

УДК 535.648.01

<https://doi.org/10.21869/2223-1560-2024-28-2-56-70>

Один из вариантов управления системой теплоснабжения зданий и сооружений с применением методов математического анализа

К. В. Жилина¹, Д. Н. Тютюнов¹, А. П. Бурцев¹ ✉

¹ Юго-Западный государственный университет
ул. 50 лет Октября, д. 94, г. Курск 305040, Российская Федерация

✉ e-mail: ap_burtsev@mail.ru

Резюме

Цель исследования. В предлагаемой публикации в качестве цели исследования выбраны два основных фактора, которые включают в себя комплексный анализ функционирования зависимой системы теплоснабжения зданий и сооружений и синтез схемы управления распределением ресурсов указанной системы путем применения математических методов и создания соответствующих алгоритмов регулирования тепловых потоков.

Методы. Для формирования оптимальной стратегии использовались методы математического анализа и дифференциальные уравнения теплового баланса. Такой подход позволил провести детальное описание нестационарного режима функционирования зависимой системы отопления зданий и сооружений с учетом температурной динамики тепловой нагрузки и окружающей среды. Попутно проведено исследование полученных теоретических результатов. Были учтены переходные процессы при введении проектируемой схемы управления в эксплуатацию. Широко использовалась теория подобия для формирования выходной рабочей формулы при организации теплоснабжения. Полученное соотношение позволило сформировать алгоритмы управления обеспечением тепла зданий и сооружений. Такой подход дал возможность для синтеза схем регулирования тепловых потоков на основе принципов распределения ресурсов по варианту эксплуатации «умного дома» для применения на практике.

Результаты. В ходе исследования получена рабочая формула управления процессом теплоснабжения зданий и сооружений. На ее основе были синтезированы соответствующие функциональные схемы, учитывающие динамику изменения температурных режимов в тепловой нагрузке и внешней среде.

Заключение. Полученные результаты дают возможность применять принципы управления «умным домом» на практике. В заключение исследования сформулированы основные выводы и рекомендации по управлению системой теплоснабжения с применением методов математического анализа.

Ключевые слова: система; теплоснабжение; модель; теплообмен; алгоритм; эффективность; схема; теплопотребление; регулирование.

Конфликт интересов: Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

© Жилина К. В., Тютюнов Д. Н., Бурцев А. П., 2024

Для цитирования: Жилина К. В., Тютюнов Д. Н., Бурцев А. П. Один из вариантов управления системой теплоснабжения зданий и сооружений с применением методов математического анализа // Известия Юго-Западного государственного университета. 2024. Т. 28, №2. С. 56-70. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2024-28-2-56-70>.

Поступила в редакцию 04.03.2024

Подписана в печать 15.04.2024

Опубликована 25.06.2024

One of the options for managing the heat supply system of buildings and structures using mathematical analysis methods

Kira V. Zhilina ¹, Dmitriy N. Tyutyunov ¹, Alexey P. Burtsev ¹ ✉

¹ Southwest State University

50 Let Oktyabrya str. 94, Kursk 305040, Russian Federation

✉ e-mail: ap_burtsev@mail.ru

Abstract

Purpose of research. In the proposed publication, two main factors are selected as the purpose of the study, which include a comprehensive analysis of the functioning of a dependent heat supply system for buildings and structures and the synthesis of a control scheme for the distribution of resources of the specified system by applying mathematical methods and creating appropriate algorithms for regulating heat flows.

Methods. Methods of mathematical analysis and differential equations of thermal balance were used to form the optimal strategy. This approach made it possible to carry out a detailed description of the non-stationary mode of operation of the dependent heating system of buildings and structures, taking into account the temperature dynamics of the thermal load and the environment. Along the way, a study of the theoretical results obtained was conducted. Transients were taken into account when putting the projected control scheme into operation. The theory of similarity was widely used to form the output working formula for the organization of heat supply. The obtained ratio made it possible to form algorithms for managing the provision of heat to buildings and structures. This approach made it possible to synthesize heat flow control schemes based on the principles of resource allocation according to the smart home operation option for practical use.

Results. In the course of the study, a working formula was obtained for the control of the heat supply process of buildings and structures. On its basis, appropriate functional schemes were synthesized, taking into account the dynamics of changes in temperature conditions in the thermal load and the external environment.

Conclusion. The results obtained make it possible to apply the principles of smart home management in practice. At the end of the study, the results of the work will be summarized, as well as the main conclusions and recommendations for managing the heat supply system using mathematical analysis methods will be formulated. Also, in conclusion, an assessment of the effectiveness of the proposed solutions and their impact on the economy and the environment can be given.

Keywords: system; heat supply; model; heat and mass transfer; algorithm; efficiency; scheme; heat consumption; regulation.

Conflict of interest. The authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

For citation: Zhilina K. V., Tyutyunov D. N., Burtsev A. P. One of the options for managing the heat supply system of buildings and structures using mathematical analysis methods. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2024; 28(2): 56-70 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2024-28-2-56-70>.

Received 04.03.2024

Accepted 15.04.2024

Published 25.06.2024

Введение

К одной из важных проблем современности в общем списке технических задач можно отнести совершенствование ресурсосберегающих технологий с одновременным обеспечением экологической безопасности.

Практика показывает, что при внедрении указанных вопросов особое преимущество имеют комплексы автома-

тического регулирования в системах горячего водоснабжения и отопления зданий и сооружений, позволяющие уменьшить расходы тепловой энергии в пределах от 10...30% [1, 2, 3, 4].

Из опыта эксплуатации, при внедрении упомянутой технологии наиболее оптимальной показала себя открытая система теплоснабжения, зависимо соединенная подающей магистралью к тепловым сетям (рис. 1).

