

ТЕПЛОФИКАЦИЯ И ТЕПЛОВЫЕ СЕТИ

РАСШИРЕННЫЙ ГРАФИК РЕГУЛИРОВАНИЯ ОТОПЛЕНИЯ: ОПРЕДЕЛЕНИЕ И ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ В СИСТЕМАХ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ

© 2021 г. А. А. Пятин^а, *, Д. М. Суворов^б

^аКировский филиал ПАО “Т Плюс”, Луганская ул., д. 51, г. Киров, 610044 Россия

^бВятский государственный университет, Московская ул., д. 36, г. Киров, 610000 Россия

*e-mail: piatin@mail.ru

Поступила в редакцию 08.04.2020 г.

После доработки 13.07.2020 г.

Принята к публикации 26.08.2020 г.

Исследован расширенный график регулирования режима отопления, обеспечивающий максимальное использование теплового потенциала теплоносителя, заданную температуру воздуха в отапливаемых помещениях и минимальные затраты энергии на транспортировку теплоносителя. Рассмотрено новое уравнение относительной отопительной нагрузки, обеспечивающей поддержание заданной температуры воздуха внутри помещений с учетом тепловыделений и затрат тепла на инфильтрацию. Использовано и верифицировано новое уравнение регулирования режима отопления, учитывающее отопительную нагрузку, расход воды, подаваемой в систему отопления, запас номинальной мощности системы, показатели степенных зависимостей коэффициента теплопередачи от температурного напора и расхода воды через систему и другие факторы. Применение расширенного графика приводит в основной части отопительного периода к снижению температуры обратной воды до 30–40°C при наличии достаточного запаса мощности системы отопления, что обеспечивает более полное охлаждение и уменьшение расхода теплоносителя, снижает затраты электроэнергии на привод сетевых насосов источника теплоснабжения и тепловые потери в сети, а также повышает эффективность работы ТЭЦ. Для оценки эффективности систем теплоснабжения предложено применять коэффициент использования теплового потенциала теплоносителя. Оценка эффектов при переходе систем отопления на расширенный график, выполненная на модельной системе теплоснабжения за отопительный период, показала, что при данном переходе коэффициент использования теплового потенциала теплоносителя, определенный с учетом повторяемости одноградусных интервалов температуры наружного воздуха, возрастает с 58 до 83%, расход сетевой воды снижается с 88 до 38% расчетного расхода, затраты электроэнергии на привод сетевых насосов уменьшаются в 3 раза, отпуск тепла от источника теплоснабжения снижается на 12.5% или на 10.0% с учетом горячего водоснабжения.

Ключевые слова: система теплоснабжения, отопительная нагрузка, регулирование отопления, температурный график, расширенный график регулирования

DOI: 10.1134/S0040363621040068

Присоединение России к Парижскому соглашению в рамках Рамочной конвенции ООН об изменении климата позволяет предположить, что в ближайшие десятилетия тенденция роста эффективности производства, распределения и потребления электрической и тепловой энергии в стране будет укрепляться. В соответствии с прогнозной оценкой технологической трансформации энергетики России, выполненной учеными ИНЭИ РАН с учетом этого обстоятельства, предполагается существенное увеличение доли ТЭЦ в структуре отпуска тепла с 45.3 в 2015 г. до 55.5–61.5% в 2040 г., причем доля современных (прежде всего парогазовых) технологий в целом по ТЭС не превысит 40% [1].

На основании прогноза [1] можно заключить, что для России важной задачей является повышение эффективности систем централизованного теплоснабжения (СЦТ), в том числе благодаря совершенствованию его технологий и способов регулирования, а в сфере теплоснабжения на базе теплофикации — за счет увеличения выработки электроэнергии паротурбинными ТЭЦ на тепловом потреблении.

Цель настоящей работы — исследование метода регулирования нагрузки отопления в зданиях, который обеспечивает максимальное использование теплового потенциала теплоносителя, заданную температуру воздуха в отапливаемых помещениях и минимальные затраты энергии на

транспортировку теплоносителя по тепловым сетям. График качественно-количественного регулирования отопления, обеспечивающий максимальное охлаждение теплоносителя по предложенному методу, называется расширенным графиком регулирования (РГР) [2, 3].

В настоящее время режимы работы СЦТ рассчитывают с помощью методов многоуровневого теплогидравлического моделирования [4–6]. В России в большинстве СЦТ при регулировании отпуска тепла на отопление применяется качественный метод с изменением температуры воды, подаваемой в системы отопления зданий, при ее постоянном расходе. Существуют методы количественного и качественно-количественного регулирования отопления зданий, при которых расход подаваемой на отопление воды изменяется [7, 8]. Во многих зарубежных странах, преимущественно в Центральной и Северной Европе, при проектировании СЦТ предусматривается количественное регулирование, и организация режимов работы систем отопления и горячего водоснабжения (ГВС) в них осуществляется полностью автоматически, что относится не только к тепловым, но и к гидравлическим режимам их работы [9–12].

