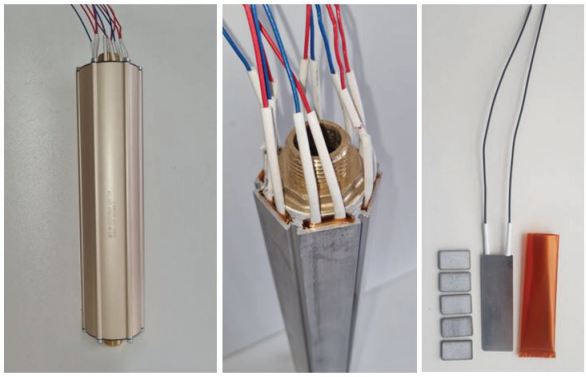


Рис. 3. Блок косвенного нагрева теплоносителя с «сухими» ТЭН, трубчатой спиральной камерой генерации тепловой энергии, алюминиевым корпусом — наполнителем для передачи тепловой энергии от ТЭН к поверхности камеры генерации тепловой энергии: *1* — алюминиевый корпус нагревательного блока; *2* — электрический нагревательный элемент; *3* — трубка теплоносителя

Fig. 3. Block of indirect heating of the heat carrier with "dry" heating elements, tubular spiral chamber for generating heat energy, aluminum case — filler for transferring heat energy from heating elements to the surface of the thermal energy generation chamber: *1* — aluminum body of the heating block; *2* — electric heating element; *3* — heat carrier tube

Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • Том 18. Выпуск 10, 2023
Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • Volume 18. Issue 10, 2023



a *b* *c*

Рис. 4. Внешний вид нагревательного электрического блока (*a*); алюминиевый сердечник с шестью каналами для PTC-термисторных нагревательных элементов и центральным каналом теплоносителя (*b*); PTC-термисторы, электроды, токопроводящий, токоизоляционный чехол (*c*)

Fig. 4. External view of the heating electric block (*a*); Aluminum core with 6 channels for PTC thermistor heating elements and a central coolant channel (*b*); PTC thermistors, electrodes, thermally conductive, current-insulating cover (*c*)

же может образовываться на внутренней поверхности камеры, если нагревательный элемент не контактирует с теплоносителем, а нагревает корпус камеры, или корпус, или промежуточное тело «сухого» ТЭН. Задачи выделения осадков в виде нерастворимых карбонатов натрия и магния под действием температуры особенно актуальны при подготовке горячей воды. При рассмотрении котлов с электрическим тепловым генератором для систем отопления вопросы выпадения осадков связаны с герметичностью отопительного контура, диффузией кислорода через стенки труб и исключением перегрева и закипания теплоносителя в тепловом генераторе. Полностью исключить выпадение осадков солей жесткости в электрических отопительных системах сложно. Основными факторами, влияющими на интенсивность выпадения осадков, служат температура поверхности, генерирующей тепло, и скорость движения теплоносителя. Чем ниже температура и выше скорость движения теплоносителя, тем меньше интенсивность образования осадков на поверхности камеры генерации тепловой энергии электрического котла [24, 25]. Эти показатели будут заложены в сравнительный анализ вариантов конструкций электрических котлов. Ключевым фактором оценки является срок службы нагревательных резисторных элементов. У нормальных резисторов температурный коэффициент сопротивления резистора является относительно стабильной величиной. Выделяемая тепловая энергия резисторного нагревательного элемента увеличивается при увеличении тока. Конструкции нагревательных резисторных элементов имеют предельную интенсивность рассеивания тепловой энергии — порог, до которого никаких трансформаций в деталях нагревательных элементов не происходит. При таких свойствах нагревательных элементов важно не допускать превышения порогов тепловой нагрузки, чтобы предотвратить разрушение нагревательного элемента. Интенсивность рассеивания тепловой энергии нормального резисторного элемента определяется расчетной скоростью движения теплоносителя и величиной теплоотдачи поверхности нагревательного элемента, если он контактирует с теплоносителем. При снижении скорости движения теплоносителя или снижении интенсивности теплоотдачи из-за образования накипи на поверхности генерации тепла срок службы нормального резисторного элемента

