

Елена Олеговна АНТОНОВА¹
Наталья Владимировна РЫДАЛИНА²
Олег Андреевич СТЕПАНОВ³
Борис Гаврилович АКСЕНОВ⁴

УДК 62-69

ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ В СИСТЕМЕ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ НА ТЕМПЕРАТУРУ ВОЗДУХА В ПОМЕЩЕНИИ

¹ кандидат технических наук, доцент
кафедры промышленной теплоэнергетики,
Тюменский индустриальный университет
antonovaeo@tyuiu.ru

² ассистент кафедры промышленной теплоэнергетики,
Тюменский индустриальный университет
rydalinanv@tyuiu.ru; ORCID: 0000-0002-5628-188X

³ доктор технических наук, профессор, заведующий
кафедрой промышленной теплоэнергетики,
Тюменский индустриальный университет
stepanovoa@tyuiu.ru; ORCID: 0000-0002-9202-2885

⁴ доктор физико-математических наук, профессор
кафедры промышленной теплоэнергетики,
Тюменский индустриальный университет
aksenovbg@tyuiu.ru

Аннотация

В данной статье представлена краткая история развития системы теплоснабжения страны. Рассмотрены виды систем теплоснабжения, дана их краткая характеристика.

Цитирование: Антонова Е. О. Изучение влияния температуры теплоносителя в системе теплоснабжения на температуру воздуха в помещении / Е. О. Антонова, Н. В. Рыдалина, О. А. Степанов, Б. Г. Аксенов // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. 2021. Том 7. № 3 (27). С. 53-70.

DOI: 10.21684/2411-7978-2021-7-3-53-70

Приведены методы определения тепловой нагрузки на бытовые нужды (отопление и горячее водоснабжение) жителей городов.

Проведено исследование влияния температуры теплоносителя на температуру воздуха в помещении. В исследовании использован экспериментально-теоретический метод. В рамках экспериментального исследования были запрошены данные измерений температуры в одном из тепловых пунктов г. Тюмени. В рамках теоретического исследования произведен расчет температуры воздуха в жилом помещении, в зависимости от температуры теплоносителя по графику ТЭЦ и по подаче в подающем теплопроводе. В процессе теоретического исследования использовались стандартные методики для проведения тепловых расчетов систем теплоснабжения, статистические методы исследования, а также стандартные компьютерные программы.

Определена необходимость регулирования тепловой энергии и рассмотрены виды регулирования. Проведен анализ принятого температурного графика ТЭЦ и проведено сопоставление с расчетным температурным графиком. Приведено решение уравнения для определения температуры воздуха в помещении. Температура воздуха в помещении зависит одновременно от двух факторов: температуры теплоносителя и температуры наружного воздуха. В результате исследования определено наличие несоответствия температур поставляемой потребителям сетевой воды и создаваемой температуры воздуха в жилых помещениях. Определена точка пересечения расчетного температурного графика и графика ТЭЦ. Обоснована необходимость соблюдения расчетного температурного графика центрального качественного регулирования. Также обоснована необходимость поставки теплоты при неизменном расходе теплоносителя.

Ключевые слова

Теплофикация, система теплоснабжения, теплопровод, сетевая вода, график изменения температуры воздуха в помещении, математический метод расчета.

DOI: 10.21684/2411-7978-2021-7-3-53-70

Введение

Начало развития теплофикации в России связано с Ленинградом (ныне Санкт-Петербург). Профессор Ленинградского политеха В. В. Дмитриев предложил проект, который был внедрен инженером Л. Л. Гинтером в ноябре 1924 г. Впервые в России была введена в эксплуатацию система централизованного теплоснабжения группы от 3-й Ленинградской электростанции.

Теплофикацией называют получение электроэнергии и теплоты комбинированным методом при едином энергетическом цикле. Под получаемой теплотой подразумевают получение горячей воды и пара. Теплотой обеспечиваются потребители — жители населенных пунктов. Основными производителями тепла являются теплоэлектроцентрали (ТЭЦ) и крупные котельные. Снабжение теплом производится централизованно по тепловым сетям. Теплоноситель поставляется потребителям по разветвленным теплопроводам, из которых состоит

тепловая сеть. Тепловая сеть также включает в себя тепловые пункты, которые предназначены для подготовки теплоносителя заданных параметров и доставки теплоносителя до конечного потребителя [9, 10].

Основным теплоносителем является нагретая вода, которую называют сетевой. Сетевую воду используют как в системах теплоснабжения и горячего водоснабжения, так и в системах вентиляции и кондиционирования воздуха. Тепловые сети являются сложными инженерными системами. Следует отметить, что протяженность магистральных теплопроводов достигает 30-40 км, а наибольший диаметр труб составляет 1 400 мм. Кроме теплопроводов в системах теплоснабжения имеются насосные и тепловые подстанции.

