

Теплоснабжение, вентиляция, кондиционирование воздуха, газоснабжение и освещение Heat Supply, ventilation, air conditioning, gas supply and lighting

Научная статья
УДК 658.012.011.56
DOI: 10.14529/build240107

К РЕШЕНИЮ ЗАДАЧИ КОЛИЧЕСТВЕННОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ В СИСТЕМАХ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ

С.В. Панферов, tgsiv@mail.ru

В.И. Панферов

Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

Аннотация. Хорошо известно, что количественное регулирование процесса теплоснабжения обладает рядом существенных преимуществ и широко используется за рубежом. Применяется такой способ регулирования и в Российской Федерации. Вместе с тем задача алгоритмизации количественного регулирования является в настоящее время все-таки достаточно проблематичной и требует дальнейшего развития. Так, например, следует признать, что литературные данные по алгоритму, предложенному, как это нам представляется, в свое время Е.Я. Соколовым, характеризуются «пропущенностью» процедуры вывода и обоснования, что нежелательно, в частности, с точки зрения учебных целей. Кроме того, алгоритм «не работает» во всем диапазоне тепловых нагрузок (наружных температур). **Цель исследования:** разработать алгоритм количественного регулирования с целью последующего его использования в составе алгоритмического обеспечения автоматизированной системы управления (АСУ) процессом теплоснабжения. **Материалы и методы.** Проведен анализ литературных данных по рассматриваемой проблеме. Используя модели систем отопления и тепловых потерь зданий, составили балансовое уравнение, позволяющее найти необходимый для отопления расход теплоносителя. **Результаты.** Предложено детальное обоснование и вывод алгоритма количественного регулирования процесса теплоснабжения по отопительной нагрузке, проведен анализ его характеристик. Учтены условия физической реализуемости процесса отопления. Алгоритм в целом представляется двухинтервальной формулой, на втором интервале наружных температур расход теплоносителя вычисляется из условия, что температура обратной воды должна быть заметно выше температуры внутреннего воздуха отапливаемых помещений. Однако при этом следует иметь в виду, что, что при регулировании расхода теплоносителя по второму интервалу будет наблюдаться завышенная мощность системы отопления, т. е. некоторый «перетоп». Показано, что при увеличении минимально допустимого значения температуры обратной воды диапазон наружных температур, в котором возможно регулирование по первому интервалу – идеальное регулирование (регулирование без «перетоп»), заметно сужается, а при снижении температуры воды в подающей магистрали, наоборот, расширяется. **Заключение.** Результаты работы могут быть использованы при разработке алгоритмического обеспечения автоматизированных систем управления процессом теплоснабжения.

Ключевые слова: теплоснабжение зданий, расход теплоносителя, автоматизированные системы управления, эквивалентный отопительный прибор, количественное регулирование, отопительная нагрузка, тепловые потери, алгоритмическое обеспечение

Для цитирования. Панферов С.В., Панферов В.И. К решению задачи количественного регулирования в системах теплоснабжения // Вестник ЮУрГУ. Серия «Строительство и архитектура». 2024. Т. 24, № 1. С. 50–58. DOI: 10.14529/build240107

Original article

DOI: 10.14529/build240107

QUANTITATIVE REGULATION IN HEAT SUPPLY SYSTEMS

S.V. Panferov, tgsiv@mail.ru

V.I. Panferov

South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

Abstract. The quantitative regulation of the heat supply process has a number of significant advantages and is widely used abroad. This method of regulation is also used in the Russian Federation. At the same time, the algorithmization of quantitative regulation is currently still quite problematic and requires further development. For example, the literature data on the algorithm proposed by E. Ya. Sokolov are characterized by the “omission” of the procedures of inference and justification, which is particularly undesirable for educational applications. In addition, the algorithm does not work across the entire range of thermal loads (outside temperatures). **Purpose of the study.** To develop an algorithm for quantitative regulation in terms of its subsequent use as part of the algorithmic support of an automated control system (ACS) for heat supply. **Materials and methods.** Literature data on the issue under consideration was analyzed. Using models of heating systems and heat losses of buildings, we compiled a balance equation that makes it possible to find the necessary coolant flow for heating. **Results.** A detailed substantiation and derivation of the algorithm for quantitative regulation of heat supply according to the heating load is proposed, and its characteristics were analyzed. The conditions for the physical feasibility of heating are taken into account. The algorithm as a whole is represented by a two-interval formula; in the second range of outdoor temperatures, the heat carrier flow rate is calculated based on the condition that the return water temperature should be noticeably higher than the indoor air temperature of the heated premises. However, when regulating the heat carrier flow in the second interval, an overestimated power of the heating system will be observed, i. e. some overshoot is possible. It is shown that with an increase in the minimum allowable value of the return water temperature, the range of outdoor temperatures in which regulation is possible in the first interval (ideal regulation without overflow) noticeably narrows, and when the water temperature in the supply line decreases, conversely, it expands. **Conclusion.** The results of the work can be used to develop algorithmic support for automated control systems for heat supply.

