

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

Научная статья
УДК 697.34
DOI: 10.14529/build230306

К ВЫВОДУ УРАВНЕНИЙ РЕГУЛИРОВАНИЯ И АНАЛИЗУ ОСОБЕННОСТЕЙ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ ОТКРЫТЫХ СИСТЕМ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ БЕЗ РЕГУЛЯТОРОВ РАСХОДА НА АБОНЕНТСКИХ ВВОДАХ

С.В. Панферов, *tgshiv@mail.ru*

В.И. Панферов

Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

Аннотация. Проблемы энергосбережения и повышения качества в жилищно-коммунальной сфере в настоящее время являются весьма актуальными. Решение этих задач возможно прежде всего за счет внедрения автоматизированных систем управления и реализации в этих системах оптимальных алгоритмов контроля и регулирования процессов отопления и теплоснабжения в целом. Рассматривается задача изучения особенностей гидравлического режима открытых систем теплоснабжения без регуляторов расхода на абонентских вводах. Задача достаточно актуальна, так как заметное количество тепловых сетей является открытым, запрет на их эксплуатацию отменен Федеральным законом № 438-ФЗ от 30.12.2021 года. Выполнен анализ и обобщение литературных данных по проблеме открытых тепловых сетей. Указано, что их гидравлический режим отличается большой сложностью, его характерные особенности в известных литературных источниках недостаточно подробно и недостаточно отчетливо разясняются, что не способствует повышению как качества эксплуатации открытых сетей, так и качеству учебного процесса в вузах. В данной работе приведен детальный вывод основных соотношений, характеризующих гидравлический режим, при этом предполагалось, что анализируемая тепловая сеть настроена по так называемому принципу «горизонтальной дорожки С.А. Чистовича». Это позволяет свести расчет реальной сети к расчету гидравлического режима одноконтурной эквивалентной тепловой сети, причем при этом использовали законы Кирхгофа для гидравлических цепей, которые, в отличие от электрических цепей, являются всегда нелинейными цепями. Проведен анализ полученных решений для некоторых конкретных случаев, в частности, исследовано влияние величины водоразбора на режим отопления абонентов при различных характеристиках системы теплоснабжения и температуры наружного воздуха. Приведенные алгоритмы могут быть использованы как в составе алгоритмического обеспечения автоматизированных систем управления теплоснабжением, так и в учебных целях.

Ключевые слова: открытая система теплоснабжения, гидравлический режим, эквивалентная гидравлическая схема, расход воды на отопление, гидравлическое сопротивление, горячее водоснабжение, уравнение регулирования

Для цитирования. Панферов С.В., Панферов В.И. К выводу уравнений регулирования и анализу особенностей гидравлических режимов открытых систем теплоснабжения без регуляторов расхода на абонентских вводах // Вестник ЮУрГУ. Серия «Строительство и архитектура». 2023. Т. 23, № 3. С. 47–56. DOI: 10.14529/build230306

DERIVATION OF THE EQUATIONS OF REGULATION AND ANALYSIS OF THE HYDRAULIC MODES OF OPEN HEAT SUPPLY SYSTEMS WITHOUT FLOW REGULATORS AT THE SERVICE CONNECTION

S.V. Panferov, tgsiv@mail.ru

V.I. Panferov

South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

Abstract. Energy efficiency and improved quality are currently very relevant issues in the housing and communal sector. These can be addressed, first of all, by introducing automated control systems and implementing optimized algorithms for monitoring and regulating heating and heat supply processes in general. The task of studying the features of the hydraulic regime of open heat supply systems without flow controllers at subscriber inputs is considered. Since a significant number of heating networks are open, the ban on their operation was reversed by Federal Law No. 438-F3 of December 30, 2021. Existing literature on open heating networks was analyzed and summarized. The hydraulic regime of open heating networks is very complex; its characteristic features are not sufficiently detailed and not clearly explained in the literature. This introduces difficulties in improving the quality of operation of open networks and university educational programs. In this paper, a detailed derivation of the main relationships characterizing the hydraulic regime is provided, with the assumption that the analyzed heat network is configured according to S.A. Chistovich's horizontal track principle. This makes it possible to reduce the calculation of a real operating network to a calculation of the hydraulic regime of a single-loop equivalent heat network using Kirchhoff's laws for hydraulic circuits, which, unlike electrical circuits, are always non-linear circuits. The obtained solutions for specific cases were analyzed; in particular, the influence of the water intake on the heating mode of consumers was studied for various characteristics of the heat supply system and outdoor temperature. The aforementioned algorithms can be used both for the algorithmic support of automated heat supply control systems and for educational purposes.

Keywords: open heat supply system, hydraulic mode, equivalent hydraulic circuit, water consumption for heating, hydraulic resistance, hot water supply, control equation

For citation. Panferov S.V., Panferov V.I. Derivation of the equations of regulation and analysis of the hydraulic modes of open heat supply systems without flow regulators at the service connection. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Construction Engineering and Architecture*. 2023;23(3):47–56. (in Russ.). DOI: 10.14529/build230306

Введение. Известно, что открытые системы теплоснабжения на базе теплоэлектроцентралей (ТЭЦ) отличаются высокой энергетической эффективностью «...прежде всего потому, что позволяют максимально реализовать эффект комбинированной выработки электрической и тепловой энергии за счёт использования низкопотенциальных источников теплоты для подогрева больших количеств подпиточной воды теплосети на ТЭЦ» [1]. В [1] также указывается, что «...применение открытых систем полностью соответствует положениям федеральных законов об энергосбережении и о теплоснабжении», что существовавшие преимущества закрытых систем перед открытыми «...в современных условиях стали минимальными», что «...выработка электроэнергии на тепловом потреблении, определяющая энергетическую эффективность ТЭЦ, на станциях, к которым подключены закрытые системы теплоснабжения, всегда гораздо ниже, чем на ТЭЦ с открытыми системами».

