

ТЕПЛОФИКАЦИЯ И ТЕПЛОВЫЕ СЕТИ

РАСЧЕТ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ЦЕНТРАЛИЗОВАННЫХ СИСТЕМ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ В НЕПРОЕКТНЫХ УСЛОВИЯХ

© 2022 г. В. А. Петрущенко*

*Санкт-Петербургский государственный политехнический университет Петра Великого,
Политехническая ул., д. 29, Санкт-Петербург, 195251 Россия*

**e-mail: pva38@mail.ru*

Поступила в редакцию 23.07.2021 г.

После доработки 08.09.2021 г.

Принята к публикации 22.09.2021 г.

Приведено рациональное объяснение причин повсеместной практики существенного несоблюдения проектных значений температуры сетевой воды и теплоносителя в приборах отопления в холодные периоды года. Проанализирован процесс формирования расчетной нагрузки систем отопления. Показано, что слагаемое в нагрузке отопления, обусловленное нагревом приточного воздуха, должно учитывать различные режимы использования помещений в течение суток. Неучет этого факта приводит к завышению расчетной нагрузки отопления и всех звеньев системы теплоснабжения до 30%. Рассмотрены режимы работы систем теплоснабжения с зависимым присоединением систем отопления с элеваторным смещением и с их независимым присоединением через теплообменники при пониженных температурах прямой сетевой воды. Показано, что в этих условиях при правильном учете нормативного среднесуточного воздухообмена в помещениях для существующих систем теплоснабжения возможен переход на пониженный температурный график. Приведены примеры перехода на температурный график 114/58°C для системы отопления как с элеваторным смещением, так и с независимым присоединением ее к тепловой сети при завышенном на 30% расчетном значении тепловых потерь зданий при сохранении качественного регулирования нагрузки.

Ключевые слова: теплоснабжение, системы отопления, типовой профиль воздухообмена в помещениях, температурный график, качественное регулирование, режимные характеристики, холодная пятидневка года

DOI: 10.1134/S0040363622050046

Системы централизованного водяного теплоснабжения строятся и эксплуатируются в России около 100 лет. Теоретическое описание режимов их работы в течение года приведено во многих литературных источниках [1–10]. Основной сезонной тепловой нагрузкой является нагрузка систем отопления жилых, общественных и прочих зданий, мощность которых для большинства районов страны изменяется в течение отопительного периода в 4–5 раз. Регулирование этой нагрузки, как правило, производится качественным методом при постоянном расходе сетевой воды на системы отопления и изменении температуры прямой сетевой воды по температурному графику. Тепловая нагрузка систем вентиляции с калориферами, работающими на горячей воде, аналогична отопительной нагрузке и далее отдельно не рассматривается.

Широкое распространение получил проектный температурный график 150/70°C. Однако известно, что этот график в холодный период года практически повсеместно не выполняется. В рас-

четных условиях по температуре наружного воздуха температура сетевой воды в прямой линии обычно не превышает 120°C, а в отдельных случаях — 95°C. Практика работы при пониженных температурах сетевой воды принимает разные формы. В большинстве случаев речь идет о работе со срезкой по температуре прямой сетевой воды с максимальным значением 110, 120 или 130°C. Иногда говорят о работе по диспетчерскому графику, который предполагает некоторую зависимость пониженной температуры прямой сетевой воды от температуры наружного воздуха.

В справочной литературе и научных публикациях приводятся точные и приближенные методы расчета, позволяющие определить параметры системы теплоснабжения в новых условиях [1, 11–13]. Очевидно, что главное назначение системы отопления — поддержание нормированных температур в отапливаемых помещениях. При работе системы теплоснабжения в непроектных условиях ответ на вопрос, какой ожидается температура в помещениях, должен быть получен, прежде всего,

расчетным путем. При сохранении проектного расхода сетевой воды и снижении температуры прямой воды изменятся все параметры систем теплоснабжения и отопления, уменьшится температура воздуха внутри помещений.

В то же время фактически даже в холодное время в отопительный период при пониженной температуре прямой сетевой воды в большинстве зданий температуры в помещениях не слишком сильно отличаются от нормативных и массовых жалоб не наблюдается [14].

Такое положение дел является ненормальным и требует осмысления, в перспективе должны приводиться в соответствие реальные температурные графики и теория регулирования сезонной тепловой нагрузки.

В настоящей статье делается попытка рационально объяснить описанные выше несоответствия и предложить меры по их устранению. Рассматриваются распространенные системы централизованного теплоснабжения с зависимым присоединением систем отопления с элеваторным смещением, а также с независимым присоединением с помощью теплообменников на тепловых пунктах и организацией циркуляции в контуре отопления.

И в теории, и на практике известны попытки решения этой проблемы. Следует отметить, что она актуальна именно для нашей страны, так как за рубежом применяются температурные графики с проектной температурой прямой сетевой воды не выше 120°C [15].

Одним из первых авторов, задавших главное идеологическое направление решения проблемы, был В.Ф. Гершкович [8, 16]. Как известно, нагрузка систем отопления жилых, многих общественных и промышленных зданий определяется двумя главными слагаемыми: трансмиссионными тепловыми потоками через наружные ограждения всех видов и затратами тепловой энергии на нагрев приточного воздуха. Под приточным понимается воздух, проникающий через щели окон и наружных дверей, наружные стены при их проницаемости, проемы фрамуг и приоткрытые створки стеклопакетов, а также воздух, поступающий в приточные вентиляционные каналы, если они предусмотрены проектом здания. Этот поток воздуха нагревается только от приборов отопления помещений, так как калориферы систем вентиляции в жилых и некоторых общественных зданиях не предусматриваются. Следует отметить, что значение второго слагаемого соизмеримо с первым, а иногда и превышает его, поэтому точность определения вентиляционного слагаемого принципиальна для рассматриваемых в статье вопросов.