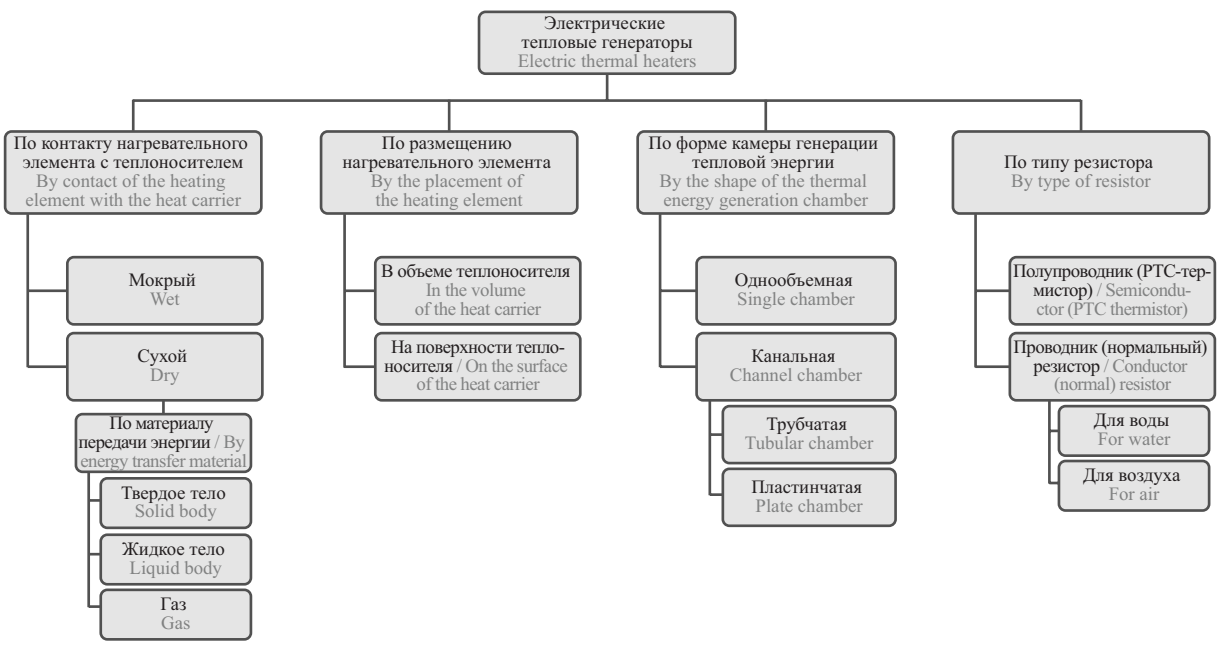


Рис. 5. Классификация устройств генерации тепловой энергии с использованием способа джоулевого нагрева теплоносителя

Fig. 5. Classification of devices for generating heat energy using the method of Joule heating of the heat carrier

Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • Том 18. Выпуск 10, 2023
Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • Volume 18. Issue 10, 2023

сокращается. В случае значительных отклонений указанных параметров от расчетных произойдет его разрушение. При термисторном нагревательном элементе, когда достигается заданная температура, определенная химическим составом и физическими свойствами элемента, происходит скачкообразное увеличение его омического сопротивления. Термисторные нагревательные элементы обладают эффектом термостатирования. Разрушение данных элементов в электрических котлах от перегрева исключено.

Все конструкции резистентного нагрева теплоносителя в камере генерации тепловой энергии имеют высокий коэффициент энергетической эффективности во всем диапазоне изменения тепловой мощности, равный 0,95–0,99 [26, 27]. Потери 1–3 % зависят от наличия и качества теплоизоляционного кожуха камеры генерации тепловой энергии; 1–1,5 % потерь связаны с потерями на системе управления, внутренней гидравлической обвязке и циркуляции теплоносителя.

В общем виде преимущества электрических котлов с джоулевым нагревом теплоносителя заключаются в:

• простоте конструкции нагревательного элемента, массовом характере производства, низкой стоимости;

• компактности, легкости монтажа и эксплуатации;

• возможности регулирования мощности в полном диапазоне изменения тепловой нагрузки;

• высоком коэффициенте энергетической эффективности преобразования электрической энергии в тепловую — 0,95–0,99.

Недостатки систем косвенного нагрева теплоносителя резисторными нагревательными приборами:

• основаны на использовании электрической энергии. В ходе оценки углеродного следа при работе требуется учитывать коэффициенты трансформации первородного источника энергии в электрическую;

• ограниченный срок службы нормальных резисторных нагревательных элементов, связанный с материалами изготовления, конструкцией, интенсивностью работы;

• образование на поверхности нагревательного элемента отложений солей жесткости, значительно снижающих эффективность нагрева теплоносителя и уменьшающих срок службы нагревательного элемента;

• тепловая инерционность нагревательных элементов, приводящая к сложности в управлении тепловой нагрузкой;

• возможность возгорания нормальных резисторных устройств теплоснабжения и объемных деформаций при авариях в нештатных режимах работы.

