

Причины отклонений температуры подающего трубопровода для независимой схемы централизованной системы теплоснабжения

Рецензия эксперта на статью получена
16.11.2025 [The expert review of the article
was received on November 16, 2025]

Протяжённость тепловых и паровых сетей в двухтрубном исчислении за период с 2005 по 2022 годы снизилась с 171,45 тыс. до 167,22 тыс. км. За период с 2015 по 2022 годы потери на тепловых сетях выросли на 14,3 млн Гкал и составляют 12,1% от количества тепла, поданного в сеть. Основными факторами, влияющими на величину потерь тепловой энергии в тепловой сети, являются соотношение протяжённости тепловых сетей различных диаметров, износ тепловых сетей, температурный график и качество регулировки тепловых сетей и тепловых пунктов [1].

По состоянию на 1 января 2026 года теплоснабжение города Москвы обеспечивается около 1113 источниками тепловой энергии установленной тепловой мощностью 59 118 Гкал/ч, протяжённость московских тепловых сетей в одноконтурном исчислении составляет 18 220,3 км, в эксплуатации теплосетевых компаний находится около 11 462 тепловых пункта (6992 центральных и 4470 индивидуальных тепловых пункта) [2].

Одним из главных элементов системы централизованного теплоснабжения является тепловой пункт, в котором осуществляется связь между тепловыми сетями и потребителями тепловой энергии.

На тепловом пункте сочетается следующее качественное и количественное регулирование:

- регулирование температуры теплосети выполняется на ТЭЦ по заданному температурному графику в зависимости от показаний датчика температуры наружного воздуха (это качественное регулирование);

- регулирование температуры теплоносителя центрального отопления (ЦО) выполняется на тепловом пункте в соответствии с заданным графиком в зависимости от показаний датчика температуры наружного воздуха регулятором ЦО (количественное регулирование посредством изменения расхода теплосети через теплообменник ЦО);

- регулирование температуры в системе горячего водоснабжения (ГВС) осуществляется в зависимости от показаний датчика температуры в соответствии с заданным значением 60 °С (количественное регулирование посредством изменения расхода теплосети через теплообменники ГВС второй зоны).

Повышение качества регулировки тепловых сетей и тепловых пунктов может быть реализовано в значительной степени за счёт анализа и оптимизации работы теплового пункта.

Качественный способ регулирования тепловой нагрузки является наиболее распространённым видом центрального регулирования водяных тепловых сетей на ТЭЦ или котельной. Его основным достоинством является стабильный гидравлический режим. При этом температура теплоносителя (греющей воды) в тепловой сети изменяется в соответствии с принятым для данной системы теплоснабжения графиком изменения температуры воды в зависимости от температуры наружного воздуха, например, 150/70 °С.

Большинство отечественных систем теплоснабжения спроектировано для работы по температурному графику с параметрами 150/70 °С.

УДК 621.1.016. Научная специальность: 2.1.3.

Алгоритм исследования причин отклонений температуры подающего трубопровода для независимой схемы централизованной системы теплоснабжения

Сергей Вадимович Гужов, к.т.н., доцент, Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт» (НИУ «МЭИ»); **Андрей Андреевич Арбатский**, к.т.н., генеральный директор ООО «НИИ «Энергоэффективных технологий микроклимата»; **Елена Владимировна Крылова**, к.п.н., доцент, замдиректора по учебной работе Института тепловой и атомной энергетики (ИТАЭ) НИУ «МЭИ»; **Дмитрий Васильевич Самусев**, ведущий инженер по КИПиА, ПАО «МОЭК»; **Анна Олеговна Сорокина**, студент, НИУ «МЭИ»

Рассмотрены способы регулирования тепловой нагрузки в тепловом пункте, показаны преимущества и недостатки зависимой и независимой схемы подключения нагрузки. Показаны способы поддержания значения температуры теплоносителя. Перечислены сигналы, контролирующиеся и передающиеся на верхний уровень в рамках системы диспетчеризации. Предложен алгоритм анализа регулируемого параметра, включающий проверки: работоспособности насосов отопления, условия положительной или отрицательной температуры наружного воздуха, отклонения контролируемых параметров в пределах заданных значений. Усовершенствование позволяет снизить тепловые потери на 6–12%.