Для российских условий сложность организации эффективных эксплуатационных режимов состоит в разной приспособленности тепловых пунктов к возможности количественного регулирования теплоснабжения абонентов [5, 6]. Кроме того, к недостаткам используемых в настоящее время расчетных методов моделирования и управления режимами работы, реализуемых в России [4, 5] и за рубежом [9–13], следует отнести, в частности, отсутствие или неполноту учета внутренних тепловыделений и теплотехнических характеристик систем отопления и отопительных приборов, в том числе запаса их тепловой мощности.

ТЕПЛОВОЙ БАЛАНС ОТОПЛЕНИЯ ЗДАНИЯ

В каждый момент времени стационарный процесс отопления здания характеризуется равенством (балансом) поступающей в него и уходящей в окружающую среду тепловой энергии. Согласно [7] мощность теплового потока, поступающего в отапливаемые помещения от системы отопления, называемая отопительной нагрузкой Q_o , представляет собой разность между суммарной мощностью уходящих потоков Q_{yx} и дополнительных потоков $Q_{доп}$, поступающих в здание, основную часть в которых для жилых зданий составляет суммарная мощность внутренних бытовых (далее – внутренних) тепловыделений $Q_{тв}$:

$$Q_o = Q_{yx} - Q_{доп} = q_o a V_H (t_b - t_H)(1 + \mu) - Q_{тв}, \quad (1)$$

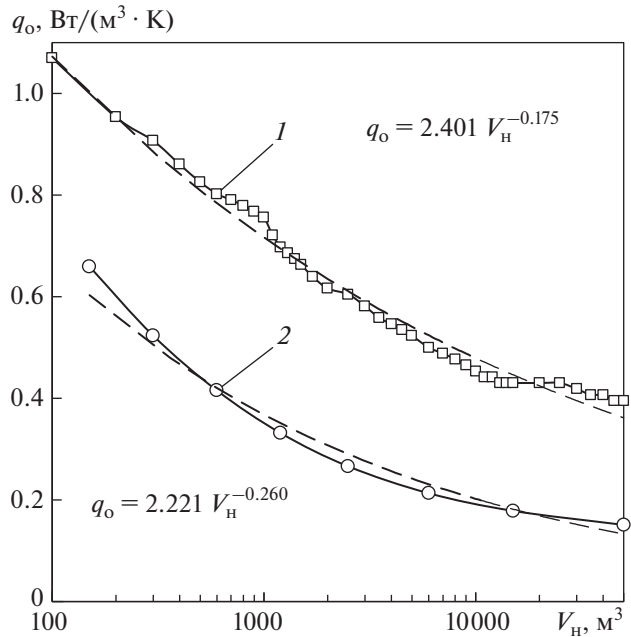


Рис. 1. Степенная аппроксимация справочных данных [14] (1) и [16] (2) для г. Киров по удельной отопительной характеристике жилых зданий

где q_o – удельная отопительная характеристика [7, 14–16]; a – поправочный коэффициент учета климатических условий местности [14]; V_H – наружный строительный объем здания; t_b – средняя температура внутри здания; t_H – температура наружного воздуха; μ – коэффициент инфильтрации.

Удельная отопительная характеристика здания зависит от его типа, объема и теплозащиты. Например, для жилых зданий, построенных после 1958 г. [14], и современных зданий согласно [16] она имеет значения, которые удобно аппроксимировать степенными функциями от объема здания (рис. 1).

Коэффициент инфильтрации учитывает тепловую мощность инфильтрации $Q_{и}$, затрачиваемую на нагрев воздуха, проникающего в здание через неплотности, и в произвольном текущем режиме может быть определен по формуле [7, 14]

$$\mu = \frac{Q_{и}}{Q_o} = b \sqrt{2gL_3 \left(1 - \frac{T_H}{T_B}\right) + w_B^2}, \quad (2)$$

где g – ускорение свободного падения; L_3 – свободная высота помещения (высота этажа); T_H , T_B – температура наружного и внутреннего воздуха по шкале Кельвина; w_B – скорость ветра; b – постоянная инфильтрации, определяемая через пло-

щадь сечения неплотностей F_H в наружных ограждениях здания по выражению

$$b = \frac{c_B F_H}{q_o a V_H};$$

здесь $c_B = 1.26$ кДж/(м³ · К) – объемная теплоемкость воздуха. Для жилых и общественных зданий при двойном остеклении окон $b = (8-10) \times 10^{-3}$ с/м [7].