Вместе с тем объективности ради следует также отметить, что закрытые системы по сравнению с открытыми характеризуются рядом своих преимуществ, которые могут быть и востребованы в определенных условиях, поэтому, учитывая

в том числе и данные работ [1–5], можно заключить, что как закрытые, так и открытые системы теплоснабжения имеют полное право на существование, что проблема выбора типа системы теплоснабжения должна решаться «...прежде всего, исходя из энергетической эффективности теплофикационных систем и с учётом качества исходной воды в источниках водоснабжения конкретных городов» [1]. Укажем также дополнительно, что к настоящему времени запрет на использование существующих открытых систем теплоснабжения отменен [6], что и обуславливает актуальность рассмотрения вопросов, связанных с их эксплуатацией и эффективностью функционирования [7, 8].

Постановка задачи. Как это хорошо известно, «...объективным недостатком открытых систем ... является сложный гидравлический режим из-за переменного расхода воды на ГВС» (примечание: ГВС – горячее водоснабжение) [1], что «...нестабильность гидравлического режима является очень значимым отрицательным эксплуатационным фактором» [4]. Поэтому рассмотрим вопросы, связанные с выводом и детальной «расшифровкой» некоторых соотношений для гидравлических режимов открытых систем теплоснабже-

ния без регуляторов расхода на абонентских вводах. Эти соотношения могут быть использованы как для наполнения алгоритмического обеспечения автоматизированных систем управления теплоснабжением – при использовании таких систем проблемы поддержания требуемого гидравлического режима практически устраняются, так и в учебных целях – в известных литературных источниках [9–12] как детали вывода, так и их обоснованность, по существу, не приводятся и не разъясняются в должной мере. Кроме того, их анализ не является достаточно подробным. К месту также заметим, что, как это нам представляется, данные соотношения были предложены в свое время С.А. Чистовичем [9–12].

Используемые допущения. Для управляемости сеть должна быть настроена следующим обра-

зом [12]: 1) полные напоры перед элеваторами всех абонентских вводов при выключенном водоразборе должны быть одинаковыми; 2) полные напоры после систем отопления также при выключенном водоразборе должны быть одинаковыми у всех абонентов; 3) водоразбор на ГВС из подающих линий абонентских вводов должен осуществляться перед элеваторами, а из обратных – после отопительных установок; 4) у всех абонентов отношение расчетных расходов воды на ГВС и отопление должно быть приблизительно одинаково.

Условия 1 и 2 (это так называемый принцип «горизонтальной дорожки С.А. Чистовича» [12]) обеспечиваются подбором диафрагм, устанавливаемых на подающих и обратных линиях абонентских вводов (рис.1). В целом вышеотмеченное иллюстрируется рис. 1.

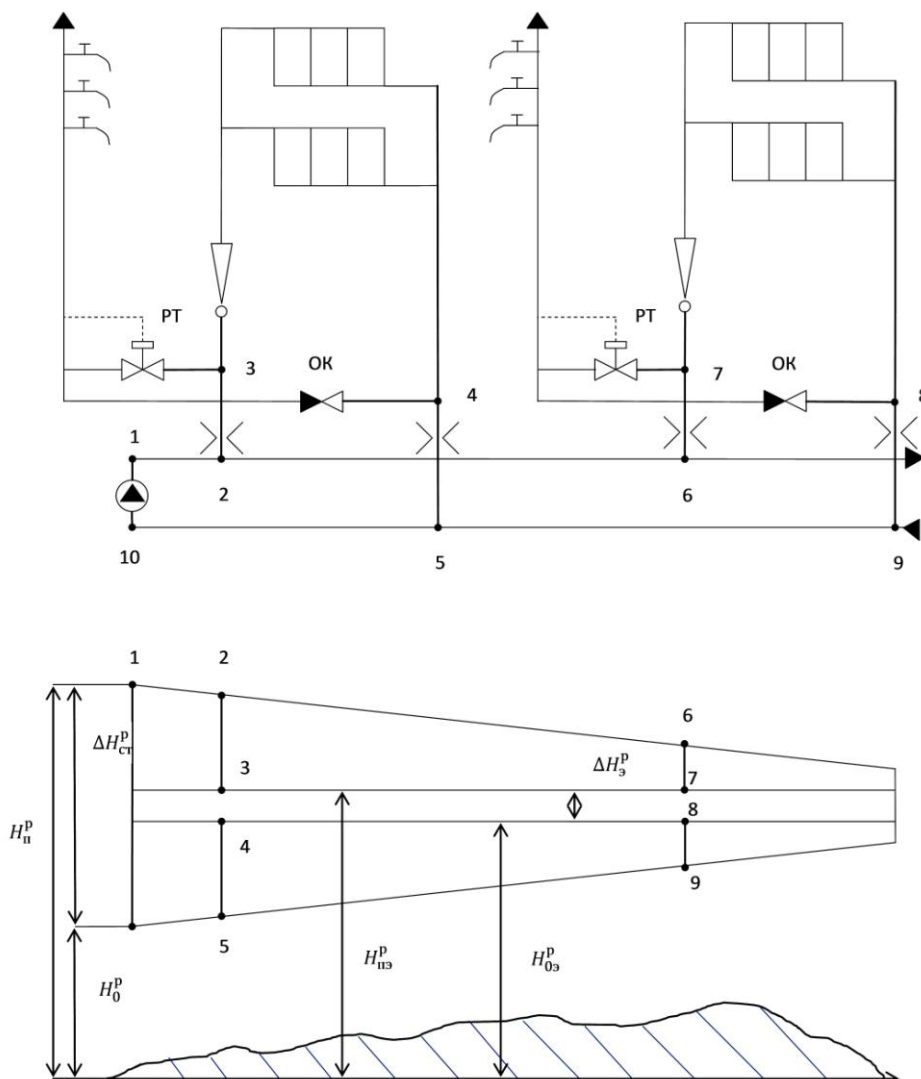


Рис. 1. Схема системы теплоснабжения и пьезометрический график при отсутствии водоразбора: 1–2 – пьезометрический график участка 1–2 подающей магистрали теплосети; 2–3 – пьезометрический график участка 2–3 подающей линии 1-го абонентского ввода; (требуемое падение напора обеспечивается подбором диафрагмы); 4–5 – пьезометрический график участка 4–5 обратной линии 1-го абонентского ввода; 5–10 пьезометрический график участка 5–10 обратной магистрали участка теплосети. Для 2-го абонента используются аналогичные обозначения графиков и участков