Виктор Федорович Гершкович обратил внимание на то, что в некоторых развитых странах Европы и Америки нормативный воздухообмен в

жилых помещениях, определяющий второе слагаемое в нагрузке отопления, в 2–5 раз ниже, чем в России и странах СНГ. Если заложенный в нагрузку отопления воздухообмен не может быть по каким-то причинам востребован, то это значит, что все звенья системы теплоснабжения спроектированы на мощность отопления с некоторым запасом по их производительности и тепловой мощности. Следовательно, функционирующие системы теплоснабжения тратят на нагрев приточного воздуха меньшую тепловую мощность, чем предполагается в проекте системы отопления. В этом случае, действительно, есть основания ожидать, что система теплоснабжения сможет выполнять свои функции по поддержанию температуры в помещениях в условиях пониженной температуры прямой сетевой воды. Это главная идея, которая позволяет рационально объяснить наблюдаемые в жизни режимы работы систем теплоснабжения.

Можно предполагать, что проектный воздухообмен в российских проектах не реализуется из-за несовершенства типовых систем вентиляции помещений разного назначения. Но возможна ситуация, при которой средний за отопительный период воздухообмен определен по максимальным значениям расходов приточного воздуха, существенно превышающим среднесуточный воздухообмен в этих помещениях с учетом времени исполнения их функций. Например, на кухне или в спальне нет нужды обеспечивать максимальный воздухообмен в течение суток. Это будет очевидным превышением необходимого среднесуточного воздухообмена. Здесь наблюдается полная аналогия с суммой максимальных часовых расходов горячей воды и средним расходом горячей воды для теплоисточника.

Поэтому в настоящей статье подробно рассмотрены следующие вопросы, позволяющие изучить работу системы теплоснабжения в непроектных условиях.

1. Формирование расчетной тепловой мощности систем отопления жилых и прочих зданий, не имеющих отдельно выделенной калориферной нагрузки систем вентиляции. В этом случае тепловая нагрузка естественных систем вентиляции входит в качестве составной части в нагрузку систем отопления зданий. Выполнена оценка степени завышения реально востребованной тепловой нагрузки от ее проектного значения, определяемого современными нормативными документами строительного проектирования зданий и его инженерных систем.

2. Получение численных решений для модельных задач системы теплоснабжения с зависимым присоединением с элеваторным смещением и независимым присоединением системы отопления. Изучено функционирование таких систем в условиях заданного расхода сетевой воды, соответ-

ствующего проектному температурному графику, при пониженной температуре прямой сетевой воды в холодные дни, а также при положительной температуре наружного воздуха в течение отопительного периода.

3. В результате анализа полученных расчетных данных делаются выводы о работе систем теплоснабжения разного типа в реальных непроектных условиях, а также даются рекомендации по приведению в соответствие реальной практики регулирования тепловой нагрузки и теории проектирования систем теплоснабжения.

4. Выполненные исследования позволяют осуществить научно обоснованный переход работающих систем теплоснабжения на пониженный, в сравнении с проектным, температурный график.

РАЧЕТ РЕЖИМОВ РАБОТЫ СИСТЕМ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ В НЕПРОЕКТНЫХ УСЛОВИЯХ

Методы исследования режимов работы систем теплоснабжения в непроектных условиях определяются постановкой задачи, которая концептуально сформулирована ранее. Вначале обсуждается решение для качественного регулирования в непроектных условиях работы системы. Показано, что значительное снижение температуры прямой воды в системе отопления с элеваторным смешением приводит к слишком сильному падению температуры воздуха в помещениях, которое не наблюдается на практике. Поэтому проводится реалистичная оценка реальной нагрузки систем отопления. Решается система уравнений, описывающих работу всех звеньев системы теплоснабжения: теплового источника, тепловой сети, оборудования тепловых пунктов, выполняющих трансформацию параметров потоков теплоносителей, приборов отопления, тепловых потерь процесса передачи тепла через наружные ограждения и нагрева приточного воздуха, для всего диапазона температур наружного воздуха отопительного периода. Совместное решение уравнений сохранения, теплопередачи и уравнения состояния теплоносителей позволяет определить основные параметры системы теплоснабжения, отличающиеся от проектных значений: температуры воды тепловой сети и системы отопления, среднюю температуру в помещениях, тепловую мощность системы отопления.

Далее приводится широко известный вывод основных соотношений, используемых при качественном регулировании системы отопления с зависимым присоединением к тепловой сети и элеваторным смешением (рис. 1).

Система уравнений для проектных условий по расчетной температуре наружного воздуха t_n^p , соответствующей температуре холодной пятиднев-

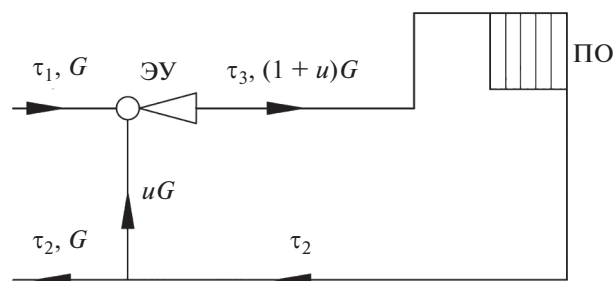


Рис. 1. Схема системы отопления с элеваторным смешением.

