

УДК 696.46:697.27

<https://doi.org/10.62595/1819-5245-2024-4-78-87>

## ОПТИМИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ ИНДИВИДУАЛЬНОГО ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ С ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ КОТЛОМ

**В. В. КИСЕЛЕВИЧ**

*Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого»,  
Республика Беларусь*

*Представлена схема системы индивидуального теплоснабжения с электрическим котлом, в контуры отопления и горячего водоснабжения которой включены теплоаккумулирующие аппараты. Предложено усовершенствование конструкции теплового аккумулятора, повышающее равномерность распределения поверхности теплообмена по рабочему объему аппарата и позволяющее оптимизировать процесс его тепловой зарядки за счет установки трубчатых электронагревательных элементов. Данное исполнение системы индивидуального теплоснабжения обеспечивает увеличение энергетической эффективности ее работы. Указанный эффект достигается благодаря снижению общего потребления электрической энергии на нужды отопления и горячего водоснабжения за счет использования запасенного в аккумуляторах тепла. Приведены теплофизические характеристики перспективных теплоаккумулирующих материалов, позволяющих увеличить продолжительность поддержания оптимального температурного режима в контурах отопления и горячего водоснабжения.*

**Ключевые слова:** система индивидуального теплоснабжения, электрический котел, аккумулятор теплоты, теплоаккумулирующий материал, скрытая теплота плавления, оптимальный температурный режим.

**Для цитирования.** Киселевич, В. В. Оптимизация системы индивидуального теплоснабжения с электрическим котлом / В. В. Киселевич // Вестник Гомельского государственного технического университета имени П. О. Сухого. – 2024. – № 4 (99). – С. 78–87. <https://doi.org/10.62595/1819-5245-2024-4-78-87>

## OPTIMIZATION OF INDIVIDUAL HEAT SUPPLY SYSTEM WITH AN ELECTRIC BOILER

**V. V. KISELEVICH**

*Sukhoi State Technical University of Gomel,  
the Republic of Belarus*

*The article presents a diagram of an individual heat supply system with an electric boiler, in the heating and hot water supply circuits with heat-accumulating devices included. An improvement in the design of the heat accumulator is proposed, which increases the uniformity of the heat exchange surface distribution over the working volume of the device and allows to optimize the process of its heat charging due to the installation of tubular electric heating elements. The proposed design of the individual heat supply system ensures an increase in the energy efficiency of its operation. The specified effect is achieved due to a decrease in the total consumption of electric energy for heating and hot water supply needs due to the use of heat stored in the accumulators. The paper presents thermophysical characteristics of promising heat-accumulating materials, which allow increasing the duration of maintaining the optimal temperature regime in the heating and hot water supply circuits.*

**Keywords:** individual heat supply system, electric boiler, heat accumulator, heat-accumulating materials, latent heat of melting, optimal temperature regime.

**For citation.** Kisilevich V. V. Optimization of individual heat supply system with an electric boiler. *Vestnik Gomel'skogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta imeni P. O. Sukhogo*, 2024, no. 4 (99), pp. 78–87 (in Russian). <https://doi.org/10.62595/1819-5245-2024-4-78-87>

## Введение

Эффективность работы систем индивидуального теплоснабжения, в которых единственным источником тепловой энергии является электрический котел, зачастую оказывается невысокой, поскольку для покрытия тепловых нагрузок на отопление и горячее водоснабжение (ГВС) необходимы довольно большие затраты электроэнергии [1, 2]. Более того, во время действия пиковых нагрузок значительно увеличивается вероятность превышения установленного для потребителя лимита электрической мощности, что, в свою очередь, может быть сопряжено с кратным ростом тарифа на электроэнергию [1]. Одним из возможных путей решения данной проблемы является дополнение систем индивидуального теплоснабжения теплоаккумулирующими аппаратами [1–6].

На практике максимальный экономический эффект от применения теплоаккумулирующих устройств достигается, когда у потребителей электрической энергии действуют тарифы, дифференцированные по временным периодам. Аккумуляирование тепловой энергии в этом случае целесообразно проводить в ночное время суток, когда энергоемкие электроприемники отключены, а ее последующее расходование на нужды отопления и ГВС – в утренние и вечерние часы, характеризующиеся значительным электропотреблением [1–3].

Наиболее широкое распространение в системах индивидуального теплоснабжения получили теплоаккумулирующие аппараты, заполненные водой [1, 2, 5, 6], одновременно выполняющей функции теплоносителя и теплоаккумулирующей среды, что во многом обусловлено большой удельной теплоемкостью и низкой стоимостью воды. Однако применение водяных аккумуляторов теплоты имеет два существенных недостатка. Первый из них связан с тем, что при слабой циркуляции воды в емкостях большого объема происходит значительное ухудшение санитарно-гигиенических показателей ее качества [3]. Вторым недостатком, присущим всем емкостным теплоаккумулирующим материалам, заключается в невозможности обеспечения постоянной температуры зарядки и разрядки аккумулятора [4].