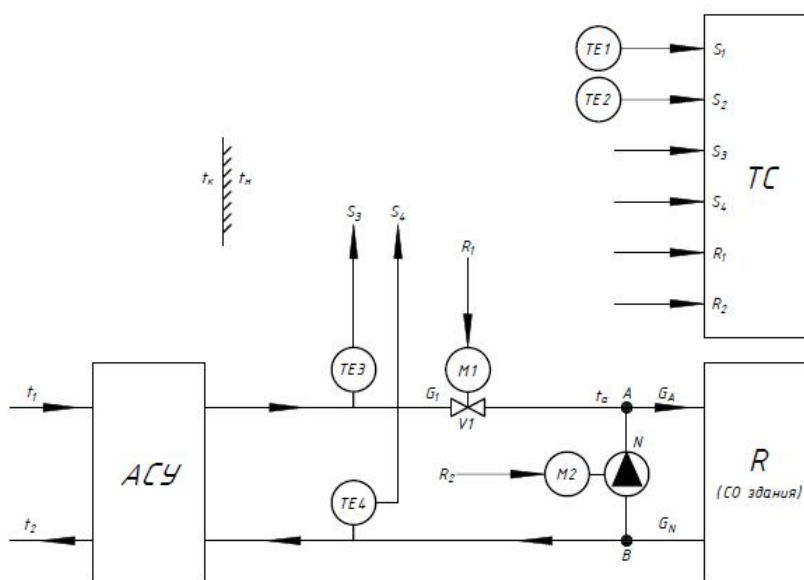


Рис. 1. Рабочая функциональная схема регулирования открытой зависимой системы теплоснабжения: **АСУ** – автоматизированная система учета, содержащая узел учета тепловой энергии с комплексом измерительного оборудования; **ТС** – контроллер параметров теплосети; **V₁** – регулирующий клапан; **M₁** – электропривод клапана; **N** – циркуляционный насос; **M₂** – электропривод насоса; **TE₁** – выносной датчик температуры наружной окружающей среды t_k ; **TE₂** – контактный датчик температуры в обогреваемом помещении t_k ; **R** – тепловая нагрузка; **TE₃** – погружной датчик температуры теплоносителя t_1 в подающем трубопроводе; **TE₄** – погружной датчик температуры теплоносителя t_2 в обратной трубе

Fig. 1. Working functional scheme of regulation of an open dependent heat supply system: **ACS** – an automated metering system containing a thermal energy metering unit with a set of measuring equipment; **TC** – a controller of heating network parameters; **V₁** – a control valve; **M₁** – electric valve actuator; **N** – circulation pump; **M₂** – electric pump drive; **TE₁** – external ambient temperature sensor t_k ; **TE₂** – contact temperature sensor in a heated room t_k ; **R** – thermal load; **TE₃** – submersible coolant temperature sensor t_1 in the supply pipeline; **TE₄** – a submersible coolant temperature sensor t_2 in the return pipe

Предлагаемый вариант распределения тепла имеет предпочтение в сравнении с независимой, в виду отсутствия необходимости применения теплообменного оборудования, групп подпиточных насосов и расширительного бака.

Следует отметить, что такой подход регулировки отопления содержит некоторую опасность для системы теплоснабжения при гидроударе в обратном трубопроводе, в случае достижения аварийного значения [2]. Это может привести к выходу из строя целого ряда теплоэнергетического оборудования.

В реальной действительности основная часть современных эксплуатируемых объектов таких, как АЭС, ТЭЦ, ГЭС защищают магистральные теплопроводы от аварийных ситуаций.

Отметим, что указанные значения температур носят номинальный характер: $t_1 = 80...150^{\circ}\text{C}$, $t_k = 20...22^{\circ}\text{C}$; $t_2 = 60...70^{\circ}\text{C}$; температура наружного воздуха t_N определяется в соответствии с СП 131.13330.2020 «Строительная климатология».

Материалы и методы

Динамика теплоснабжения требует использования горячего теплоносителя, температура которого должна иметь номинальное значение t_1 . Он поступает из тепловой магистрали на регулирующий клапан V_1 , который управляет процессом регулирования подачи тепла в тепловую нагрузку R , для поддержа-

ния нормативной номинальной температуры t_k в ней (зданий и сооружений).

Процесс поддержания температуры t_k управляется за счет запитки контура ARBA горячим теплоносителем в точке А. Обеспечение циркуляции осуществляется с помощью насоса N, который подмешивает горячий теплоноситель в необходимом объеме. В результате теплоотдачи в обратный трубопровод поступает охлажденный теплоноситель с номинальной температурой t_2 ^{1,2} [2, 5-9].

В научных работах [5-15] предлагаемый подход позволяет описать основные особенности процесса передачи тепла определенными функциями, включающими координаты и время. Тогда мы можем представить нашу модель в виде ряда решений для различных задач конвекции тепла, вызванной определенными факторами.

Для представления процесса теплоснабжения в виде математической модели необходимо учесть следующие параметры:

– геометрические характеристики участка трубы (внешний d_1 и внутренний d_2 диаметр, м; длина контура l , м);

¹ Федоров С. С. Управление системой многоконтурного теплоснабжения зданий при зависимом подключении к тепловым сетям: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Белгород, 2016. 16 с.

² Федоров С. С. Управление системой многоконтурного теплоснабжения зданий при зависимом подключении к тепловым сетям: дис. ... канд. техн. наук. Белгород, 2016. 171 с.

- физические свойства среды (теплоемкость c , Дж/кг·°C; теплопроводность λ , Вт/м·°C; плотность ρ , кг/м³);
- интенсивность тепловых потерь (объемная плотность тепловыделений q_v , Вт/м³; тепловой поток q , Вт/м²);
- условия теплообмена на границах участка.

