

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ
INFORMATION TECHNOLOGY AND TELECOMMUNICATIONS

УДК 62533.65

DOI:10.21822/2073-6185-2022-49-3-68-73

Оригинальная статья/ Original Paper

**Разработка математического аппарата по оптимизации АСУ
системы теплоснабжения на примере здания высшей школы**

С.В. Гужов, Е.В. Крылова, Д.В. Тороп

Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт»,
111250, г. Москва, ул. Красноказарменная, 14, Россия

Резюме. Цель. Целью настоящей работы является оптимизация функционирования АСУ системы теплоснабжения. Настройке подвергается связь расхода уходящих газов на входе в котел-утилизатор и температуры теплоносителя в дальней точке потребителя. **Метод.** Методической основой исследования являются: уравнение теплового баланса для котла-утилизатора парогазовой установки; принципы обеспечения заданных параметров теплоснабжения потребителя; уравнение тепломассообмена и санитарные нормы по теплоснабжению. **Результат.** Разработан математический аппарат, выражающий зависимость величины расхода уходящих газов на входе в котел утилизатор и температуры теплоносителя в устройстве обогрева в самом дальнем помещении анализируемого здания. **Вывод.** Оптимизация АСУ системы теплоснабжения на примере здания высшей школы показывает возможность повышения точности регулирования АСУ системой отопления. В случае дополнительной установки сужение коридора погрешностей происходит в 2,5 раза.

Ключевые слова: оптимизация АСУ, система теплоснабжения, автоматизированные системы управления, математический аппарат

Для цитирования: С.В. Гужов, Е.В. Крылова, Д.В. Тороп. Разработка математического аппарата по оптимизации АСУ системы теплоснабжения на примере здания высшей школы. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2022;49(3):68-73. DOI:10.21822/2073-6185-2022-49-3-68-73

Elaboration of a mathematical apparatus for optimizing the automated control system of a heat supply system on the example of a building of a higher school

S.V. Guzhov, E.V. Krylova, D.V. Torop

National Research University «Moscow Power Engineering Institute»,
14 Krasnokazarmennaya Str., Moscow 111250, Russia

Abstract. Objective. The purpose of this work is to optimize the functioning of the automated control system of the heat supply system. The connection between the flow rate of flue gases at the inlet to the waste heat boiler and the temperature of the heat carrier at the far point of the consumer is subject to adjustment. **Method.** The methodological basis of the study is: the heat balance equation for the waste heat boiler of the combined cycle plant; principles for ensuring the specified parameters of heat supply to the consumer; equation of heat and mass transfer and sanitary standards for heat supply. **Result.** A mathematical apparatus has been developed that expresses the dependence of the flue gas flow rate at the inlet to the waste heat boiler and the temperature of the coolant in the heating device in the farthest room of the analyzed building. **Conclusion.** Optimization of the automated control system of the heat supply system on the example of a building of a higher school shows the possibility of improving the accuracy of control of the automated control system by the heating system. In the case of an additional installation, the narrowing of the error corridor occurs by 2.5 times.

Keywords: ACS optimization, heat supply system, automated control systems, mathematical apparatus

For citation: S.V. Guzhov, E.V. Krylova, D.V. Torop. Elaboration of a mathematical apparatus for optimizing the automated control system of a heat supply system on the example of a building of a higher school. Herald of the Daghestan State Technical University. Technical Science. 2022; 49 (3): 68-73. DOI: 10.21822 /2073-6185-2022-49-3-68-73

Введение. При отпуске теплоэнергии в системах центрального теплоснабжения, широко распространенных на территории России, обычно ориентируются на параметры теплоносителя на выходе с источника теплоты на основании графика отпуска тепловой энергии в [1]. Проблема состоит в том, что в наиболее удалённом помещении здания потребителя температура воздуха далеко не всегда соответствует принятым нормам, по причине несовершенств и высокого физического износа систем и приборов отопления, возникших в ходе эксплуатации, которые такая система не учитывает.