Ключевые слова: система отопления, центральное отопление, центральный тепловой пункт (ЦТП), индивидуальный тепловой пункт (ИТП), регулирование, автоматическая система регулирования (АСР), система диспетчеризации, отклонение, независимая схема, шкаф автоматизации, теплоноситель, температура, расход, параметр, алгоритм, блок-схема.

UDC 621.1.016. Scientific specialty number: 2.1.3.

Algorithm for studying the causes of deviations in the supply pipeline temperature for an independent circuit of a centralized heating system

Sergey V. Guzhov, PhD (Engineering), Associate Professor, National Research University "Moscow Power Engineering Institute" (NRU "MPEI"); **Andrey A. Arbat-sky**, PhD (Engineering), General Director of the "Research Institute of Energy-Efficient Microclimate Technologies", LLC; **Elena V. Krylova**, PhD (Engineering), Associate Professor, deputy director for Academic Affairs of the Institute Thermal and Nuclear Power Engineering of the NRU "MPEI"; **Dmitry V. Samusev**, senior instrumentation and control engineer, "Moscow United Energy Company", PJSC; **Anna O. Sorokina**, student, NRU "MPEI"

The methods of regulating the heat load in a heating point are considered, the advantages and disadvantages of a dependent and independent load connection scheme are shown. The methods of maintaining the temperature of the coolant are shown. The signals that are monitored and transmitted to the upper level within the dispatching system are listed. It is revealed that there is a sufficient set of parameters transmitted to the dispatching system to solve the problem of analyzing the temperature deviations of the coolant in the supply pipeline and determining the possible causes of the deviations in real time. An algorithm for analyzing the controlled parameter is proposed, which includes checking the operability of heating pumps, conditions for positive or negative outdoor air temperature, and deviations of controlled parameters within the set values. The improvement makes it possible to reduce heat losses by 6–12%.

Key words: heating system, central heating, central heating plant (CHP), individual heating plant (IHP), regulation, automatic control system (ACS), dispatching system, deviation, independent circuit, automation cabinet, coolant, temperature, flow rate, parameter, algorithm, block diagram.

Выбор данного графика технико-экономически обоснован тем, что при его использовании получается наибольшая величина комбинированной выработки электроэнергии при тепловом потреблении. В ряде случаев на ТЭЦ применяется температурный график 150/70 °С со срезкой при 120, 130, 135 или 140 °С [3].

Присоединение систем потребления теплоты следует выполнять в соответствии с их теплогидравлическими характеристиками с учётом гидравлического режима работы внешних тепловых сетей (пьезометрического графика) и графика изменения температуры теплоносителя во внешней тепловой сети в зависимости от изменения температуры наружного воздуха (графика центрального регулирования тепловой нагрузки) [4].

Системы отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха могут присоединяться к двухтрубным водяным тепловым сетям в тепловых пунктах по гидравлически зависимой и независимой от режима работы тепловой сети схемам. Необходимо предусматривать защиту систем теплоснабжения от превышения давления.

Регулирование нагрузки для систем отопления и вентиляции осуществляется путём поддержания температуры воды в подающей линии систем после водоподогревателя при независимых схемах присоединения или после насоса смешения при зависимом присоединении.

В большинстве случаев для повышения энергоэффективности источников тепла и тепловой сети температура на входе в теплосети поддерживается больше 95 °С, и в результате подавляющее большинство современных зданий присоединены по зависимой схеме со смешением теплоносителя тепловой сети с обратным теплоносителем из системы отопления до температуры отопительных приборов.

Подавляющее большинство зданий присоединены по зависимой схеме со смешением теплоносителя до температуры не менее t_1 .

Для организации смешения двух потоков необходимо, чтобы соблюдалось условие $p_{12} < p_{21}$, но для того, чтобы полученный теплоноситель с температурой $t_{от}$ циркулировал через систему отопления, необходимо, чтобы выполнялось условие $p_{12} > p_{21}$. Для решения этого противоречия променяют различные способы.

Ранее для смешения воды широко применяли водоструйные насосы (гидроэлеваторы). Действие гидроэлеватора основано на эффекте Вентури: возрастание скорости потока в суживающемся канале сопровождается уменьшением статического давления.



Основное достоинство гидроэлеватора в том, что в одном простом устройстве без подвижных элементов объединяется смеситель и циркуляционный насос. Однако гидроэлеватор имеет низкий КПД = 15–20 % и поэтому для его работы требуется значительный перепад давления между подающим и обратным трубопроводами (около 80–150 кПа).