Математическая модель процесса тепломассопереноса может быть представлена в виде системы уравнений Навье-Стокса для описания движения среды $\vec{\omega}$ за время τ и температуры t в ортогональной системе координат x, y, z , а также уравнения энергии для определения температурного поля и граничных условий, учитывающих теплообмен на стенках трубы:

$$\frac{dt}{d\tau} = \Delta t + q_v - q, \quad (1)$$

где $\frac{dt}{d\tau} = \frac{\partial t}{\partial \tau} + \omega_x \frac{\partial t}{\partial x} + \omega_y \frac{\partial t}{\partial y} + \omega_z \frac{\partial t}{\partial z}$ – субстанциональная производная, связанная с описанием движущейся среды со скоростью $\vec{\omega} = (\omega_x; \omega_y; \omega_z)$, при этом $\omega_x, \omega_y, \omega_z$ – проекции вектора скорости теплоносителя $\vec{\omega}$, м/с; $\Delta = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$ – оператор Лапласа [10, 11].

В результате решения данной системы уравнений можно определить распределение температуры внутри участка трубы, а также потери тепла на каждом участке. Это позволит оптимизировать процесс теплоснабжения, минимизировать потери тепла и обеспе-

чить требуемый температурный режим в помещении.

Попутно отметим, что ось абсцисс содержит начало координат и направлена вдоль оси трубы. Одновременно оси ординат и аппликат исходят из указанного начала в плоскости, нормальной к оси абсцисс (оси трубы) [6].

Полагая, что температурные параметры в зависимой системе изменяются во времени, рассмотрим нестационарный режим работы контура ARBA. В этом случае перемещение рабочего тепла происходит вдоль оси абсцисс, и в произвольном сечении $\tilde{x}$ его расход G_1 и температура t_1 изменяются во времени, то есть справедливы соотношения: $\frac{\partial t}{\partial \tau} \neq 0, \omega_x = \omega_y = \omega_z = 0, \Delta t = 0$. Учитывая, что в большинстве случаев величина q_v практически отсутствует, соотношение (1) примет вид:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = -\frac{q}{c\rho}. \quad (2)$$

Для стальных электросварных труб по ГОСТ 10704-91 «Трубы стальные электросварные прямошовные» отношение диаметров имеет отношение: $\frac{d_1}{d_2} > 0,98$.

Тепловой поток q (Вт) через единицу поверхности трубопровода, характеризующейся эффективным диаметром d_x (м) при условии $d_x = d_2$ и длиной l (м) с учетом приведенного коэффициента теплопередачи трубопроводного контура и контура потребителя $k_{тр}$ (Вт/м²·°C)

при разнице температур между горячим теплоносителем и температурой внутри объекта с тепловой нагрузкой R может быть представлен в виде:

$$q \approx k_{mp} \cdot \pi \cdot d_x \cdot l \cdot (t - t_k). \quad (3)$$

Для определения интенсивности тепловых потерь q указанный коэффициент k_{tr} следует привести к единице площади внешней цилиндрической поверхности трубы диаметром d_2 и длиной l . В этом случае k_{tr} достаточно разделить на величину этой площади $\pi \cdot d_2 \cdot l$. С учетом указанного, подставляя (3) в (2), получим:

$$\begin{aligned} \frac{\partial t}{\partial \tau} &= - \frac{k_{mp} \cdot \pi \cdot d_2 \cdot l \cdot (t - t_k)}{\pi \cdot d_2 \cdot l \cdot c\rho} = \\ &= - \frac{k_{mp} \cdot (t - t_k)}{c\rho}. \end{aligned} \quad (4)$$

Преобразуем (4) в виде:

$$- \frac{k_{mp} (t - t_k)}{c\rho} = - \frac{(t - t_k)}{\frac{c\rho}{k_{mp}}}. \quad (5)$$

Введем обозначения:

$$\frac{c\rho}{k_{mp}} = \frac{T_n}{K}. \quad (6)$$

Подставляя (6) в (5), имеем:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = - \frac{K(t - t_k)}{T_n}. \quad (7)$$

Одномерная функция $t = f(\tau)$ при учете постоянной времени тепловой нагрузки T_n и коэффициента усиления температурного напора в системе теплоснабжения K , являющимся константой пропорциональным отношению температур в подающем и обратном трубопроводах t_2/t_1 и зависящем от геометрических и

физических свойств тепловой нагрузки, может быть записана в виде:

$$K_t + T_n \frac{dt}{d\tau} = K t_k. \quad (8)$$

Проинтегрируем дифференциальное уравнение (8) с учетом постоянной времени τ и времени запаздывания τ_0 для произвольного сечения с координатой $\tilde{x} = l$ контура трубопровода, соответственно имеющей температуру t_1 в виде одного из граничных условий¹ [7, 16, 17, 18, 3, 4] (рис. 2).

$$\int_{t_1}^t \frac{d(t - t_k)}{t - t_k} = - \frac{K}{t_N} \int_{\tau_0}^{\tau} d\tau, \quad (9)$$

$$t = t_k + (t_1 - t_k) \exp \left(- \frac{K}{t_N} (\tau - \tau_0) \right). \quad (10)$$

)

Из условия $\tau \rightarrow \infty$ следует $K \rightarrow 1$, что приводит к соотношению:

$$t = t_k + (t_1 - t_k) \exp \left(- \frac{\tau - \tau_0}{t_N} \right). \quad (11)$$

Известно, что общее решение соотношения (1), соответствующее сечению $\tilde{x} = l$, имеет вид:¹

$$\tilde{t} = C_1 e^{a_1 \tilde{x}} + C_2 e^{a_2 \tilde{x}} + t_k, \quad (12)$$

где $C_1, C_2, a_1, a_2 - const$, причем a_1 и a_2 определяются из эксперимента за счет варьирования значениями $\tilde{x}$ и $\tilde{t}$ в соотношении (12).

¹ Федоров С. С. Управление системой многоконтурного теплоснабжения зданий при зависимом подключении к тепловым сетям: дис. ... канд. техн. наук. Белгород, 2016. 171 с.