ЭУ – элеваторный узел; ПО – приборы отопления

ки ($t_n^p = -24^\circ\text{C}$), с коэффициентом обеспеченности 0.92 имеет вид

$$\left. \begin{aligned} k_3^p &= k_{\text{огр}}^p + G_{\text{взд}}^p c_{\text{взд}} / F_3; \\ Q^p &= k_n^p F_n \Delta t^p = Gc(\tau_1^p - \tau_2^p) = G_n c(\tau_3^p - \tau_2^p) = \\ &= k_3^p F_3 (t_n^p - t_n^p), \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где k_3^p – приведенное проектное значение коэффициента теплопередачи здания с учетом трансмиссии тепловой энергии через наружные ограждения общей площадью F_3 и затрат тепловой энергии на нагрев нормативного максимального часового расхода приточного воздуха, отнесенное к общей площади наружных ограждений F_3 , Вт/(м² · К); $k_{\text{огр}}^p$ – коэффициент теплопередачи здания с учетом трансмиссии тепловой энергии через наружные ограждения, Вт/(м² · К); $G_{\text{взд}}^p$ – массовый расход воздуха, кг/с; $c_{\text{взд}}$ – удельная массовая изобарная теплоемкость воздуха, Дж/(кг · К); Q^p – расчетный тепловой поток системы теплоснабжения, Вт; k_n^p – коэффициент теплопередачи приборов отопления с общей площадью поверхности теплообмена F_n , Вт/(м² · К); Δt^p – средний температурный перепад между теплоносителем приборов отопления и температурой воздуха в отапливаемых помещениях, °C; G – расход сетевой воды, поступающей в элеваторные узлы, кг/с; c – удельная массовая теплоемкость воды, Дж/(кг · К); $G_n = (1 + u)G$ – расход воды, циркулирующей через приборы отопления, кг/с; u – коэффициент смешения элеваторного узла, неизменный в течение отопительного периода (так как его значение зависит только от гидравлических сопротивлений контура системы отопления); τ_1^p , τ_2^p – расчетные температуры сетевой воды в подающем и обратном трубопроводе, равные соответственно 150 и 70°C; $\tau_3^p = 95^\circ\text{C}$ – расчетная температура воды в подающем трубопроводе системы отопления; t_n^p –

расчетная температура воздуха внутри помещения, равная 18°C.

При произвольной температуре наружного воздуха в течение отопительного периода t_n и сохранении температуры воздуха в помещениях t_b^p для качественного регулирования систему уравнений можно записать так:

$$\begin{aligned} Q &= k_n F_n \Delta t = Gc(\tau_1 - \tau_2) = \\ &= G_n c(\tau_3 - \tau_2) = k_3^p F_3(t_b^p - t_n), \end{aligned} \quad (2)$$

где τ_1, τ_2, τ_3 — температуры потоков воды, соответствующие произвольной температуре наружного воздуха $t_n, ^\circ\text{C}$.

Принятые в (2) обозначения показаны на рис. 1.

Очевидно, что для этого режима сохраняются значения площади поверхности приборов отопления, расходы сетевой воды и воды в системе отопления, площадь наружных ограждений, воздухообмен и коэффициент теплопередачи здания.

Относительное снижение тепловой мощности системы отопления составляет

$$\begin{aligned} \bar{Q} = \frac{Q}{Q^p} &= \frac{t_b^p - t_n}{t_b^p - t_n^p} = \left(\frac{\Delta t}{\Delta t^p} \right)^{n+1} = \\ &= \left[\frac{\tau_3 + \tau_2 - t_b^p}{\tau_3^p + \tau_2^p - t_b^p} \right]^{n+1}, \end{aligned} \quad (3)$$

где n — показатель степени в критериальной зависимости коэффициента теплопередачи приборов отопления от среднего температурного напора [3].

Вводятся обозначения: $\tau_1^p - \tau_2^p = \delta\tau^p$, $\tau_3^p - \tau_2^p = \theta^p$,

$$\Delta t^p = \frac{\tau_3^p + \tau_2^p}{2} - t_b^p.$$

Из (1)–(3) следует известное решение в виде

$$\tau_2 = t_b^p + \Delta t^p \bar{Q}^{1/(n+1)} - \frac{\theta^p}{2} \bar{Q}; \quad (4)$$

$$\tau_1 = t_b^p + \Delta t^p \bar{Q}^{1/(n+1)} + \left(\delta\tau^p - \frac{\theta^p}{2} \right) \bar{Q}; \quad (5)$$

$$\tau_3 = t_b^p + \Delta t^p \bar{Q}^{1/(n+1)} + \frac{\theta^p}{2} \bar{Q}. \quad (6)$$

Существуют объективные ограничения по температуре прямой сетевой воды снизу и сверху. Ограничением снизу является температура 70°C, необходимая для приготовления воды систем горячего водоснабжения на тепловых пунктах при положительных температурах наружного воздуха. Именно эта температура определяет точку излома температурного графика снизу. Для более высоких температур наружного воздуха при сохране-

нии принципа регулирования в помещениях будет наблюдаться так называемый перетоп, т.е. температура t_b будет больше 18°C.

Ограничением сверху для температуры прямой сетевой воды является предельная температура, зависящая от состояния сетей, оборудования различных звеньев системы теплоснабжения. Ее значение (110, 115, 120 или 130°C) определяет так называемую работу со срезкой, когда температура прямой воды поддерживается постоянной при низких температурах наружного воздуха. Очевидно, что в этом случае для рассматриваемой модели температура в помещениях t_b будет ниже расчетного значения 18°C.

Для этих двух интервалов наружных температур, соответствующих нижней и верхней срезкам температур прямой сетевой воды, приближенное решение имеет вид:

$$t_b^{\text{срез}} \approx t_n + (t_b^p - t_n) \frac{\tau_1^{\text{срез}} - t_n}{\tau_1 - t_n}; \quad (7)$$

$$\tau_2^{\text{срез}} \approx \tau_1^{\text{срез}} - (\tau_1 - \tau_2) \frac{\tau_1^{\text{срез}} - t_n}{\tau_1 - t_n}; \quad (8)$$

$$\tau_3^{\text{срез}} \approx \tau_1^{\text{срез}} - (\tau_1 - \tau_3) \frac{\tau_1^{\text{срез}} - t_n}{\tau_1 - t_n}; \quad (9)$$

$$\bar{Q} = \frac{t_b^{\text{срез}} - t_n}{t_b^p - t_n} \approx \frac{\tau_1^{\text{срез}} - t_n}{\tau_1 - t_n}, \quad (10)$$

где $\tau_1^{\text{срез}}, \tau_2^{\text{срез}}, \tau_3^{\text{срез}}$ — температуры потоков в зонах срезки, °C.