Keywords: heat supply, coolant consumption, automated control systems, equivalent heater, quantitative regulation, heating load, heat losses, algorithmic support

For citation. Panferov S.V., Panferov V.I. Quantitative regulation in heat supply systems. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Construction Engineering and Architecture*. 2024;24(1):50–58. (in Russ.). DOI: 10.14529/build240107

Постановка задачи. Как это хорошо известно, в системах централизованного теплоснабжения в РФ преимущественно используется качественное регулирование процесса [1, 2]. Вместе с тем по данным работы [3] в Дании, Германии, Финляндии и Швеции «...системы теплоснабжения... работают на принципах количественного регулирования». Указывается, что в сетях этих стран температура теплоносителя либо стабилизируется на уровне в 110 °С, либо ступенчато изменяется в диапазоне 100÷120 °С. Аналогичные сведения о количественном регулировании процесса теплоснабжения содержатся и в работе [4]. В этой же работе также отмечается, что относительно низкие температуры теплоносителя положительно влияют на работу теплоэлектроцентралей (ТЭЦ) и способствуют снижению потерь теплоты при ее транспортировке. Также в работе [4] подчеркивается, что при такой концепции построения систем теплоснабжения – когда температура прямой воды является const и не зависит от погодных условий – все регулирование процесса сосредоточено в тепловых пунктах самих потребителей. Это, во-первых, дает возможность им самим регулировать процесс в

зависимости от их собственных нужд, а во-вторых, способствует и энергосбережению. Конечно, при этом температура и расход теплоносителя в подающих магистралях самой тепловой сети должны позволять решать задачи регулирования на тепловых пунктах потребителей должным образом, т. е. теплообменное оборудование потребителя должно быть способно «снять» с теплоносителя нужное по погоде количество теплоты. Только при таком условии в здании будет поддерживаться требуемая температура внутреннего воздуха.

К месту заметим, что проблема количественного регулирования в РФ стала актуальной в основном из-за вынужденного (по разным причинам) снижения температуры теплоносителя в подающих магистралях тепловых сетей, которое началось примерно с 90-х годов прошлого столетия. При этом теплоснабжающими организациями заявляется, что потребное количество теплоты, якобы, доставляется «расходом», однако при этом обычно не разъясняется, как и каким образом конкретно решается эта задача.

Зарубежный опыт построения систем региональной энергетики обсуждается в работе [5].

В работе [6] проведен сравнительный анализ энергетической эффективности работы ТЭЦ при количественном и качественном способах регулирования тепловой нагрузки. Отмечено, что при количественном регулировании тепловой нагрузки, во-первых, повышается энергетическая эффективность ТЭЦ за счет увеличения теплофикационной выработки электроэнергии турбинами на 9,5 %, во-вторых, расход топлива водогрейными котлами уменьшается на 9 % (объясняется это меньшим количеством одновременно работающих котлов и снижением продолжительности их работы в отопительный период), и в-третьих, снижается расход электроэнергии на транспорт теплоносителя в два раза.

О снижении расхода электроэнергии на перекачку теплоносителя при количественном регулировании сообщается и в работе [1, с. 119–120].

Таким образом, как это следует из вышеизложенного, переход на количественный метод регулирования систем теплоснабжения в общем обещает быть достаточно эффективным, однако при этом есть некоторые проблемы с конкретными алгоритмами регулирования, с тем, когда и каким образом следует изменять расход теплоносителя на теплоснабжение [7, 8]. Поэтому необходима проработка указанных вопросов. О такой необходимости говорится, в частности, и в работе [7], в которой указаны проблемы, которые необходимо решать при применении количественного регулирования в условиях, когда в эксплуатируемых тепловых сетях волевым методом предполагается заметное снижение температуры прямой воды. При этом, в частности, отмечается, что существенное увеличение расхода теплоносителя неизбежно приведет к неудовлетворительной работе элеваторных узлов.

О необходимости проработки задачи регулирования указано в работе [8], в данной работе предложен свой подход к построению алгоритмов регулирования, при этом учитываются теплофизические свойства греющей и нагреваемой воды в теплообменниках, термические сопротивления стенок каналов или трубок и слоя накипи и прочие характеристики.

Предлагаемое решение задачи. Как это отмечено выше, при управлении теплоснабжением за счет изменения расхода все регулирование процесса должно быть сосредоточено в тепловых пунктах самих потребителей, поэтому есть смысл найти алгоритм управления именно для такого случая. Такой подход вполне целесообразен еще и из-за того, что погодное регулирование на централизованном источнике теплоты в принципе для каждого конкретного здания является достаточно грубым, не обеспечивающим поддержание температуры внутреннего воздуха на заданном уровне с удовлетворительной точностью. Как это отмечено в работе [9, с. 458], централизованное регулирование «... ориентировано на обезличенное здание в

районе действия тепловой станции при расчетной температуре внутреннего воздуха 18 °С (расчетная температура согласно СНиП в наиболее представительном помещении в рядовой жилой комнате жилого дома)». Однако так называемый погодный график должен быть индивидуальным для каждого конкретного здания с его вполне конкретными теплозащитными свойствами и вполне конкретной системой отопления. Данный график можно построить, если приравнять мощность системы отопления к теплопотерям здания.