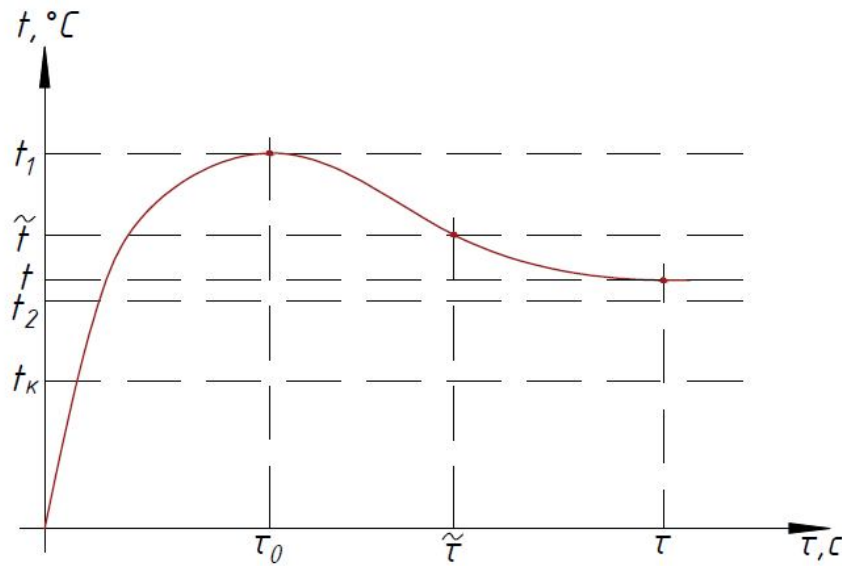


Рис. 2. Температурная характеристика рабочего тела; $\tilde{t}$, t_1 , t_2 , t_k – номинальные параметры системы отопления, °C

Fig. 2. Temperature characteristics of the working fluid; $\tilde{t}$, t_1 , t_2 , t_k – nominal parameters of the heating system, °C

В случае, если $\tilde{x} = l = 0$, то $\tilde{x} = \tilde{x}_A = 0$ получим значение температуры рабочего тела в точке А – начальной границе тепловой нагрузки, причем:

$$\begin{cases} C_1 = \frac{(t_1 - t_k) \exp(a_2 l) - (t_2 - t_k)}{\exp(a_2 l) - 1} \\ C_2 = -\frac{(t_1 - t_k) \exp(a_1 l) - (t_2 - t_k)}{\exp(a_1 l) - 1} \end{cases} \quad (13)$$

Подставляя (12) в (11), (11) – в (10), имеем:

$$\tilde{t} = t_k + (t_1 - t_k) \exp\left(-\frac{K(\tau - \tau_0)}{t_N}\right). \quad (14)$$

Важно отметить, что дифференциальное уравнение (8) соответствует апериодическому (инерционному) звену 1-го рода. В данном случае имеем передаточную функцию $w_1(C)$, характеризующую переходный процесс при подключении системы отопления:

$$w_1(C) = \frac{K}{1 + Ct_N}, \quad (15)$$

где C – параметр; K – коэффициент усиления, который определяет перепад температуры между подающим и обратным трубопроводом.

Соответствующая переходная функция имеет вид:

$$h(\tau) = K \left(1 - \exp\left(-\frac{\tau}{t_N}\right) \right). \quad (16)$$

Кроме того, имеет место наличие звена чистого запаздывания с передаточной функцией $w_2(C)$ и временем чистого запаздывания τ_0 , с:

$$w_2(C) = \exp^{-C\tau_0}. \quad (17)$$

Учитывая (16) и (17) функциональную схему объекта теплоснабжения, можно представить в виде цепочки апериодического звена 1-го порядка и звена чистого запаздывания $w(C)$ [10].

Согласно (14) и (15) получим итоговую передаточную функцию $w(C)$ в виде:

$$w(C) = w_1(C) \cdot w_2(C) = \frac{K \exp^{-C\tau_0}}{1 + Ct_N}. \quad (18)$$

Параметры t_N , τ_0 , C , K могут быть определены опытным путем с учетом геометрических характеристик, тепловой нагрузки и физико-химических свойств теплоносителя.

Из исследования [10] и зависимости (6) следует, что значение t_N прямо пропорционально плотности и удельной теплоемкости горячего теплоносителя и обратно пропорционально коэффициенту теплопередачи k_{mp} контура системы теплоснабжения (тепловая нагрузка R).

Если учесть, что при теплоснабжении объекта часть тепла неизбежно теряется, то справедливо представить уравнение теплового баланса в виде

$$Q_k = \eta Q, \quad (19)$$

где η – КПД системы теплоснабжения; Q – тепловой поток, поступающий для обогрева через поверхность теплообмена, Вт; Q_k – тепловой поток на нагревание тепловой нагрузки R , Вт, причем:

$$Q = \bar{c}_p G_1 (t_1 - t_2), \quad (20)$$

где $\bar{c}_p$ – средняя удельная теплоемкость рабочего тела в интервале температур $[t_2; t_1]$, $\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot ^\circ \text{C}}$; G_1 – расход горя-

чего теплоносителя по массе в подающем трубопроводе, кг/с.

$$Q_k = k_n F (t_k - t_n), \quad (21)$$

где k_n – коэффициент теплопередачи поверхности теплообмена, $\text{Вт} / \text{м}^2 \cdot ^\circ \text{C}$; F – площадь поверхности теплообмена, м^2 .