В сравнительном анализе конструкций электрических котлов с использованием джоулевого электрического нагрева теплоносителя рассмотрим варианты: А — объемная камера с «мокрым» ТЭН с нормальным резистором; Б — объемная камера с «сухим» нормальным ТЭН водяного типа; В — объемная камера с «сухим» нормальным ТЭН воздушного типа; Г — канальная трубчатая камера с «сухим» нормальным ТЭН водяного типа, алюминиевым телом передачи тепловой энергии от ТЭН к трубе теплоносителя; Д — канальная пластинчатая камера с термисторными нагревательными элементами полупроводниковоыго типа. Применим балльную систему сравнения с максимальным значением 10 баллов по каждому показателю. Рассматриваем электрический котел для индивидуальной автономной системы отопления, мощностью 12 кВт·ч. Гидравлический контур котла, расширительный бак, циркуляционный насос, корпус, алгоритм работы в рассмотрении не участвуют и приняты одинаковыми по конструкции и стоимости. В качестве показателей принимаются:

• стоимость нагревательного элемента, 1кВт — I;

• удельные по мощности габариты камеры генерации тепловой энергии, кВт/дм^3 — II;

• срок службы нагревательного элемента, циклов нагрузки, часов работы — III;

• возможность и простота замены отдельного нагревательного элемента, время замены — IV;

• образование накипи на поверхности нагревательных элементов или образование накипи на поверхности камеры генерации тепловой энергии — возможность превышения температуры 100 °С, скорость движения теплоносителя — V;

• возможность разрушения нагревательного элемента при нарушении расчетных параметров работы системы отопления, наличие критического порога теплового рассеивания — VI.

Методика определения значений параметра основана на сравнении с лучшим показателем в группе, значение которого принимается равным 10 баллам. Результаты сравнения представлены в таблице.

Наибольшее количество баллов получила конструкция Д — канальная пластинчатая камера с термисторными нагревательными элементами полупроводникового типа, наименьшее А — объемная камера с «мокрым» ТЭН с нормальным резистором. Это обусловлено следующими причинами.

Вероятность выпадения осадков в виде солей жесткости максимальна у классических конструкций объемной камеры нагрева теплоносителя с «мокрым» трубчатым нагревательным элементом. Температура поверхности оболочки ТЭН — максимальная из всех рассматриваемых случаев, а скорость движения теплоносителя — минимальная. Системы автоматического регулирования электрических котлов данного типа отслеживают температуру теплоносителя на выходе из камеры генерации тепловой энергии. Интенсивность теплоотдачи тепловой энергии с поверхности оболочки ТЭН не отслеживается. При отличии гидравлического сопротивления контура циркуляции от расчетного вероятность образования накипи на поверхности оболочки ТЭН усиливается. Снижение теплоотдачи поверхности ТЭН приводит к снижению срока

Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • Том 18. Выпуск 10, 2023
Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • Volume 18. Issue 10, 2023

Сравнительные показатели конструкции электрических котлов резистентного типа

Comparative indicators of the construction of electric boilers of the resistant type

	Показатели / Indicators						Баллы / Points
Вариант конструкции Construction variant	I	II	III	IV	V	VI	Сумма баллов Sum of points
А	8	7	2	5	3	3	28
Б / B	5	7	2	10	5	4	33
В / C	2	6	2	10	6	6	32
Г / D	8	8	2	0	8	8	34
Д / E	10	10	10	3	10	10	53

службы, перегреву и разрушению нормального резисторного нагревательного элемента.

При использовании полупроводниковых термисторных нагревательных элементов возможность их перегрева и разрушения исключена их физическими свойствами. Керамическая основа элементов практически не имеет ограничений по сроку службы. Скорость движения теплоносителя по каналам пластинчатого теплообменника — максимальная из рассматриваемых конструкций. Температура поверхности нагрева теплоносителя не бывает выше 85 °С, тепловая инерционность термисторов — низкая. Удельная объемная мощность теплового генератора достигает 15 кВт/дм^3. Условия возникновения осадков в виде солей жесткости — минимальные.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представлены классификация и сравнительный анализ современных электрических тепловых генераторов автономных водяных систем отопления, использующих принцип джоулевого нагрева теплоносителя. Все конструкции резистентного нагрева теплоносителя в камере генерации тепловой энергии имеют высокий коэффициент энергетической эффективности во всем диапазоне изменения тепловой мощности, равный 0,95–0,99. Основными моментами, определяющими преимущества конструктивных решений электрических тепловых генераторов, являются: срок службы нагревательных элементов, температура поверхности контакта нагревательного элемента с теплоносителем, скорость движения теплоносителя в зоне нагрева.