Согласно работам [10–12] мощность системы отопления W_{CO} можно вычислить по следующей формуле:

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

где c и G_{CO} – удельная теплоемкость и массовый расход теплоносителя через систему отопления соответственно, t_{CO} и t_B – соответственно температура воды на входе системы отопления и температура внутреннего воздуха, $(kF)_{CO}$ – это тот параметр, который подлежит определению при идентификации модели системы отопления [13]. В данном случае, как это обычно принято в литературе, система отопления здания представляется эквивалентным отопительным прибором.

Теплопотери здания, как это хорошо известно, определяют по формуле Н.С. Ермолаева [1, 9]:

$$Q = q_V \cdot (t_B - t_H) \cdot V, \quad (2)$$

где q_V – удельная тепловая характеристика здания, V – его объем, t_H – температура наружного воздуха.

Приравнявая соотношения (1) и (2) и разрешая полученное равенство относительно G_{CO} , получим, что

$$G_{CO} = \frac{q_V V (t_B^3 - t_H) \cdot (kF)_{CO}}{2c[(kF)_{CO} (t_{CO} - t_B^3) - q_V V (t_B^3 - t_H)]}. \quad (3)$$

Вполне понятно, что в данную формулу вместо t_B подставлена t_B^3 – заданная температура внутреннего воздуха.

Данный алгоритм следует использовать в системе автоматического управления (САУ) отоплением: имея оценку теплозащитных свойств здания в виде его удельной тепловой характеристики q_V , а также решив задачу идентификации для его системы отопления – определив параметр $(kF)_{CO}$, по фактической температуре наружного воздуха и заданной температуре внутреннего воздуха вычисляется необходимый расход воды на его систему отопления.

Анализ и корректировка полученного решения. На рис. 1 для здания с $q_V = 0,86$ Вт/(м³·°С), $(kF)_{CO} = 4300$ Вт/°С, $V = 8000$ м³ приведены графики изменения расхода G_{CO} в зависимости от

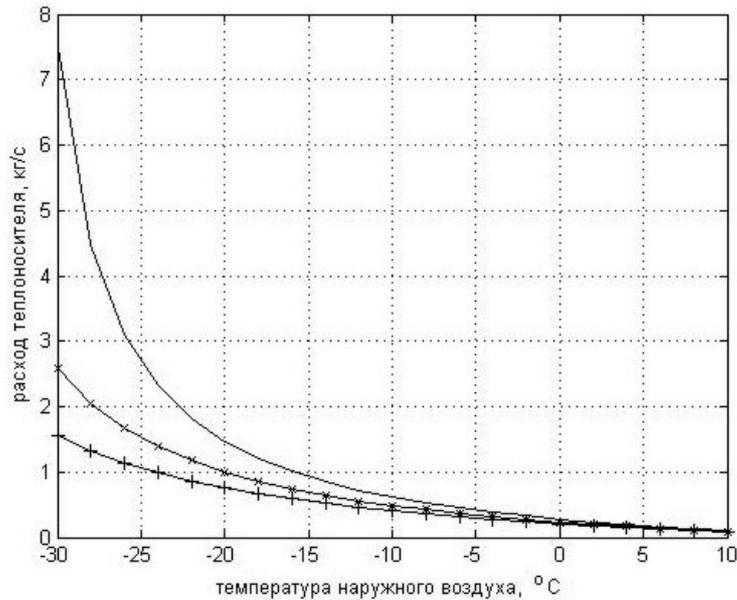


Рис. 1. Кривые изменения расхода теплоносителя в зависимости от температуры наружного воздуха

температуры наружного воздуха t_H для 3 значений t_{CO} , считая снизу вверх: кривая 1 для $t_{CO} = 120$ °C, кривая 2 для $t_{CO} = 110$ °C и кривая 3 для $t_{CO} = 100$ °C. При этом считалось, что $t_B^3 = 18$ °C.

Как видно из рис. 1, при высоких наружных температурах расход теплоносителя практически не зависит от температуры воды на входе системы отопления t_{CO} – все три кривые изображаются по существу одной и той же линией. Объясняется это, очевидно, низким уровнем теплопотерь здания. Кроме того, вполне понятно, что чем ниже t_{CO} , тем больше должен быть расход теплоносителя на систему отопления.

Если подставить соотношение (3) в хорошо известную формулу для температуры обратной воды

$$t_{OBR} = t_{CO} - \frac{q_V V}{c G_{CO}} (t_B^3 - t_H), \quad (4)$$

то определим, что эта температура при регулировании по алгоритму (3) должна изменяться следующим образом:

$$t_{OBR} = -t_{CO} + 2t_B^3 + \frac{2q_V V}{(kF)_{CO}} (t_B^3 - t_H). \quad (5)$$

На рис. 2 для условий рис. 1 приведены графики изменения температуры обратной воды, вычисленные по формуле (5).