Следует отметить, что упомянутая величина $\bar{c}_p$ в интервале температур $[50^\circ \text{C}, 70^\circ \text{C}]$ имеет разброс $\pm 0,31\%$ от границ указанного интервала, поэтому достаточно воспользоваться средним значением:

$$\begin{aligned} \bar{c}_p &= (4,174 + 4,187) \cdot 10^3 / 2 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot ^\circ \text{C}} = \\ &= 4,1805 \cdot 10^3 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot ^\circ \text{C}}. \end{aligned}$$

Подставляя (20) и (21) в (19), получим:

$$k_n F (t_k - t_n) = \eta \bar{c}_p G_1 (t_1 - t_2). \quad (22)$$

Выражение (21) позволяет синтезировать механизм поддержания номинального значения t_k в отапливаемом помещении [13].

С другой стороны, учитывая неразрывность струи теплоносителя в системе отопления горячей водой справедливо равенство, например, для точки А, (см. рис.1):

$$G_1 + G_N = G_A, \quad (23)$$

где G_1, G_N – соответственно входящие в точку А расходы горячей воды через регулирующий клапан V_1 и циркуляционный насос N , кг/с; G_A – выходящий из точки А расход горячей воды в тепло-

вую нагрузку R (отапливаемое помещение), кг/с.

Подставляя (22) в (21), имеем управляющую формулу с учетом динамики t_k в отапливаемом помещении:

$$k_n F(t_k - t_n) = \eta \bar{c}_p (G_A - G_N)(t_1 - t_2). \quad (24)$$

Соотношения (22), (24) позволяют управлять теплоснабжением объекта по схеме «умного дома».

Результаты и их обсуждение

Рассмотрим две возможные модели управления теплоснабжением соответственно на основе выражений (21) и (23).

А. Однопараметрическое управление. В качестве управляющего параметра при регулировании тепловой нагрузки выберем температуру окружающей сре-

ды (наружного воздуха). Предположим, t_n изменилась на величину Δt_n , тогда получим ее значение, равное $t_n + \Delta t_n$. Полагая, что $k_n, F, t_k, \eta, \bar{c}_p, G_N, t_1, t_2$ не подлежат изменению, достаточно изменить значение G_1 на величину ΔG_1 так, чтобы сохранить постоянство t_k . В итоге получим:

$$k_n F(t_k - (t_n + \Delta t_n)) = \eta \bar{c}_p (t_1 - t_2)(G_1 + \Delta G_1), \quad (25)$$

Вычитая из (24) почленно (21), имеем:

$$\Delta G_1 = -\frac{k_n F}{\eta \bar{c}_p (t_1 - t_2)} \cdot \Delta t_n. \quad (26)$$

Проведем схемную реализацию полученной зависимости с учетом переходных процессов (рис.3):

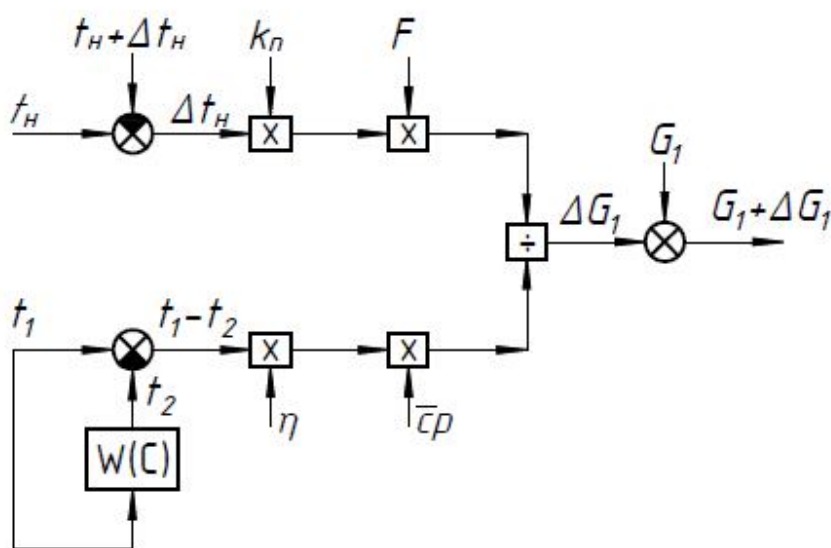


Рис. 3. Структурная схема автоматизации управления зависимой системой теплоснабжения при условии $t_k = \text{const}$

Fig. 3. Block diagram of automation of control of a dependent heat supply system under the condition $t_k = \text{const}$

На основании исследования¹ и соотношения (25) следует, что если $\Delta t_n < 0$, то $\Delta G_1 > 0$ – расход горячей воды возрастает путем приоткрытия клапана V_1 на величину, соответствующую указанной зависимости), в случае, если $\Delta t_n > 0$, то $\Delta G_1 < 0$, аналогично при $\Delta t_n = 0$, то $\Delta G_1 = 0$.

Практика показывает [1, 2], что применение регулировки по каналу $G_1 \div t_A$ обладает существенно меньшей инерционностью во времени по сравнению с каналом управления $G_N \div t_A$ (см. рис. 1).

Б. Двухпараметрическое управление. В этом случае, в качестве управля-

ющих параметров выступают температура окружающей среды (наружного воздуха) t_n и температура воздуха в обогреваемом помещении t_k при обеспечении тепловой нагрузки R .