Использование в тепловых аккумуляторах веществ [3, 4, 7–11], способных при фиксированной температуре плавления/затвердевания поглощать/выделять значительное количество скрытой теплоты, позволяет избежать указанных недостатков. Наряду с этим такие вещества имеют большую удельную теплоаккумулирующую способность [3, 8–13] в сравнении с емкостными материалами, что делает возможным уменьшение рабочего объема аппарата при сохранении количества аккумуляруемой в нем тепловой энергии [11–13].

Главным фактором, сдерживающим широкое применение плавящихся теплоаккумулирующих веществ, является их сравнительно невысокая теплопроводность [4, 10, 14], которая приводит к ухудшению условий теплообмена с теплоносителем и, как следствие, к увеличению времени зарядки аккумулятора. В связи с этим большую актуальность приобретают исследования, нацеленные на поиск способов снижения негативного влияния указанного фактора. Работы в данной области ведутся в двух ключевых направлениях [3, 4, 6, 11–15]: оптимизация характеристик теплоаккумулирующих веществ и совершенствование конструктивных особенностей тепловых аккумуляторов. В данной статье основное внимание будет сосредоточено на втором направлении исследований.

Целью настоящей работы – оптимизация схемы системы индивидуального теплоснабжения с электрическим котлом и совершенствование конструкции теплоаккумулирующих аппаратов, включенных в контуры отопления и горячего водоснабжения.

### Схемное решение системы индивидуального теплоснабжения

Предлагаемая схема системы индивидуального теплоснабжения изображена на рис. 1. Отличительной особенностью данной схемы является наличие в ней двух теплоаккумулирующих аппаратов: аккумулятора теплоты для системы отопления (ТАО), подключенного параллельно электрическому котлу (ЭК), и гидравлически не связанного с котлом теплообменного аппарата для системы горячего водоснабжения (ТАГ), сочетающего функции теплового аккумулятора и емкостного водонагревателя.

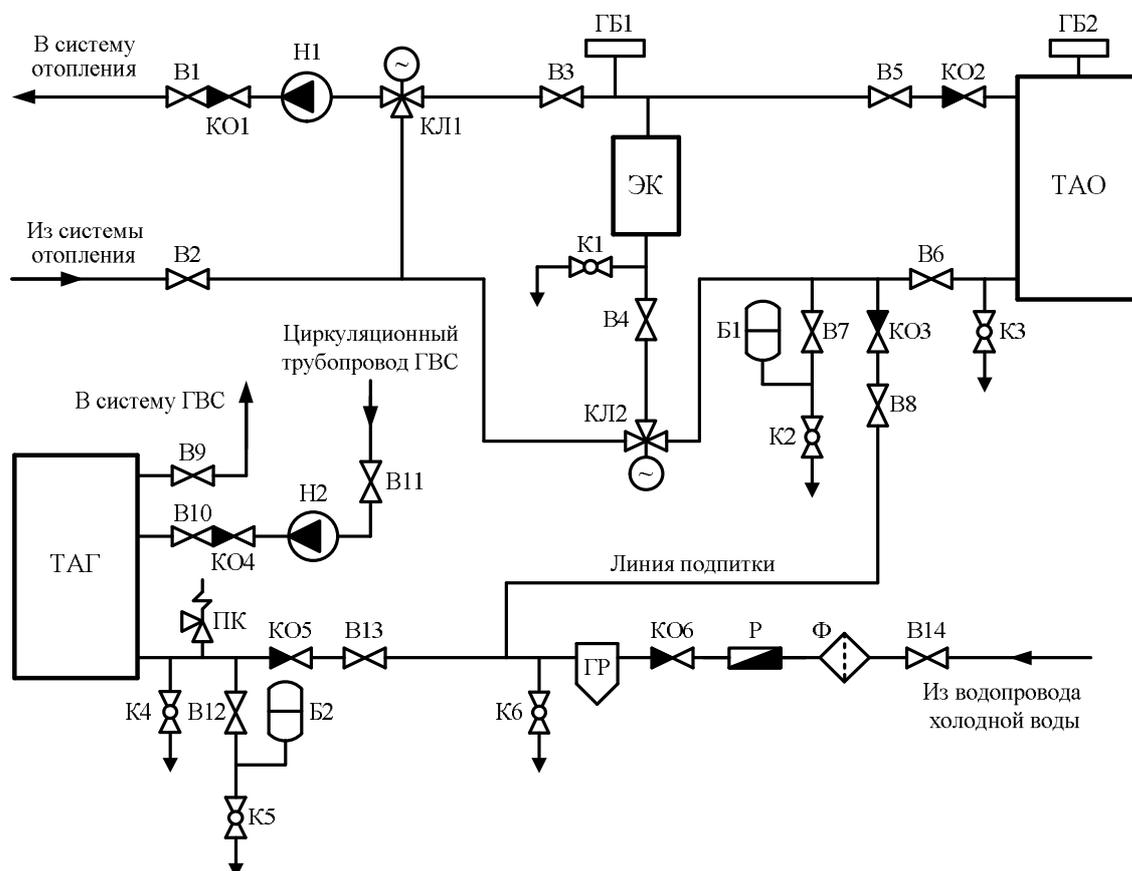


Рис. 1. Принципиальная схема системы индивидуального теплоснабжения с электрическим котлом