Постановка проблемы

Основное назначение системы отопления — поддержание заданной температуры воздуха в помещении. Согласно работе [4], в жилых зданиях должна поддерживаться оптимальная температура в пределах значений $+(20,6-22,6)^\circ\text{C}$, допустимая температура $+(18,4-25,2)^\circ\text{C}$. Приводятся также величины результирующей температуры. При этом оптимальное значение результирующей температуры находится в пределах от $+19,6$ до $+21,8^\circ\text{C}$, а допустимое значение — от $+17,4$ до $+24,4^\circ\text{C}$. Кроме того, в строительных нормах отмечается, что допустимые показатели локальной асимметрии результирующей температуры должны составлять не более $2,5^\circ\text{C}$, а для оптимальной температуры — не превышать $3,5^\circ\text{C}$. Для проведения расчетов в работах [2, 3] оговаривается, что в качестве расчетной температуры воздуха в помещении принимается минимальная из оптимальных. Согласно нормативной литературе, средняя расчетная температура воздуха в жилых помещениях принимается по СП 60.13330 или по соответствующим нормам проектирования здания. Также оговаривается, что в холодный период температура воздуха в жилых помещениях должна быть равной минимальной из оптимальных температур по ГОСТ 30494 [2, 3].

Для расчета температуры воздуха в помещении принимается величина $+18^\circ\text{C}$. Нужно отметить, что расчетная температура воздуха внутри помещения обозначается как t_i . Таким образом, величина минимальной температуры воздуха в жилых зданиях по факту должна составлять величину $t_i = +18^\circ\text{C}$.

Количество тепла, необходимое для отопления жилого здания, рекомендуется вычислять по формуле [2, 3]:

$$Q_{o \max} = qF_{\text{ж}}(1 + k_1), \quad (1)$$

где q — удельный тепловой поток максимальной тепловой нагрузки на отопление жилых домов, $\text{Вт}/\text{м}^2$ (значения q на отопление жилых домов приводятся в работе [4]); $F_{\text{ж}}$ — площадь жилого помещения, м^2 ; k_1 — коэффициент теплового потока на отопление, при отсутствии данных следует принимать равным 0,25 [2, 3].

Величина показателя тепловой нагрузки на отопление, расчет которой проводится по уравнению (1), является максимальной и соответствует только величине температуры на проектирование систем отопления, которую обозначают t_o . Значения температур для проектирования систем отопления приводятся

в работе [3]. Для Тюмени температура для проектирования систем теплоснабжения составляет величину $t_o = -35$ °С, с коэффициентом обеспеченности 0,92. В специальной литературе установлено, что для всех категорий жилых домов максимальная величина удельной тепловой нагрузки на отопление и вентиляцию в среднем составляет $q = 113,7$ Вт/м², а для кирпичных и панельных домов высотой 4-10 этажей величина такого показателя составляет $q = 87$ Вт/м².

В соответствии с нормативной литературой, отопительным сезоном считается период, начало и конец которого принимается при среднесуточной температуре наружного воздуха +8 °С в течение пяти суток [4, 6]. Также в специальной литературе приведен порядок построения графиков температур сетевой воды в теплопроводах централизованного теплоснабжения, где начальной температурой отопительного периода и конечной принимается температура +8 °С [4, 6].

Возникает необходимость определения теплового потока на отопление при температурах наружного воздуха от значения $t_n = +8$ °С, соответствующих началу отопительного сезона, до значения температуры для проектирования систем теплоснабжения, составляющей $t_o = -35$ °С.

Основными задачами, решаемыми при организации технико-экономических расчетов, при проектировании и эксплуатации систем теплоснабжения, являются определение расхода топлива, выбор оборудования источника тепла, определение режима загрузки и графика ремонта этого оборудования, а также построение графиков потребления теплоты. Различают часовые, годовые по продолжительности тепловой нагрузки и годовые по месяцам графики потребления теплоты.

Самыми распространенными являются *часовые* графики расхода теплоты на отопление, горячее водоснабжение и вентиляцию. При построении часового графика расхода теплоты используют два значения теплового потока: максимальный $Q_{o\max}$ и посчитанный при температуре воздуха на начало отопительного периода. Тепловой поток на отопление для любых температур наружного воздуха t_n вычисляется по уравнению [6, 4, 1, 2]:

$$Q_o^{t_n} = Q_{o\max} \cdot \left(\frac{t_i - t_n}{t_i - t_o} \right), \quad (2)$$

где t_i — расчетная температура воздуха внутри помещения, равная $t_i = +18$ °С; t_o — температура для проектирования систем теплоснабжения, составляет $t_o = -35$ °С; t_n — температура наружного воздуха начала (конца) отопительного периода, равная $t_n = +8$ °С.

Общий вид графика часового расхода теплоты на отопление по уравнению (2) показан на рис. 1.

При построении графика величина максимального потока на отопление принята $Q_{o\max} = 100$ МВт. В начале отопительного периода величина теплового потока на отопление при температуре наружного воздуха $t_n = +8$ °С, составляет величину, согласно уравнению (2):

$$Q_o^{t_n} = 100 \cdot \left(\frac{18 - 8}{18 - (-35)} \right) = 18,86 \text{ МВт.}$$

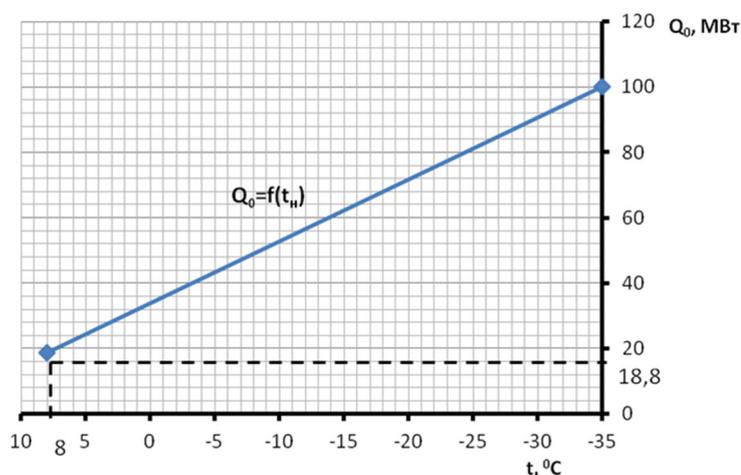


Рис. 1. Расход теплоты на отопление

Fig. 1. Hourly heat consumption for heating

Расчет показывает, что величина тепловой нагрузки на отопление зависит от температуры наружного воздуха и изменяется за отопительный сезон в несколько раз (рис. 1). Следовательно, во время работы системы теплоснабжения необходимо регулировать расход теплоты на отопление.