Рассмотрим случай, когда изменяется не только t_n на величину Δt_n , но и t_k – на величину Δt_k в соотношении (27). В этом случае выражение ΔG_1 при условии постоянства величин $k_n, F, \eta, \bar{c}_p, G_N, t_1, t_2$, примет вид (рис.4):

$$\Delta G_1 = -\frac{k_n F (\Delta t_k - \Delta t_n)}{\eta \bar{c}_p (t_1 - t_2)}. \quad (27)$$

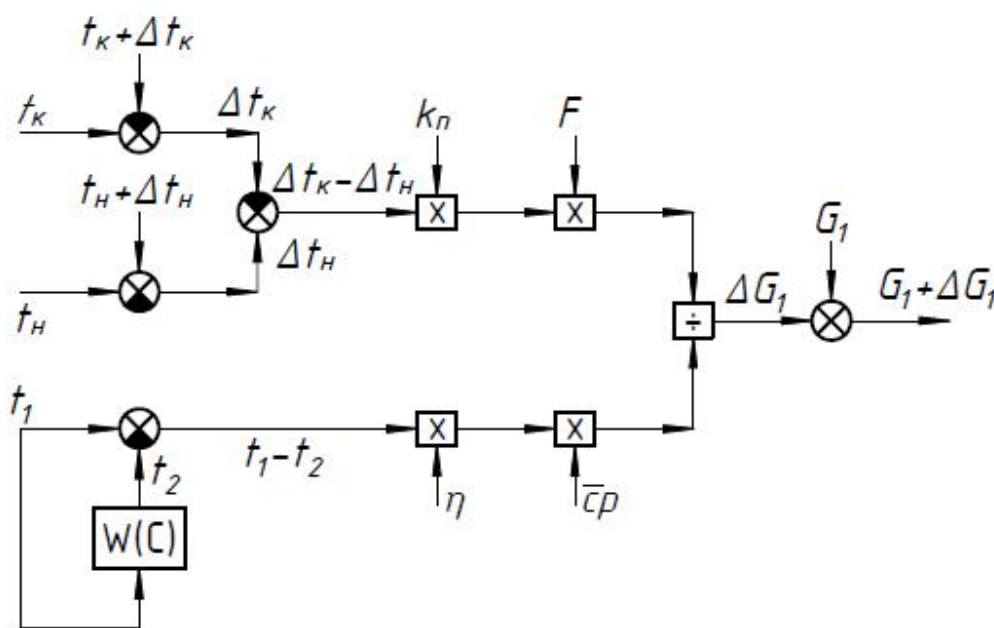


Рис. 4. Структурная схема автоматизации управления зависимой системой теплоснабжения при условии $t_k = \text{const}$ и $t_n = \text{const}$

Fig. 4. Block diagram of automation of control of a dependent heat supply system under the condition $t_k = \text{const}$ and $t_n = \text{const}$

¹ Федоров С. С. Управление системой многоконтурного теплоснабжения зданий при зависимом подключении к тепловым сетям: дис. ... канд. техн. наук. Белгород, 2016. 171 с.

Подобная схема «умного дома» была реализована в лаборатории кафедры инфраструктурных энергетических систем. Сравнительные характеристики потреб-

ления тепловой энергии соответственно до применения новой системы теплоснабжения (2022 год) и после – (2023 год), приведены на рис. 5 и в табл. 1.

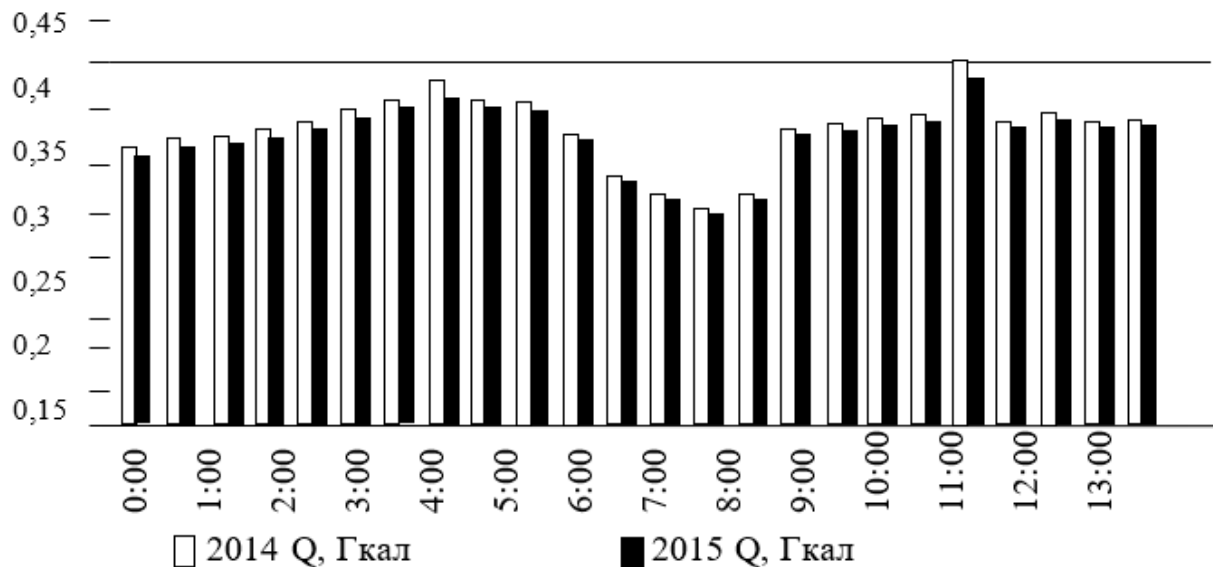


Рис. 5. Диаграмма сравнения потребления тепловой энергии в отопительной системе объекта

Fig. 5. A diagram comparing the consumption of thermal energy in the heating system of the facility

Таблица 1. Сравнительные температурные характеристики 2022 и 2023 гг.

Table 1. Comparative temperature characteristics of 2022 and 2023

№№	Время, час / Time, hour	Температура наружного воздуха, °C / Outdoor air temperature, °C	
		22.11.2022	27.11.2023
1	9.00	–8,4	–8,5
2	12.00	–3,8	–3,3
3	15.00	–1,1	–2,8
4	18.00	–6,2	–5,7
5	21.00	–5,6	–5,9

Проводился сравнительный эксперимент на объекте строительства в период года с похожими температурами t_n наружного воздуха 21.11.2022 г. и 21.11.2023 г. в течение суток. Была получена сравнительная экономия тепловой энергии на 8,84%.

Выводы

В ходе исследования с применением методов математического анализа были получены следующие результаты:

1. Рабочая формула управления процессом теплоснабжения зданий и сооружений для зависимой системы отопления.