На рис. 1 приняты следующие обозначения: Б1 и Б2 – расширительные баки для компенсации термоиндуцированного повышения давления воды в контурах отопления и ГВС; В1–В14 – запорные вентили; ГБ1 и ГБ2 – группы безопасности, в состав каждой из которых входят предохранительный клапан, воздухоотводчик и манометр; ГР – грязевик; К1–К6 – шаровые краны для слива воды; КЛ1 и КЛ2 – трехходовые регулирующие клапаны с электрическим приводом; КО1–КО6 – обратные клапаны; Н1 и Н2 – насосы, обеспечивающие циркуляцию горячей воды в контурах отопления и ГВС; ПК – предохранительный клапан; Р – расходомер холодной воды; Ф – фильтр.

Включение аппаратов ТАО и ТАГ в схему индивидуального теплоснабжения позволяет запасать тепловую энергию в период минимальных электрических нагрузок, для которого характерен сниженный тариф, и расходовать ее в часы средних и максимальных нагрузок, когда действует основной тариф на электроэнергию. Данное техническое решение делает возможным уменьшение суммарных затрат электрической энергии для целей отопления и ГВС и в конечном счете способствует повышению эффективности функционирования системы теплоснабжения в целом.

### Конструктивные решения теплоаккумулирующих аппаратов

Конструкция аккумулятора теплоты для системы отопления представлена на рис. 2.