H_{II}^P и H_O^P – полные напоры в подающем и обратном коллекторах источника теплоснабжения; ΔH_{CT}^P – разность напоров между подающим и обратным коллекторами; $H_{IIЭ}^P$ – полный напор перед элеваторами абонентских вводов; $\Delta H_Э^P$ – падение напора в системах отопления (СО) – элеваторах; $H_{OЭ}^P$ – полный напор после элеваторов – СО. Верхний индекс «р» используется для обозначения расчетного режима (при отсутствии водоразбора). ОК – обратный клапан, РТ – регулятор температуры воды в системе горячего водоснабжения.

В целом используемые на рис. 1 обозначения являются общепринятыми.

Решение задачи. При выполнении этих условий данную теплоту можно заменить эквивалентной сетью с одним эквивалентным абонентом, расход воды у которого равен сумме расходов всех абонентов (рис. 2).

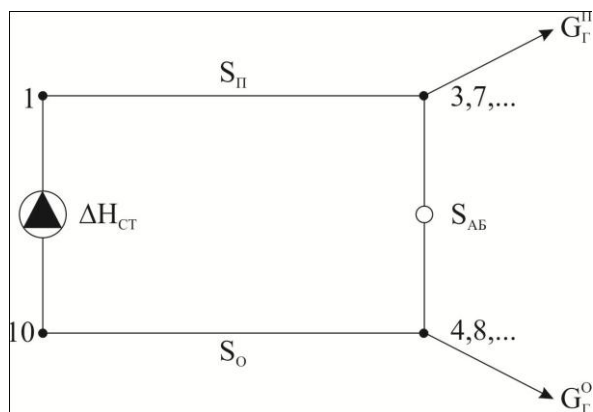


Рис. 2. Схема эквивалентной тепловой сети

Считается, что в сети имеет место квадратичный гидравлический режим, кроме того, справедливы и законы Кирхгофа для гидравлических цепей [13–15].

Параметры расчетного режима позволяют определить гидравлические сопротивления эквивалентного абонента S_{AB} и подающей S_{II} и обратной S_O магистралей эквивалентной тепловой сети:

$$S_{II} = \frac{(H_{II}^P - H_{IIЭ}^P) \cdot \rho g}{(G_O^P)^2}; \quad (1)$$

$$S_{AB} = \frac{\Delta H_Э^P \cdot \rho g}{(G_O^P)^2}; \quad (2)$$

$$S_O = \frac{(H_{OЭ}^P - H_O^P) \cdot \rho g}{(G_O^P)^2}. \quad (3)$$

Здесь G_O^P – расчетный расход воды на отопление всех реальных абонентов. Кроме того, для общего сопротивления сети можно записать сле-

дующие соотношения: $S = S_{II} + S_{AB} + S_O \rightarrow 1 = S_{II} / S + S_{AB} / S + S_O / S$

Введем также и следующие обозначения:

$$\gamma = \frac{G_{II}^P}{G_O^P}; \quad \beta = \frac{G_{II}^P}{G_{II}^P}; \quad \varphi = \frac{G_O}{G_O^P} \quad \text{– здесь и далее } G_{II}^P,$$

G_{II}^O и G_{II}^P соответственно расход воды на ГВС из подающей и обратной магистрали и общий расход воды на ГВС.

Выразим G_{II}^P , G_{II}^O , а также и потерю напора на эквивалентном абоненте через G_O^P :

$$G_{II}^P = \beta G_{II}^P = \beta \gamma G_O^P; \quad (4)$$

$$G_{II}^O = G_{II}^P - G_{II}^P = \gamma G_O^P - \beta \gamma G_O^P = \gamma(1 - \beta) G_O^P; \quad (5)$$

$$\Delta H_{AB} = S_{AB} G_O^2 = S_{AB} (\varphi G_O^P)^2 = S_{AB} \varphi^2 (G_O^P)^2. \quad (6)$$

Расход воды по подающей линии эквивалентной сети в нерасчетном режиме согласно 1-му закону Кирхгофа будет равен

$$G_O + G_{II}^P = \varphi G_O^P + \beta \gamma G_O^P = (\varphi + \beta \gamma) G_O^P, \quad (7)$$

в соответствии с этим потеря напора на этом участке будет следующей:

$$\Delta H_{II} = S_{II} (\varphi + \beta \gamma)^2 (G_O^P)^2. \quad (8)$$

Расход воды по обратной линии эквивалентной сети в нерасчетном режиме будет таков:

$$G_O - G_{II}^O = \varphi G_O^P - \gamma(1 - \beta) G_O^P = [\varphi - \gamma(1 - \beta)] G_O^P. \quad (9)$$

Поэтому потеря напора на обратной линии будет определяться следующим выражением:

$$\Delta H_O = S_O [\varphi - \gamma(1 - \beta)]^2 (G_O^P)^2. \quad (10)$$

Таким образом, для всей эквивалентной тепловой сети можно записать

$$\Delta H_{CT} = \Delta H_{II} + \Delta H_{AB} + \Delta H_O = \{(\varphi + \beta \gamma)^2 S_{II} + \varphi^2 S_{AB} + [\varphi - \gamma(1 - \beta)]^2 S_O\} (G_O^P)^2. \quad (11)$$

Через $\Delta H_{CT}^P = S(G_O^P)^2$ данное соотношение можно переписать так:

$$\Delta H_{CT} = \Delta H_{CT}^P \{(\varphi + \beta \gamma)^2 S_{II} / S + \varphi^2 S_{AB} / S + [\varphi - \gamma(1 - \beta)]^2 S_O / S\}. \quad (12)$$

Данное уравнение показывает, как следует изменять разность напоров на ТЭЦ в зависимости от величины водоразбора – коэффициент γ , от режима отопления – коэффициент φ и температуры наружного воздуха – коэффициент β .