Схема, которая применяется при реконструкции системы отопления, оборудованной элеватором, в расчётном режиме предусматривает двухходовой клапан, который пропускает из теплотрассы частичный расход теплоносителя в систему отопления, а насос постоянно поддерживает требуемый перепад давления, необходимый для работы элеватора. Насос в этой схеме работает периодически. Регулятор может автоматически менять режимы поддержания в помещениях расчётной (комфортной) или пониженной температуры.

Регулятор осуществляет управление как одним контуром системы отопления, так и двумя. Регулятор управляет циркуляционными насосами с защитой их от «сухого хода», а также может осуществ-

лять управление как одним контуром системы отопления, так и двумя.

Другим способом обеспечения смешения теплоносителей в один поток и циркуляцию его через систему отопления является совместное применение регулирующего клапана и насоса.

Преимуществом установки смешительного (разделительного) клапана является возможность подачи теплоносителя в систему отопления без смешения и, соответственно, целесообразность использования этой арматуры появляется лишь в периодах отопительного сезона, когда $t_{от} = t_1$. Однако трёхходовой клапан имеет более высокую стоимость, и при его использовании нарушается гидравлический режим системы отопления $G_{от} = \text{const}$.

Регулятор по показаниям датчика корректирует температуру теплоносителя, поступающего в систему отопления, управляя клапаном.

В расчётном режиме трёхходовой клапан пропускает из теплотрассы полный расход теплоносителя в систему отопления и только в промежуточных режимах осуществляется подмешивание из обратного трубопровода отопления для снижения температуры сетевой воды.

Насос в схеме присоединения абонента позволяет применить наиболее энергосберегающие автоматизированные решения по регулированию систем. Появляется возможность не только качественного, но и качественно-количественного регулирования системы отопления практически в любом диапазоне, учитывая специфику теплового режима здания.

Схема с расположением насоса на перемычке считается наиболее экономичной, так как через перемычку проходит меньший расход воды, чем в подающем либо обратном трубопроводе. Следовательно, применяется маломощный насос и потребляется меньше электроэнергии.

В большинстве случаев для повышения энергоэффективности источников тепла и тепловой сети температура на входе в теплотрассу поддерживается больше 95 °С, и в результате подавляющее большинство современных зданий присоединены по зависимой схеме со смешением теплоносителя тепловой сети с обратным теплоносителем из системы отопления до температуры отопительных приборов

В независимых схемах присоединения теплоноситель из тепловой сети поступает в подогреватель, в котором его тепло используется для нагревания теплоносителя системы отопления. При этом сетевая вода и вода системы отопления разделены поверхностью нагрева. Таким образом, сеть и система отопления полностью гидравлически изолированы друг от друга. Гидравлическая изоляция теплоносителей на абонентском вводе используется для защиты местных установок от завышенного или заниженного давлений в тепловых сетях, при которых возможно разрушение нагревательных приборов или опорожнение систем отопления.

Регулирование температуры в системе ГВС осуществляется в зависимости от показаний датчика температуры в соответствии с заданным значением 60 °С путём воздействия на исполнительные механизмы клапана Г1–У, соответственно. Предусматривается ручной режим работы клапанов; кнопочный пост размещается по месту установки клапанов. Предусматривается возможность задания дополнительной уставки температуры по двум временным интервалам. Поддержание заданного давления в системе ГВС первой зоны осуществляется путём изменения частоты вращения рабочего насоса при помощи существующего преобразователя частоты, входящего в состав станции управления, установленной на насосах хозяйственного водоснабжения первой зоны в зависимости от показаний датчиков давления, установленных на трубопроводах ХВС и обратном трубопроводе ГВС второй зоны.

Поддержание заданного давления (65 м вод. ст.) в системе ХВС первой зоны осуществляется путём изменения частоты вращения рабочего насоса при помощи существующего преобразователя частоты, входящего в состав станции управления, установленной на насосах хозяйственного водоснабжения первой зоны в зависимости от показаний датчиков давления, установленных на трубопроводах ХВС и обратном трубопроводе ГВС второй зоны.

В рамках системы диспетчеризации контролируются и передаются на верхний уровень следующие сигналы [5–9].