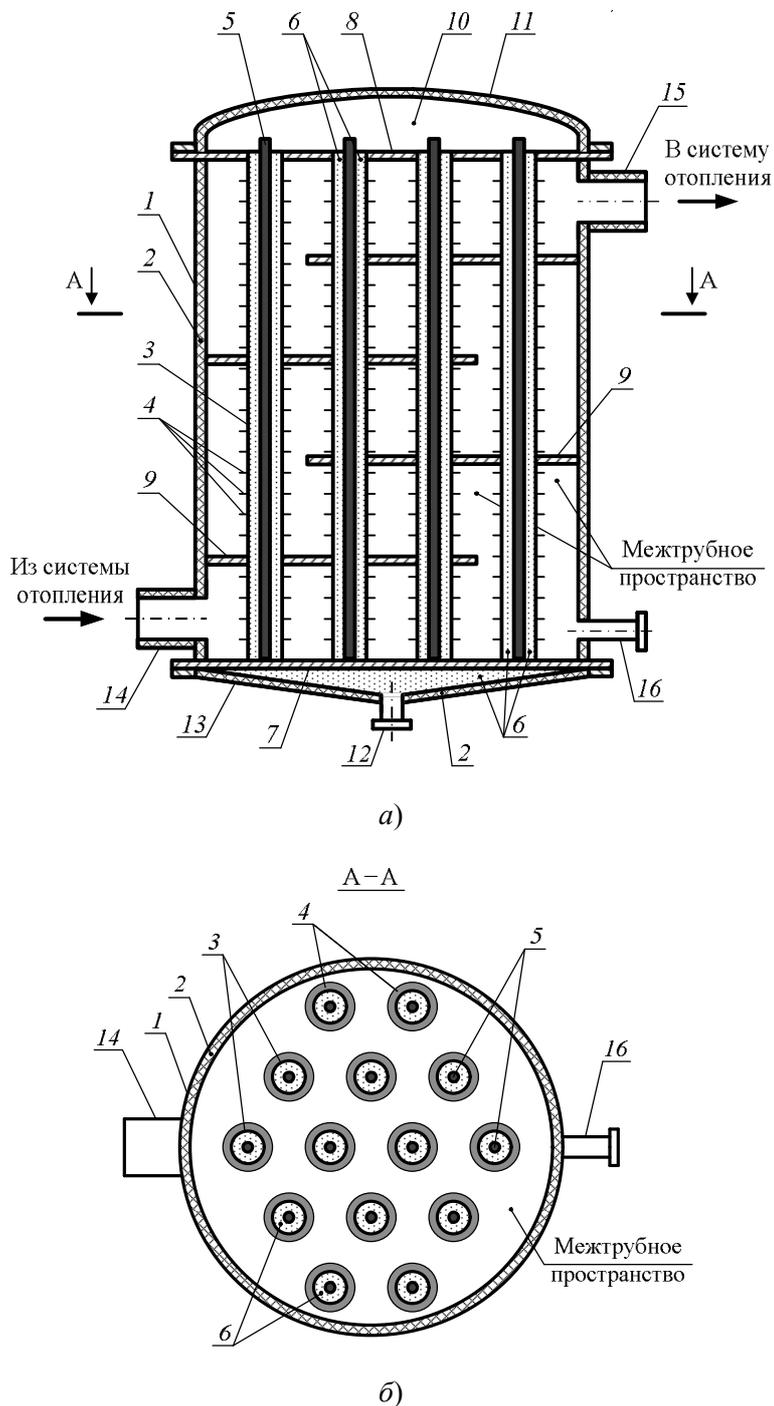


Рис. 2. Аккумулятор теплоты для системы отопления:  
а – продольный разрез; б – поперечный разрез

Аккумулятор ТАО состоит из цилиндрического корпуса 1, выполненного из нержавеющей стали и закрытого теплоизоляционным кожухом 2. В корпусе вертикально расположены металлические трубки 3 с наружными ребрами 4. Внутри трубок 3 коаксиально установлены гладкие трубчатые электроннагревательные (ТЭН) элементы 5. Свободный объем между трубками 3 и элементами 5 заполнен теплоаккумулирующим материалом 6. Для крепления трубок 3 в корпусе 1 предусмотрены

нижняя 7 и верхняя 8 трубные решетки. Перегородки 9 (показаны только на продольном разрезе ТАО), установленные в межтрубном пространстве аппарата, обеспечивают интенсификацию процесса теплообмена за счет увеличения скорости движения воды.

Полая камера 10, расположенная между трубной решеткой 8 и верхней герметичной крышкой 11, снижает эффект воздействия на корпус аппарата механических напряжений, вызванных увеличением объема теплоаккумулирующего материала при его плавлении. Заполнение трубок 3 твердым теплоаккумулирующим материалом 6 производится при снятой верхней крышке 11. Удаление расплава материала 6 выполняется посредством открытия сливного штуцера 12, прикрепленного к нижней герметичной крышке 13, покрытой теплоизоляционным слоем 2. Сообщение заполненного водой межтрубного пространства ТАО с контуром системы отопления осуществляется при помощи входного 14 и выходного 15 патрубков. Слив воды из рабочего объема ТАО производится через штуцер 16.

Предложенное усовершенствование конструкции теплового аккумулятора для системы отопления имеет следующие отличительные преимущества:

1) способствует повышению эффективности теплообмена между водой и теплоаккумулирующей средой за счет установки поперечных перегородок 9 и равномерного распределения ребренных трубок 3 по рабочему объему аппарата;

2) обеспечивает возможность быстрой зарядки аккумулятора благодаря соосному размещению электронагревательных элементов 5 и заполненных теплоаккумулирующим материалом трубок 3;

3) позволяет применять теплоаккумулирующие вещества с большим скачком объема в точке плавления благодаря наличию полой камеры 10, в которую может свободно поступать увеличенный в объеме расплав рабочего вещества.

Конструкция аккумулятора теплоты для системы горячего водоснабжения приведена на рис. 3. Аккумулятор ТАГ представляет собой вертикальный цилиндрический корпус 1, сделанный из нержавеющей стали и закрытый теплоизоляционным кожухом 2. Внутри аппарата по периметру окружности, образуемой при поперечном сечении корпуса 1, размещены вертикальные металлические трубки 3 с внешними ребрами 4. Гладкие ТЭН элементы 5, предназначенные для нагрева теплоаккумулирующей среды 6, коаксиально расположены внутри трубок 3.

В центральной части корпуса 1 находится трубчатый нагреватель 7 с наружными ребрами 8 и кварцевыми изоляторами 9 и теплоаккумулирующий пояс 10, выполненный в виде двух металлических полусекторов, заполненных материалом 6. Элементы 7 и 10 размещены соосно друг относительно друга. Трубки 3, нагреватель 7 и пояс 10 закреплены на нижней 11 и верхней 12 трубных решетках.

Полость 13 между трубной решеткой 12 и верхней герметичной крышкой 14, покрытой слоем изоляции 2, служит для компенсации объемного термического расширения расплава материала 6. Заполнение ТАГ теплоаккумулирующим материалом 6, находящимся в твердом порошкообразном состоянии, осуществляется при снятой верхней крышке 14. Извлечение расплава материала 6 производится через сливной штуцер 15, присоединенный к нижней крышке 16.