Как это нетрудно показать, коэффициент β является функцией температуры воды в подающей и обратной магистралях или, что то же самое при качественном регулировании, – температуры наружного воздуха.

В самом деле, теплота, содержащаяся в общем расходе воды на ГВС, должна равняться теплоте в расходе воды на ГВС из подающей линии и теплоте в расходе воды на ГВС из обратной линии:

$$cG_{\Gamma}t_{\Gamma} = cG_{\Gamma}^{\Pi}t_{\Pi} + cG_{\Gamma}^{\text{O}}t_{\text{O}}. \quad (13)$$

Поэтому

$$G_{\Gamma}^{\text{O}} = G_{\Gamma} - G_{\Gamma}^{\Pi} \Rightarrow G_{\Gamma}t_{\Gamma} = G_{\Gamma}^{\Pi}t_{\Pi} + (G_{\Gamma} - G_{\Gamma}^{\Pi})t_{\text{O}} \Rightarrow \\ \Rightarrow t_{\Gamma} = \beta t_{\Pi} + (1-\beta)t_{\text{O}} \Rightarrow \beta = \frac{t_{\Gamma} - t_{\text{O}}}{t_{\Pi} - t_{\text{O}}}.$$

Здесь $t_{\Gamma} = \text{const}$ – температура воды в системе ГВС, а температуры теплоносителя в подающей t_{Π} и обратной t_{O} магистралях являются функциями температуры наружного воздуха.

Если поставлена задача – обеспечить расчетный режим отопления (это когда $\varphi=1$), то алгоритм управления напорами на ТЭЦ в зависимости от режима водоразбора и температуры наружного воздуха таков

$$\Delta H_{\text{CT}} = \Delta H_{\text{CT}}^{\text{P}} \{ (1+\beta\gamma)^2 S_{\Pi} / S + S_{\text{AB}} / S + \\ + [1-\gamma(1-\beta)]^2 S_{\text{O}} / S \}. \quad (14)$$

Если при этом водоразбора нет (коэффициент $\gamma=0$), то $\Delta H_{\text{CT}} = \Delta H_{\text{CT}}^{\text{P}} \{ S_{\Pi} / S + S_{\text{AB}} / S + S_{\text{O}} / S \} = \Delta H_{\text{CT}}^{\text{P}}$ – что так и должно быть.

При водоразборе только из подающей линии (температура наружного воздуха такая!) и при расчетном режиме отопления ($\beta=1$ и $\varphi=1$) в зависимости от величины водоразбора γ должно быть

$$\Delta H_{\text{CT}} = \Delta H_{\text{CT}}^{\text{P}} \{ (1+\gamma)^2 S_{\Pi} / S + S_{\text{AB}} / S + S_{\text{O}} / S \} = \\ = |S_{\text{AB}} / S + S_{\text{O}} / S = 1 - S_{\Pi} / S| = \\ = \Delta H_{\text{CT}}^{\text{P}} \{ 1 + \gamma(2+\gamma) S_{\Pi} / S \}. \quad (15)$$

Из данной формулы следует, что с увеличением величины водоразбора γ для обеспечения расчетного режима отопления необходимо повышать разность напоров между подающим и обратным коллекторами ТЭЦ. Это и вполне понятно: с увеличением γ растет расход воды по подающей магистрали, следовательно, растет и потеря напора на этой линии, потеря напора на абонентском вводе и обратной линии при этом будет одной и той же, так как по этим элементам расход воды всегда равен G_{O}^{P} . Поэтому для компенсации растущей потери напора в сети необходимо увеличивать ΔH_{CT} .

При водоразборе только из обратной линии и при расчетном режиме отопления ($\beta=0$ и $\varphi=1$) в зависимости от величины водоразбора γ должно быть

$$\Delta H_{\text{CT}} = \Delta H_{\text{CT}}^{\text{P}} \{ S_{\Pi} / S + S_{\text{AB}} / S + [1-\gamma]^2 S_{\text{O}} / S \} = \\ = |S_{\Pi} / S + S_{\text{AB}} / S = 1 - S_{\text{O}} / S| = \\ = \Delta H_{\text{CT}}^{\text{P}} \{ 1 + \gamma(\gamma-2) S_{\text{O}} / S \}. \quad (16)$$

Коэффициент γ по физическому смыслу может изменяться только в пределах от нуля до еди-

ницы, поэтому фигурная скобка в (16) при увеличении γ от нуля до единицы будет уменьшаться от 1 до $1 - S_{\text{O}} / S$, следовательно, с увеличением водоразбора для обеспечения расчетного расхода воды на отопление ΔH_{CT} необходимо уменьшать. Это также вполне понятно: так как по подающей линии и через абонентский ввод расход один и тот же и равен G_{O}^{P} , то и потеря напора на этих элементах всегда одна и та же, потеря напора на обратной магистрали будет уменьшаться из-за того, что вода на ГВС забирается из этой линии и расход воды по ней будет падать.

Из уравнения (12) следует:

$$\Delta H_{\text{CT}} / \Delta H_{\text{CT}}^{\text{P}} = \varphi^2 S_{\Pi} / S + 2\beta\gamma\varphi S_{\Pi} / S + \\ + \beta^2 \gamma^2 S_{\Pi} / S + \varphi^2 S_{\text{AB}} / S + \varphi^2 S_{\text{O}} / S - \\ - 2\varphi\gamma(1-\beta) S_{\text{O}} / S + \gamma^2 (1-\beta)^2 S_{\text{O}} / S. \quad (17)$$

Или же

$$\Delta H_{\text{CT}} / \Delta H_{\text{CT}}^{\text{P}} = \\ = \varphi^2 + 2\varphi[\beta\gamma S_{\Pi} / S - \gamma(1-\beta) S_{\text{O}} / S] + \\ + \beta^2 \gamma^2 S_{\Pi} / S + \gamma^2 (1-\beta)^2 S_{\text{O}} / S. \quad (18)$$