Система отопления каждого здания проектируется на расчетный теоретический режим работы, при котором в отапливаемых помещениях при расчетной температуре наружного воздуха для проектирования систем отопления (расчетной отопительной) $t_{н.о}$, индивидуальной для каждой местности, должна быть обеспечена температура воздуха, равная нормативной расчетной температуре внутри помещения $t_{в.р}$ [7, 14, 15, 17–20]. При этом в систему подается вода температурой $\tau'_{о1}$, которая затем охлаждается до температуры обратной воды $\tau'_{о2}$, и в помещения передается расчетная теоретическая тепловая мощность $Q'_{о.т}$.

Здесь и далее показатели расчетного режима обозначаются со штрихом в верхнем индексе, показатели теоретического режима – с буквой “т” в нижнем индексе.

Уравнение (1) для расчетной теоретической отопительной нагрузки имеет вид

$$Q'_{о.т} = Q'_{yx} - Q'_{тв} = q_o a V_H (t_{в.р} - t_{н.о}) (1 + \mu'_т) - Q'_{тв}, \quad (3)$$

где $\mu'_т$ – расчетный теоретический коэффициент инфильтрации при расчетной скорости ветра $w'_в$ (для г. Киров $w'_в = 5.3$ м/с по [17]).

Мощность тепловыделений обычно принимается постоянной в отопительный период и равной расчетной мощности тепловыделений $Q'_{тв}$, которая определяется через удельную плотность тепловыделений $q_{тв}$ на 1 м² жилой площади в зависимости от заселенности жителями $f_{ж}$ по формуле

$$Q'_{тв} = q_{тв} f_{ж} N_{ж} = q_{тв} F_{ж}, \quad (4)$$

где $N_{ж}$ – число жителей; $F_{ж}$ – жилая площадь.

Согласно [21] плотность тепловыделений в жилых зданиях принимается равной 17 Вт/м² при заселенности 20 м²/чел. и менее, 10 Вт/м² – при заселенности 45 м²/чел. и более, а при промежуточной заселенности – с помощью линейной интерполяции. Указанные значения являются усредненными, фактически плотность тепловыделений динамично изменяется и зависит от многих факторов (количества находящихся в здании жителей,

числа включенных электроприборов, потребления газа и т.д.).

Объемная плотность тепловыделений в здании $q_{тв.об}$ вычисляется по формуле

$$q_{тв.об} = \frac{Q_{тв}}{V_H} = q_{тв} \frac{F_{ж}}{V_H}. \quad (5)$$

Значения мощности тепловыделений и их поверхностной плотности в текущем режиме могут отличаться от значений в расчетном теоретическом режиме. С учетом (3), (5) вводится понятие относительных теоретических (далее – относительных) тепловыделений $\bar{q}'_{тв.т}$ – отношения тепловыделений в текущем режиме к расчетной теоретической отопительной нагрузке:

$$\bar{q}'_{тв.т} = \frac{Q_{тв}}{Q'_{о.т}} = \frac{q_{тв.об}}{q_o a (t_{в.р} - t_{н.о}) (1 + \mu'_т) - q'_{тв.об}}, \quad (6)$$

где $q'_{тв.об}$ – объемная плотность тепловыделений в расчетном режиме.

При использовании степенных зависимостей удельной отопительной характеристики от объема зданий (см. рис. 1) по выражению (6) определены зависимости относительных тепловыделений от объема здания при разных значениях объемной плотности тепловыделений в расчетном теоретическом режиме для климатических условий г. Киров (рис. 2). Они показывают, что относительные тепловыделения в зданиях в расчетном теоретическом режиме могут достигать 20–50% для зданий, построенных после 1958 г. [14], и более 50% для современных зданий [16] с высокой тепловой защитой, причем с ростом объема здания значение относительных тепловыделений увеличивается.

Кроме того, с уменьшением отопительной нагрузки при повышении температуры наружного воздуха текущее относительное значение тепловыделений $Q_{тв}/Q_o$ при текущей отопительной нагрузке в тепловом балансе процесса отопления становится еще большим, и для эффективного регулирования отопления необходимо учитывать внутренние тепловыделения.