Подвод холодной воды в аппарат выполняется через нижний патрубок 17, а отвод нагретой воды – через верхний патрубок 18. Возврат горячей воды в аккумулятор ТАГ производится через установленный в средней части корпуса 1 патрубок 19 циркуляционного трубопровода ГВС. Удаление воды из ТАГ совершается при помощи сливного штуцера 20.

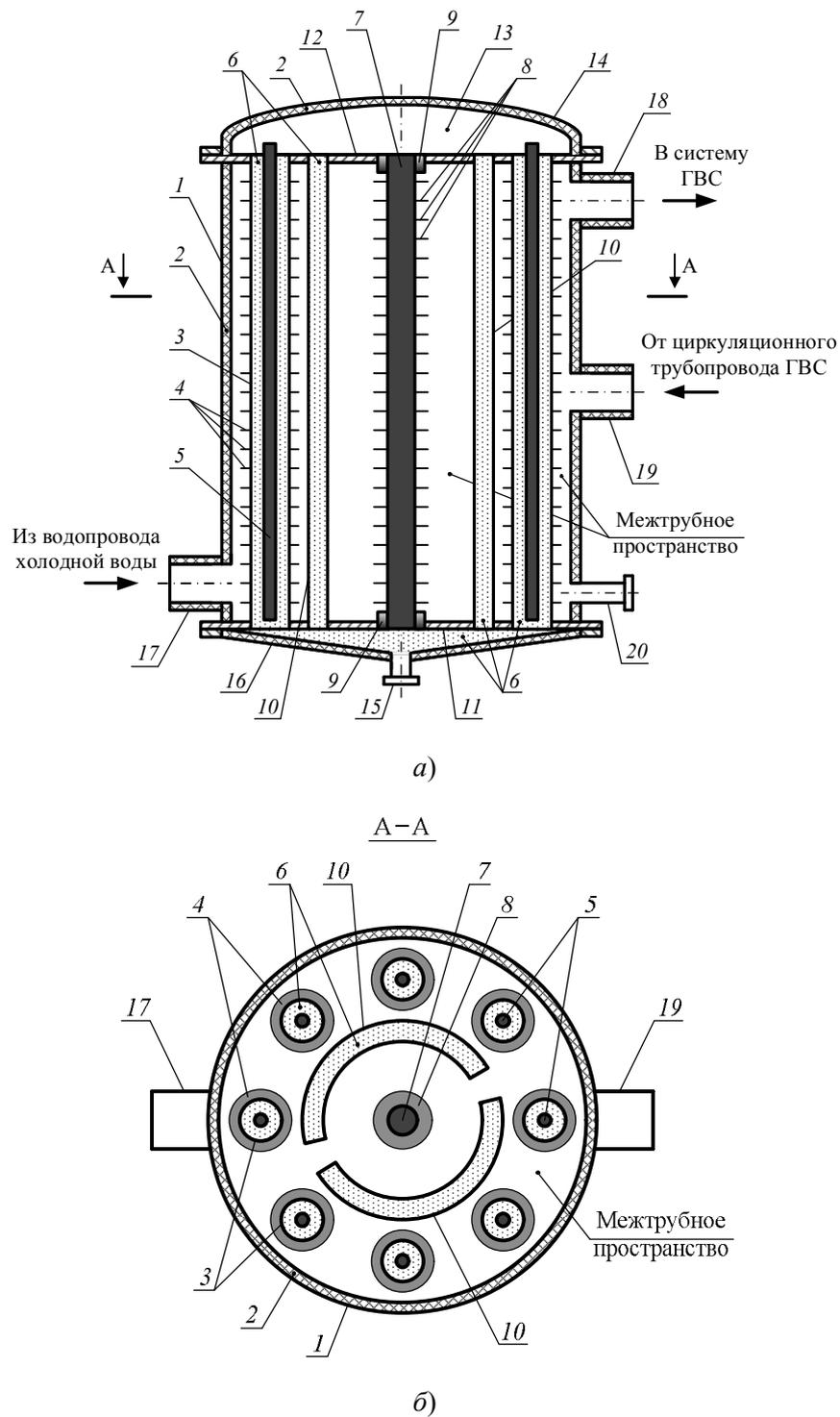


Рис. 3. Аккумулятор теплоты для системы горячего водоснабжения:  
 а – продольный разрез; б – поперечный разрез

Наряду с преимуществами, свойственными устройству ТАО, предлагаемая конструкция аккумулятора теплоты для системы ГВС обладает следующими важными достоинствами:

1) объем ТАГ разделен на две секции, расположенные внутри и снаружи теплоаккумулирующего пояса 10, что увеличивает равномерность распределения поверх-

ности теплообмена по рабочему объему аппарата и, как следствие, способствует повышению эффективности его работы;

2) в центре ТАГ размещен трубчатый нагреватель 7, имеющий большую единичную мощность в сравнении с элементами 5 и находящийся в прямом контакте с нагреваемой средой, заполняющей межтрубное пространство аппарата, что позволяет проводить зарядку аккумулятора в форсированном режиме.