Выделим полный квадрат по φ , введя предварительно обозначение $[\beta\gamma S_{\Pi} / S - \gamma(1-\beta) S_{\text{O}} / S] = [\cdot]$, в результате получим

$$\varphi^2 + 2\varphi[\cdot] + [\cdot]^2 - [\cdot]^2 + \beta^2 \gamma^2 S_{\Pi} / S + \\ + \gamma^2 (1-\beta)^2 S_{\text{O}} / S - \Delta H_{\text{CT}} / \Delta H_{\text{CT}}^{\text{P}} = 0. \quad (19)$$

Или же

$$\{ \varphi + [\cdot] \}^2 = \Delta H_{\text{CT}} / \Delta H_{\text{CT}}^{\text{P}} + [\cdot]^2 - \\ - \beta^2 \gamma^2 S_{\Pi} / S - \gamma^2 (1-\beta)^2 S_{\text{O}} / S. \quad (20)$$

Поскольку нам интересен только неотрицательный корень этого уравнения, то будем иметь $\varphi = -[\cdot] +$

$$+ \sqrt{\Delta H_{\text{CT}} / \Delta H_{\text{CT}}^{\text{P}} + [\cdot]^2 - \beta^2 \gamma^2 S_{\Pi} / S - \gamma^2 (1-\beta)^2 S_{\text{O}} / S}. \quad (21)$$

Исследование полученного решения. Рассмотрим, какое влияние водоразбор на нужды ГВС оказывает на гидравлический режим отопительных установок при постоянном напоре на коллекторах источника теплоснабжения.

При водоразборе только из подающей линии ($\beta=1$) и при постоянном напоре на коллекторах источника ($\Delta H_{\text{CT}} / \Delta H_{\text{CT}}^{\text{P}} = 1$) формула (21) принимает вид

$$\varphi = -\gamma \cdot \frac{S_{\Pi}}{S} + \sqrt{1 + \gamma^2 \cdot \left(\frac{S_{\Pi}}{S} \right)^2 - \gamma^2 \cdot \left(\frac{S_{\Pi}}{S} \right)}. \quad (22)$$

Графики данной зависимости для различных значений величины водоразбора (коэффициент γ) и различных значений относительного сопротивления подающей магистрали S_{Π} / S приведены на рис. 3.

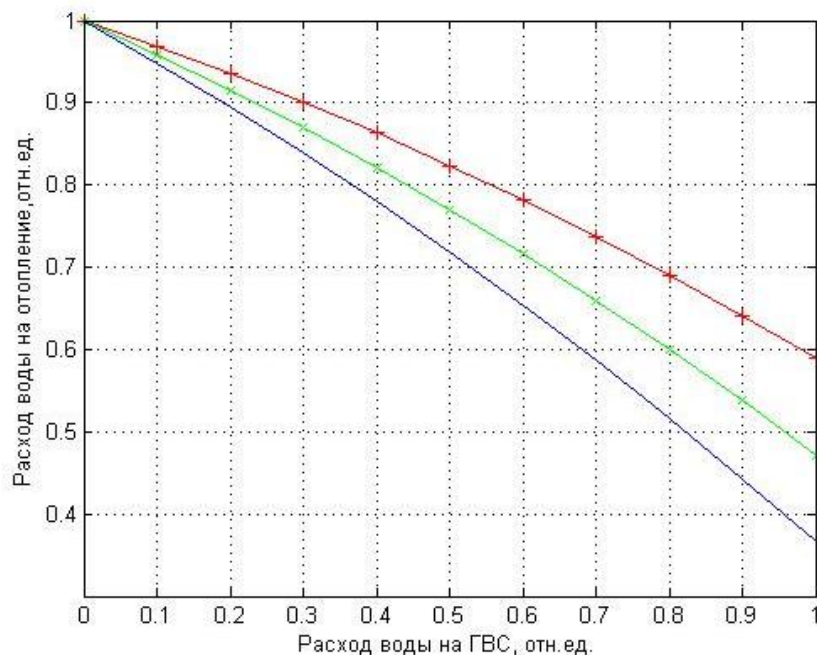


Рис. 3. Кривые зависимости φ от γ при $\beta = 1$

Здесь для верхней кривой $S_{\Pi} / S = 0,3$, для средней $S_{\Pi} / S = 0,4$ и для нижней кривой $S_{\Pi} / S = 0,5$.

Как видно из рис. 3, при $\Delta H_{CT} / \Delta H_{CT}^P = 1$ увеличение водоразбора из подающей линии приводит к уменьшению расхода воды на отопление, причем тем значительнее, чем больше относительное сопротивление подающей магистрали.

Это и вполне понятно, так как

$$\frac{\partial \varphi}{\partial \gamma} = -\frac{S_{\Pi}}{S} + \gamma[1 + \gamma^2 \cdot \left(\frac{S_{\Pi}}{S}\right)^2 - \gamma^2 \cdot \left(\frac{S_{\Pi}}{S}\right)^{-1} \cdot \frac{S_{\Pi}}{S} \left(\frac{S_{\Pi}}{S} - 1\right)] < 0. \quad (23)$$

Однако при этом общий расход по подающей линии $(G_O + G_{\Gamma}) = (\varphi + \gamma)G_O^P$ растет, так как

$$\begin{aligned} \frac{\partial(G_O + G_{\Gamma})}{\partial \gamma} &= \left\{ \gamma \left(1 - \frac{S_{\Pi}}{S}\right) + \gamma[1 + \gamma^2 \cdot \left(\frac{S_{\Pi}}{S}\right)^2 - \right. \\ &\left. - \gamma^2 \cdot \left(\frac{S_{\Pi}}{S}\right)^{-1} \cdot \frac{S_{\Pi}}{S} \left(\frac{S_{\Pi}}{S} - 1\right)] \right\} G_O^P > 0; \\ \frac{\partial(G_O + G_{\Gamma})}{\partial \gamma} &= \frac{\partial(\varphi + \gamma)G_O^P}{\partial \gamma} = \left(\frac{\partial \varphi}{\partial \gamma} + 1\right)G_O^P > 0. \quad (24) \end{aligned}$$

Здесь нужно учитывать, что $\left|\frac{\partial \varphi}{\partial \gamma}\right| < 1$ и $\frac{\partial \varphi}{\partial \gamma} < 0$.