Как это нетрудно видеть из рис. 2, регулирование по алгоритму (3) при некоторых наружных температурах недопустимо, более того, оно просто физически нереализуемо, так как согласно рис. 2 теплоноситель формально должен быть охлажден аж до отрицательных температур. К месту заметим, что вероятнее всего по этой причине в работе

[1, с. 134] приведены уравнения эквивалента расхода воды и температуры обратной воды в зависимости от тепловой нагрузки только для случая, когда $t_{OBR} > t_B^3$. Для случая, когда это условие не выполняется, в [1] нет никаких рекомендаций.

Из всего вышеотмеченного, очевидно, следует, что использованные при выводе алгоритма (3) соотношения не учитывают условия физической реализуемости процесса отопления, поэтому нужна корректировка полученных решений.

На рис. 3 для $t_{CO} = 100$ °C приведены графики изменения расхода по соотношению (3) и из условия, что температура обратной воды в точности равна температуре внутреннего воздуха отапливаемых зданий. Как видно из рис. 3, при некоторых наружных температурах расход теплоносителя по алгоритму (3) меньше расхода, найденного из условия $t_{OBR} = t_B^3$, следовательно, количественное регулирование по формуле (3) при таких наружных температурах в данном случае не является реально достижимым.

Покажем, какому неравенству должен подчиняться расход теплоносителя из условия, что температура обратной воды не может быть меньше температуры внутреннего воздуха отапливаемых зданий:

$$t_{OBR} = t_{CO} - \frac{q_V V}{c G_{CO}} (t_B^3 - t_H) \geq t_B^3; \quad (6)$$

$$t_{CO} - t_B^3 \geq \frac{q_V V}{c G_{CO}} (t_B^3 - t_H); \quad (7)$$

$$G_{CO} \geq \frac{q_V V}{c} \cdot \frac{t_B^3 - t_H}{t_{CO} - t_B^3}. \quad (8)$$

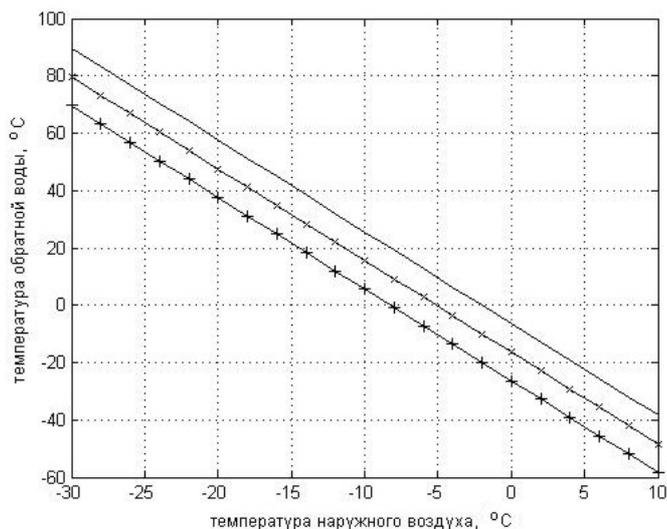


Рис. 2. Кривые изменения температуры обратной воды в зависимости от температуры наружного воздуха, вычисленные по формуле (5)

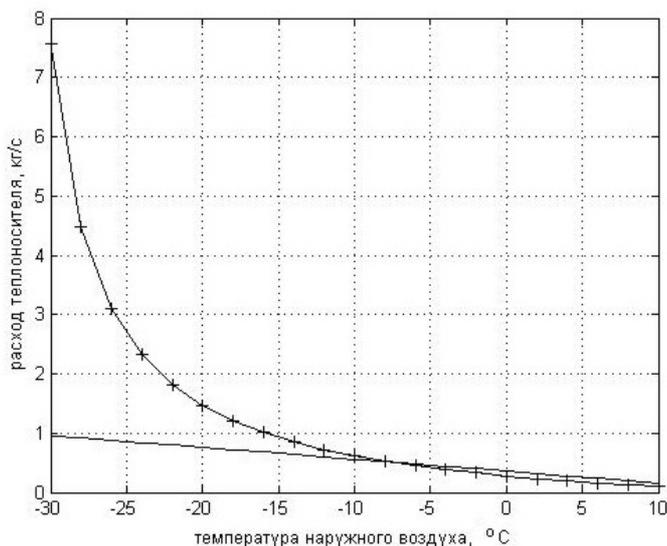


Рис. 3. Графики изменения расхода теплоносителя в зависимости от температуры наружного воздуха, вычисленного по уравнению (3), и из условия $t_{\text{ОБР}} = t_{\text{В}}^3$

Выясним, при какой температуре наружного воздуха отмеченные расходы будут равны. Как это нетрудно показать, это будет иметь место при следующей температуре:

$$t_{\text{Н}}^{\text{max}} = t_{\text{В}}^3 - \frac{(kF)_{\text{CO}}}{2 \cdot q_{\text{V}} V} (t_{\text{CO}} - t_{\text{В}}^3). \quad (9)$$

Для условий рис. 3 это будет наблюдаться при $t_{\text{Н}} = -7,625 \text{ } ^\circ\text{C}$. Кроме того, из формулы (9) следует, что с увеличением параметра $\frac{(kF)_{\text{CO}}}{2 \cdot q_{\text{V}} V}$ критическое значение наружной температуры, вычисляемое по формуле (9), уменьшается (смещается в сторону отрицательных наружных температур), т. е. диапазон наружных температур, при которых

допустимо количественное регулирование по алгоритму (3), сужается.