### Перспективные теплоаккумулирующие материалы

Для заполнения теплоаккумулирующих аппаратов ТАО и ТАГ рекомендуется использовать твердые вещества, способные при плавлении/затвердевании поглощать/выделять большое количество тепла. Теплофизические характеристики веществ, перспективных для применения в качестве теплоаккумулирующих материалов, даны в таблице.

Теплофизические характеристики теплоаккумулирующих веществ

Вещество	Температура плавления, °С	Теплота плавления, кДж/кг
Семеновский воск [8]	76–88	167
Канделлильский воск [8]	60–68	175
Полиоксиэтилен-125000 [8]	57–71	180
Парафин 6035 [9]	58–60	189
Парафин 6403 [9]	62–64	189

Наибольшей удельной теплотой плавления из представленных в таблице веществ обладает парафин, который является нетоксичным, химически инертным и сохраняет стабильность своих характеристик при большом числе циклов плавления и затвердевания. Теплоаккумулирующая способность парафина с температурой плавления  $t_m = 60$  °С, рассчитанная по данным [8, 9] для рабочего интервала от 45 до 70 °С, составила  $51,2$  (кВт · ч)/м<sup>3</sup>, что приблизительно в 1,8 раза выше аккумулирующей способности воды, равной  $28,6$  (кВт · ч)/м<sup>3</sup> в том же температурном интервале. Использование данного материала в аккумуляторах ТАО и ТАГ позволяет прогнозировать увеличение длительности поддержания оптимального температурного режима в контурах отопления и горячего водоснабжения.

### Функционирование системы индивидуального теплоснабжения

Зарядка аккумуляторов теплоты начинается в момент включения ТЭН, которые нагревают теплоаккумулирующий материал до температуры  $\bar{t}$ , превышающей температуру  $t_m$  его плавления на 10–15 °С. В окрестности  $t_m$  материал поглощает скрытую теплоту плавления, при этом часть аккумулированного им тепла расходуется на нагрев воды, находящейся в межтрубном пространстве ТАО и ТАГ. По достижении в аккумуляторах установившегося теплового режима происходит отключение ТЭН.

Изоляция корпусов ТАО и ТАГ поддерживает температуру теплоаккумулирующего материала на уровне, превышающем  $t_m$ , и обеспечивает хранение аккумулированной тепловой энергии. Зарядку аккумуляторов рекомендуется проводить в ночное время, соответствующее периоду действия минимальных электрических нагрузок. При зарядке ТАО вентили В5 и В6 открыты, а клапан КЛ2 находится в положении, при котором проток воды из контура системы отопления в сторону ТАО закрыт. Тепловая зарядка ТАГ ведется при открытых вентилях В9–В11.

Разрядка аккумуляторов осуществляется в часы средних и максимальных нагрузок, когда действует основной тариф на электроэнергию. Разрядка ТАГ начинается в момент разбора горячей воды у потребителей. В первое время горячая вода забирается из рабочего объема аккумулятора, а затем по мере ее расходования в ТАГ через вентиль В13 и клапан КО5 поступает холодная вода из водопровода. Проходя через ТАГ, холодная вода поглощает теплоту, выделяющуюся при остывании теплоаккумулирующего материала, и в нагретом состоянии направляется в систему ГВС. При условии разрядки ТАГ до температуры  $t_{hw}$ , лежащей в диапазоне 45–50 °С, и наличии запроса тепла на нужды ГВС происходит автоматическое включение ТЭН элементов, выполняющих дозарядку ТАГ для стабилизации температурного режима системы ГВС.

В режиме разрядки ТАО электрический котел ЭК отключается, а трехходовой клапан КЛ2 переводится в положение, при котором проток воды открыт в направлении ТАО и закрыт в направлении ЭК. Вода из системы отопления насосом Н1 нагнетается в ТАО через вентиль В6, проходит сквозь рабочий объем ТАО и возвращается в контур системы отопления через обратный клапан КО2 и вентиль В5. Вода, циркулирующая по межтрубному пространству ТАО, нагревается за счет охлаждения теплоаккумулирующего материала, выделяющего при этом скрытую теплоту плавления.

Пороговая температура  $t_h$ , определяющая момент полной разрядки аккумулятора ТАО, зависит от температурного графика системы отопления и, как правило, находится в интервале 35–40 °С. Автоматическое регулирование данного графика производится трехходовым клапаном КЛ1. Параллельная работа ЭК и ТАО реализуется посредством переключения клапана КЛ2 в промежуточное положение, обеспечивающее прохождение воды как в направлении ЭК, так и в направлении ТАО. Покрытие отопительной нагрузки в случае полной разрядки ТАО происходит при помощи электрического котла ЭК.