Теплота подается потребителю в виде потока горячей воды, поставляемой по трубопроводам системы теплоснабжения. Температура сетевой воды должна обеспечивать расчетную температуру воздуха в жилом помещении, равную $+18^\circ\text{C}$. В настоящее время температура сетевой воды в трубопроводах Тюмени отличается от расчетных величин. Таким образом, необходимо установить величину температуры воздуха в жилом помещении, соответствующую температуре сетевой воды и, одновременно, температуре наружного воздуха. Поэтому необходимо решить уравнение зависимости температуры сетевой воды в подающем теплопроводе относительно температуры воздуха в помещении. В результате сопоставления графика ТЭЦ с расчетным обнаружено несоответствие температуры сетевой воды графика ТЭЦ при температуре наружного воздуха, соответствующей температуре проектирования системы отопления.

Методы

Регулировка расхода теплоты на отопление во время работы системы теплоснабжения

Уже установлено, что величина тепловой нагрузки изменяется за отопительный сезон в несколько раз (рис. 1). В связи с этим возникает необходимость осуществлять регулирование расхода теплоты на отопление.

В настоящее время принято производить регулирование отпуска теплоты в следующей последовательности: на источнике теплоты, в центральных тепловых пунктах, а также в индивидуальных тепловых пунктах. При этом предусмотрены

следующие способы регулирования на источнике тепла: количественное, качественное и центральное качественно-количественное. Количественное регулирование представляет собой изменение расхода теплоносителя, в зависимости от температуры наружного воздуха. Качественное регулирование предполагает изменение температуры теплоносителя на источнике теплоты, в зависимости от температуры наружного воздуха. Центральное качественно-количественное регулирование производится за счет изменения расхода и температуры теплоносителя на источнике теплоты. Основным критерием для проведения регулирования является поддержание температурного и гидравлического режима у потребителя тепла [4].

В системе теплоснабжения Тюмени действует метод центрального качественного регулирования [1]. Необходимо отметить, что при проектировании системы теплоснабжения города действовал только качественный метод регулирования температуры сетевой воды, от температуры наружного воздуха. Сущность метода заключается в том, что расход сетевой воды не меняется, меняется только ее температура. Диаметр труб теплопроводов зависит от расхода воды. Если расход воды является постоянным, то диаметры трубопроводов системы теплоснабжения не нуждаются в изменении. В специальной литературе приводится уравнение зависимости температуры сетевой воды в подающем теплопроводе [7]:

$$\tau_1 = t_i + \Delta t \cdot \left(\frac{t_i - t_H}{t_i - t_o} \right)^{0,8} + (\Delta\tau - 0,5 \cdot \Theta) \cdot \frac{t_i - t_H}{t_i - t_o}, \quad (3)$$

где t_i — расчетная температура воздуха в помещении, принимается $t_i = 18$ °С; Δt — температурный напор нагревательного прибора, для нахождения которого используется уравнение:

$$\Delta t = \frac{\tau_3 + \tau_2}{2} - t_i, \quad (4)$$

где t_o — расчетная температура наружного воздуха для проектирования системы отопления, принимается равной $t_o = -35$ °С; τ_3 — расчетная температура наружного воздуха после элеватора, °С, принимается равной $\tau_3 = 95$ °С; τ_2 — расчетная температура воды в обратном теплопроводе, °С, принимается равной $\tau_2 = 70$ °С; $\Delta\tau$ — расчетный перепад температур сетевой воды в тепловой сети, определяется $\Delta\tau = \tau_1 - \tau_2$; Θ — расчетный перепад температур сетевой воды в местной системе отопления, также определяется $\Theta = \tau_3 - \tau_2$.

Определим значения коэффициентов, входящих в уравнение (3):

$$\Delta t = \frac{\tau_3 + \tau_2}{2} - t_i = \frac{95 + 70}{2} - 18 = 64,5;$$

$$\Delta\tau = \tau_1 - \tau_2 = 150 - 70 = 80 \text{ °С};$$

$$\Theta = \tau_3 - \tau_2 = 95 - 70 = 25 \text{ °С};$$

$$\Delta\tau - 0,5\Theta = 80 - 0,5 \cdot 25 = 67,5 \text{ °С}.$$

После того, как определены коэффициенты уравнения сетевой воды, вычисляется температура сетевой воды в подающем теплопроводе:

$$\tau_1 = 18 + 64,5 \cdot \left(\frac{18 - t_n}{18 - (-35)} \right)^{0,8} + 67,5 \cdot \frac{18 - t_n}{18 - (-35)}. \quad (5)$$

Значения температур наружного воздуха принимаются произвольно, t_n в интервале от $+8^\circ\text{C}$ до расчетной температуры проектирования систем отопления t_o , далее определяются значения температуры сетевой воды в подающем теплопроводе τ_1 .