На данный момент не применяется практика регулирования вырабатываемой теплоты на источнике в зависимости от параметров непосредственно у потребителя. Такая система могла бы значительно сократить производственные сырьевые издержки и обеспечить комфортные условия потребителю без дополнительных систем автоматического регулирования тепла (САРТ), которые не входят в базовую систему теплоснабжения.

Постановка задачи. Целью исследования является оптимизация функционирования АСУ системы теплоснабжения потребителя на примере здания высшей школы. Настройке подвергается связь расхода уходящих газов на входе в котел-утилизатор и температуры теплоносителя в дальней точке потребителя.

В рамках поставленной цели были последовательно решены задачи

1. Анализ существующих схем.
2. Разработка математического аппарата для повышения точности регулирования расхода уходящих газов как функции от температуры теплоносителя в дальней точке потребителя.
3. Оценка применимости разработанного математического аппарата на примере здания высшей школы.

Методы исследования. При расчете использованы уравнения теплового баланса для котла-утилизатора парогазовой установки [2] и принципы обеспечения заданных параметров теплоснабжения потребителя [3], в основе которых лежат уравнения тепломассообмена и санитарные нормы по теплоснабжению жилых и общественных зданий [4].

В описываемую систему входит: ПГУ (парогазовая установка), ЦТП (центральный тепловой пункт), ИТП (индивидуальный тепловой пункт), потребитель и система теплопередающих трубопроводов (рис. 1).

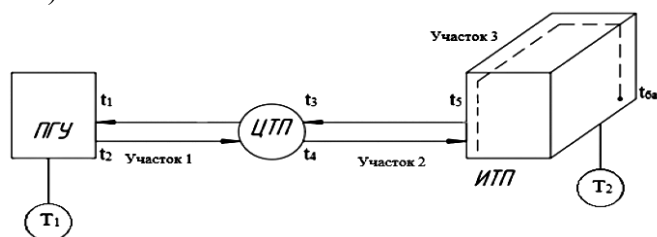


Рис. 1. Принципиальная схема системы теплоснабжения здания

Fig. 1. Schematic diagram of the heating system of the building

t_1 - температура прямой сетевой воды, отпускаемой в сеть теплоснабжения, t_2 - температура обратной сетевой воды на возврате из сети теплоснабжения, t_3 - температура теплоносителя после ЦТП, t_4 - температура теплоносителя возвращаемого в ЦТП после потребителя, t_5 - температура подаваемого теплоносителя после ИТП, $t_{\text{бат}}$ - температура теплоносителя в дальней точке потребителя, T_1 - датчик температуры №1, установленный на выходе из ПГУ, T_2 - датчик температуры №2, установленный по месту потребления теплоэнергии

t_1 - температура воды прямой сети, supplied to the heat supply network, t_2 - температура воды обратной сети, t_3 - температура теплоносителя после ЦТП, t_4 - температура теплоносителя, возвращенного к ЦТП, t_5 - температура теплоносителя после ИТП, $t_{\text{БВ}}$ - температура теплоносителя в точке отбора, T_1 - датчик температуры, установленный на выходе из ЦТП, T_2 - датчик температуры, установленный в месте потребления.

От станции до ЦТП и от ЦТП до ИТП (находящимся непосредственно в здании) трубопровод пролегает в полупроходном подземном канале с параметрами ШхВ=1,3х1,4 м, первая часть канала от ПГУ до ЦТП длиной $L_1=1000$ м и вторая часть канала от ЦТП до ИТП длиной $L_2=350$ м. После ИТП, трубопровод пролегает в условиях комнатной температуры ($t_{\text{вп}}=22^\circ\text{C}$) на протяжении $L_3=250$ м. Трубопровод до ИТП утеплен стекловатой, принят коэффициент, учитывающий изолированные участки трубопровода $\beta=0,2$.

Параметры утеплителя: $\lambda=0,26$ Вт/м, толщина $\delta=70$ мм, внутренний диаметр $d=400$ мм. После ИТП труба ($\beta=0,2$) изолирована пенополиуретаном с характеристиками: $\lambda=0,24$ Вт/м, $\delta=5,4$ мм, $d=21,2$ мм. Скорость теплоносителя на входе в систему составляет 0,4 м/с, температура. Температура обратной сетевой воды на выходе из системы теплоснабжения $t_1=75^\circ\text{C}$. Расход теплоносителя $G = 47,725 \frac{\text{кг}}{\text{с}}$.