При водоразборе только из обратной линии ($\beta = 0$) и при постоянном напоре на коллекторах

источника ($\Delta H_{CT} / \Delta H_{CT}^P = 1$) относительный расход воды на отопление будет вычисляться по следующей формуле:

$$\varphi = \gamma \cdot \frac{S_O}{S} + \sqrt{1 + \gamma^2 \cdot \left(\frac{S_O}{S}\right)^2} - \gamma^2 \cdot \frac{S_O}{S}. \quad (25)$$

Данная зависимость иллюстрируется рис. 4.

Здесь для верхней кривой $S_O / S = 0,5$, для средней $S_O / S = 0,4$ и для нижней кривой $S_O / S = 0,3$.

Как видно из рис. 4, увеличение водоразбора из обратной линии приводит к увеличению расхода воды на отопление (наблюдается так называемый «перетоп»). При этом чем больше относительное сопротивление обратной магистрали, тем значительнее «перетоп». Объясняется это тем, что в данном случае

$$\begin{aligned} \frac{\partial \varphi}{\partial \gamma} &= \frac{S_O}{S} + \gamma[1 + \gamma^2 \cdot \left(\frac{S_O}{S}\right)^2 - \\ &- \gamma^2 \cdot \left(\frac{S_O}{S}\right)^{-1} \cdot \frac{S_O}{S} \left(\frac{S_O}{S} - 1\right)] > 0. \quad (26) \end{aligned}$$

При $\frac{S_O}{S} = 0,5$ $\frac{\partial \varphi}{\partial \gamma} = 0,5 - \frac{0,25\gamma}{\sqrt{1 - 0,25\gamma^2}}$, если

учесть, что $0 \leq \gamma \leq 1$, то $0,2113 \leq \frac{\partial \varphi}{\partial \gamma} \leq 0,5$.

При $\frac{S_O}{S} = 0,3$ $\frac{\partial \varphi}{\partial \gamma} = 0,3 - \frac{0,21\gamma}{\sqrt{1 - 0,21\gamma^2}}$, если

учесть, что $0 \leq \gamma \leq 1$, то $0,0637 \leq \frac{\partial \varphi}{\partial \gamma} \leq 0,3$.

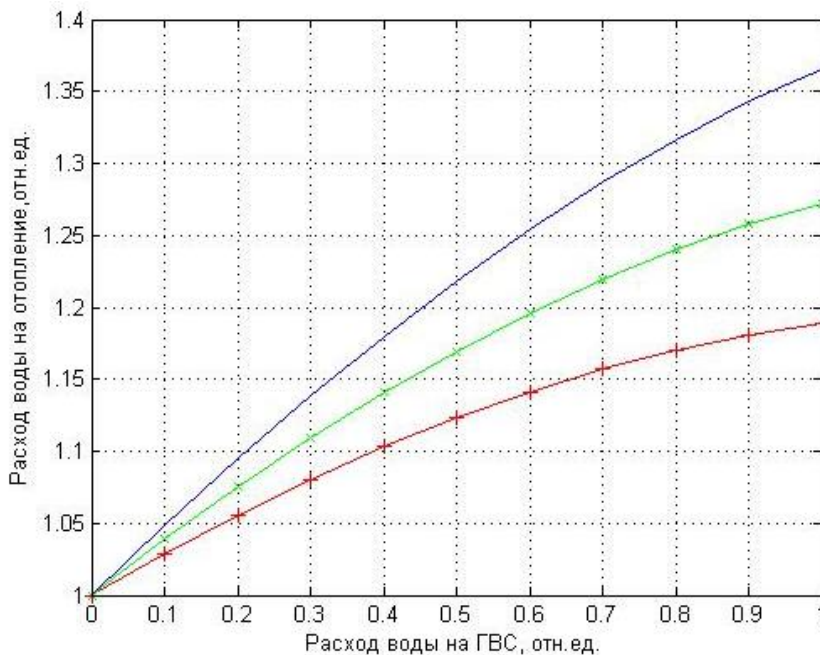


Рис. 4. Кривые зависимости ϕ от γ при $\beta = 0$

Далее выясним, какой вид имеет график уравнения (21) при $\beta = 0,4$, $\Delta H_{CT} = \Delta H_{CT}^P = \text{const}$ для следующих диапазонов изменения относительных сопротивлений подающей и обратной магистралей $0 \leq S_{II} / S \leq 0,5$ и $0 \leq S_O / S \leq 0,5$. В [12] утвержда-

ется, что в этом случае $\phi \approx 1$, т. е. расход воды на отопление примерно равен расчетному значению, однако при этом никаких конкретных данных не приводится.

На рис. 5 для кривой, отмеченной знаком «плюс», $S_{II} / S = S_O / S = 0,2$, для кривой, отмечен-