Результаты сравнительного анализа вариантов конструкции электрических котлов показывают перспективность использования в качестве нагревательных элементов полупроводниковых термисторов. По конструкции исполнения камеры генерации тепловой энергии перспективны канальные пластинчатые электрические теплообменники.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *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

2. *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.

3. *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.

4. *Яшин Д.Г., Псарев С.А.* Анализ аварий на газотранспортной системе России // Пожарная безопасность: проблемы и перспективы. 2018. № 9.

5. *Терёшкин А.А.* Анализ аварийности на сетях газораспределения // Вестник магистратуры. 2021. № 5–6 (116). С. 63–65. EDN JURZHC.

6. *Данилова А.С.* Анализ аварийности сетей тепло- и газоснабжения // Вестник магистратуры. 2021. № 1–5 (112). С. 27–31. EDN QQGWFA.

7. *Соколов Ю.И.* Системный кризис жилищно-коммунального хозяйства России // Проблемы анализа риска. 2020. Т. 17. № 5. С. 10–25. DOI: 10.32686/1812-5220-2020-17-5-10-25. EDN EZIUIH.

8. *Nidek A.J.* Heating Elements. URL: https://farnam-custom.com/heating-elements?locale=en

9. *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

10. *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

11. *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

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

13. *Горкин А.П.* Энциклопедия «Техника». М. : Rosmen, 2006. 488 с.

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

15. *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

16. *Торопов А.Л.* Использование электрических котлов с иерархическим управлением нагрузкой для поквартирного теплоснабжения // Вестник МГСУ. 2022. Т. 17. № 11. С. 1488–1498. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.11.1488-1498

17. *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

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

19. *Заяц А.Е., Корко В.С., Кустова Р.И.* Электрические элементные нагреватели : учебное пособие. Минск : БГАТУ, 2011. 180 с.

20. *Вадова Л.Ю.* Способы и средства повышения эффективности работы трансформаторного нагревателя // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2022. № 8. С. 51–55.

21. *Балашов С.М., Балашов С.С., Фролов А.А., Балашов М.С.* Совершенствование трубчатых электронагревателей // Теплоэнергетика. 2005. № 2. С. 53–56. EDN HSCYPN.

22. *Musat R., Helerea E.* Characteristics of the PTC heater used in automotive HVAC systems // IFIP Advances in Information and Communication Technology. 2010. Pp. 461–468. DOI: 10.1007/978-3-642-11628-5_51

23. *Chen Q.F., Yuan Z.X., Guo Z.Q., Zhao Y.* Practical performance of a small PTC solar heating system in winter // Solar Energy. 2019. Vol. 179. Pp. 119–127. DOI: 10.1016/j.solener.2018.12.061

24. *Колца Л.Н., Елистратова Ю.В., Семиненко А.С.* Влияние отложений солей жесткости на теплоотдачу отопительных приборов // Современные наукоемкие технологии. 2014. № 7–2. С. 58–59. EDN SALRRV.

25. *Гоненко Т.В., Хацевский В.Ф.* Исследование процесса накипеобразования при электронагреве жидкостей // Система управления экологической безопасностью : сб. тр. XIV Междунар. науч.-практ. конф. 2020. С. 242–248.

26. *Жигулина И.С., Алифанова А.И.* Особенности применения электрического отопления // Современные наукоемкие технологии. 2013. № 8–1. С. 41–42. EDN QYYPOV.

27. *Аллох М.Ю., Маликов С.А.* Сравнение эффективности теплового насоса и электрического котла для теплоснабжения коттеджа // X Междунар. студ. науч. конф. Студенческий научный форум. 2018. URL: https://scienceforum.ru/2018/article/2018007141

Поступила в редакцию 15 мая 2023 г.
Принята в доработанном виде 17 мая 2023 г.
Одобрена для публикации 20 июня 2023 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, ORCID: 0000-0002-7457-6948; Toropov@aprilgroup.ru.