Входные параметры:

1. Давление в подающем трубопроводе теплосети p_1 , МПа.
2. Давление в обратном трубопроводе теплосети p_2 , МПа.
3. Температура в подающем трубопроводе теплосети t_1 из теплосчётчика, °С.
4. Температура в обратном трубопроводе теплосети t_2 из теплосчётчика, °С.
5. Давление в городском водопроводе холодной воды $p_{\text{гор}}$, МПа.
6. Температура наружного воздуха $t_{\text{нв}}$, °С.

Выходные параметры:

7. Давление в подающем трубопроводе системы отопления p_3 , МПа.
8. Давление в обратном трубопроводе системы отопления p_4 .
9. Температура в подающем трубопроводе отопления t_3 , °С.
10. Температура в обратном трубопроводе отопления t_4 , °С.
11. Давление в подающем трубопроводе системы ГВС p_7 .
12. Давление в циркуляционном трубопроводе системы ГВС p_{13} .
13. Температура в подающем трубопроводе ГВС (ВПГ1) $t_{7,1}$, °С.
14. Температура в подающем трубопроводе ГВС (ВПГ2) $t_{7,2}$, °С.
15. Температура в циркуляционном трубопроводе ГВС t_{13} , °С.

16. Давление в подающем трубопроводе холодной воды $p_{\text{ХВС}}$, МПа.

Параметры от теплосчётчика на вводе в центральный тепловой пункт:

17. Расход тепловой энергии Q , Гкал.
18. Массовый расход теплоносителя в подающем трубопроводе G_1 , т/ч.
19. Массовый расход теплоносителя в обратном трубопроводе G_2 , т/ч.
20. Расход теплоносителя на подпитку отопления $G_{\text{тп}}$, т/ч.
21. Время работы теплосчётчика $C_{\text{нр}}$, ч.

Устранить отклонения параметра t_3 и t_7 возможно изменив настройки режимной карты регулятора ЦО и ГВС в шкафу автоматизации (ШКА). Больше всего времени на проведение исследований требует подготовка данных для последующего анализа. Эту задачу можно реализовать в центральном процессоре ШКА и системе диспетчеризации. В результате анализа выявлено, что имеется достаточный набор параметров, передаваемых из ШКА в систему диспетчеризации, чтобы выполнить анализ отклонений и определить их возможные причины в режиме реального времени.

Для этого можно предложить достаточно простой алгоритм анализа, двух регулируемых параметров t_3 и t_7 . Устранить причины возможно в короткие сроки. Этот алгоритм анализа можно исполнить в модуле центрального процессора CPU850 шкафа автоматизации и в системе диспетчеризации.

Описание алгоритма анализа регулируемого параметра t_3 приведено на блок-схеме (рис. 1).

1. Ввод дня и текущего начального времени анализа $\tau = 0$ из центрального процессора.
2. Ввод исходных данных t_3 , $t_{\text{нв}}$, p_3 и p_4 в текущий день при $\tau = 0$ из центрального процессора (действия в центральном процессоре ШКА).



Регулирование температуры в системе ГВС осуществляется в зависимости от показаний датчика температуры в соответствии с заданным значением 60 °С. Предусматривается ручной режим работы клапанов; кнопочный пост размещается по месту установки клапанов. Предусматривается возможность задания дополнительной уставки температуры по двум временным интервалам

Регулирование температуры теплоносителя t_3 после водоподогревателя отопления (ВПО) осуществляется в зависимости от показаний датчика температуры наружного воздуха в соответствии с заданным температурным графиком путём воздействия на исполнительный механизм клапана Т–У.

