

## О СТРУКТУРАХ МОДЕЛЕЙ СИСТЕМ ОТОПЛЕНИЯ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ В АЛГОРИТМАХ РЕГУЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ

**С.В. Панферов**

*Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия*

Рассмотрена задача выбора структуры математической модели отопительных приборов и систем для целей разработки алгоритмов централизованного регулирования теплоснабжения. На основе детального анализа существа процесса определена предпочтительная структура модели. Показано, что отмеченная структура отличается простотой и обеспечивает незначительную разность температурных графиков, рассчитанных по классическому и усовершенствованному алгоритмам регулирования процесса теплоснабжения. Результаты работы могут быть использованы при создании алгоритмического обеспечения автоматизированных систем управления централизованным теплоснабжением.

*Ключевые слова:* централизованное теплоснабжение, алгоритм регулирования, температурный график, математическая модель, алгоритмическое обеспечение, температура теплоносителя, отопительный прибор.

**Введение.** Известно, что задачи погодного регулирования процесса теплоснабжения, в частности, вопросы построения графиков количественно-качественного регулирования отпуска теплоты рассмотрены в достаточно большом количестве работ [1–4 и др.]. Получены существенно значимые и интересные для теории и практики результаты. Применяемые системы автоматизации обычно решают задачу управления процессом посредством компенсации основного возмущения для теплового режима зданий (ТРЗ) – температуры наружного воздуха. Как правило, при этом используются хорошо известные алгоритмы Е.Я. Соколова (см., например, [1]). В работах [4, 5] приведен обоснованный вывод уравнений Е.Я. Соколова для количественно-качественного регулирования систем централизованного теплоснабжения. При этом было установлено, что системы отопления зданий представляются эквивалентным отопительным прибором. Это достаточно принятый и разумный в существующих условиях прием, когда в реальных условиях системы отопления содержат в своем составе отопительные приборы разных типоразмеров и разных сроков эксплуатации и, возможно, с различными вариантами подключения к подводящим и обратным теплопроводам. Очевидно, что прямой анализ режимов работы таких систем является весьма трудной задачей. Целесообразность такого подхода обуславливается еще и тем, что, как это показано в работе [6], параметры эквивалентного отопительного прибора достаточно успешно определяются по экспериментальным данным. В данной работе рассматривается вопрос о рациональной структуре математической модели эквивалентного отопительного прибора, которую следует использовать при разработке алгоритмов регулирования.

**Структуры моделей систем отопления.** В алгоритмах регулирования Е. Я. Соколова считается, что коэффициент теплопередачи отопительных приборов  $k$  зависит от температурного напора  $\Delta t$  и с приемлемой точностью может быть определен по следующему уравнению:

$$k = m\Delta t^n, \quad (1)$$

где  $\Delta t$  – среднее значение температурного напора отопительного прибора,  $m$  и  $n$  – некоторые эмпирические коэффициенты. Следует заметить, что  $\Delta t$  обычно вычисляют по соотношению:

$$\Delta t = (t_{ВХ} + t_{ВЫХ}) / 2 - t_{В}, \quad (2)$$

где  $t_{В}$  – температура внутреннего воздуха,  $t_{ВХ}$  и  $t_{ВЫХ}$  – соответственно температура на входе и выходе отопительного прибора.

Как известно из теории теплообмена, тепловой поток (мощность)  $W$  отопительного прибора в этом случае будет равен

$$W = m\Delta t^{n+1}F, \quad (3)$$

где  $F$  – площадь поверхности отопительного прибора.

С другой стороны, тепловой поток отопительного прибора  $W$  можно определить и по следующей формуле:

$$\begin{aligned} W &= k\Delta tF = k[(t_{ВХ} + t_{ВЫХ}) / 2 - t_{В}]F = \\ &= [t_{ВЫХ} = t_{ВХ} - W / (cG_{ГР})] = \\ &= kF[t_{ВХ} - t_{В} - W / (2cG_{ГР})]. \end{aligned} \quad (4)$$

Следовательно,

$$W = kF(t_{ВХ} - t_{В}) / [1 + kF / (2cG_{ГР})]. \quad (5)$$

В данной формуле  $G_{ГР}$  – массовый расход теплоносителя через прибор (систему отопления),  $c$  – удельная теплоемкость теплоносителя. Заметим, что уравнения (3) и (5) являются двумя различными вариантами модели эквивалентного ото-

пительного прибора, которым представляется система отопления.