REFERENCES

1. 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

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

3. Stertyukov K.G., Starodubtseva O.A. Problems of introduction of new technologies and technical tools to increase efficiency in the energy sector. *PNRPU Bulletin. Electrotechnics, Informational Technologies, Control Systems*. 2018; 25:58-73. EDN UOAKVZ. (rus.).

4. Yashin D.G., Psarev S.A. Analysis of accidents in the gas transmission system of Russia. *Fire Safety: Problems and Prospects*. 2018; 9. (rus.).

5. Tereshkin A.A. Analysis of accidents on gas distribution networks. *Bulletin of the Magistracy*. 2021; 5-6(116):63-65. EDN JURZHC. (rus.).

6. Danilova A.S. Analysis of the accident rate of heat and gas supply networks. *Bulletin of the Magistracy*. 2021; 1-5(112):27-31. EDN QQGWFA. (rus.).

7. Sokolov Yu.I. Systemic crisis of housing and communal services in Russia. *Issues of Risk Analysis*. 2020; 17(5):10-25. DOI: 10.32686/1812-5220-2020-17-5-10-25. EDN EZIUIH. (rus.).

8. Nidek A.J. *Heating Elements*. URL: https://farnam-custom.com/heating-elements?locale=en

9. 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

10. 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

11. 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

12. Pshenichnikov V. Commercial water heaters in factories. *Plumbing, Heating, Air Conditioning*. 2011; 6(114):40-43. EDN RHVZSV. (rus.).

13. Gorkin A.P. *Encyclopedia "Equipment"*. Moscow, Rosmen, 2006; 488. (rus.).

14. Belavin Yu.A., Evstigneev M.A., Chernyavskiy A.N. *Tubular electric heaters and installations with their application*. Moscow, Energoatomizdat, 1989; 160. (rus.).

15. 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.).

16. Toropov A.L. Using electric boilers with hierarchical load control systems to supply heat to apartments. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2022; 17(11):1488-1498. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.11.1488-1498 (rus.).

17. 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

18. Pilipenko A.I. Industrial electrical heaters. *Industrial Electric Heating and Electric Heating*. 2012; 1:28-34. EDN YWDUPQ. (rus.).

19. Zayats A.E., Korko V.S., Kustova R.I. *Electric elemental heaters : a manual*. Minsk, BGATU, 2011; 180. (rus.).

20. Vadova L.Yu. Methods and means of improving the efficiency of the transformer heater. *International Journal of Applied and Fundamental Research*. 2022; 8:51-55. (rus.).

21. Balashov S.M., Balashov S.S., Frolov A.A., Balashov M.S. Improving tubular electrical heaters. *Thermal Engineering*. 2005; 2:53-56. EDN HSCYPN. (rus.).

22. Musat R., Helerea E. Characteristics of the PTC heater used in automotive HVAC systems. *IFIP Advances in Information and Communication Technology*. 2010; 461-468. DOI: 10.1007/978-3-642-11628-5_51

23. Chen Q.F., Yuan Z.X., Guo Z.Q., Zhao Y. Practical performance of a small PTC solar heating system in winter. *Solar Energy*. 2019; 179:119-127. DOI: 10.1016/j.solener.2018.12.061

24. Koltsa L.N., Elistratova Yu.V., Seminenko A.S. Influence of deposits of hardness salts on the heat transfer of heating devices. *Modern science-intensive technologies*. 2014; 7-2:58-59. EDN SALRRV. (rus.).

25. Gonenko T.V., Khatsevskiy V.F. Study of the process of scale formation during electric heating of liquids. *Environmental safety management system : proceedings of the XIV International Scientific and Practical Conference*. 2020; 242-248. (rus.).

26. Zhigulina I.S., Alifanova A.I. Features of the use of electric heating. *Modern science-intensive technologies*. 2013; 8-1:41-42. EDN QYYPOV. (rus.).

27. Allokh M.Yu., Malikov S.A. Comparison of the efficiency of a heat pump and an electric boiler for heating a cottage. *X International Student Scientific Conference. Student Scientific Forum*. 2018. URL: https://scienceforum.ru/2018/article/2018007141 (rus.).

Received May 15, 2023.
Adopted in revised form on May 17, 2023.
Approved for publication on June 20, 2023.

BIONOTES: **Alexey L. Toropov** — Candidate of Technical Sciences, General Director — Chief Designer; **Engineering Center "April"**; 13 Schelkovskoe shosse, Moscow, 105122, Russian Federation; ID RSCI: 1030472, ORCID: 0000-0002-7457-6948; Toropov@aprilgroup.ru.