Если учесть динамику процесса теплообмена (съемка теплоты системой отопления с прямой воды), то, как это хорошо известно, система отопления конструируется так, что температура обратной воды должна быть заметно выше температуры внутреннего воздуха, в противном случае продолжительность процесса будет бесконечно большой. Обозначим разумный минимум температуры обратной воды через t^* , т. е. будем считать, что $t_{\text{ОБР}} \geq t^*$, тогда получим следующее соотношение для расхода теплоносителя:

$$G_{\text{CO}} \geq \frac{q_{\text{V}} V}{c} \cdot \frac{t_{\text{В}}^3 - t_{\text{Н}}}{t_{\text{CO}} - t^*}. \quad (10)$$

На рис. 4 для $t_{CO} = 100\text{ }^\circ\text{C}$ приведены графики изменения расхода по соотношению (3) – отмечена плюсами и по границе неравенства (10), причем прямая, отмеченная звездочками, для случая, когда $t_{OBR} = t_B^3 = 18\text{ }^\circ\text{C}$, а прямая, отмеченная кружочками, когда $t_{OBR} = t^* = 30\text{ }^\circ\text{C}$. Здесь равенство расходов по формуле (3) и для случая $t_{OBR} = t^* = 30\text{ }^\circ\text{C}$ достигается уже при наружной температуре $t_H = -11,375\text{ }^\circ\text{C}$.

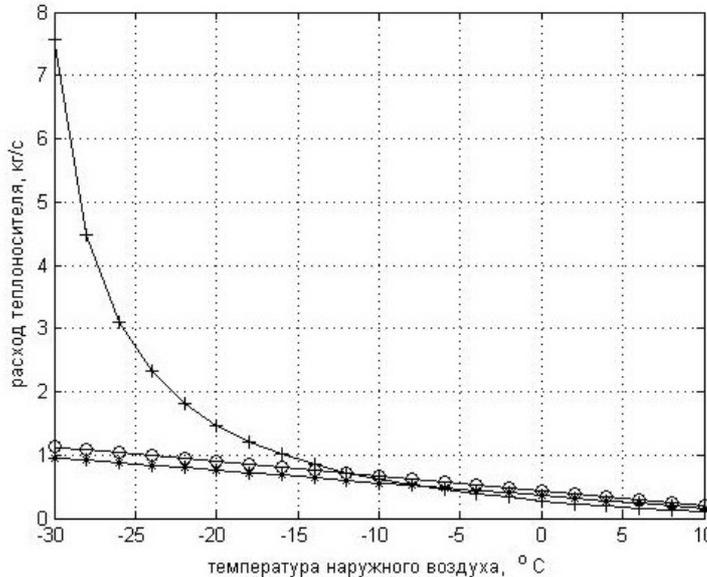


Рис. 4. Графики изменения расхода по формуле (3) и по границе неравенства (10)

Как видно из рис. 4, при увеличении t^* диапазон наружных температур, в котором возможно количественное регулирование по алгоритму (3), заметно сужается.

Нетрудно показать, что равенство расходов по алгоритму (3) и по нижней границе неравенства (10) будет достигаться при следующем значении наружной температуры:

$$t_H^{\max} = t_B^3 - \frac{(kF)_{CO}}{2q_V V} (t_{CO} + t^* - 2 \cdot t_B^3). \tag{11}$$

Таким образом, учитывая вышеизложенное, алгоритм количественного регулирования можно представить следующей интервальной формулой:

$$G_{CO} = \begin{cases} \frac{q_V V (t_B^3 - t_H) \cdot (kF)_{CO}}{2c[(kF)_{CO} (t_{CO} - t_B^3) - q_V V (t_B^3 - t_H)]}, & \text{если } t_H \leq t_B^3 - \frac{(kF)_{CO}}{2 \cdot q_V V} (t_{CO} + t^* - 2 \cdot t_B^3); \\ \frac{q_V V \cdot (t_B^3 - t_H)}{c \cdot (t_{CO} - t^*)}, & \text{если } t_H > t_B^3 - \frac{(kF)_{CO}}{2 \cdot q_V V} (t_{CO} + t^* - 2 \cdot t_B^3). \end{cases} \tag{12}$$

Температура обратной воды при этом будет изменяться следующим образом:

$$t_{OBR} = \begin{cases} -t_{CO} + 2t_B^3 + \frac{2q_V V}{(kF)_{CO}} (t_B^3 - t_H), & \text{если } t_H \leq t_B^3 - \frac{(kF)_{CO}}{2q_V V} (t_{CO} + t^* - 2 \cdot t_B^3); \\ t^*, & \text{если } t_H > t_B^3 - \frac{(kF)_{CO}}{2q_V V} (t_{CO} + t^* - 2 \cdot t_B^3). \end{cases} \tag{13}$$

Однако при этом следует иметь в виду, что при регулировании расхода по второму интервалу будет наблюдаться завышенная мощность системы отопления, т. е. некоторый «перетоп». Так, например, температуре наружного воздуха $t_H = 0\text{ }^\circ\text{C}$ теплотери вышеуказанного здания при $t_B^3 = 18\text{ }^\circ\text{C}$ будут составлять

123,84 кВт, а мощность системы отопления, вычисленная по расходу $G_{CO} = \frac{q_V V}{c} \cdot \frac{t_B^3 - t_H}{t_{CO} - t^*}$,

будет равна 159,167 кВт, «перетоп» 28,52%. Понятно, что это приведет к увеличению температуры внутреннего воздуха, что может быть неприемлемым. В связи с этим количественное регулирование по первому интервалу будем называть идеальным.