Для отчетливого понимания последующих выкладок требуются пояснения. Температуру и массовый расход воды из подающей магистрали тепловой сети на абонентский ввод обозначим через  $t_C$  и  $G_C$  соответственно, температуру и расход обратной воды на узел смешения через  $t_{OBR}$  и  $G_{OBR}$ , а температуру и расход теплоносителя после узла смешения, т. е. на входе системы отопления, как  $t_{CO}$  и  $G_{CO}$  (рис. 1).

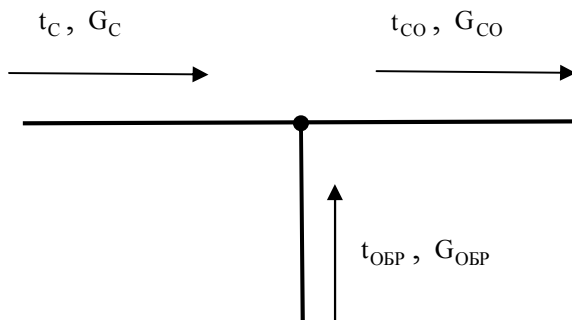


Рис. 1. Расчетная схема узла смешения

Согласно закону сохранения энергии (тепловому балансу) и 1-му закону Кирхгофа, можно записать следующие соотношения:

$$G_{CO} = G_C + G_{OBR}; \quad (6)$$

$$cG_{CO}t_{CO} = cG_Ct_C + cG_{OBR}t_{OBR}. \quad (7)$$

В нашем случае вся система отопления здания заменяется эквивалентным отопительным прибором, следовательно, все соотношения, указанные выше, справедливы и в данном случае, однако теперь необходимо учесть, что  $t_{ВХ} = t_{CO}$ ,  $t_{ВЫХ} = t_{OBR}$  и  $G_{ПР} = G_{CO}$ . В связи с этим тепловой поток (мощность) системы отопления будет равен

$$W_{CO} = (kF)_{CO}(t_{CO} - t_B) / [1 + (kF)_{CO} / (2cG_{CO})] \quad (8)$$

В формуле (8)  $(kF)_{CO}$  – это тот параметр, который подлежит определению посредством решения задачи параметрической идентификации модели системы отопления [6].

При использовании модели (3) выражение для мощности системы отопления будет следующим:

$$W_{CO} = (mF)_{CO} \Delta t_{CO}^{n+1}, \quad (9)$$

где  $(mF)_{CO}$  – параметр, который тоже следует определять при идентификации модели системы отопления.

**Вычисление разности температурных графиков.** Согласно работам [4, 5], классический алгоритм управления теплоснабжением по отопительной нагрузке, полученный с использованием модели (9), представляется следующим соотношением:

$$t_C = t_B + \Delta t_{CO}^P \bar{Q}^{1/(n+1)} + [(t_C^P - t_{OBR}^P) - 0,5(t_{CO}^P - t_{OBR}^P)] \times \bar{Q}. \quad (10)$$

Уравнение (10) с точностью до обозначений при  $n = 0,25$  совпадает с уравнением (4.38), приведенным Е.Я. Соколовым на с. 132 в [1].

В этом случае  $\bar{Q} = Q/Q^P = (t_B - t_H) / (t_B^P - t_H^P)$  – относительные теплотери здания, а параметры расчетного режима обозначены верхним индексом «р».

Необходимо также отметить следующее: как это было установлено в [6], значимой практической необходимости в учете зависимости коэффициента теплопередачи  $k$  от температурного напора  $\Delta t$  нет. В работе [6] показано, что пересчет найденных по экспериментальным данным параметров  $(mF)_{CO}$  и  $n$  модели (9) в параметр  $(kF)_{CO}$  дает практически те же самые значения, что и для случая, когда сам параметр  $(kF)_{CO}$  при решении задачи параметрической идентификации непосредственно оценивался по тем же экспериментальным данным. Поэтому при выводе алгоритма регулирования допустимо считать, что  $(kF)_{CO} = (k^P F)_{CO}$ . Это позволяет заметно упростить конечные соотношения. Кроме того отметим и следующие обстоятельства. Известные в литературе попытки повысить точность расчетов за счет более глубокого учета механизма явлений оказались малоэффективными, так как погрешности расчетов определяются в основном погрешностями исходных данных, которые, к сожалению, довольно высокие. Здесь, к примеру заметим, что, как это хорошо известно, весьма проблемной характеристикой в теплопередаче является коэффициент теплоотдачи; этот коэффициент трудно определяется, поэтому появилась идея построения так называемой новой теории теплопередачи, в которой этот коэффициент просто не используется [7]. По всем этим причинам погрешность теплотехнических расчетов может достигать 30 и более процентов. Поэтому наиболее целесообразно из всех возможных вариантов модели теплопередачи использовать самую простую по структуре, но при этом достаточно проверенную на практике модель.