Например, для заданных выше проектных значений параметров системы теплоснабжения при срезке 115°C и температуре холодной пятидневки –25°C приближенные значения параметров равны:

Температура, °C:

воздуха в помещениях	9,4
обратной сетевой воды	51
на выходе из элеваторных узлов	71

Тепловая мощность против
проектного графика без срезки, %

80

Точные значения, определенные по уравнениям системы (3)–(6), составляют $\bar{Q} = 78.4\%$, $\tau_2 = 8.7^\circ\text{C}$, $\tau_1 = 52.3^\circ\text{C}$, $\tau_3 = 71.9^\circ\text{C}$. Для сравнения аналогичные проектные значения составляют 100% и 18, 70, 95°C соответственно.

Отсюда видно, что приведенные простые приближенные соотношения дают достаточно точные результаты, но проблема заключается в том, что эти решения не соответствуют практике эксплуатации систем такого вида. Например, в

Санкт-Петербурге температура воды в прямой линии от различных ТЭЦ не превышает 120°C , от котельных ГУП ТЭК она не более 100°C . Тем не менее, в холодные периоды длительностью несколько суток при выходе системы на режим, близкий к стационарному, столь сильного снижения температур в помещениях и мощности систем отопления не наблюдается.

Следовательно, необходимо проанализировать всю цепочку исходных данных, которые определяют функционирование системы отопления в течение отопительного периода. Главным параметром системы является ее заявленная тепловая мощность в расчетных условиях. Следует рассмотреть, как она формируется. Если окажется, что она завышается в сравнении с реальной тепловой нагрузкой, то полученное выше несоответствие будет иметь понятное объяснение.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОЕКТНОЙ И РЕАЛЬНОЙ МАКСИМАЛЬНОЙ НАГРУЗКИ СИСТЕМЫ ОТОПЛЕНИЯ

Необходимо различать значения максимальной часовой нагрузки системы отопления здания и средней часовой нагрузки за сутки холодной пятидневки. Максимальная часовая нагрузка системы отопления здания обеспечивает ее нормальную работу в экстремально сложных климатических условиях и определяется двумя слагаемыми: трансмиссионными потерями тепловой энергии через многослойные наружные ограждения с учетом разного рода теплотехнических неоднородностей и затратами тепловой энергии на нагрев приточного воздуха. Методы определения трансмиссионных тепловых потерь разработаны весьма детально, изложены в СП 50.13330.2012* [17] и не вызывают серьезных вопросов или возражений.

Второе слагаемое в расчетной тепловой мощности системы отопления зависит от нормативного расхода приточного воздуха, который определяется назначением помещений в процессе их эксплуатации. При этом в проекте системы отопления предполагается, что эта нагрузка, как и трансмиссионные тепловые потоки, востребована одновременно всеми потребителями.

Следует обратить внимание на то, как изменялись с течением времени нормы воздухообмена на примере помещений различного назначения жилых многоквартирных домов и общежитий, составляющих основную нагрузку жилых районов.

В СНиП II-Л.1-62 “Жилые здания. Нормы проектирования” и в последующих редакциях этого документа нормы воздухообмена для жилых комнат квартир и общежитий составляли $3 \text{ м}^3/\text{ч}$ на 1 м^2 площади, что соответствует кратности воздухообмена около 1 ч^{-1} .

В 2003 г. был введен в действие СНиП 31-01-2003 “Здания жилые многоквартирные”, в котором появились новые понятия — режим обслуживания и нерабочий режим помещений различного назначения, для которых нормы воздухообмена могут весьма существенно отличаться. Например, для спален, общих и детских комнат в режиме обслуживания кратность воздухообмена составляет 1.0 ч^{-1} , а в нерабочем режиме — 0.2 ч^{-1} , т.е. в 5 раз меньше.

Очевидно, что в расчетной нагрузке систем отопления должен учитываться не максимальный часовой, а среднесуточный воздухообмен во всех помещениях с учетом длительности и норм воздухообмена при различных режимах эксплуатации помещений.

В целях развития положений СП 60.13330.2016 “Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха” специалистами НП АВОК в 2020 г. были разработаны “Методические рекомендации по определению минимального воздухообмена в помещениях жилых и общественных зданий”. В этих Рекомендациях предлагается учитывать почасовые изменения минимального воздухообмена в зависимости от режима эксплуатации помещений жилых и общественных зданий в суточном и годовом циклах. Именно на основе типового профиля воздухообмена в помещениях необходимо определять среднесуточный воздухообмен в здании.

В справочном Приложении В СТО СРО НП СПАС-05-2013 “Энергосбережение в зданиях. Расчет и проектирование систем вентиляции жилых многоквартирных зданий” приводится пример расчета требуемого воздухообмена для трехкомнатной жилой квартиры. Из него следует, что в режиме обслуживания кратность воздухообмена равна 0.5 ч^{-1} , тогда как для нерабочего режима — 0.1 ч^{-1} . При учете реальной длительности этих периодов среднесуточная кратность воздухообмена для квартиры в целом находится на уровне 0.2 – 0.3 ч^{-1} .

При учете максимального часового воздухообмена трансмиссионное и вентиляционное слагаемые дают соизмеримый вклад в расчетную тепловую мощность системы отопления [18, 19] от 40 до 60%. Поэтому мощность системы отопления, определенная по среднесуточному воздухообмену, примерно на 20–30% меньше, чем при максимальном часовом воздухообмене.