Снижение температуры теплоносителя в подающей магистрали и расширение диапазона применимости идеального регулирования.

Как это следует из соотношения (11) $\frac{\partial t_H^{\max}}{\partial t_{CO}} < 0$,

т. е. с уменьшением температуры теплоносителя на входе системы отопления t_{CO} верхняя граница применимости соотношения (3) для количественного регулирования растет и может оказаться так, что это уравнение применимо во всем практически значимом диапазоне наружных температур. Понятно, что в этом случае нет необходимости в использовании второго интервала алгоритма (12). Для примера на рис. 5 приведен график зависимости (11) для здания с $q_V = 0,86 \text{ Вт}/(\text{м}^3 \cdot \text{°C})$, $(kF)_{CO} = 4300 \text{ Вт}/\text{°C}$, $V = 8000 \text{ м}^3$ при $t_B^3 = 18 \text{ °C}$, $t_{OBR} = t^* = 30 \text{ °C}$.

Как видно из рис. 5, при снижении температуры теплоносителя на входе системы отопления t_{CO} верхний предел применимости соотношения (3) для регулирования – t_H^{\max} заметно растет и, например, при $t_{CO} = 50 \text{ °C}$ будет $t_H^{\max} = 4,25 \text{ °C}$.

Таким образом, можно утверждать, низкотемпературное теплоснабжение и идеальное количественное регулирование (регулирование без «перетопа») органически (вполне естественно) взаимосвязаны, что при снижении температуры теплоносителя на входе системы отопления диапазон применимости такого регулирования расширяется. Вероятнее всего, по этой причине за рубежом применяют ступенчатое снижение температуры теплоносителя при регулировании процесса теплоснабжения за счет изменения расхода теплоносителя [3].

Некоторые замечания. Следует, однако, заметить, что предложенное решение задачи является достаточно общим, а не относится только к отоплению отдельного здания. Дело в том, что отопительную нагрузку как отдельного здания, так и некоторого микрорайона можно представить, как это неоднократно отмечалось в работах [10–14], как теплотребление отдельного эквивалентного отопительного прибора. Также вполне понятно, что при конкретном применении алгоритма необходимо учитывать и допустимые температуры теплоносителя на входе систем отопления [9, 15]. Если же фактическая температура прямой воды выше допустимой, то необходимо также решить и задачу понижения этой температуры до предельно допустимого значения, что не рассматривается в данной работе. Вместе с тем предложенный алгоритм является практически значимым, так как представляет один из возможных вариантов ответа на вопрос о том, как конкретно следует изменять расход воды на отопление в вышеуказанной ситуации. Кроме того, в работе приведены достаточно подробные и, как нам представляется, вполне понятные обоснования полученных соотношений, что несколько проблематично, например, для работы [1]. Отметим также, что ответы на вопрос о количественном регулировании для несколько иных условий можно найти, например, в работах [16–20].

Выводы. Рассмотрено решение задачи количественного регулирования отопительной нагрузки зданий. Приведенный алгоритм детально обоснован и представляется двухинтервальной формулой по температуре наружного воздуха. Алгоритм характеризуется тем, что при регулировании на первом интервале потребителю в точности доставля-

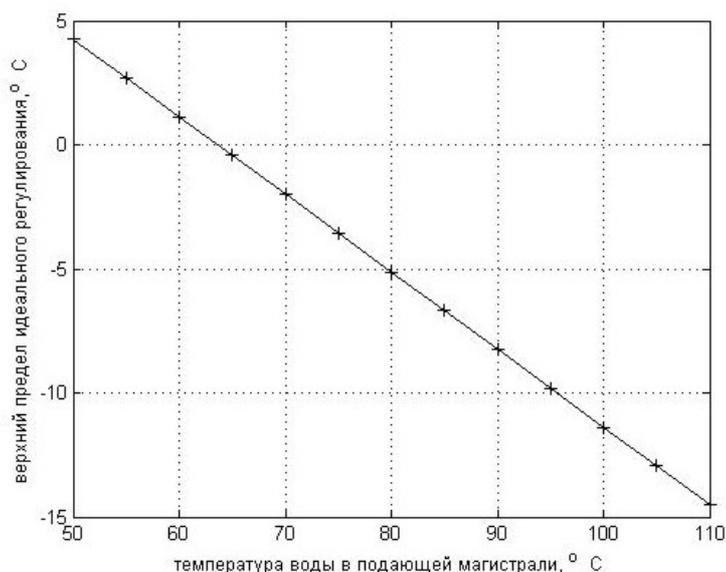


Рис. 5. График зависимости верхнего предела применимости идеального количественного регулирования от температуры теплоносителя в подающей магистрали

ется требуемое по погоде количество теплоты – регулирование идеальное. Однако на втором интервале – при высоких температурах наружного воздуха – количественное регулирование реализуется с некоторым «перетоком». Исключить «перетоп» в этом случае можно за счет

снижения температуры теплоносителя на входе системы отопления, так как в этом случае диапазон применимости идеального количественного регулирования расширяется.