В самом деле, если же считать, что  $(kF)_{CO} = (k^P F)_{CO}$ , то получим, что уравнение регулирования процесса теплоснабжения будет иметь вид

$$t_C = t_B + \Delta t_{CO}^P \bar{Q} + [(t_C^P - t_{OBR}^P) - 0,5(t_{CO}^P - t_{OBR}^P)] \times \bar{Q}. \quad (11)$$

Как видно из (11), показателя  $n$  в алгоритме уже нет, т. е. соотношение упростилось. При этом, как это выяснилось в процессе решения задачи, для получения формулы (11) нет прямой необходимости в том, чтобы специально пересмотреть процедуру вывода [4, 5], оказалось, что всего лишь

## Инженерное оборудование зданий и сооружений

достаточно в алгоритме (10) просто формально положить  $n = 0$ .

Для полноты исследования следует оценить разность между температурными графиками (10) и (11) –  $\Delta t_C$ , для этого из уравнения (10) вычтем уравнение (11), тогда будем иметь

$$\Delta t_C = \Delta t_{CO}^P \cdot [\bar{Q}^{1/(n+1)} - \bar{Q}]. \quad (12)$$

На рис. 2 приведены кривые, показывающие, как изменяется  $\Delta t_C$  в зависимости от относительной тепловой нагрузки  $\bar{Q}$  при  $n = 0,25$ : кривая 1 для  $\Delta t_{CO}^P = 64,5$  °C (температурный график 95/70 °C), а кривая 2 для  $\Delta t_{CO}^P = 69,5$  °C (температурный график 105/70 °C).

Как следует из рис. 2, наибольшее различие температурных графиков не превышает 5,7 °C (кривая 2), что на практике малозначимо при реальной точности поддержания температурных графиков.

Зависимость (12) имеет максимум при  $\bar{Q} = (n+1)^{-(n+1)/n}$ , этот максимум равен  $\Delta t_{C\text{MAX}} = \Delta t_{CO}^P \cdot [(n+1)^{-1/n} - (n+1)^{-(n+1)/n}]$ . В частности, при  $n = 0,25$  относительная тепловая на-

грузка, при которой достигается максимум различия температурных графиков, будет равна  $\bar{Q} = 1,25^{-5} = 0,327$ , при этом  $\Delta t_{C\text{MAX}} = 0,0819 \cdot \Delta t_{CO}^P$ .

Среднее значение разности температурных графиков, очевидно, будет равно

$$\begin{aligned} \Delta \bar{t}_C &= \int_0^1 \Delta t_{CO}^P \cdot [\bar{Q}^{1/(n+1)} - \bar{Q}] d\bar{Q} = \\ &= \Delta t_{CO}^P \cdot \left[ \frac{n+1}{n+2} - \frac{1}{2} \right], \end{aligned} \quad (13)$$

что, например, для температурного графика 105/70 °C при  $n = 0,25$  составит всего 3,86 °C.

В то же время следует отметить, что, как это было указано выше, на практике фактическая точность поддержания температурных графиков теплоснабжения, к сожалению, не велика, погрешность может быть 20 °C и более. На рис. 3 приведены кривые фактической и расчетной (по графику) температуры теплоносителя в подающей магистрали тепловой сети, а также и соответствующая им кривая температуры наружного воздуха за один календарный год [8].

На рис. 3 кривые 1 и 2 – соответственно расчетная и фактическая температура теплоносителя