Учет тепловой инерции зданий позволяет ориентироваться на среднесуточные значения расхода тепловой энергии на нагрев приточного воздуха.

Принятое в настоящей статье снижение реальной тепловой мощности системы отопления на 30% при выполнении расчетов режимов работы систем теплоснабжения носит иллюстративный характер. Более точно завышение расчетной на-

грузки теплоисточника на отопление должно определяться с учетом времени строительства зданий, их планировки, особенностей строительных конструкций и количества зданий разного типа.

Существующие системы вентиляции, особенно в старых жилых зданиях, не имеют эффективных средств регулирования расходов приточного воздуха в соответствии с нормативными значениями. Фактически приток наружного воздуха происходит через щели в наружных ограждениях либо через фрамуги и створки оконных блоков и стеклопакетов.

Но даже при наличии этих технических средств регулирование воздухообмена производится отнюдь не массово. Более того, замена старых оконных блоков на пластиковые стеклопакеты привела к заметному снижению воздухообмена, который далек от нормативных значений в межотопительный период и особенно в холодные дни. В результате оконные блоки и стеклопакеты в качестве приточных систем вентиляции жилых и общественных зданий выполняют роль регулятора-ограничителя тепловой нагрузки систем отопления. В холодные дни они не обеспечивают нормативный воздухообмен в режиме обслуживания, так как мало кто открывает фрамуги и створки оконных блоков.

Из изложенного следует, что и по современным нормам воздухообмена, и по факту применения существующих систем вентиляции реальная тепловая нагрузка систем отопления заметно меньше проектной мощности систем отопления. В настоящей статье основные расчеты выполнены для превышения проектной мощности на 30% по сравнению с фактической, а также сделаны оценки температурных графиков при отклонениях 20 и 10%.

РАБОТА СИСТЕМЫ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ С ЗАВИСИМЫМ ПРИСОЕДИНЕНИЕМ СИСТЕМЫ ОТОПЛЕНИЯ С ЭЛЕВАТОРНЫМ СМЕШЕНИЕМ В НЕПРОЕКТНЫХ УСЛОВИЯХ

Далее представлена система уравнений, описывающая поведение модели, приведенной на рис. 1, при произвольной температуре наружного воздуха:

$$\begin{aligned} Q &= k_n F_n \Delta t = Gc(\tau_1 - \tau_2) = \\ &= G_n c(\tau_3 - \tau_2) = 0.7k_3^p F_3(t_b^p - t_n). \end{aligned} \quad (11)$$

Здесь учтено, что реальный среднесуточный воздухообмен снижает общие тепловые потери здания на 30% (приведенный коэффициент теплопередачи здания $k_3 = 0.7k_3^p$) при любой температуре наружного воздуха.

Совместное решение (1) и (11) позволяет сформировать новый пониженный температурный график при сохранении средней температуры в помещениях в диапазоне температур наружного воздуха от точки излома температурного графика до температуры холодной пятидневки. Соответствующие температуры теплоносителей определяются из (4)–(6) с учетом

$$\bar{Q} = \frac{Q}{Q^p} = 0.7 \frac{t_b^p - t_n}{t_b^p - t_n^p}. \quad (12)$$

Значения всех характерных температур нового графика приведены в табл. 1. Расход сетевой воды и тепловая мощность системы отопления отнесены к проектным значениям. Из табл. 1 следует, что среднюю температуру воздуха в помещениях можно сохранить и при пониженной температуре прямой сетевой воды при графике 114/58°C. Это возможно в связи с тем, что все элементы системы теплоснабжения спроектированы на большую тепловую нагрузку, в сравнении с реальной, на 30%. При положительных температурах наружного воздуха сохранение температуры в помещениях на уровне 18°C возможно при снижении расхода сетевой воды.

Аналогичные графики могут быть получены при меньшем снижении тепловых потерь здания в расчетных условиях, например до 80 и 90% проектного значения. В первом случае средняя температура воздуха внутри помещений сохраняется при графике 126/62°C, во втором – при 138/66°C.

В [20] автор рассмотрел работу системы отопления с элеваторным смешением при отклонении от проектных значений гидравлических сопротивлений в контуре системы отопления. В [21] приведено обоснование сниженного температурного графика для зависимого присоединения системы отопления с элеваторным смешением.

РАБОТА СИСТЕМЫ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ С НЕЗАВИСИМЫМ ПРИСОЕДИНЕНИЕМ СИСТЕМЫ ОТОПЛЕНИЯ В НЕПРОЕКТНЫХ УСЛОВИЯХ

При проектировании новых зданий, как правило, применяется независимое присоединение систем отопления с использованием рекуперативного теплообменника на тепловом пункте при организации механической циркуляции в системе отопления. Соответствующая схема модельной задачи показана на рис. 2.

Профессор Е.Я. Соколов с сотрудниками в ряде работ [22–24] рассмотрели более общую постановку задачи с теплообменником отопления на центральном тепловом пункте и элеваторными узлами на индивидуальных тепловых пунктах. При ее решении принимались следующие допущения:

ния теплового пункта, кг/с; τ_3^p — температура воды в прямом трубопроводе системы отопления, °C; τ_4^p — температура воды в обратном трубопроводе системы отопления, °C.