Использование теплоаккумулирующих аппаратов в рамках предлагаемой схемы теплоснабжения (см. рис. 1) наиболее целесообразно проводить при положительных и небольших отрицательных температурах  $t_a$  наружного воздуха. При выборе в качестве теплоаккумулирующих материалов веществ, перечисленных в таблице, включение аккумуляторов ТАО и ТАГ в работу предпочтительно осуществлять при температурах  $t_a$ , лежащих в диапазоне от –8 до +8 °С. Это связано с тем, что для указанных значений  $t_a$  температура воды в подающей линии системы отопления обычно находится в интервале от 70 до 40 °С, который соответствует оптимальному режиму работы аккумуляторов. Эксплуатация ТАО и ТАГ в данном режиме дает возможность ожидать снижения нагрузок для целей отопления и горячего водоснабжения приблизительно на 30–35 %.

### **Заключение**

Разработана схема системы индивидуального теплоснабжения, в которой в дополнение к основному источнику тепловой энергии – электрическому котлу – установлены аккумуляторы теплоты, заполненные твердым веществом, способным при плавлении/затвердевании поглощать/выделять большое количество скрытого тепла.

Предложены конструктивные решения, позволяющие оптимизировать работу теплоаккумулирующих аппаратов за счет увеличения равномерности распределения теплообменной поверхности по их рабочему объему и установки трубчатых электронагревательных элементов. Приведены теплофизические характеристики веществ, пригодных для применения в качестве теплоаккумулирующих материалов в данных аппаратах.

Реализация предложенных в работе технических решений даст возможность уменьшить общий расход электроэнергии на нужды отопления и горячего водо-

снабжения за счет использования предварительно аккумулированной тепловой энергии и в конечном итоге – повысить эффективность функционирования системы индивидуального теплоснабжения.

### Литература

1. Торопов, А. Л. Применение электрических котлов для водяного поквартирного теплоснабжения / А. Л. Торопов // Вестник МГСУ. – 2023. – Т. 18, № 9. – С. 1451–1465. <https://doi.org/10.22227/1997-0935.2023.9.1451-1465>
2. Мацевитый, Ю. М. Оценка энергетической эффективности систем электротеплоаккумуляционного отопления административных зданий / Ю. М. Мацевитый, Н. Г. Ганжа, А. В. Хименко // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. – 2011. – № 10 (92). – С. 9–16.
3. Серов, С. Ф. Теплоаккумулирующие системы в теплоснабжении индивидуальных домов / С. Ф. Серов, Н. С. Дегтярев // Водоснабжение и санитарная техника. – 2010. – № 10-2. – С. 40–45.
4. Бабаев, Б. Д. Разработка и исследование энергосистем на основе возобновляемых источников с фазопереходным аккумулированием тепла : дис. ... д-ра техн. наук : 05.14.01 / Бабаев Баба Джабраилович ; Даг. гос. ун-т. – Махачкала, 2016. – 345 л.
5. Ганжа, Н. Г. Тепловое аккумулирование как способ повышения энергетической эффективности систем теплоснабжения / Н. Г. Ганжа, А. В. Хименко // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. – 2012. – № 3 (97). – С. 16–21.
6. Advances in thermal energy storage systems: methods and applications / Ed. L. F. Cabeza. – Cambridge : Woodhead Publishing, 2015. – 612 p. <https://doi.org/10.1016/C2013-0-16453-7>
7. Yang, T. Phase change material-based thermal energy storage / T. Yang, W. P. King, N. Miljkovic // Cell Reports Physical Science. – 2021. – Vol. 2, N 8. – P. 100540. <https://doi.org/10.1016/j.xcrp.2021.100540>
8. Бабаев, Б. Д. Принципы теплового аккумулирования и используемые теплоаккумулирующие материалы / Б. Д. Бабаев // Теплофизика высоких температур. – 2014. – Т. 52, № 5. – С. 760–776. <https://doi.org/10.1134/S0018151X14050010>
9. Review on thermal energy storage with phase change materials and applications / A. Sharma, V. V. Tyagi, C. R. Chen, D. Buddhi // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2009. – Vol. 13, N 2. – P. 318–345. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2007.10.005>
10. Studies on performance enhancement of heat storage system with multiple phase change materials / W. Li, Y. Zhang, X. Zhang, J. Zhao // Journal of Energy Storage. – 2022. – Vol. 47. – P. 103585. <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.103585>
11. Thermal energy storage with phase change materials / Eds.: M. Farid, A. Auckaili, G. Gholami-bozanjani. – Boca Raton : CRC Press, 2021. – 464 p. <https://doi.org/10.1201/9780367567699>
12. A critical review on phase change materials (PCM) based heat exchanger: Different hybrid techniques for the enhancement / H. Togun, H. S. Sultan, H. I. Mohammed [et al.] // Journal of Energy Storage. – 2024. – Vol. 79. – P. 109840. <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.109840>
13. Regin, A. F. Heat transfer characteristics of thermal energy storage system using PCM capsules : A review / A. F. Regin, S. C. Solanki, J. S. Saini // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2008. – Vol. 12, N 9. – P. 2438–2458. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2007.06.009>
14. Progress in the study of enhanced heat exchange in phase change heat storage devices / W. Zhang, L. Pan, D. Ding [et al.] // ACS Omega. – 2023. – Vol. 8, N 25. – P. 22331–22344. <https://doi.org/10.1021/acsomega.3c01430>
15. Gholaminia, V. Heat storage process analysis in a heat exchanger containing phase change materials / V. Gholaminia, M. Rahimi, H. Ghaebi // Journal of Energy Storage. – 2020. – Vol. 32. – P. 101875. <https://doi.org/10.1016/j.est.2020.101875>