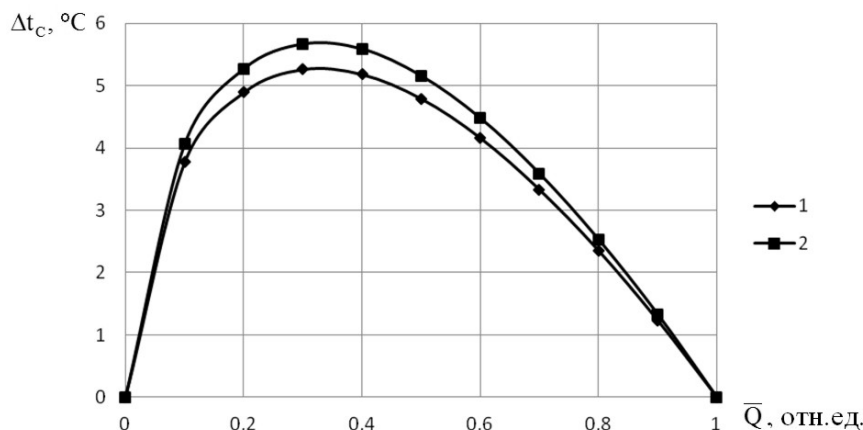


Рис. 2. Различие температурных графиков

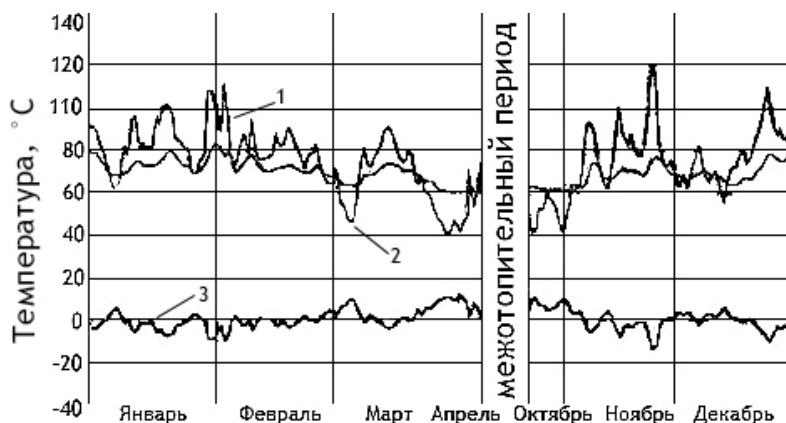


Рис. 3. Графики изменения температуры

в подающем теплопроводе системы теплоснабжения; кривая 3 – температура наружного воздуха.

Следует отметить, что в работах [9, 10] рассмотрены два варианта математической модели отопительного прибора: первый вариант – это формула (5), а второй вариант модели точнее учитывает физику явлений в приборе, поэтому он сложнее и получен на основе классической теории теплообменников. В [9, 10] показано, что в практически интересных случаях расхождение мощностей отопительных приборов, вычисленных по указанным вариантам моделей, весьма незначительно. Следовательно, и с этой точки зрения предпочтительнее использовать модель (5), как более простую по структуре.

**Выводы.** В работе аргументированно показано, что при разработке алгоритмов регулирования процесса теплоснабжения нет практической необходимости в учете зависимости коэффициента теплопередачи эквивалентного отопительного прибора от температурного напора. Разность температурных графиков теплоснабжения, построенных как с учетом отмеченной зависимости, так и без ее учета, получается практически малозначимой.

#### Литература

1. Соколов, Е.Я. Теплофикация и тепловые сети: учебник для вузов / Е.Я. Соколов. – М.: Изд-во МЭИ, 1999. – 472 с.
2. Шарапов, В.И. Регулирование нагрузки систем теплоснабжения / В.И. Шарапов, П.В. Ротов. – М.: Изд-во «Новости теплоснабжения», 2007. – 164 с.
3. О температурном графике теплофикационных систем городов / П.В. Ротов, М.Е. Орлов, М.А. Ротова, В.И. Шарапов // Энергосбережение и водоподготовка. – 2012. – № 6. – С. 39–42.

4. Панферов, В.И. Об особенностях вывода уравнений регулирования систем централизованного теплоснабжения / В.И. Панферов, С.В. Панферов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2016. – Т. 16, № 1. – С. 21–30. DOI: 10.14529/ctcr160102.

5. Панферов, В.И. О некоторых решениях проблемы управления централизованным теплоснабжением / В.И. Панферов, С.В. Панферов // Труды Академэнерго. – 2016. – № 2. – С. 95–108.

6. Панферов, С.В. Об одном решении задачи построения общей модели теплового режима здания и его системы отопления / С.В. Панферов, Н.А. Тренин, В.И. Панферов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2017. – Т. 17, № 3. – С. 24–33. DOI: 10.14529/ctcr170303

7. Адиутори, Е.Ф. Новые методы в теплопередаче / Е.Ф. Адиутори. – М.: Мир, 1977. – 230 с.

8. Гершкович, В.Ф. О возможности практической реализации регулирования теплопотребления зданий методом периодического прерывания потока теплоносителя / В.Ф. Гершкович // Новости теплоснабжения. – 2000. – № 2. – С. 33–37.

9. Панферов, В.И. К решению задачи моделирования отопительных приборов и систем / В.И. Панферов, С.В. Панферов // Системы автоматизации в образовании, науке и производстве: Труды X Всероссийской науч.-практ. конф. – Новокузнецк: СибГИУ, 2015. – С. 384–388.