Принимаем допущения:

1. Так как температура теплоносителя незначительно зависит от температуры грунта, в котором пролегает канал с системой теплопередающих трубопроводов, можно принять допущение, что в системе температура и теплопроводность грунта, сухого изглинка, приняты постоянными и равными $t_{\text{гр}}=2^\circ\text{C}$ и $\lambda_{\text{гр}}=2,2$ Вт/м $^\circ\text{C}$.

2. Для упрощения математической модели объекта принимаем допущение, что теплопотери в трубопроводе не зависят от температуры окружающей среды и постоянны во времени.

3. Так как у нас не стоит специфической задачи о влиянии состояния системы теплоснабжения и здания на эффективность теплоснабжения принимаем, что система теплоснабжения и система отопления здания находятся в удовлетворительном состоянии. Гидравлическое сопротивление трубопровода, геометрия и технические погрешности, возникающие в результате эксплуатации (течи, коррозию или осадок на стенках) не учитываются. Поток в трубе равномерен и постоянен. Расход и скорость теплоносителя принимаются постоянными на всем протяжении системы отопления. Здание имеет удовлетворительное состояние, теплоизоляция здания не имеет погрешностей.

4. Допускаем, что для обеспечения удовлетворительного состояния системы теплоснабжения и отопления промывка систем отопления здания проводится регулярно в соответствии с ПТЭ [5]. Приборы отопления находятся в удовлетворительном состоянии, функционируют нормально и целостно.

5. Соответственно, при допущении, принятом ранее, можно сказать, что тогда температура воздуха в помещениях прямо коррелирует с температурой теплоносителя в приборах отопления в этой комнате, а температуру внутри здания принимаем неизменной.

6. В наиболее удалённом помещении здания потребителя температура воздуха соответствует требованиям СанПИН [11-15].

На практике, данный пункт выполняется крайне редко по причине несовершенств систем и приборов отопления, возникших в ходе эксплуатации.

В качестве измерительного прибора взят термоэлектрический преобразователь типа НСХ: 100Pt ДТС024-РТ100.В3.30/0,2 [7] с пределом допускаемой погрешности $\pm(0.30+0.005 \cdot t)^\circ\text{C}$.

Для решения данной задачи принимается тип источника теплоты – ПГУ. Заданные параметры ПГУ: $G_{\text{кт}}=81,3$ кг/с, $\varphi=0,994$, $h_4=176,790$ кДж/кг, $h_{\text{кт}}=133,156$ кДж/кг.

Параметры газов на входе в котёл-утилизатор: $\beta_{\text{г}} = 1,177$, $\vartheta_{\text{кт}} = 546,33$, $\mu_{\text{г}} = 28,356$.

Величина $h_{\text{кт}}$ определяется по формуле: $h_{\text{кт}} = \frac{\mu \cdot h_{\text{кт}}}{\mu_{\text{г}}}, \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$ (1)

Величина $Q_{\text{ГВТО}}$ определяется по формуле:

$$Q_{\text{ГВТО}} = G_{\text{КТ}} \cdot (h_4 - h_{\text{yx}}) \cdot \varphi = G_{\text{СВ}} \cdot (h_{\text{ПС}} - h_{\text{ОС}}) \quad (2)$$

Энтальпии прямой и обратной сетевой воды:

$$h_{\text{ПС}} = t_1 \cdot c_p \quad (3)$$

$$h_{\text{ОС}} = t_2 \cdot c_p. \quad (4)$$

На основании (1)-(4) определяем расход дымовых газов как функцию от переменных величин прямой и обратной температур сетевой воды:

$$G_{\text{КТ}} = \frac{(t_1 - t_2) \cdot G_{\text{СВ}} \cdot c_p}{(h_{\text{КТ}} - h_{\text{yx}}) \cdot \varphi} \quad (5)$$