Температуры наружного воздуха примем равными: $t_n = +8, 0, -5, -10, -15, -20, -25, -30, -35^\circ\text{C}$ и по уравнению (5) вычислим значения температур сетевой воды.

При $t_n = +8^\circ\text{C}$:

$$\tau_1 = 18 + 64,5 \cdot \left(\frac{18 - 8}{53} \right)^{0,8} + 67,5 \cdot \frac{18 - 8}{53} = 47,7^\circ\text{C}.$$

При $t_n = 0^\circ\text{C}$:

$$\tau_1 = 18 + 64,5 \cdot \left(\frac{18}{53} \right)^{0,8} + 67,5 \cdot \frac{18}{53} = 68,11^\circ\text{C}.$$

Аналогично рассчитываются остальные показатели, результаты сведены в таблицу 1.

Таблица 1

Значения температур наружного воздуха и соответствующие ей значения температуры сетевой воды

Table 1

Outdoor air temperature values and corresponding mains water temperature values

Температура наружного воздуха, $t_n, ^\circ\text{C}$	Температура сетевой воды в подающем теплопроводе, $\tau_1, ^\circ\text{C}$
+8	47,7
0	68,11
-5	80,36
-10	92,37
-15	104,18
-20	115,8
-25	130,9
-30	138,7
-35	150

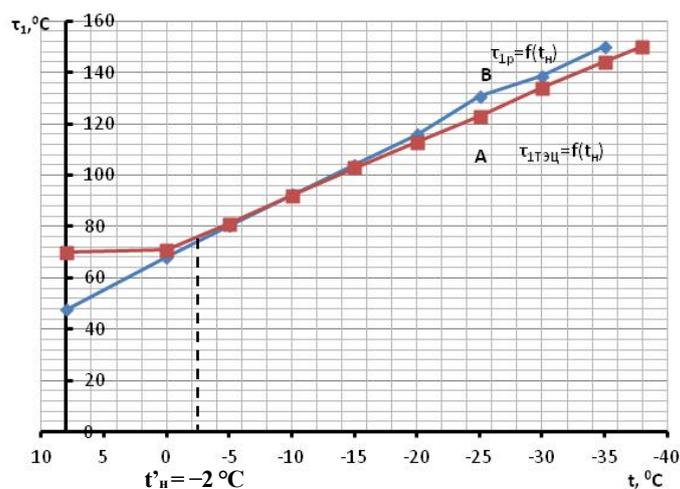


Рис. 2. График изменения температуры сетевой воды в зависимости от температур наружного воздуха

Fig. 2. Graph of the change in the temperature of the mains water depending on the outdoor air temperature

Используя полученные значения, строится график центрального качественного регулирования (рис. 2).

После построения соответствующего графика проводится срез графика на уровне температуры теплоносителя в обратной магистрали. Для данных значений срез графика проводят по температуре $\tau = 70\text{ }^\circ\text{C}$. Для этого от оси ординат при температуре $70\text{ }^\circ\text{C}$ проводится горизонталь до пересечения с графиком $\tau_{1p} = f(t_n)$. Полученную точку пересечения проектируют по нормали на ось температур наружного воздуха, обозначают t'_n и называют точкой излома графика. Физический смысл точки излома состоит в том, что при температурах наружного воздуха от $+8\text{ }^\circ\text{C}$ до точки излома осуществляется местное регулирование, а от точки излома до температуры проектирования систем отопления ($-35\text{ }^\circ\text{C}$ для Тюмени) осуществляется регулирование на источнике теплоты (ТЭЦ). Для Тюмени точке излома графика соответствует температура наружного воздуха $-2\text{ }^\circ\text{C}$.

Если температура сетевой воды соответствует графику рис. 2, то обеспечивается температура воздуха в помещении, равная расчетной, т. е. $t_i = +18\text{ }^\circ\text{C}$.

Современное состояние системы регулирования температур сетевой воды в подающем теплопроводе

В Тюмени температура сетевой воды соответствует значениям, приведенным в специальной литературе [1].

По принятым значениям [1] строится график температуры сетевой воды в зависимости от температур наружного воздуха. График показан на рис. 2 (А). Для удобства проведения анализа график (А) назван «графиком ТЭЦ», и температура сетевой воды обозначена как $\tau_{1ТЭЦ}$. Для сопоставления на рис. 2 также

показан расчетный график центрального качественного регулирования (В), выполненный по уравнению (5). Его назвали расчетным, и соответственно обозначена температура сетевой воды τ_{1p} . Предварительно значения температур $\tau_{1TЭЦ}$ и τ_{1p} сведены в таблицу 2.