Исходными данными для расчета и проектными параметрами системы являются следующие температуры, °C:

Сетевой воды в трубопроводе:

подающем τ_1^p 150

обратном τ_2^p 70

Воды в трубопроводе системы отопления:

подающем τ_3^p 80

обратном τ_4^p 60

Наружного воздуха t_n^p –24

Воздуха в помещении t_b^p 18

Непроектные условия работы системы описываются системой уравнений:

$$Q = k_n F_n \Delta t = Gc(\tau_1 - \tau_2) = G_n c(\tau_3 - \tau_4) = k_3 F_3 (t_b^p - t_n^p) = k_m F_m \frac{(\tau_1 - \tau_3) - (\tau_2 - \tau_4)}{\ln \frac{\tau_1 - \tau_3}{\tau_2 - \tau_4}}. \quad (14)$$

В приведенной модели учитывается вид теплообменного оборудования на тепловых пунктах. Для определенности принята конструкция пластинчатых теплообменников, широко применяемых в современных проектах зданий. Тепловые потери здания составляют 70% проектного значения в связи с пониженным расходом приточного воздуха при его осреднении за сутки $k_3 = 0.7k_3^p$.

В выполненных расчетах принималось, что в проектных и непроектных условиях площади поверхности приборов отопления F_n , наружных ограждающих конструкций зданий F_3 и теплообменников отопления F_m на тепловых пунктах одинаковы.

В соответствии с прил. 8 СП 41-101-95 “Проектирование тепловых пунктов” [25], коэффициенты теплоотдачи по сетевой воде и по потоку воды системы отопления зависят от средней температуры потока и его скорости.

Определить относительное снижение тепловой мощности системы можно, разделив соответствующие части систем уравнений (14) и (13) одну на другую:

$$\bar{Q} = (\bar{\Delta t})^{n+1} = \bar{G} \frac{\tau_1 - \tau_2}{\tau_1^p - \tau_2^p} = \bar{G}_n \frac{\tau_3 - \tau_4}{\tau_3^p - \tau_4^p} = \frac{k_3 t_b^p - t_n^p}{k_3^p t_b^p - t_n^p} = \frac{\tau_1^p - \tau_3^p}{k_m^p (\tau_1^p - \tau_3^p) - (\tau_2^p - \tau_4^p)} \ln \frac{\tau_2^p - \tau_4^p}{\tau_1^p - \tau_3^p}, \quad (15)$$

где n — показатель степени в критериальной зависимости для теплопередачи приборов отопления [26].

При расчетах был выбран распространенный тип приборов отопления в виде чугунных секционных радиаторов и стальных панельных конвекторов РСВ и РСГ при движении теплоносителя сверху вниз. Для этого типа приборов $n = 0.3$.

Решение системы уравнений (15) выполняется в одноцикловом итерационном процессе при переборе одной неизвестной величины, например температуры прямой сетевой воды, с определением другой неизвестной величины, например относительной тепловой мощности, из двух разных уравнений.

При использовании полученной модели был проведен расчет условий работы системы отопления с проектным температурным графиком 150/70°C и постоянной температурой внутри помещения 18°C. Значения всех характерных температур проектного и нового графиков представлены в табл. 2. Расход сетевой воды и тепловая мощность системы отопления также отнесены к проектным значениям.

На рис. 3, а приведены проектные температурные графики для рассмотренных систем теплоснабжения, на рис. 3, б — скорректированные.

Из данных табл. 2 следует, что сохранение средней температуры воздуха в помещениях возможно практически при том же сетевом температурном графике 114/58°C, что и при элеваторном присоединении системы отопления. В системе отопления будет обеспечиваться график 64/50°C. Аналогичные температурные графики могут быть получены при снижении тепловых потерь в расчетных условиях до 80 и 90% проектного значения. В первом случае температура в помещениях сохраняется при сетевом графике 126/62°C, во втором — при 138/66°C, как и для систем отопления с элеваторным смешением.

Как и следовало ожидать, сетевой температурный график является лишь средством, но не целью в договоре на теплоснабжение [27]. Решающий параметр системы отопления в договоре с ресурсоснабжающей организацией — температура воздуха в помещениях.

Таблица 2. Проектный ($k_3 = k_3^p$, $t_{н.и} = 3.41^\circ\text{C}$) и скорректированный ($k_3 = 0.7k_3^p$, $t_{н.и} = -2.85^\circ\text{C}$) температурные графики для независимого присоединения системы отопления

$t_n, ^\circ\text{C}$	$\tau_1^p/\tau_1, ^\circ\text{C}$	$\tau_2^p/\tau_2, ^\circ\text{C}$	$\tau_3^p/\tau_3, ^\circ\text{C}$	$\tau_4^p/\tau_4, ^\circ\text{C}$	$t_B^p/t_B, ^\circ\text{C}$	$\bar{Q}^p/\bar{Q}$	$\bar{G}^p/\bar{G}$
-24	150.0/114.4	70.0/58.4	80.0/64.1	60.0/50.1	18/18	1.00/0.70	1/1
-20	138.5/106.3	66.1/55.6	75.0/60.4	57.0/47.8	18/18	0.91/0.63	1/1
-16	126.8/98.0	62.1/52.7	70.0/56.7	53.8/45.3	18/18	0.81/0.57	1/1
-12	116.1/90.0	59.0/49.7	64.9/52.9	50.6/42.9	18/18	0.71/0.50	1/1
-8	104.5/81.2	55.0/46.5	59.6/49.0	47.2/40.3	18/18	0.62/0.43	1/1
-4	92.7/72.5	50.8/43.2	54.2/45.0	43.8/37.6	18/18	0.52/0.37	1/1
0	80.6/70.0	46.3/43.3	48.7/44.9	40.1/38.3	18/18	0.43/0.33	1/1
4	70.0/70.0	42.5/36.1	44.1/36.6	37.2/31	18.5/18	0.34/0.23	1/0.55
8	70.0/70.0	44.2/32.1	45.8/32.1	39.3/28.7	21.5/18	0.32/0.17	1/0.35

ВЫВОДЫ

1. В результате анализа расчетной мощности системы отопления показано, что при проектировании систем отопления площадь поверхности приборов отопления завышена в связи с неправильным определением среднесуточного нормативного значения расхода приточного воздуха в жилых, общественных и прочих зданиях. Именно этот запас является основной причиной более или менее нормальной работы систем теплоснабжения при пониженной температуре прямой сетевой воды в условиях холодной пятидневки года.