Относительная отопительная нагрузка здания $\bar{Q}'_{о.т}$, определяемая как отношение текущей отопительной нагрузки к расчетной теоретической нагрузке (3), с учетом внутренних тепловыделений и инфильтрации для произвольного режима отопления задается формулой [3]

$$\bar{Q}'_{о.т} = \frac{Q_o}{Q'_{о.т}} = \frac{(t_{в} - t_{н}) (1 + \mu)}{(t_{в.р} - t_{н.о}) (1 + \mu'_т)} \left(1 + \bar{q}'_{тв.т} \right) - \bar{q}'_{тв.т}, \quad (7)$$

где $\bar{q}'_{тв.т}$ – относительные тепловыделения в расчетном теоретическом режиме.

Относительная отопительная нагрузка существенно зависит от относительных тепловыделений, температуры наружного воздуха и заданной температуры внутри зданий, которая может отличаться от нормативной. Температура наружного воздуха, при которой относительная отопительная нагрузка равна нулю и затраты тепла на отопление (при его наличии) полностью обеспечиваются тепловыделениями, можно назвать температурой начала отопления $t_{нач}$, которую вычисляют с помощью итерационного подбора по формуле

$$t_{нач} = t_{в} - (t_{в,р} - t_{н,о}) \frac{\bar{q}'_{тв,т.нач} (1 + \mu'_{т})}{(1 + \bar{q}'_{тв,т}) (1 + \mu_{нач})}, \quad (8)$$

где $\bar{q}'_{тв,т.нач}$, $\mu_{нач}$ – относительные тепловыделения и коэффициент инфильтрации при температуре наружного воздуха начала отопления.

Значение коэффициента инфильтрации и относительных тепловыделений определяют при искомой температуре начала отопления, обеспечивающей выполнение равенства (8). При температуре наружного воздуха выше $t_{нач}$ отопление с поддержанием заданной температуры внутри зданий невозможно, так как тепловыделения при их неизменности будут превышать потери тепла и произойдет перегрев помещений.

График зависимости температуры начала отопления от температуры внутри зданий и относительного значения тепловыделений (6), принимаемого постоянным и равным расчетному теоретическому значению, показан на рис. 3. Как пример приведены температуры начала отопления при $t_{в} = 22^{\circ}\text{C}$, наиболее комфортной для жителей (по [18] интервал допустимой температуры внутри помещений для г. Киров составляет $20\text{--}24^{\circ}\text{C}$). При анализе эффектов, возникающих вследствие применения расширенного графика регулирования режима отопления, в качестве заданной температуры внутри жилых зданий в г. Киров была принята температура 22°C . Она является средней температурой допустимого диапазона для микроклимата жилых помещений согласно [18, 20] и отличается от нормативной температуры 20°C [18, 19] – минимально допустимой температуры, обеспечиваемой работой системы отопления в расчетном режиме.

Из рис. 3 видно, что увеличение тепловыделений снижает температуру начала отопления, что закономерно, а повышение заданной температуры внутри помещений увеличивает ее. При определенном уровне тепловыделений температура начала отопления становится меньше температуры включения или выключения систем отопле-

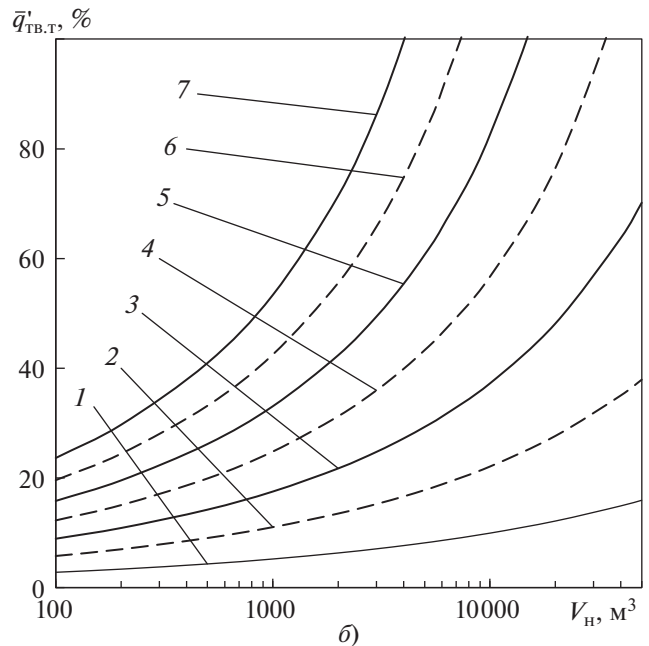
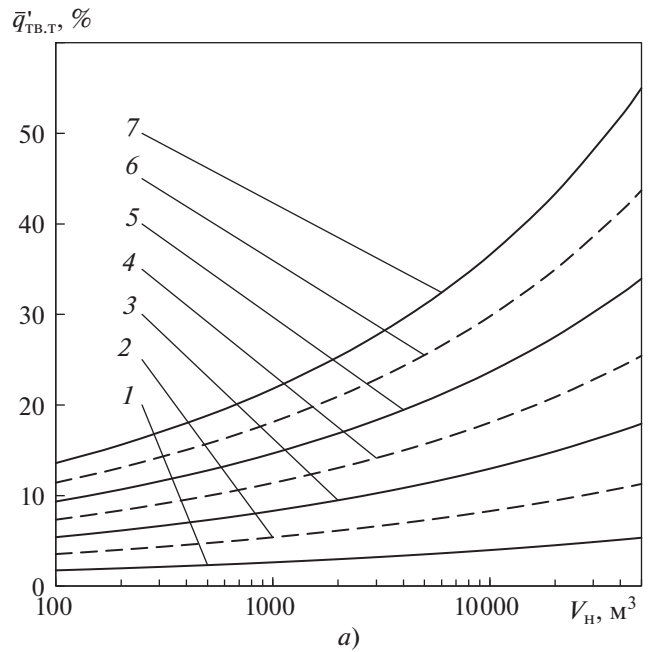