Необходимо отметить, что для Тюмени в графике качественного регулирования добавляется значение температуры наружного воздуха $-38\text{ }^{\circ}\text{C}$. Одновременно с этим фактом указано, что отпуск тепловой энергии для тепловых сетей Тюмени с закрытой системой теплоснабжения производится по температурному графику $150\text{-}70\text{ }^{\circ}\text{C}$ [1]. Указано, что для тепловых сетей Тюмени принято качественное регулирование с расчетной температурой наружного воздуха $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$ [1]. Согласно указаниям специальной литературы [2-8], значение температурного графика $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ соответствует температуре наружного воздуха, равной $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$ — температуре для проектирования систем отопления. На основании этого факта в графике ТЭЦ температуре наружного воздуха, равной $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$, должна соответствовать температура сетевой воды $+150\text{ }^{\circ}\text{C}$, т. е. в графике ТЭЦ существует неточность. Кроме того, если при $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$ температура сетевой воды составляет величину $144\text{ }^{\circ}\text{C}$, то температурный график для Тюмени должен быть записан как $144\text{-}70\text{ }^{\circ}\text{C}$. При этом в работе [1] указано, что фактические температуры

Таблица 2

Сопоставление температуры сетевой воды в зависимости от температур наружного воздуха, по уравнению (5) и по графику ТЭЦ

Table 2

Comparison of the network water temperature values depending on the outdoor air temperatures, according to the equation (5) and the CHPP schedule

Температура наружного воздуха, $t_n, ^{\circ}\text{C}$	Расчетная температура сетевой воды в подающем тепलोпроводе, $\tau_{1p}, ^{\circ}\text{C}$	Температура сетевой воды по графику ТЭЦ, $\tau_{1TЭЦ}, ^{\circ}\text{C}$
+8	47,7	70
0	68,1	71
-5	80,4	81
-10	92,4	92
-15	104,2	103
-20	115,8	113
-25	130,9	123
-30	138,7	134
-35	150,0	144
-38	—	150

теплоносителя в подающем трубопроводе в диапазоне температур наружного воздуха от +10 до -13 °С соответствуют температурному графику. При температурах наружного воздуха менее -13 °С температуры теплоносителя в подающем трубопроводе не превышают 116 °С. Таким образом, при температуре наружного воздуха -13 °С наблюдается фактическая точка срезки температурного графика [1]. Следовательно, имеется существенное расхождение с расчетным графиком центрального качественного регулирования и температурой точки среза графика. По расчету $t'_n = -2$ °С, а по факту -13 °С.

В учебниках и СНИПах [2-8] при расчетах центрального качественного регулирования определяется также вид регулирования по отношению среднечасовой нагрузки на ГВС к максимальной нагрузке на отопление $Q_{hm}/Q_{o\max}$. Если указанное отношение $Q_{hm}/Q_{o\max} < 0,15$, то регулирование осуществляется только по нагрузке отопления и соответствует рис. 2. В противном случае регулирование осуществляется по совмещенной нагрузке на отопление и ГВС. При этом график (рис. 2) необходимо перестроить на больший температурный интервал. Расход сетевой воды, поставляемой в жилые районы, уменьшается. Следует отметить, что величины тепловых нагрузок или их отношения не приводятся в схеме [1].

Анализ значений графиков А и В показывает, что в начале отопительного сезона температура сетевой воды графика ТЭЦ значительно выше, чем расчетного графика. Из графика (рис. 2) видно, что начиная с температуры наружного воздуха, равной $t_n = -10$ °С, становится выше температура сетевой воды, определенная уравнением (5) и названная расчетной. Если расчетная температура сетевой воды τ_{1p} определяется уравнением, в котором температура воздуха в помещении всегда составляет значение +18 °С, то по графику ТЭЦ это становится неочевидным. Точка пересечения расчетного графика и для графика ТЭЦ показывает температуру наружного воздуха, при которой температура воздуха в помещении равна расчетной, т. е. $t_i = +18$ °С. Из рис. 2 видно, что температура наружного воздуха, при которой температура воздуха в помещении равна +18 °С, составляет величину $t_n = -10$ °С.

Необходимо определить температуру воздуха в помещении, если температура сетевой воды определяется графиком ТЭЦ.

Результаты

Определение температуры воздуха в помещении

Рассмотрим уравнение (3) с целью определения температуры воздуха в помещении.

Уравнение (3) относительно искомой температуры t_i не является линейным, более того, искомая температура находится в 0,8 степени и входит в уравнение 6 раз. Использование при решении уравнения стандартных методов решения затруднительно.

В уравнении (3) известны следующие значения температур: $t_o = -35$ °С; $\tau_2 = 150$ °С; $\tau_2 = 70$ °С; $\tau_3 = 95$ °С; $\Delta t = \tau_1 - \tau_2 = 80$ °С; $\Theta = \tau_3 - \tau_2 = 25$ °С; $\Delta t - 0,5\Theta = 67,5$ °С.

Подставив в уравнение (3) известные параметры, получаем уравнение:

$$\tau_1 = t_i + (85,2 - t_i) \cdot \left(\frac{t_i - t_n}{t_i + 35} \right)^{0,8} + 67,5 \cdot \left(\frac{t_i - t_n}{t_i + 35} \right). \quad (6)$$

В уравнении (6) известны следующие величины: температура сетевой воды τ_1 и температура наружного воздуха t_n . Тогда определить температуру воздуха в помещении можно методом перебора значений.

При температуре наружного воздуха $t_n = -18,6$ °С температура сетевой воды по факту подачи составляет величину $\tau = 95,720$ °С. (Фактические данные были предоставлены по тепловому пункту по адресу ул. Амурская, 68 за 17.01.2018.) Температура сетевой воды по факту подачи в тепловой пункт обозначена $\tau_{1ф}$. Поэтому $\tau_{1ф} = 95,72$ °С.