2. Для иллюстрации влияния 30%-ного запаса площади поверхности теплообмена приборов отопления, определены скорректированные температурные графики для существующих систем отопления с зависимым присоединением к тепловой сети с элеваторным смешением и с независимым присоединением через рекуперативный теплообменник на тепловом пункте.

3. Полученные результаты позволяют, во-первых, рационально объяснить существующее расхождение между теорией и практикой регулирования нагрузки отопления, во-вторых, предложить научно обоснованный метод корректировки температурных графиков регулирования сезонной нагрузки существующих систем теплоснабжения с проектным температурным графиком $150/70^\circ\text{C}$.

4. Принципиально важным для корректировки проектного температурного графика эксплуатируемых систем теплоснабжения является уточнение нагрузки отопления с учетом определения среднесуточного воздухообмена в помещениях жилых и общественных зданий в зависимости от режима их эксплуатации в суточном и годовом циклах.

5. Для заданной уточненной нагрузки отопления скорректированные температурные графики

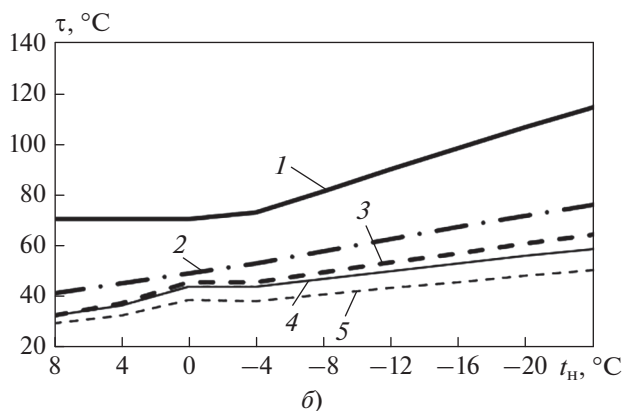
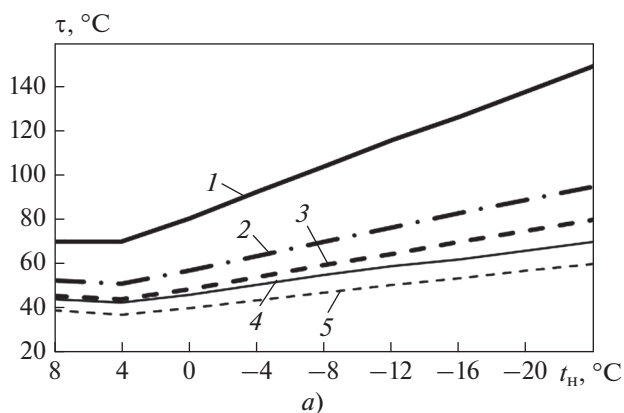


Рис. 3. Проектные (а) и скорректированные при снижении реальной тепловой нагрузки систем отопления на 30% (б) температурные графики для разных линий потоков систем теплоснабжения с элеваторным и независимым присоединением систем отопления к тепловой сети.

Линия: 1 — прямой сетевой воды для любого способа присоединения; 2 — после элеваторного узла; 3 — прямая отопления, независимое присоединение; 4 — обратной сетевой воды для любого способа присоединения; 5 — обратная отопления, независимое присоединение