2. Проведен анализ и исследование эффективности найденной формулы в сравнении с разными методами теплоснабжения.

3. Учтено влияние переходного процесса.

4. Синтезирована соответствующая схема «умного дома».

5. Проведено сравнительное исследование полученных результатов. Установлен прирост в 8,84% при экономии затрат на тепловую энергию.

Список литературы

1. Математический анализ. Функции нескольких переменных / Д. Н. Тютюнов, Л. И. Студеникина, Е. В. Скрипкина [и др.]. Курск: Юго-Западный государственный университет, 2021. 141 с.

2. Тютюнов Д. Н., Бредихина О. А. Марковская продукционная схема и устройство сумматора на основе знакоразрядной симметричной системы счисления. Курск: Юго-Западный государственный университет, 2020. 119 с.

3. Математическое описание скоростных методов вычисления функций в задачах теплотехники, термодинамики, термической и химико-термической обработки / Д. Н. Тютюнов, Е. В. Скрипкина, А. А. Шатульский [и др.] // Вестник РГАТА имени П. А. Соловьева. 2020. № 2(53). С. 106-112.

4. Тютюнов Д. Н., Бойков А. В., Пшеничных А. О. Модифицированный вариант линейной модели контроля потребления ресурсов в массиве потребителей с возможностью применения знакоразрядных подстановок А.А. Маркова // Математика и ее приложения в современной науке и практике : сборник научных статей IX Международной научно-практической конференции студентов и аспирантов, Курск, 26–27 апреля 2019 г. Курск: Юго-Западный государственный университет, 2019. С. 24-30.

5. Выбор аппаратных и программных средств для управления доступом при разработке технологии построения закрытых виртуальных сред органо-вычислительных ресурсов / А.В. Коськин, В.Н.Волков, А.В.Демидов, С.А. Лазарев [и др.] // Информационные системы и технологии. 2015. № 2(88). С.117-123.

6. Коськин А.В., Ужаринский А.Ю. Методика формирования интегрирующей модели данных на основе имеющихся разнородных источников данных // Информационные системы и технологии . 2014. № 2(82). С.19-27.

7. Раков В.И., Захарова О.В. О научной необходимости технологической целесообразности создания новых систем моделирования вычислительных средств управления // Промышленные АСУ и контроллеры. 2013. №2. С. 7-21.

8. Константинов И. С., Федоров С. С. Алгоритм управления системой многоконтурного теплоснабжения зданий и сооружений // Строительство и реконструкция. 2015. № 6(62). С. 107-111.

9. Федоров С. С. Система управления процессом теплоснабжения промышленных предприятий при зависимом присоединении к тепловым сетям // Строительство и реконструкция. 2014. № 5(55). С. 106-110.

10. Исследование зависимости температуры теплоносителя от длины трубопроводов системы отопления / Д. Н. Тютюнов, Н. С. Кобелев, С. С. Федоров [и др.] // Известия Юго-Западного государственного университета. 2013. № 3(48). С. 167-171.
11. Распределение тепловой энергии в системе теплоснабжения с позиции энергосбережения / С. С. Федоров, И. Ю. Сидоров, И. П. Труханов [и др.] // Научный альманах. 2015. № 9(11). С. 865-869. <https://doi.org/10.17117/na.2015.09.865>
12. Бурцев А. П., Булгаков А. В., Яковлева В. Н. Вариант управления воздушными потоками по схеме «умный дом» с использованием комплексного многослойного пластинчатого рекуператора // БСТ: Бюллетень строительной техники. 2023. № 7(1067). С. 60-63.
13. Бурцев А. П., Шлеенко А. В., Тютюнов Д. Н. Исследование математической модели автоматизированного управления тепловыми потоками в системе приточно-вытяжной вентиляции // БСТ: Бюллетень строительной техники. 2022. № 9(1057). С. 38-41.
14. Version of a mathematical model of purge ventilation system with a complex recuperative heat exchanger / V. Ezhov, N. Semicheva, A. Burtsev [et al.] // Journal of Applied Engineering Science. 2021. Vol. 19, № 1. P. 246-251. <https://doi.org/10.5937/jaes0-30068>.
15. Математическая модель для автоматизированного управления тепловыми потоками энергоэффективной системы вентиляции / В. С. Ежов, Н. Е. Семичева, Д. Н. Тютюнов, А. П. Бурцев, Н. С. Перепелица, А. П. Бурцев // Известия Юго-Западного государственного университета. 2021; 25(1): 38-52. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2021-25-1-38-52>.
16. Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача. М.: Энергоиздат, 1981. 416 с.
17. Теплотехника / В. Н. Луканин, М. Г. Шатров, Г. М. Камфер [и др.]. 3-е изд., испр. М.: Высшая школа, 2002. 671 с.
18. Тютюнов Д. Н., Бурцев А. П., Бурцев А. П. Использование скоростных методов вычисления функций для практических расчётов в задачах теплотехники и термодинамики // Математика и ее приложения в современной науке и практике: сборник научных статей IX Международной научно-практической конференции студентов и аспирантов, Курск, 26–27 апреля 2019 г. Курск: Юго-Западный государственный университет, 2019. С. 65-73.

References

1. Tyutyunov D. N., Studenikina L. I., Skripkina E. V., et al. Mathematical analysis. Functions of several variables. Kursk: Yugo-Zapadnyi gosudarstvennyi universitet; 2021. 141 p. (In Russ.).
2. Tyutyunov D. N., Bredikhina O. A. Markovskaya production scheme and device of an adler based on a signed symmetric number system. Kursk: Yugo-Zapadnyi gosudarstvennyi universitet, 2020. 119 p. (In Russ.).