Согласно проведенным расчетам, температура сетевой воды должна составлять величину $\tau_1 = 112,58$ °С. Пусть температура воздуха в помещении $t_i = 10$ °С. Тогда уравнение температуры теплоносителя примет вид:

$$\tau_1 = 10 + (85,2 - 10) \cdot \left(\frac{10 + 18,6}{10 + 35} \right)^{0,8} + 67,5 \cdot \left(\frac{10 + 18,6}{10 + 35} \right) = 103,3 \text{ °С.}$$

Следовательно, температура воздуха в помещении меньше 10 °С.

Температура воздуха в помещении принимается $t_i = +6$ °С. Тогда температура сетевой воды составит величину

$$\tau_1 = 6 + (85,2 - 6) \cdot \left(\frac{6 + 18,6}{6 + 35} \right)^{0,8} + 67,5 \cdot \left(\frac{6 + 18,6}{6 + 35} \right) = 97,6 \text{ °С.}$$

Фактически температура подачи сетевой воды составляет $\tau_{1ф} = 95,72$ °С. Следовательно, даже температура воздуха в помещении, равная +6 °С, оказывается высокой.

На основе рассмотренного метода определения температуры воздуха в помещении основан следующий алгоритм:

1. Температура воздуха в помещении t_i принимается в пределах от 0 до 25 °С.
2. Определяется коэффициент температурного напора в соответствии с уравнением $\Delta t = 82,5 - t_i$.
3. Вычисляется значение температуры сетевой воды по значениям температуры наружного воздуха t_n и температуры сетевой воды в прямом теплопроводе τ_1 по факту подачи методом приближений по уравнению

$$\tau_1 = t_i + (85,2 - t_i) \cdot \left(\frac{t_i - t_n}{t_i + 35} \right)^{0,8} + 67,5 \cdot \left(\frac{t_i - t_n}{t_i + 35} \right).$$

Данное уравнение было решено численными методами: методом половинного деления и методом хорд. Алгоритм реализован посредством программы Excel. В результате было установлено, что в рассмотренном примере, когда температура наружного воздуха равна $-18,6$ °С, а температура сетевой воды в подающем

теплопроводе по факту подачи равна $95,72\text{ }^{\circ}\text{C}$, температура воздуха в помещении составляет величину $5,6\text{ }^{\circ}\text{C}$. Это означает, что система отопления не выполняет основную задачу. В жилом помещении, независимо от температуры наружного воздуха, температура воздуха должна быть $18\text{ }^{\circ}\text{C}$.

С помощью алгоритмов, реализованных в программе Excel, были определены значения температур воздуха в жилом помещении по графику ТЭЦ и по фактическим данным по тепловому пункту. Значения температур воздуха в жилом помещении в зависимости от температур сетевой воды по графику ТЭЦ представлены в таблице 3.

Вычисленные значения температуры воздуха в жилом помещении в зависимости от температуры сетевой воды по факту подачи теплового пункта приведены в таблице 4.

Таким образом, очевидно, что в начале отопительного сезона температура сетевой воды подающего теплопровода, поставляемой ТЭЦ, температура воздуха в жилых помещениях значительно выше расчетной, равной $+18\text{ }^{\circ}\text{C}$. Это свидетельствует о переизбытке поставляемой тепловой энергии. Затем, при температурах наружного воздуха $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ температура воздуха в жилых помещениях становится равной расчетной. Если температура наружного воздуха ниже $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$, то создается недостаток тепловой энергии, и температура воздуха в жилых помещениях становится отрицательной, что совершенно недопустимо.

Таблица 3

Значения температур воздуха в жилом помещении в зависимости от температуры теплоносителя по графику ТЭЦ

Table 3

Values of air temperatures in a residential building depending on the temperature of the heat carrier according to the CHPP schedule

Температура наружного воздуха, $t_n, ^{\circ}\text{C}$	Температура сетевой воды по графику ТЭЦ, $\tau_{\text{ТЭЦ}}, ^{\circ}\text{C}$	Значения температуры воздуха в помещении, $t_i, ^{\circ}\text{C}$
+8	70	26,9
0	71	24,3
-6	83	17,1
-7	85	16,8
-10	92	16,7
-15	103	16
-20	113	14
-25	123	10,5
-30	134	4,6
-35	144	—

Таблица 4

Значения температур воздуха в жилом помещении в зависимости от температуры сетевой воды в подающем теплопроводе по факту подачи

Table 4

The values of the air temperature in the living room, depending on the temperature of the mains water in the supply heat pipe after the supply

Температура наружного воздуха, $t_n, ^\circ\text{C}$	Температура сетевой воды по факту подачи, $\tau_{1\phi}, ^\circ\text{C}$	Значения температуры воздуха в помещении, $t_i, ^\circ\text{C}$
-6,200	93,840	23,7
-7,000	93,690	22,5
-8,100	96,390	22,8
-9,000	93,590	19,3
-10,067	94,190	18,1
-11,067	93,440	16
-12,100	94,580	15,1
-15,533	96,030	10
-19,167	95,720	2,9
-20,100	94,880	0,6
-22,333	96,000	-3,5
-24,000	95,860	-7,2

Таким образом, использование в расчетах численных методов, реализуемых в программе Excel, позволяет достаточно достоверно определять температуру воздуха в помещении при известных значениях температуры сетевой воды подающего теплопровода и температуры наружного воздуха, так как погрешность расчетов составляет 0,1%. Также в программе были посчитаны температуры сетевой воды по расчетному графику, составленному по уравнению (3), и температура воздуха была определена как равная значению 17,9999 °C, т. е. соответствующая расчетной, равной +18 °C, что свидетельствует о достоверности полученных данных.