Определим теплосоппротивление для 1 участка теплопровода:

$$R_{\text{из}} = \frac{1}{2\pi\lambda} \ln \frac{D}{d} = 0,184 \text{ м}^\circ\text{C/Вт} \quad (6)$$

По эмпирической формуле Шубина [2 с.81] рассчитаем сопротивление грунта $R_{\text{КГР}}$ и далее найдем температуру воздуха в первой части канала (от ПГУ до ЦТП):

$$R_{\text{КГР}} = \frac{\ln \left[3,5 \cdot \frac{h}{a} \cdot \left(\frac{a}{b} \right)^{0,25} \right]}{5,7 \cdot 0,5 \cdot \frac{a}{b} \cdot \lambda_{\text{ГР}}} = 0,116 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^\circ\text{C}} \quad (7)$$

$$t_{\text{К1}} = \frac{\frac{t_1}{R_{\text{из}}} + \frac{t_2}{R_{\text{из}}} + \frac{t_{\text{ГР}}}{R_{\text{КГР}}}}{\frac{1}{R_{\text{из}}} + \frac{1}{R_{\text{из}}} + \frac{1}{R_{\text{КГР}}}} = 46,926^\circ\text{C} \quad (8)$$

Определим расход и температуры теплоносителя в конце участка:

$$t_3 = t_{\text{К1}} + (t_1 - t_{\text{К1}}) \cdot e^{\frac{-(1+\beta) \cdot L_1}{R_{\text{из}} \cdot c_p \cdot G}} = 88,62^\circ\text{C} \quad (9)$$

$$t_4 = \frac{t_2 - t_{\text{К1}}}{\frac{-(1+\beta) \cdot L_1}{R_{\text{из}} \cdot c_p \cdot G_1}} + t_{\text{К1}} = 75,93^\circ\text{C} \quad (10)$$

Второй участок (от ЦТП до ИТП):

Расчет для этого участка проводится аналогичным образом: $t_3 = 88,62^\circ\text{C}$, $t_4 = 75,93^\circ\text{C}$.

Тогда, рассчитаем температуру воздуха во втором участке канала: $t_{\text{К2}} = 46,8^\circ\text{C}$

Рассчитаем температуры теплоносителя в конце участка: $t_5 = 88,15^\circ\text{C}$,

Третий участок (от ИТП до трубы):

Так как принцип проложения системы изменился, рассчитаем термосопротивление изоляции трубопровода для данного участка:

$$R_{\text{из}} = \frac{1}{2\pi \cdot \lambda} \cdot \ln \frac{D}{d} = 0,273 \text{ м}^\circ\text{C/Вт} \quad (11)$$

Рассчитаем температуру в батарее в самом дальнем помещении здания (в конце участка трубопровода):

$$t_{\text{бат}} = t_{\text{вр}} + (t^5 - t_{\text{вр}}) \cdot e^{\frac{-(1+\beta) \cdot L_3}{R_{\text{из}} \cdot c_p \cdot G}} = 87,7^\circ \quad (12)$$

Параметры теплоносителя соответствуют требованиям СНиП 41-01-2003 [3, раздел 6, пункт 6.1.2].

Обсуждение результатов. На основании (5-12) запишем математическую модель, учитывающую зависимость расхода газов от температуры в помещении потребителя с учетом погрешностей средств измерений:

$$G_{\text{КТ}} = \frac{(t_{\text{бат}} \cdot k) \cdot G_{\text{СВ}} \cdot c_p}{(h_{\text{КТ}} - h_{\text{yx}}) \cdot \varphi}, \quad (13)$$

где: k - коэффициент потерь температуры на протяжении системы отопления, от источника до потребителя=0,2

На основании полученных результатов строим график (рис.2) зависимости расхода уходящих газов $G_{\text{КТ}}$ от температуры теплоносителя в батарее $t_{\text{бат}}$ в конце теплопровода с учётом погрешности измерительного прибора №1 и измерительного прибора №2.