для сетевой воды практически одинаковы для систем отопления как с элеваторным смешением, так и с независимым присоединением к тепловой сети.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Соколов Е.Я.** Теплофикация и тепловые сети: учеб. для вузов. 7-е изд., стереотип. М.: Изд-во МЭИ, 2001.
2. **Дюскин В.К.** Количественно-качественное регулирование тепловых сетей. М.: Госэнергоиздат, 1959.
3. **Дюскин В.К.** Тепловой и гидравлический режим систем водяного отопления. М.; Л.: Изд-во М-ва коммуна. хоз-ва РСФСР, 1950.
4. **Зингер Н.М.** Качественно-количественное регулирование закрытых систем теплоснабжения // Теплоэнергетика. 1964. № 8. С. 62–66.
5. **Шарапов В.И., Ротов П.В.** Регулирование нагрузки систем теплоснабжения. М.: Новости теплоснабжения, 2007.
6. **Панферов В.И., Панферов С.В.** Об особенностях вывода уравнений регулирования систем централизованного теплоснабжения // Вестник ЮУрГУ. Сер. Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. 2015. Т. 16. № 1. С. 21–30.
7. **Щелоков А.Я., Щелоков Я.М.** О роли температурных графиков в повышении эффективности тепловых сетей // Энергосбережение. 2021. № 2. С. 44–46.
8. **Гершкович В.Ф.** Энергосберегающие системы жилых зданий. Пособие по проектированию // Сантехника. Отопление. Кондиционирование. 2006. № 7. С. 76–82; № 8. С. 70–79.
9. **Рафальская Т.А., Мансуров А.Р., Мансурова И.Р.** Исследование переменных режимов работы систем централизованного теплоснабжения при качественно-количественном регулировании // Вестник ПНИПУ. Строительство и архитектура. 2019. Т. 10. № 2. С. 79–91.
<https://doi.org/10.15593/2224-9826/2019.2.07>
10. **Ексаев А.Р.** Методика для оптимизации эксплуатационного температурного графика любого конкретного теплоисточника в увязке с фактическим состоянием теплосетей, присоединенных нагрузок и требованиями, предъявляемыми к качеству теплоснабжения как услуги // Коммунальный комплекс России. 2021. № 3. С. 20–23. [Спец. выпуск.]
11. **Рекомендации по наладке водяных систем теплоснабжения / Сост. М.М. Апарцев / М-во энергетики и электрификации СССР; Глав. техн. управление по эксплуатации энергосистем; Всесоюз. гос. трест по организации и рационализации район. электр. станций и сетей ОРГРЭС. М., 1968.**
12. **Апарцев М.М.** Наладка водяных систем централизованного теплоснабжения: справ.-метод. пособие. М.: Энергоатомиздат, 1983.
13. **Миргородский А.И.** О температурных графиках // Новости теплоснабжения. 2018. № 8. С. 2–23.
14. **Зубанов А.А.** Оценка эффективности и экономичности работы системы теплоснабжения в реальных условиях // Новости теплоснабжения. 2018. № 8. С. 24–29.
15. **Анализ практики применения пониженных температурных графиков в теплоснабжении в зарубежных странах и оценка перспектив использования в системах теплоснабжения, включающих источники комбинированной выработки электрической и тепловой энергии, режимов с пониженными температурными графиками в целях повышения энергоэффективности и качества предоставляемых услуг по теплоснабжению. М.: ЗАО ИЦ “Энергетика города”, 2014.**
16. **Гершкович В.Ф.** Сто пятьдесят... Норма или перебор? (Размышления о параметрах теплоносителя) // Энергосбережение. 2004. № 5. С. 14–19.
17. **СП 50.13330.2012.** Свод правил. Тепловая защита зданий. Актуализированная редакция СНиП 23.02.2003. М.: М-во регион. развития РФ, 2012.
18. **Самарин О.Д.** Теплофизика. Энергосбережение. Энергоэффективность. М.: Изд-во Ассоциации строит. вузов, 2009.
19. **Филиппов С.П., Дильман Н.Д., Ионов М.С.** Оптимальные уровни тепловой защиты зданий для климатических условий России // Теплоэнергетика. 2013. № 11. С. 70–80.
<https://doi.org/10.1134/S0040363613110040>
20. **Петрущенко В.А.** Анализ режимов работы системы отопления с элеваторным смешением. СПб.: Страта, 2016.
21. **Петрущенко В.А.** Обоснование пониженного температурного графика регулирования централизованных систем теплоснабжения // Новости теплоснабжения. 2015. № 8. С. 30–37.
22. **Соколов Е.Я.** Тепловые характеристики теплообменных аппаратов // Теплоэнергетика. 1958. № 5. С. 38–43.
23. **Соколов Е.Я., Калинин Н.В.** Проверка точности приближенного уравнения характеристики теплообменного аппарата // Теплоэнергетика. 1964. № 2. С. 70–75.
24. **Соколов Е.Я., Вершинский В.П.** Методика расчета центрального регулирования закрытых независимых систем теплоснабжения // Теплоэнергетика. 1968. № 9. С. 83–85.
25. **СП 41-101-95.** Своды правил в строительстве. Проектирование тепловых пунктов. М.: ОАО ЦПП, 1995.
26. **Внутренние санитарно-технические устройства. В 3 ч. Ч. 1: Отопление / В.Н. Богословский, Б.А. Крупнов, А.Н. Сканава, А.Г. Егiazаров, Л.М. Михайлов, В.В. Невский, Л.Ф. Моор, Е.О. Шилькрот, А.Л. Наумов, С.М. Финкельштейн, Н.В. Харченко, С.С. Васильев, А.З. Ивянский, Н.И. Староверова, А.П. Варфоломеева; под ред. И.Г. Староверова и Ю.И. Шиллера. 4-е изд., перераб. и доп. М.: Стройиздат, 1990. (Сер. Справочник проектировщика.)**
27. **Жанэ А.Д.** Температурный график в отношениях ресурсоснабжения // Новости теплоснабжения. 2021. № 2. С. 60–63.

Calculation of Operating Modes of Centralized Heat-Supply Systems in Nonproject Conditions

V. A. Petrushchenkov*

Peter the Great St. Petersburg State Polytechnic University, St. Petersburg, 195251 Russia

**e-mail: pva38@mail.ru*

Abstract—A rational explanation of the reasons for the widespread practice of significant noncompliance with the design values of the temperature of mains water and coolant in heating devices in cold periods of the year is given. The process of forming the design load of heating systems is analyzed. It is shown that the term in the heating load, due to the heating of the supply air, should take into account different modes of operation of the premises during the day. Failure to take this fact into account leads to an overestimation of the design load of heating and all parts of the heat-supply system by up to 30%. The modes of operation of heat-supply systems with dependent connection of heating systems with elevator mixing and with their independent connection through heat exchangers at low temperatures of direct mains' water are considered. It is shown that it is possible under these conditions, with proper consideration of the standard average daily air exchange of premises for existing heat-supply systems, to switch to a reduced temperature schedule. For an overestimated estimated capacity of heat losses of buildings by 30% while maintaining high-quality regulation, examples of switching to a temperature schedule of 114–58°C for a heating system with both elevator mixing and with its independent connection to the heating network are given.

Keywords: typical profile of indoor air exchange, temperature schedule, regulation quality, operating characteristics

Свидетельство о регистрации средства массовой информации
ПИ № ФС77-79408 от 27 ноября 2020 г., выдано Федеральной службой по надзору в сфере связи,
информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор)

Подписано к печати 10.12.2019 г.

Формат 60 × 88¹/₈

Тираж 301 экз.

Усл. печ. л. 9.53

Дата выхода в свет 28.02.2020 г.

Уч.-изд. л. 9.75

Цена свободная

Учредители: Российская академия наук,
Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт»

Издатель: ООО «ТЕМАТИЧЕСКАЯ РЕДАКЦИЯ»,
125252, г. Москва, ул. Зорге, д. 19, этаж 3, помещ. VI, комн. 44
Отпечатано в типографии «Book Jet» (ИП Коняхин А.В.),
390005, г. Рязань, ул. Пушкина, 18, тел. (4912) 466-151