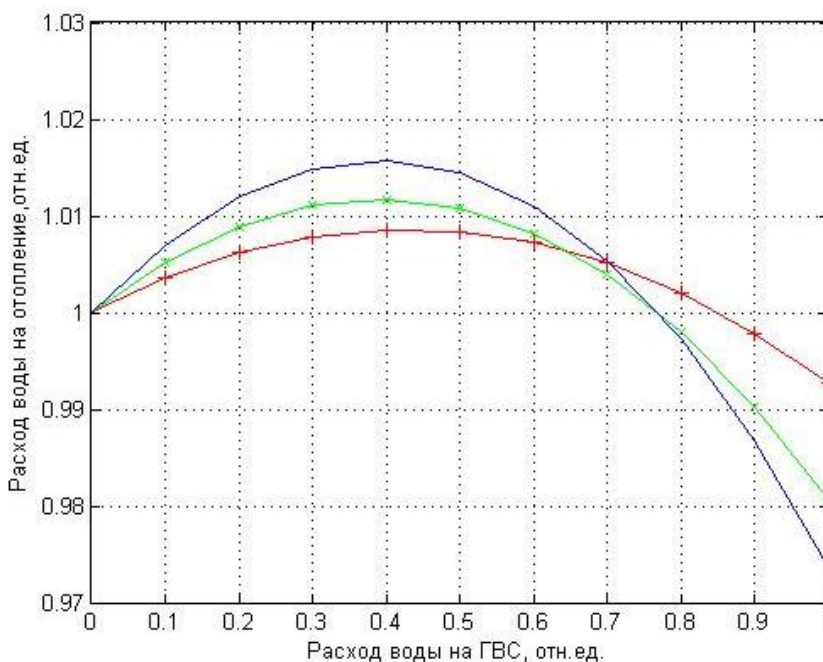


Рис. 5. График уравнения (21) при $\beta = 0,4$ при одинаковых сопротивлениях магистралей

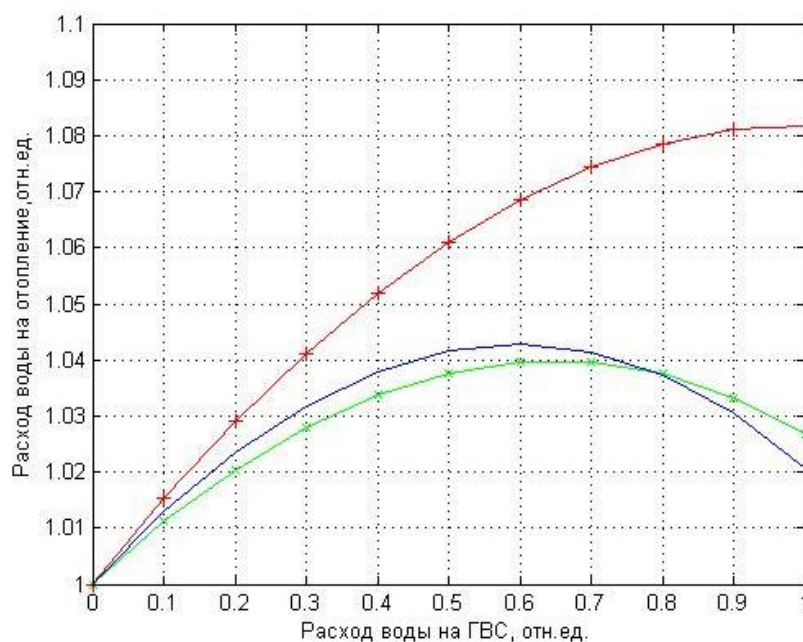


Рис. 6. График уравнения (21) при $\beta = 0,4$
при неодинаковых сопротивлениях магистралей

ной крестиками, $S_{II}/S = S_O/S = 0,3$ и для 3-й кривой $S_{II}/S = S_O/S = 0,4$.

Как видно из рис. 5, погрешность поддержания расчетного расхода воды на отопление в рассмотренном случае не превышает 3 %, что вполне удовлетворительно. Однако при этом следует заметить, что $\beta = 0,4$ лишь при определенной температуре наружного воздуха. Здесь также следует отметить, что чем больше относительное сопротивление магистралей, тем больше и погрешность.

На рис. 6 для кривой, отмеченной знаком «плюс», $S_{II}/S = 0,2; S_O/S = 0,4$, для кривой, отмеченной крестиками, $S_{II}/S = 0,3; S_O/S = 0,4$ и для 3-й кривой $S_{II}/S = 0,4; S_O/S = 0,5$.

Как видно из рис. 6, погрешность поддержания расчетного расхода воды на отопление уже может достигать почти 9 %, причем эта погреш-

ность тем больше, чем больше разность между сопротивлениями магистралей сети.

Выводы

Рассмотрен вывод соотношений для гидравлического режима открытых тепловых сетей, настроенных по принципу «горизонтальной дорожки С.А. Чистовича». Проведен анализ полученных решений для некоторых конкретных случаев, в частности, исследовано влияние величины водоразбора на режим отопления абонентов при различных характеристиках системы теплоснабжения и температуры наружного воздуха. Полученные уравнения могут быть использованы как для наполнения алгоритмического обеспечения автоматизированных систем управления теплоснабжением, так и в учебных целях – в известных литературных источниках [9–12] как детали вывода, так и их обоснованность, по существу, не приводятся и не разъясняются в должной мере.

Список литературы

1. Шарапов В.И. Проблемы трансформации открытых систем теплоснабжения в закрытые // Сантехника, отопление, кондиционирование. 2019. № 7. С. 43–47.
2. Риполь-Сарагосси Л.Ф., Кравченко Г.М., Бабенков В.И. Регулирование параметров теплоносителя открытых систем теплоснабжения // Новости теплоснабжения. 2004. № 10. С. 38–39.
3. Хоничев Ю.В., Псаров С. А., Шумилин Е. В. Особенности решения задачи определения фактического потокораспределения в системах теплоснабжения с открытым водоразбором // Вестник ТОГУ. 2008. № 1(8). С. 211–222.
4. Странадко И.М., Рожков Р.Ю., Кийски А.В. О проблемах открытых систем теплоснабжения // Новости теплоснабжения. 2013. № 1. С. 18–20.
5. Гашо Е.Г., Пузаков В.С., Гужов С.В. Анализ проблем и тенденций развития систем теплоснабжения крупных городов России // Теплоэнергетика. 2021. № 3. С. 75–88. DOI: 10.1134/S0040363621020028
6. Федеральный закон от 30 декабря 2021 г. № 438-ФЗ «О внесении изменений в Федеральный закон «О теплоснабжении».