Кроме того, на кафедре промышленной теплоэнергетики Тюменского индустриального университета ведется работа по составлению программы, позволяющей определять температуру воздуха в помещении по массиву данных с последующей их распечаткой.

Заключение

В результате проведенного исследования получены следующие результаты и сделаны выводы:

1. Предложен алгоритм определения температуры воздуха в помещении.
2. Составлена программа, позволяющая проводить вычисление температуры воздуха в помещении.
3. При проведении расчетов установлено, что график, предложенный для качественного регулирования температур сетевой воды в подающем теплопроводе городского округа Тюмени, при температурах наружного воздуха от +8 до –10 °С позволяет создавать температуру воздуха в жилых помещениях выше расчетной, равной +18 °С.
4. При температурах наружного воздуха от –10 до –35 °С температура воздуха в жилых помещениях становится значительно ниже расчетной, а затем отрицательной, что совершенно недопустимо.
5. При анализе схемы [1], принятой для городского округа Тюмени, выявлены несоответствия температур излома графика расчетным значениям, а также отсутствие возможности определить вид регулирования.

При соблюдении температурного графика, получаемого расчетным путем, температура воздуха в жилых помещениях составляет расчетную величину, равную +18 °С.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Актуализированная схема теплоснабжения муниципального образования городской округ Тюмень на период 2018-2033 гг. // Администрация города Тюмени: оф. портал. URL: <https://www.tyumen-city.ru/vlast/administration/struktura-administracii-goroda-tumeni/departaments/djkh/teplosnabjenie/proekt-aktualizirovannoi-shemi-teplosnabjenii-municipalnogo-obrazovanii-gorodskoi-okrug-gorod-tumeny-na-period-2019-2040-gg/aktualizirovannai-shema-teplosnabjenii-municipalnogo-obrazovanii-gorodskoi-okrug-gorod-tumeny-na-period-2018-2033-gg/> (обращения 21.04.2021).
2. Свод правил: СП 124.13330.2012. Тепловые сети: утв. М-вом строительства и жилищно-коммунального хозяйства РФ 30.12.2006: введ в действие 01.01.2013. М.: Минрегион России, 2020. 19 с.
3. Свод правил: СП 131.13330.2018. Строительная климатология: утв. М-вом строительства и жилищно-коммунального хозяйства РФ 29.05.2018: введ в действие 29.05.2019. М.: ГУП ЦПП, 2000. 57 с.
4. Свод правил: СП 60.13330.2016. Отопление, вентиляция и кондиционирование. Актуализированная редакция: СНиП 41-01-2003: утв. М-вом строительства и жилищно-коммунального хозяйства РФ 16.12.2016: введ в действие 17.06.2017. М.: Минстрой России, 2020. 108 с.
5. Степанов О. А. Источники и системы теплоснабжения в примерах и задачах: учебное пособие / О. А. Степанов, Е. О. Антонова, Н. В. Рыдалина. Тюмень: ТИУ, 2019. 80 с.
6. Строительные нормы и правила: СНиП 2.04.07-86. Тепловые сети: утв. постановлением Госстроя СССР 30.12.1986: с изм. введен в действие 12.10.2001. М.: Госстрой России, 2003. 57 с.

7. Тихомиров А. К. Теплоснабжение района города: учеб. пособие / А. К. Тихомиров. Хабаровск: Изд-во Тихоокеан. ун-та, 2006. 135 с.
8. Хрусталеv Б. М. Теплоснабжение и вентиляция. Курсовое проектирование / Б. М. Хрусталеv, Ю. Я. Кувшинов, В. М. Копко, А. А. Михалеvич и др. М.: АСВ, 2012. 784 с.
9. Davletbaev V. Experimental investigation of the heat exchange intensity / V. Davletbaev, N. Rydalina, E. Antonova // International Scientific Conference on Energy, Environmental and Construction Engineering, EECE-2018 (19-20 November 2018, SPb.). MATEC Web of Conferences 245. SPb., 2018. Art. 07002. DOI: 10.1051/matecconf/201824507002
10. Stepanov O. Heat-exchange units with porous inserts / O. Stepanov, B. Aksenov, N. Rydalina, E. Antonova // International Scientific Conference on Energy, Environmental and Construction Engineering, EECE-2019 (19-20 November 2019, SPb.). Web of Conferences 140. SPb., 2019. Art. 05006. DOI: 10.1051/e3sconf/201914005006E3S

Elena O. ANTONOVA¹
Natalia V. RYDALINA²
Oleg A. STEPANOV³
Boris G. AKSENOV⁴

UDC 62-69

**STUDY OF THE HEAT-CARRYING FLUID TEMPERATURE
INFLUENCE IN THE HEAT SUPPLY SYSTEM
ON THE INDOOR AIR TEMPERATURE**

¹ Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor,
Department of Industrial Heat Power Engineering,
Industrial University of Tyumen
antonovao@tyuiu.ru

² Junior Lecturer,
Department of Industrial Heat Power Engineering,
Industrial University of Tyumen
rydalinanv@tyuiu.ru; ORCID: 0000-0002-5628-188X

³ Dr. Sci. (Tech.), Professor,
Head of Department of Industrial Heat Power Engineering,
Industrial University of Tyumen
stepanovoa@tyuiu.ru; ORCID: 0000-0002-9202-2885

⁴ Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor,
Department of Industrial Heat Power Engineering,
Industrial University of Tyumen
aksenovbg@tyuiu.ru

Abstract

This article presents a brief history of the country's heat supply system development. The types of heat supply systems are considered, their brief characteristics are given. Methods

Citation: Antonova E. O., Rydalina N. V., Stepanov O. A., Aksenov B. G. 2021. "Study of the heat-carrying fluid temperature influence in the heat supply system on the indoor air temperature". Tyumen State University Herald. Physical and Mathematical Modeling. Oil, Gas, Energy, vol. 7, no. 3 (27), pp. 53-70.