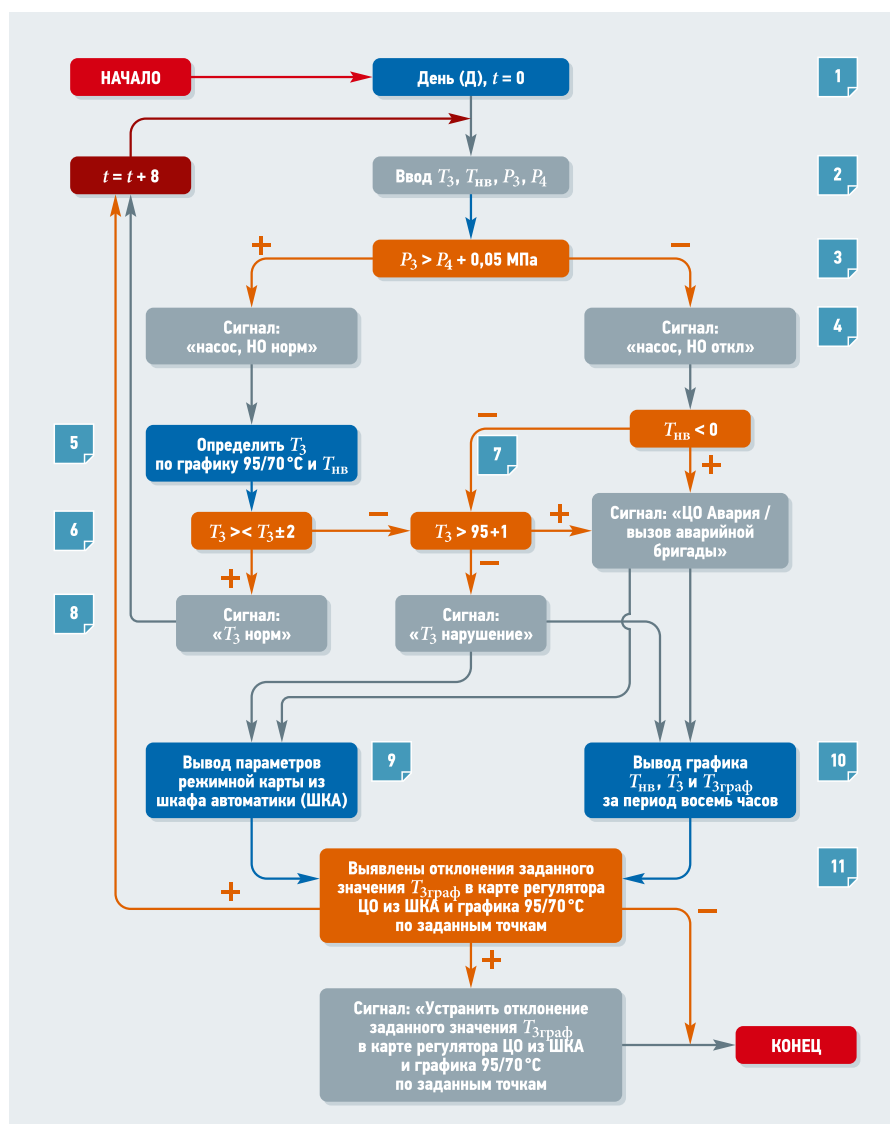


Рис. 1. Исследование причин отклонения температуры t_3 ЦО для независимой схемы

3. Проверка условия работоспособности насосов отопления НО1, НО2 по перепаду давления на насосе (разнице давлений в подающем и обратном трубопроводах $p_3 - p_4$). В норме перепад составляет 0,10–0,11 МПа, снижение до 0,05 МПа представляет собой признак отклонения в работе насосов системы отопления. Выход «Да» — сигнал «Насос ЦО норм.», выход «Нет» — сигнал «Насос ЦО откл.» (действия в центральном процессоре ШКА).

4. Проверка условия положительной или отрицательной температура наружного воздуха. Если насос НО работает с отклонениями и температура наружного воздуха отрицательная — это исходные события для аварии (размораживание системы отопления). Выход «Да» — сигнал «ЦО / Авария / Вызов аварийной бригады» (действия в центральном процессоре ШКА), выход «Нет» — сигнал « t_3 нарушение».

5. Определить по графику 95/70 и $t_{нв}$ температуру t_3 , заданную для поддержания в системе ЦО (действия в центральном процессоре ШКА).

6. Проверка, что температура t_3 отклонилась от заданного значения не более

чем на $\pm 2^\circ\text{C}$ (отклонение регулятора ЦО в пределах $\pm 0,5^\circ\text{C}$). Выход «Да» — сигнал « t_3 норм.», выход «Нет» — сигнал « t_3 нарушение» (действия в центральном процессоре ШКА).

7. Проверка, что температура t_3 не превышает 95°C (исходные события — заклинивание регулятора ЦО в открытом положении при температуре t_1 теплоты более 100°C или отклонение насосов НО). Выход «Да» — сигнал «ЦО / Авария / Вызов аварийной бригады», выход «Нет» — сигнал « t_3 нарушение» (действия в центральном процессоре ШКА).