Вывод. Исходя из полученных результатов можно сформулировать вывод, что коридор погрешностей, полученный с прибора №2, установленного непосредственно у потребителя,

находится ближе к теоретической величине расхода дымовых газов, чем коридор погрешностей, полученный с прибора №1, установленный около источника теплоэнергии. Чем ближе к наиболее удаленной от теплоисточника точке потребления находится прибор, тем точнее можно регулировать расход дымовых газов. Это повлечет за собой экономию топлива и получение большей выгоды.

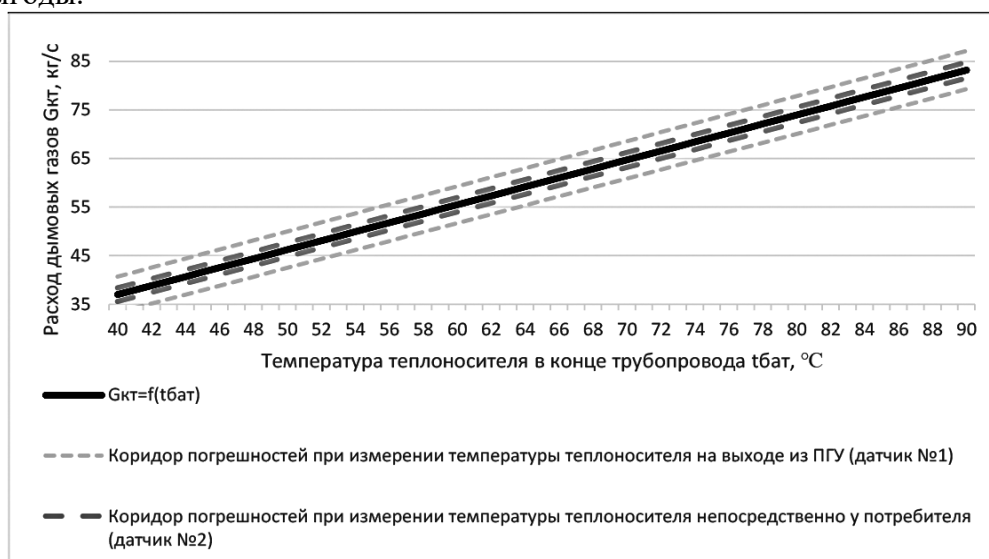


Рис. 2. Зависимость расхода уходящих газов от температуры теплоносителя в конце теплопровода
Fig. 2. Dependence of flue gas flow rate on the coolant temperature at the end of the heat pipeline

Наиболее целесообразная с точки зрения точности регулирования место расположения измерительного прибора – самая удаленная от источника теплоты точка потребителя – в устройстве обогрева в самом дальнем помещении анализируемого здания. Однако подобное местоположение датчика не всегда представляется возможным. Для регулирования расхода дымовых газов необходимо стремиться максимально приблизить датчик к конечной точке потребления, например, использовать данные датчика температуры на входе в ИТП.

Проанализировано влияние расположения измерительных приборов в тепловой схеме на точность регулирования. Разработан математический аппарат, выражающий зависимость величины расхода уходящих газов на входе в котел утилизатор и температуры теплоносителя в устройстве обогрева в самом дальнем помещении анализируемого здания. Таким образом, оптимизация АСУ системы теплоснабжения на примере здания высшей школы показывает возможность повышения точности регулирования АСУ системой отопления, в случае дополнительной установки сужение коридора погрешностей происходит в 2.5 раза.

Библиографический список:

1. Комерческий сайт компании ООО «МОЭК», температурный график магистральных тепловых сетей ПАО «МОЭК» на отопительный сезон 2020/2021 гг, дата обращения: 10 июня 2022 года https://online.moek.ru/_downloads/temp-grafiks/%D0%A2%D0%B5%D0%BC%D0%BF%D0%B5%D1%80%D0%B0%D1%82%D1%83%D1%80%D0%BD
2. Методика расчета тепловых схем газотурбинных и парогазовых электростанций / С.В. Цанев, В.Д. Буров, М.А.Соколова, В.Е. Торжков. –М.: Издательство МЭИ, 2004. –48 с.
3. Поливода, Ф.А. Надежность систем теплоснабжения городов и предприятий легкой промышленности [Текст]/Ф.А.Поливода – М.: ИНФРА-М, 2017. – 170 с.
4. СНиП 41-01-2003. Отопление, вентиляция и кондиционирование [Текст]. – Взамен СНиП 2.04.05-91; Введ. с 01.01.2004 – М.: Государственный комитет Российской Федерации по строительству и жилищно-коммунальному комплексу (Госстрой России), 2004. – 54 с.
5. Правила технической эксплуатации тепловых энергоустановок (утв. приказом Минэнерго РФ от 24 марта 2003 г. N 115) [Текст]. Введ. с 01.10.2003 – М.: Министерство энергетики Российской Федерации, 2003. – 202 с.
6. СО 34.35.101-2003. Методические указания по объему технологических измерений, сигнализации, автоматического регулирования на тепловых электростанциях; Введ. с 01.09.2004 – М.: ЦПТИ ОРГРЭС, 2004. – 98 с.
7. СанПиН 2.1.2.2645-10 «Санитарно-эпидемиологические требования к условиям проживания в жилых зданиях и помещениях» [Текст]. – Взамен СанПиН 2.1.2.1002-00. Введ. с 15.08.2010 – М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2010.— 27 с.

8. Методы расчета основных энергетических показателей паротурбинных, газотурбинных и парогазовых теплофикационных установок / Е. Я. Соколов, В. А. Мартынов ; Ред. В. М. Качалов ; Моск. энерг. ин-т (МЭИ) . – М. : Изд-во МЭИ, 1997 – 102 с
9. Управление и инноватика в теплоэнергетике : учебное пособие для вузов по направлению "Теплоэнергетика" / А. В. Андришин, В. Р. Сабанин, Н. И. Смирнов . – М. : Издательский дом МЭИ, 2011 . – 392 с.
10. Теория автоматического управления : учебник для вузов по специальности "Автоматизация технологических процессов и производств (энергетика)" / В. Я. Ротач . – 3-е изд., стер . – М. : Изд-во МЭИ, 2005 . – 400 с.
11. Коммерческий сайт компании ООО «ПО Овен», каталог продукции, описание датчика термосопротивления типа ДТСхх4 и его модификаций (включая ДТС024-РТ100.В3.30/0,2), дата обращения: 15 июня 2022 года https://owen.ru/product/dtshh4_termosoprotivleniya_s_kabel_nim_vivodom/klass_dopuska_izmereniya
12. E. Dotzauer, "Simple model for prediction of loads in district-heating systems", *Applied Energy*, 2002; 73: 277-284,
13. G. Yingjun and H. Yajin, "Heat load forecasting and optimization of thermal network adjustment method study", *The 27th Chinese Control and Decision Conference (2015 CCDC)*, 2015; 4907-4910.
14. E. Kral, A. Kostalova, P. Capek, L. Vasek, "Algorithm for Central Heating Heat Load Modelling", *2018 International Conference on Computational Science and Computational Intelligence (2018 CSCI)*. 2018; 62.
15. D. Rusovs, L. Jakovleva, V. Zentins, K. Baltputnis, "Heat Load Numerical Prediction for District Heating System Operational Control", *Latvian Journal of Physics and Technical Sciences*, 2021; 58(3):121.

References:

1. Commercial website of MOEK LLC, temperature chart of main heat networks of PJSC MOEK for the heating season 2020/2021, date of access: June 10, 2022 https://online.moek.ru/_downloads/temp-grafiks/%D0%A2%D0%B5%D0%BC%D0%BF%D0%B5%D1%80%D0%B0%D1%82%D1%83%D1%80%D0%BD
2. Methods for calculating thermal circuits of gas turbine and combined cycle power plants / S.V. Tsanev, V.D. Burov, M.A. Sokolova, V.E. Torzhkov. -M.: MPEI Publishing House, 2004; 48. (In Russ)
3. Polivoda, F.A. Reliability of heat supply systems for cities and light industry enterprises [Text] / F.A. Polivoda. M.: *INFRA-M*, 2017; 170. (In Russ)
4. SNiP 41-01-2003. Heating, ventilation and air conditioning [Text]. - Instead of SNiP 2.04.05-91; Introduction from 01.01.2004 - M.: State Committee of the Russian Federation for Construction and Housing and Communal Complex (Gosstroy of Russia), 2004; 54. (In Russ)
5. Rules for the technical operation of thermal power plants (approved by order of the Ministry of Energy of the Russian Federation of March 24, 2003 N 115) [Text]. Introduction from 01.10.2003 - M.: Ministry of Energy of the Russian Federation, 2003; 202. (In Russ)
6. SO 34.35.101-2003. Guidelines on the volume of technological measurements, signaling, automatic control at thermal power plants; Introduction from 09/01/2004 M.: *TPTI ORGRES*, 2004; 98. (In Russ)
7. SanPiN 2.1.2.2645-10 "Sanitary and epidemiological requirements for living conditions in residential buildings and premises" [Text]. - Instead of SanPiN 2.1.2.1002-00. Introduction from 08/15/2010 - M.: *Federal Center for Hygiene and Epidemiology of Rospotrebnadzor*, 2010; 27. (In Russ)
8. Methods for calculating the main energy indicators of steam turbine, gas turbine and steam-gas heating plants. E.Ya. Sokolov, V.A. Martynov; Ed. V.M. Kachalov; Moscow energy Institute (MPEI) *MPEI Publishing House*, 1997; 102.
9. Andriyushin A.V., Sabanin V.R., Smirnov N.I. M.: *MPEI Publishing House*, 2011; 392. (In Russ)
10. Theory of automatic control: a textbook for universities in the specialty "Automation of technological processes and industries (energy)" / V. Ya. Rotach. - 3rd ed., revised. M.: *MPEI Publishing House*, 2005; 400. (In Russ)
11. Commercial website of PO Oven LLC, product catalog, description of the thermal resistance sensor type DTSxx4 and its modifications (including DTS024-PT100.V3.30/0.2), accessed: June 15, 2022 https://owen.ru/product/dtshh4_termosoprotivleniya_s_kabel_nim_vivodom/klass_dopuska_izmereniya
12. E. Dotzauer, "Simple model for prediction of loads in district-heating systems", 2002; 73: 277-284.
13. G. Yingjun and H. Yajin, "Heat load forecasting and optimization of thermal network adjustment method study", *The 27th Chinese Control and Decision Conference (2015 CCDC)*, 2015; 4907-4910.
14. E. Kral, A. Kostalova, P. Capek, L. Vasek, "Algorithm for Central Heating Heat Load Modelling", *2018 International Conference on Computational Science and Computational Intelligence (2018 CSCI)*, 2018; 62.
15. D. Rusovs, L. Jakovleva, V. Zentins, K. Baltputnis, "Heat Load Numerical Prediction for District Heating System Operational Control", *Latvian Journal of Physics and Technical Sciences*. 2021; 58(3):121.

Сведения об авторах:

Гужов Сергей Вадимович, кандидат технических наук, доцент, кафедра автоматизированных систем управления тепловыми процессами; GuzhovSV@mpei.ru

Крылова Елена Владимировна, кандидат педагогических наук, доцент, кафедра автоматизированных систем управления тепловыми процессами; KrylovaYeV@mpei.ru

Тороп Дарья Владимировна, магистрант, кафедра автоматизированных систем управления тепловыми процессами; ToropDV@mpei.ru

Information about the authors:

Sergey V. Guzhov, Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., Department of Automated Control Systems for Thermal Processes; GuzhovSV@mpei.ru

Yelena V. Krylova, Cand. Sci. (Pedagogical), Assoc. Prof., Department of Automated Control Systems for Thermal Processes; KrylovaYeV@mpei.ru

Darya V. Torop, Undergraduate, Department of Automated Control Systems for Thermal Processes; ToropDV@mpei.ru

Конфликт интересов/ Conflict of interest.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов/The authors declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию/Received 04.07.2022.

Одобрена после рецензирования Revised 27.07.2022.

Принята в печать/ Accepted for publication 27.07.2022.