## References

1. Toropov A. L. Application of electric boilers for water apartment heat supply. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo stroitel'nogo universiteta*, 2023, vol. 18, no. 9, pp. 1451–1465 (in Russian). <https://doi.org/10.22227/1997-0935.2023.9.1451-1465>
2. Matsevityi Yu. M., Ganzha N. G., Khimenko A. V. Evaluation of energy efficiency of systems electric thermal storage heating of civil buildings. *Energoberezhnie. Energetika. Energoaudit = Energy saving. Power engineering. Energy audit*, 2011, no. 10 (92), pp. 9–16 (in Russian).
3. Serov S. F., Degtyarev N. S. Heat storage systems in the heat supply of individual houses. *Vodosnabzhenie i sanitarnaya tekhnika = Water Supply and Sanitary Technique*, 2010, no. 10-2, pp. 40–45 (in Russian).
4. Babaev B. D. Development and research of energy systems based on renewable sources with phase-transition heat storage. Dr. eng. sci. diss., Makhachkala, 2016. 345p. (in Russian).
5. Ganzha N. G., Khimenko A. V. Thermal storage as a way of improving energy efficiency systems of heat supply. *Energoberezhnie. Energetika. Energoaudit = Energy saving. Power engineering. Energy audit*, 2012, no. 3 (97), pp. 16–21 (in Russian).
6. Cabeza L. F. (ed.) *Advances in thermal energy storage systems: methods and applications*. Cambridge, Woodhead Publ., 2015. 612 p. <https://doi.org/10.1016/C2013-0-16453-7>
7. Yang T., King W. P., Miljkovic N. Phase change material-based thermal energy storage. *Cell Reports Physical Science*, 2021, vol. 2, no. 8, p. 100540. <https://doi.org/10.1016/j.xcrp.2021.100540>
8. Babaev B. D. Principles of heat accumulation and heat-accumulating materials in use. *Teplotfizika vysokikh temperatur = High Temperature*, 2014, vol. 52, no. 5, pp. 736–751 (in Russian). <https://doi.org/10.1134/S0018151X14050010>
9. Sharma A., Tyagi V. V., Chen C. R., Buddhi D. Review on thermal energy storage with phase change materials and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2009, vol. 13, no. 2, pp. 318–345. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2007.10.005>
10. Li W., Zhang Y., Zhang X., Zhao J. Studies on performance enhancement of heat storage system with multiple phase change materials. *Journal of Energy Storage*, 2022, vol. 47, p. 103585. <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.103585>
11. Farid M., Auckaili A., Gholamibozanjani G. (eds.) *Thermal energy storage with phase change materials*. Boca Raton, CRC Press, 2021. 464 p. <https://doi.org/10.1201/9780367567699>
12. Togun H., Sultan H. S., Mohammed H. I., Sadeq A. M., Biswas N., Hasan H. A., Homod R. Z., Abdulkadhim A. H., Yaseen Z. M., Talebizadehsardari P. A critical review on phase change materials (PCM) based heat exchanger: Different hybrid techniques for the enhancement. *Journal of Energy Storage*, 2024, vol. 79, p. 109840. <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.109840>
13. Regin A. F., Solanki S. C., Saini J. S. Heat transfer characteristics of thermal energy storage system using PCM capsules: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2008, vol. 12, no. 9, pp. 2438–2458. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2007.06.009>
14. Zhang W., Pan L., Ding D., Zhang R., Bai J., Du Q. Progress in the study of enhanced heat exchange in phase change heat storage devices. *ACS Omega*, 2023, vol. 8, no. 25, pp. 22331–22344. <https://doi.org/10.1021/acsomega.3c01430>
15. Gholaminia V., Rahimi M., Ghaebi H. Heat storage process analysis in a heat exchanger containing phase change materials. *Journal of Energy Storage*, 2020, vol. 32, p. 101875. <https://doi.org/10.1016/j.est.2020.101875>