7. Иванов С.А., Батухтин А.Г., Маккавеев В.В. Методика расчета параметров потребителя при качественно-количественном регулировании в открытых системах централизованного теплоснабжения // Промышленная энергетика. 2008. № 4. С. 32–34.
8. Маккавеев В.В. Оптимизация отпуска теплоты от ТЭЦ при качественно-количественном регулировании в открытых системах теплоснабжения: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Чита: Изд-во ЧГУ, 2009. 24 с.
9. Чистович С.А. Гидравлический режим открытых тепловых сетей с переменным расходом воды. М.: Изд-во МКХ РСФСР, 1955. 96 с.
10. Чистович С.А. Гидравлические и тепловые режимы систем централизованного теплоснабжения // Сб. докл. V Международной конф. по централизованному теплоснабжению. Киев: Изд-во КПИ, 1982. С. 32–42.
11. Автоматизированные системы теплоснабжения и отопления / С.А. Чистович, В.К. Аверьянов, Ю.Я. Темпель, С.И. Быков. Л.: Стройиздат, 1987. 235 с.
12. Соколов Е.Я. Теплофикация и тепловые сети: учебник для вузов: 7 изд. М.: Изд-во МЭИ, 2001. 472 с.
13. Методы и алгоритмы расчета тепловых сетей / В.Я. Хасилев, А.П. Меренков, Б.М. Каганович и др. М.: Энергия, 1978. 176 с.
14. Меренков А.П., Хасилев В.Я. Теория гидравлических цепей. М.: Наука, 1985. 278 с.
15. Михайловский Е.А. Разработка и апробация технологии объектно-ориентированного моделирования гидравлических цепей на примере задач потокораспределения: дис. ... канд. техн. наук. Иркутск: Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева, 2018. 142 с.

References

1. Sharapov V.I. Problems of transformation open heating systems to closed. *Plumbing, Heating, Air-Conditioning*. 2019;7:43–47. (in Russ.)
2. Ripoll-Zaragossi L.F., Kravchenko G.M., Babenkov V.I. [Regulation of the parameters of the coolant of open heat supply systems]. *Novosti teplosnabzheniya*. [News of heat supply]. 2004;10:38–39. (in Russ.)
3. Khonichev Yi.I., Psarov S.A., Shumilin E.V. Features in finding the actual heat-transfer agent consumption in heat systems with an open water consumption. *Bulletin of PNU*. 2008;1(8):211–222. (in Russ.)
4. Strenadko I.M., Rozhkov R. Yu., Kiyski A.V. [On the problems of open heat supply systems]. *Novosti teplosnabzheniya* [News of heat supply]. 2013;1:18–20. (in Russ.)
5. Gasho E.G., Puzakov V.S., Guzhov S.V. An analysis of problems and trends relating to the development of heat-supply systems for Russian cities. *Thermal engineering*. 2021;68(3):235–246. DOI: 10.1134/S0040601521020026
6. *Federal'nyy zakon ot 30 dekabrya 2021 g. N 438-F3 "O vnesenii izmeneniy v Federal'nyy zakon "O teplosnabzhenii"* [Federal Law No. 438-F3 of December 30, 2021 "On Amendments to the Federal Law "On Heat Supply"']. (in Russ.)
7. Ivanov S.A., Batukhtin A.G., Makkaveev V.V. Calculation of the customer parameters upon qualitative-quantitative control in open systems of district heating. *Industrial Power Engineering*. 2008;4:32–34. (in Russ.)
8. Makkaveev V.V. *Optimizatsiya otpuska teploty ot TETS pri kachestvenno-kolichestvennom regulirovanii v otkrytykh sistemakh teplosnabzheniya: Avtoref. dis. kand. tekhn. nauk*. [Optimization of heat supply from CHP with qualitative-quantitative regulation in open heat supply systems. Abstract of cand. sci. diss.]. Chita: Publishing House of ChGU; 2009. 24 p.
9. Chistovich S.A. *Gidravlicheskiy rezhim otkrytykh teplovykh setey s peremennym raskhodom vody* [Hydraulic regime of open heating networks with variable water consumption]. Moscow: Publishing House of the Moscow Institute of Arts of the RSFSR; 1955. 96 p. (in Russ.)
10. Chistovich S.A. [Hydraulic and thermal regimes of district heating systems] In: *Sbornik dokladov V Mezhdunarodnoy konf. po tsentralizovannomu teplosnabzheniyu* [Collection of reports of the V International Conf. for district heating]. Kyiv: Publishing house of KPI; 1982. pp. 32–42. (in Russ.)
11. Chistovich S.A., Averyanov V.K., Tempel Yu.Ya., Bykov S.I. *Avtomatizirovannyye sistemy teplosnabzheniya i otopleniya* [Automated systems of heat supply and heating]. Leningrad: Stroyizdat. Publ.; 1987. 235 p. (in Russ.)
12. Sokolov E.Ya. *Teplofikatsiya i teplovyye seti: uchebnyy dlya vuzov* [Heat supply and heat networks: Textbook for universities]. 7th ed. Moscow: MPEI Publishing House; 2001. 472 p. (in Russ.)
13. Khasilev V.Ya., Merenkov A.P., Kaganovich B.M. and others. *Metody i algoritmy rascheta teplovykh setey* [Methods and algorithms for calculating thermal networks]. Moscow: Energy; 1978. 176 p. (in Russ.)
14. Merenkov A.P., Khasilev V.Ya. *Teoriya gidravlicheskikh tsepey* [Theory of hydraulic circuits]. Moscow: Nauka; 1985. 278 p. (in Russ.)
15. Mikhailovsky E.A. *Razrabotka i aprobatsiya tekhnologii ob"yektno-oriyentirovannogo modelirovaniya gidravlicheskikh tsepey na primere zadach potokoraspredeleeniya: diss. ... kand. tekhn. nauk* [Development and Approval of the Technology of Object-Oriented Modeling of Hydraulic Circuits on the Example of Flow Distribution Problems. Cand. sci. diss.]. Irkutsk: Institute of Energy Systems. L.A. Melenteva; 2018. 142 p. (in Russ.)

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 24.02.2023, принята к публикации 10.03.2023.

The article was submitted 24.02.2023; approved after reviewing 10.03.2023.