Список литературы

1. Соколов Е.Я. Теплофикация и тепловые сети: учебник для вузов. 7-е изд. М.: Изд-во МЭИ, 2001. 472 с.
2. Хаванов П.А. Развитие, перспективы и состояние децентрализованных систем теплоснабжения РФ // Вестник МГСУ. 2012. № 11. С. 219–226.
3. Игнатенко В.В., Боровков В.М. Анализ методов регулирования отпуска тепловой энергии потребителям // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2010. № 2-2. С. 65–71.
4. Баткова Е.В., Шмакова Л.А., Вальцева А.И. Сравнительный анализ систем теплоснабжения. [Электронный ресурс] URL: https://elar.urfu.ru/bitstream/10995/63809/1/ere_2015_015.pdf (дата обращения: 5.02.2015)
5. Ворожихин В.В. Зарубежный опыт построения систем региональной (муниципальной) энергетики. [Электронный ресурс] URL: <http://portal-energo.ru/articles/details/id/70> (дата обращения: 13.02.2010)
6. Ротов П.В. Оценка энергетической эффективности технологий количественного регулирования тепловой нагрузки на ТЭЦ // Труды Академэнерго. 2014. № 4. С. 39–50.
7. Петрущенко В.А. Обоснование пониженного температурного графика регулирования централизованных систем теплоснабжения // Новости теплоснабжения. 2015. № 8(180). С. 31–37.
8. Сапрыкин И.М. О режимах регулирования отпуска теплоты // Новости теплоснабжения. 2010. №6(июнь). С. 40–48.
9. Сканави А.Н., Махов Л.М. Отопление: учебник для вузов. М.: Издательство АСВ, 2002. 576 с.
10. Панферов В.И., Панферов С.В. О некоторых решениях проблемы управления централизованным теплоснабжением // Труды Академэнерго. 2016. № 2. С. 95–108.
11. Панферов В.И., Панферов С.В. Анализ алгоритмов регулирования систем теплоснабжения по Е.Я. Соколову // Теоретические основы теплогазоснабжения и вентиляции: Материалы Третьей Международной науч.-техн. конф. М.: МГСУ, 2009. С. 276–280.
12. Панферов В.И., Панферов С.В. Об особенностях вывода уравнений регулирования систем централизованного теплоснабжения // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2016. Т. 16, № 1. С. 21–30. DOI: 10.14529/ctcr160102.
13. Панферов С.В. Структурно-параметрический синтез адаптивной системы управления температурным режимом отапливаемых зданий: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2011. 20 с.
14. Панферов С.В., Тренин Н.А., Панферов В.И. Об одном решении задачи построения общей модели теплового режима здания и его системы отопления // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2017. Т. 17, № 3. С. 24–33. DOI: 10.14529/ctcr170303.
15. Ткачук А.Я. Проектирование систем водяного отопления: учебное пособие. Киев: Выща школа, 1989. 192 с.
16. Panferov V.I., Panferov S.V. To Solution of problem of controlling heat carrier flow rate for low-temperature heat supply // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2018. No. 451. 012102. DOI: 10.1088/1757-899X/451/1/012102.
17. Панферов С.В., Панферов В.И. Управление отоплением зданий при низкотемпературных режимах теплоснабжения // Вестник ЮУрГУ. Серия «Строительство и архитектура». 2018. Т. 18, № 3. С. 60–67. DOI: 10.14529/build180309.
18. Panferov V.I., Panferov S.V. The Heat Carrier Flow Control in Heat Transport Systems // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2016. Т. 16, № 3. С. 32–39. DOI: 10.14529/ctcr160304.
19. Панферов В.И., Гавей О.Ф. Управление температурой и расходом теплоносителя в тепловых сетях // Энергосбережение и водоподготовка. 2016. № 5 (103). С. 66–69.
20. Панферов С.В., Панферов В.И. Оптимальное управление температурой и расходом теплоносителя в тепловых сетях при переменном КПД насосов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Строительство и архитектура». 2021. Т. 21, № 2. С. 52–59. DOI: 10.14529/build210205

References

1. Sokolov, E.Ya. *Teplofikatsiya i teplovyje seti: uchebnik dlya vuzov* [District heating and heat networks: the Textbook for high schools]. Moscow: MEI Publishing, 2001. 472 p.
2. Khavanov P.A. Development, Prospects and Condition of Decentralized Heat Supply Systems in the Russian Federation. *Vestnik MGSU*. 2012;11:219–226 (In Russ.)
3. Ignatenok V.V., Borovkov V.M. [Analysis of methods for regulating the supply of thermal energy to consumers]. *Nauchno-tehnicheskie vedomosti SPbGPU* [St. Petersburg State Polytechnical University Journal]. 2010;2-2:65–71. (In Russ.)