8. В случае создания в системе ЦО условий для формирования сигнала « t_3 норм.» через восемь часов провести следующий цикл проверки (действия в центральном процессоре ШКА).

9. В случае создания в системе ЦО условий для формирования сигналов « t_3 нарушение» или «ЦО / Авария / Вызов аварийной бригады» вывести параметры режимной карты регулятора ЦО (действия в центральном процессоре ШКА).

10. В случае создания в системе ЦО условий для формирования сигналов « t_3 на-

рушение» или «ЦО / Авария / Вызов аварийной бригады» вывести график изменения параметров t_3 , $t_{3\text{граф}}$ и $t_{нв}$ за последние восемь часов (действия в системе диспетчеризации).

11. Проверка соответствия параметров заданных точек графика t_3 в регуляторе ЦО в ШКА и графика 95/70. Выход «Да» — сигнал «Устранить отклонения заданного значения $t_{3\text{граф}}$ в карте регулятора ЦО из ШКА и графика 95/70 по заданным точкам» и через восемь часов провести следующий цикл проверки (действия в центральном процессоре ШКА), выход «Нет» — сигнал «Завершение работы алгоритма».

За счёт приведения температуры t_3 ЦО к графику путём внесения изменений в настройки регулятора возможно приведение к графику температуры возврата теплоты t_2 , что позволяет снизить тепловые потери теплоты в магистральном трубопроводе возврата теплоты; оцениваемый диапазон возможной экономии 6–12%. Проведённые исследования показали, что необходимо обеспечить формализованное управление конфигурацией измерителей и регуляторов автоматической системы регулирования (АСР) ЦТП путём создания в каждом филиале ПАО «МОЭК» утверждённых карт данных функциональных и физических характеристики АСР.

- О состоянии теплоэнергетики и централизованно-теплоснабжения в Российской Федерации в 2019 году: Информационно-аналитический доклад [Электр. ресурс]. Минэнерго России; ФГБУ «РЭА», 2020. Режим доступа: minenergo.gov.ru. Дата обрац.: 14.01.2026.
- Солдатенков А.С. Автоматизация децентрализованного отопления комплекса зданий с основными схемами теплопотребления: автореф. дисс. канд. техн. наук по спец. 05.13.06. — Белгород: БГТУ, 2014. 22 с.
- Журавлёв Р.Г. Тепловой пункт: зависимое присоединение абонентов к тепловым сетям // Вестник магистратуры, 2016. №4-1. С. 38–42.
- СТО 70238424.27.060.003–2008 (НП «Инвэл»). Тепловые пункты тепловых сетей. Условия создания. Нормы и требования / Дата введ.: 31.10.2008.
- Пикина Г.А., Суслев Д.М., Пашенко Ф.Ф., Пашенко А.Ф. Исследование влияния прогноза на эффективность двухсвязной системы регулирования мощности энергоблока // Датчики и системы, 2024. №5. С. 18–23.
- Пикина Г.А., Пашенко Ф.Ф., Пашенко А.Ф., Косой А.А. Решение ряда теоретико-прикладных проблем вариационных методов оптимального управления // Датчики и системы, 2023. №6. С. 3–10.
- Пикина Г.А., Суслев Д.М. Метод отрицательной корреляции как эффективное средство обработки эксперимента по определению частотных характеристик объекта // Вестник МЭИ, 2024. №2. С. 126–133.
- Аракелян Э.К., Красненко Д.М. Концепция моделирования и проектирования интеллектуальных измерительных датчиков // Новое в российской электроэнергетике, 2024. №12. С. 27–39.
- Пашенко Ф.Ф., Чан Д.Х., Аракелян Э.К., Пашенко А.Ф., Красненко Д.М. Адаптивные алгоритмы в задаче моделирования энергетических объектов // Новое в российской электроэнергетике, 2023. №5. С. 28–39.

References — see page 78.

Algorithm for studying the causes of deviations in the supply pipeline temperature for an independent circuit of a centralized heating system. Pp. 52–55.