3. Tyutyunov D. N., Skripkina E. V., Shatul'sky A. A., et al. Mathematical description of high-speed methods for calculating functions in problems of thermal engineering, thermodynamics, thermal and chemical-thermal treatment. *Vestnik RGATA imeni P. A. Solov'eva = Bulletin of the P. A. Solovyov Russian State Technical University*. 2020; (2): 106-112. (In Russ.).

4. Tyutyunov D. N., Boikov A.V., Pshenichnykh A. O. A modified version of a linear model for controlling resource consumption in an array of consumers with the possibility of using digit substitutions A.A. Markov. In: *Matematika i ee prilozheniya v sovremennoi nauke i praktike : sbornik nauchnykh statei IX Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii studentov i aspirantov = Mathematics and its applications in modern science and practice : collection of scientific articles of the IX International Scientific and Practical Conference of Students and graduate students*. Kursk, Yugo-Zapadnyi gosudarstvennyi universitet; 2019. P. 24-30. (In Russ.).

5. Koskin A.V., Volkov V.N., Demidov A.V., Lazarev S.A., et al. The choice of hardware and software for access control in the development of technology for building closed virtual environments of organo-computing resources. *Informatsionnye sistemy i tekhnologii = Information Systems and Technologies*. 2015; (2): 117-123. (In Russ.).

6. Koskin A.V., Uzharinsky A.Yu. Methodology for forming an integrating data model based on available heterogeneous data sources. *Informatsionnye sistemy i tekhnologii = Information Systems and Technologies*. 2014; (2): 19-27. (In Russ.).

7. Rakov V.I., Zakharova O.V. On the scientific necessity of technological expediency of creating new systems for modeling computational controls. *Promyshlennye ASU i kontroly = Industrial Automated Control Systems and Controllers*. 2013; (2): 7-21. (In Russ.).

6. Konstantinov I. S., Fedorov S. S. Algorithm for controlling the system of multi-circuit heat supply of buildings and structures. *Stroitel'stvo i rekonstruktsiya = Building and Reconstruction*. 2015; (6): 107-111. (In Russ.).

9. Fedorov S. S. Heat supply process control system for industrial enterprises with dependent connection to heating networks]. *Stroitel'stvo i rekonstruktsiya = Building and Reconstruction*. 2014; (5): 106-110. (In Russ.).

10. Research of the Dependence of Coolant Temperature on the Heating Pipelines Length / Tyutyunov D. N., Kobelev N. S., Fedorov S. S. et al. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2013; (3): 167-171. (In Russ.).

11. Fedorov S. S., Sidorov I. Yu., Trukhanov I. P., et al. Distribution of thermal energy in the heat supply system from the point of view of energy saving. *Nauchnyi al'manakh = Scientific Almanac*. 2015; (9): 865-869. (In Russ.). <https://doi.org/10.17117/na.2015.09.865>.

12. Burtsev A. P., Bulgakov A.V., Yakovleva V. N. Variant of air flow control according to the "smart house" scheme using a complex multilayer plate heat exchanger. *BST: Byulleten' stroitel'noi tekhniki = BST: Bulletin of construction equipment*. 2023; (7): 60-63. (In Russ.).

13. Burtsev A. P., Shleenko A.V., Tyutyunov D. N. Investigation of the mathematical model of automated control of heat flows in the supply and exhaust ventilation system. *BST: Byulleten' stroitel'noi tekhniki* = *BST: Bulletin of construction machinery*. 2022: (9): 38-41. (In Russ.).
14. Ezhov V., Semicheva N., Burtsev A. Version of a mathematical model of purge ventilation system with a complex recuperative heat exchanger. *Journal of Applied Engineering Science*. 2021: (9): 246-251. <https://doi.org/10.5937/jaes0-30068>. (In Russ.).
15. Yezhov V. S., Semicheva N. E., Tyutyunov D. N., Burtsev A. P., Perepelitsa N. S., Burtsev A. P. A Mathematical Model for Automated Heat Flow Control of an Energy-Efficient Ventilation System. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta* = *Proceedings of the Southwest State University*. 2021; 25(1): 38-52 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2021-25-1-38-52>. (In Russ.).
16. Isachenko V.P., Osipova V.A., Sukomel A.S. *Teploperedacha* [Heat transfer]. Moscow: Energoizdat; 1981. 416 p. (In Russ.).
17. Lukanin V. N., Shatrov M. G., Kamfer G. M., Heat engineering. 3rd ed. Moscow: Vysshaya shkola; 2002. 671 p. (In Russ.).
18. Tyutyunov D. N., Burtsev A. P., Burtsev A. P. The use of high-speed methods of calculating functions for practical calculations in problems of thermal engineering and thermodynamics. In: *Matematika i ee prilozheniya v sovremennoi nauke i praktike: sbornik nauchnykh statei IX Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii studentov i aspirantov* = *Mathematics and its applications in modern science and practice: collection of scientific articles of the IX International Scientific and Practical Conference of students and post-graduates*. Kursk: Yugo-Zapadnyi gosudarstvennyi universitet; 2019. P. 65-73. (In Russ.).

Информация об авторах / Information about the Authors

Жилина Кира Викторовна, кандидат технических наук, доцент кафедры высшей математики, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: kirazhilina@yandex.ru

Kira V. Zhilina, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor of Higher Mathematics Department, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: kirazhilina@yandex.ru

Тютюнов Дмитрий Николаевич, кандидат технических наук, доцент кафедры высшей математики, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: kaf.vm@mail.ru

Dmitrij N. Tyutyunov, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor of Higher Mathematics Department, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: kaf.vm@mail.ru

Бурцев Алексей Петрович, кандидат технических наук, преподаватель кафедры инфраструктурных энергетических систем, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: ap_burtsev@mail.ru

Alexey P. Burtsev, Cand. of Sci. (Engineering), Lecturer at the of Infrastructural Energy Systems Department, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: ap_burtsev@mail.ru