4. Batkova E.V., Shmakova L.A., Valtseva A.I. [Comparative analysis of heat supply systems]. [*Electronic resource*] Available at: https://elar.urfu.ru/bitstream/10995/63809/1/ere_2015_015.pdf (accessed 5 February 2015) (In Russ.)
5. Vorozhikhin V.V. [Foreign experience in building regional (municipal) energy systems]. [*Electronic resource*] Available at: <http://portal-energo.ru/articles/details/id/70> (accessed 13 February 2010) (In Russ.)
6. Rotov P.V. Evaluation of the energy efficiency of the technology of quantitative regulation of thermal load on thermal station. *Transactions of Academenergo*. 2014;4:39–50 (In Russ.)
7. Petrushchenkov V.A. [Substantiation of the reduced temperature schedule for regulation of centralized heat supply systems]. *Novosti teplosnabzheniya*. [News of heat supply]. 2015;8(180):31–37. (In Russ.)
8. Saprykin I.M. [On the modes of regulation of heat supply]. *Novosti teplosnabzheniya*. [News of heat supply]. 2010;6(June):40–48 (In Russ.)
9. Skanavi A.N., Mahov L.M. *Otoplenie: uchebnik* [Heating: Textbook]. Moscow: DIA Publ.; 2002. 576 p.
10. Panferov V.I., Panferov S.V. About some solutions of district heating control problem. *Transactions of Academenergo*. 2016;2:95–108. (In Russ.)
11. Panferov V.I., Panferov S.V. [Analysis of algorithms control the heating systems according to the works of Sokolov E.Ja]. In: *Teoreticheskie osnovy teplogazosnabzheniya i ventiljacii: materialy tret'ej Mezhdunarodnoj nauch.-tehn. konf.* [Theoretical Foundations of heat and ventilation: Proceedings of the Third International scientific and engineering. Conference]. Moscow: MGRS; 2009. pp. 276–280. (In Russ.)
12. Panferov V.I., Panferov S.V. About Features of Derivation of the Regulation Equations for District Heating Systems. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*. 2015;16(1):21–30. (In Russ.) DOI: 10.14529/ctcr160102
13. Panferov S.V. *Strukturno-parametricheskij sintez adaptivnoj sistemy upravleniya temperaturnym rezhimom otaplivayemyh zdaniy. Avtoref. dis. kand. tekhn. nauk.* [Structurally-parametrical synthesis of adaptive control system for temperature control of heated buildings. Abstract of cand. sci. diss.]. Chelyabinsk: South Ural St. Univ. Publ.; 2011. 20 p.
14. Panferov S.V., Trenin N.A., Panferov V.I. About One Solution to the Problem Development of General Model of Thermal Regime of the Building and Its Heating System. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*. 2017;17(3):24–33 (In Russ.) DOI: 10.14529/ctcr170303
15. Tkachuk A.Ya. *Proyektirovaniye sistem vodyanogo otopleniya: uch. posobiye* [Design of water heating systems: study guide]. Kyiv: High School; 1989. 192 p.
16. Panferov V.I., Panferov S.V. To Solution of problem of controlling heat carrier flow rate for low-temperature heat supply. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2018;451:012102. DOI: 10.1088/1757-899X/451/1/012102.
17. Panferov S.V., Panferov V.I. Heating Management For Buildings with Low-Temperature Modes of Heat Supply. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Construction Engineering and Architecture*. 2018;18(3):60–67. (In Russ.) DOI: 10.14529/build180309
18. Panferov V.I., Panferov S.V. The Heat Carrier Flow Control in Heat Transport Systems. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*. 2016;16(3):32–39. DOI: 10.14529/ctcr160304.
19. Panferov V.I., Gavey O.F. Control of temperature and coolant flow rate in heating systems. *Ènergobereženie i Vodopodgotovka* [Energy saving and water conditioning]. 2016;5:66–69. (In Russ.)
20. Panferov S.V., Panferov V.I. Optimum Control of Temperature and Flow of the Heating Agent in Heating Networks with Variable Efficiency of Pumps. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Construction Engineering and Architecture*. 2021;21(2):52–59. (In Russ.) DOI: 10.14529/build210205

Информация об авторах:

Панферов Сергей Владимирович, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Градостроительство, инженерные сети и системы», Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; tgsiv@mail.ru.

Панферов Владимир Иванович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Информационно-аналитическое обеспечение управления в социальных и экономических системах», Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия.

Information about the authors:

Sergey V. Panferov, Cand. Sci. in Engineering, Associate Professor the Department of Town Planning, Engineering Systems and Networks, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; tgsiv@mail.ru

Vladimir I. Panferov, Doc. Sci. in Engineering, Professor of the Department of Informational and Analytical Support of Control in Social and Economic Systems, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia.

Статья поступила в редакцию 23.06.2023, принята к публикации 30.06.2023.

The article was submitted 23.06.2023; approved after reviewing 30.06.2023.