10. Панферов, В.И. Динамическая модель отопительных приборов и систем / В.И. Панферов, С.В. Панферов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2015. – Т. 15, № 2. – С. 75–82. DOI: 10.14529/ctcr150208

**Панферов Сергей Владимирович**, кандидат технических наук, доцент кафедры градостроительства, инженерных сетей и систем, Южно-Уральский государственный университет (Челябинск), tgsiv@mail.ru

Поступила в редакцию 30 сентября 2017 г.

## ON THE STRUCTURES OF THE MODELS FOR HEATING SYSTEMS USED IN THE ALGORITHMS FOR THE HEAT SUPPLY PROCESS REGULATION

S.V. Panferov, [tgsiv@mail.ru](mailto:tgsiv@mail.ru)  
South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation

The problem of choosing the structure of a mathematical model of heating devices and systems for development of algorithms for centralized regulation of heat supply is considered. Based on a detailed analysis of the process essence, the preferred structure of the model is determined. It is shown that this structure is simple and provides a slight difference in temperature graphs calculated by the classical and improved algorithms for regulating the heat supply process. The results of the work can be used to create algorithmic support for automated centralized heating control systems.

*Keywords: centralized heat supply, regulating algorithm, temperature graph, mathematical model, algorithmic support, coolant temperature, heating device.*

### References

1. Sokolov E. Ja. *Teplofikacija i teplovyje seti: uchebnyj dlja VUZov* [District Heating and Heat Networks: the Textbook for High Schools]. Moscow, Publishing House of the Moscow Power Engineering Institute, 1999. 472 p.
2. Sharapov V.I., Rotov P.V. *Regulirovanie nagruzki sistem teplosnabzhenija* [Regulation of the Load of Heat Supply Systems]. Moscow, Publishing house "Heat supply news", 2007. 164 p.
3. Rotov P.V., Orlov M.E., Rotova M.A., Sharapov V.I. [O Temperaturnom Grafike Teplofikacionnyh Sistem Gorodov]. *Jenergoberezhenie i vodopodgotovka* [Energy saving and water conditioning], 2012, no. 6, pp. 39–42 (in Russ.).
4. Panferov V.I. Panferov S.V. About Features of Derivation of the Regulation Equations for District Heating Systems. *Bulletin of South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control & Radioelectronics*, 2016, vol. 16, no. 1, pp. 21–30 (in Russ.). DOI: 10.14529/ctcr160102.
5. Panferov V.I., Panferov S.V. [On Some Solutions to the Problem of Centralized Heat Supply Management]. *Trudy Akademjenergo* [Proceedings of AcademEnergO], 2016, no. 2, pp. 95–108 (in Russ.).
6. Panferov S.V. Trenin N.A., Panferov V.I. On one Solution to the Problem of Constructing a General Model of the Thermal Regime of a Building and its Heating System. *Bulletin of South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control & Radioelectronics*, 2017, vol. 17, no. 3, pp. 24–33 (in Russ.). DOI: 10.14529/ctcr170303
7. Adiutori E.F. *Novye metody v teploperedache* [New Methods in Heat Transfer]. Moscow, World publ., 1977. 230 p.
8. Gershkovich V.F. [On the Feasibility of Realizing the Regulation of Heat Consumption of Buildings by Periodically Interrupting the Flow of Heat Carrier]. *Novosti teplosnabzhenija* [Heat Supply News], 2000, no. 2, pp. 33–37 (in Russ.).
9. Panferov V.I., Panferov S.V. [To the Solution of the Problem of Modeling of Heating Devices and Systems]. *Sistemy avtomatizacii v obrazovanii, nauke i proizvodstve: Trudy X Vserossijskoj nauchno-prakt. konf.* [Automation Systems in Education, Science and Production: Proceedings of the 10th All-Russian Scientific and Practical Conference]. Novokuzneck, SibGIU Publ., 2015, pp. 384–388 (in Russ.).
10. Panferov V.I. Panferov S.V. [Dynamic Model of Heating Appliances and Systems], *Bulletin of South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control & Radioelectronics*, 2015, vol. 15, no. 2, pp. 75–82 (in Russ.). DOI: 10.14529/ctcr150208

Received 30 September 2017

### ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Панферов, С.В. О структурах моделей систем отопления, используемых в алгоритмах регулирования процесса теплоснабжения / С.В. Панферов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Строительство и архитектура». – 2017. – Т. 17, № 4. – С. 62–66. DOI: 10.14529/build170409

### FOR CITATION

Panferov S.V. On The Structures of the Models for Heating Systems Used in the Algorithms for the Heat Supply Process Regulation. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Construction Engineering and Architecture*. 2017, vol. 17, no. 4, pp. 62–66. (in Russ.). DOI: 10.14529/build170409