Sergey V. Guzhov, PhD (Engineering), Associate Professor, National Research University "Moscow Power Engineering Institute" (NRU "MPEI"); **Andrey A. Arbatsky**, PhD (Engineering), General Director of the "Research Institute of Energy-Efficient Microclimate Technologies", LLC; **Elena V. Krylova**, PhD (Engineering), Associate Professor, deputy director for Academic Affairs of the Institute Thermal and Nuclear Power Engineering of the NRU "MPEI"; **Dmitry V. Samusev**, senior instrumentation and control engineer, "Moscow United Energy Company", PJSC; **Anna O. Sorokina**, student, NRU "MPEI"

1. *O sostoyanii teploenergetiki i tsentralizovannogo teplosnabzheniya v Rossijskoj Federatsii v 2019 godu: informatsionno-analiticheskij doklad* [On the state of thermal power engineering and district heating in the Russian Federation in 2019: An information and analytical report]. *Minenergo Rossii* [Ministry of Energy of Russia]. FGBU "REA" ["Russian Energy Agency" Federal State Budgetary Institution]. Web-source: minenergo.gov.ru. Access date: January 14, 2026. [In Russian]
2. A.S. Soldatenkov. *Avtomatizatsiya detsentralizovannogo otopleniya kompleksa zdaniy s osnovnymi skhemami teplopotrebleniya* [Automation of decentralized heating of a complex of buildings with main heat consumption schemes]. *Avtoref. diss. kand. tekhn. nauk po spets. 05.13.06* [Abstract of the PhD (Engineering) in specialty 05.13.06]. Belgorod. BGTU [Shukhov Belgorod State Technological University]. 2014. 22 p. [In Russian]
3. R.G. Zhuravlev. *Teplovoj punkt: zavisimoe prisoedinenie abonentov k teplovym setyam* [Heating point: dependent connection of subscribers to heating networks]. *Vestnik magistratury* ["Bulletin of the Magistracy" Magazine]. 2016. No. 4-1. Pp. 38–42. [In Russian]
4. STO 70238424.27.060.003–2008 (NP "Invel") [The Organization's Construction Code No. 70238424.27.060.003–2008 ("Invel" Scientific Enterprise)]. *Teplovyte punkty teplovykh setej. Usloviya sozdaniya normy i trebovaniya* [Heating stations of heating networks. Conditions for creating. Standards and requirements]. Date of impl.: October 31, 2008. [In Russian]
5. G.A. Pikina, D.M. Suslov, F.F. Pashchenko, A.F. Pashchenko. *Issledovanie vliyaniya prognoza na effektivnost' dvukhsvyaznoj sistemy regulirovaniya moshchnosti energobloka* [Study of the influence of the forecast on the efficiency of a two-link power control system of a power unit]. *Datchiki i sistemy* ["Sensors and Systems" Magazine]. 2024. No. 5. Pp. 18–23. [In Russian]
6. G.A. Pikina, F.F. Pashchenko, A.F. Pashchenko, A.A. Kosoy. *Reshenie ryada teoretiko-prikladnykh problem variatsionnykh metodov optimal'nogo upravleniya* [Solution of a number of theoretical and applied problems of variational methods of optimal control]. *Datchiki i sistemy* ["Sensors and Systems" Magazine]. 2023. No. 6. Pp. 3–10. [In Russian]
7. G.A. Pikina, D.M. Suslov. *Metod otritsatel'noj korrelyatsii kak effektivnoe sredstvo obrabotki eksperimenta po opredeleniyu chastotnykh kharakteristik ob#ekta* [The negative correlation method as an effective means of processing the experimental data on determining the frequency characteristics of an object]. *Vestnik MEI* [Bulletin of the Moscow Power Engineering Institute]. 2024. No. 2. Pp. 126–133. [In Russian]
8. E.K. Arakelian, D.M. Krasnenko. *Kontseptsiya modelirovaniya i proektirovaniya intellektual'nykh izmeritel'nykh datchikov* [Concept of modeling and design of intelligent measuring sensors]. *Novoe v rossijskoj elektroenergetike* ["New in the Russian Electric Power Industry" Magazine]. 2024. No. 12. Pp. 27–39. [In Russian]
9. F.F. Pashchenko, D.Kh. Chan, E.K. Arakelian, A.F. Pashchenko, D.M. Krasnenko. *Adaptivnye algoritmy v zadache modelirovaniya energeticheskikh ob#ektov* [Adaptive algorithms in the problem of modeling power facilities]. *Novoe v rossijskoj elektroenergetike* ["New in the Russian Electric Power Industry" Magazine]. 2023. No. 5. Pp. 28–39. [In Russian]