DOI: 10.21684/2411-7978-2021-7-3-53-70

for determining the heat load for household needs (heating and hot water supply) of urban residents are presented.

The study of the coolant temperature influence on the air temperature in the room was carried out. The study used an experimental-theoretical research method. As a part of the experimental study, the data of temperature measurements in one of the heating points in Tyumen were requested. Within the framework of a theoretical study, the air temperature in a living room was calculated, depending on the coolant temperature according to the schedule of the CHPP and according to the supply in the supply heat pipe. In carrying out the theoretical study, standard methods were used for carrying out thermal calculations of heat supply systems, statistical research methods, as well as standard computer programs.

The need to regulate heat energy is determined and the types of regulation are considered. The analysis of the adopted temperature schedule of the CHPP was carried out and a comparison was made with the calculated temperature schedule. The solution of the equation for determining the air temperature in the room is given. The air temperature in the room depends simultaneously on two factors: the temperature of the heating medium and the temperature of the outside air. As a result of the study, the presence of a discrepancy between the temperatures of the network water supplied to consumers and the created air temperature in residential premises was determined. The intersection point of the calculated temperature schedule and the CHP schedule was determined. The necessity of observing the calculated temperature schedule of the central quality regulation has been substantiated. The necessity of heat supply at a constant flow rate of the heat carrier has also been substantiated.

Keywords

Heating, heat supply system, heat pipe, network water, graph of changes in air temperature in the room, mathematical calculation method.

DOI: 10.21684/2411-7978-2021-7-3-53-70

REFERENCES

1. Administration of Tyumen city: official portal. Updated heat supply scheme of the Tyumen City District municipality for the period 2018-2033. Accessed 21 April 2021. <https://www.tyumen-city.ru/vlast/administration/struktura-administracii-goroda-tumeni/departaments/djkh/teplosnabjenie/proekt-aktualizirovannoi-shemi-teplosnabjenii-municipalynogo-obrazovanii-gorodskoi-okrug-gorod-tumeny-na-period-2019-2040-gg/aktualizirovannai-shema-teplosnabjenii-municipalynogo-obrazovanii-gorodskoi-okrug-gorod-tumeny-na-period-2018-2033-gg/> [In Russian]
2. The set of rules: SP 124.13330.2012. 2020. Heating networks: approved by the Ministry of Construction, Housing and Utilities of the Russian Federation on 30 December 2006: put into effect on 1 January 2013. Moscow: Ministry of Regional Development of Russia. 19 pp. [In Russian]
3. The set of rules: SP 131.13330.2018. 2000. Construction climatology: approved by the Ministry of Construction and Housing and Utilities of the Russian Federation 29 May 2018: put into effect 29 May 2019. Moscow: GUP TsPP. 57 pp. [In Russian]

4. The set of rules: SP 60.13330.2016. 2020. Heating, ventilation and air conditioning. Updated edition: SNiP 41-01-2003: approved by the Ministry of Construction, Housing and Utilities of the Russian Federation on 16 December 2016: put into effect on 17 June 2017. Moscow: Ministry of Construction of Russia. 108 pp. [In Russian]
5. Stepanov O. A. , Antonova E. O. , Rydalina N. V. 2019. Sources and systems of heat supply in examples and tasks: a tutorial. Tyumen: TIU. 80 pp. [In Russian]
6. Construction norms and rules: SNiP 2.04.07-86. 2003. Heating networks: approved by the decree of the State Construction Committee of the USSR on 30 December 1986: with amendments, put into effect on 12 October 2001. Moscow: Gosstroy of Russia. 57 pp. [In Russian]
7. Tikhomirov A. K. 2006. Heat supply of the city district: a tutorial. Khabarovsk: Pacific University Publishing House. 135 pp. [In Russian]
8. Khrustalev B. M. , Kuvshinov Yu. Ya., Kopko V. M. (eds.). 2012. Heat supply and ventilation. Course design. Moscow: ASV. 784 pp. [In Russian]
9. Davletbaev V., Rydalina N., Antonova E. 2018. “Experimental investigation of the heat exchange intensity”. International Scientific Conference on Energy, Environmental and Construction Engineering, EECE-2018, 19-20 November, St. Petersburg. MATEC Web of Conferences, vol. 245, art. 07002. DOI: 10.1051/mateconf/201824507002
10. Stepanov O., Aksenov B., Rydalina N., Antonova E. 2019. “Heat-exchange units with porous inserts”. International Scientific Conference on Energy, Environmental and Construction Engineering, EECE-2019, 19-20 November, St. Petersburg. E3S Web of Conferences, vol. 140, art. 05006. DOI: 10.1051/e3sconf/201914005006