Рис. 2. Зависимость относительных тепловыделений в расчетном теоретическом режиме по [14] (а) и [16] (б) от объема зданий в климатических условиях г. Киров. $q'_{тв,об}$, Вт/м³: 1 – 1; 2 – 2; 3 – 3; 4 – 4; 5 – 5; 6 – 6; 7 – 7

ния – температуры начала (или окончания) отопительного периода 8°C [18].

Из (7) также следует, что расчетная относительная отопительная нагрузка, равная 100% при заданной температуре внутри помещений, которая превышает расчетную нормативную, наблюдается при расчетной температуре наружного воздуха $t'_{н}$,

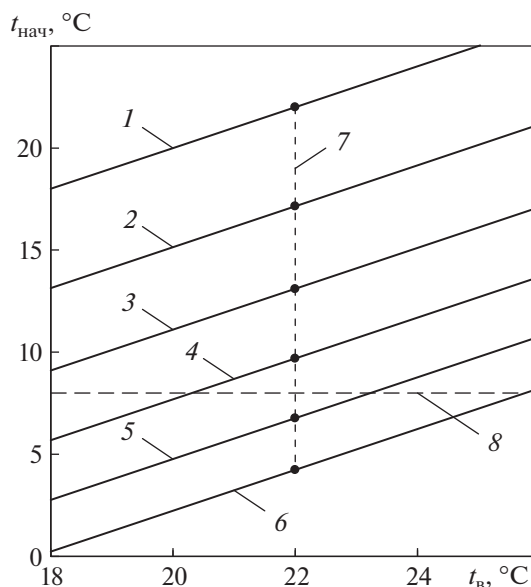


Рис. 3. Зависимость температуры начала отопления от заданной температуры внутри зданий для климатических условий г. Киров.
 $\bar{q}_{\text{тв.т}}$, %: 1 – 0; 2 – 10; 3 – 20; 4 – 30; 5 – 40; 6 – 50; 7 – линия температур начала отопления при $t_{\text{в}} = 22^\circ\text{C}$; 8 – линия температуры наружного воздуха 8°C

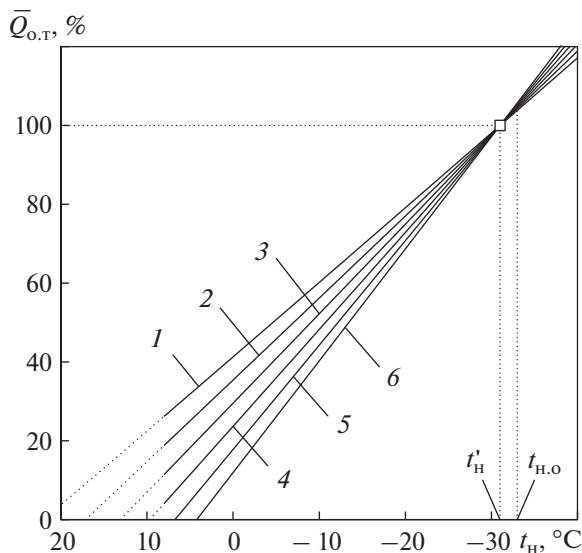


Рис. 4. Зависимость относительной отопительной нагрузки от температуры наружного воздуха при температуре внутри зданий 22°C для климатических условий г. Киров.
 Обозначения см. рис. 3

большей расчетной отопительной температуры наружного воздуха [2]:

$$t'_n = t_b - (t_{\text{в.п}} - t_{\text{н.о}}) \frac{1 + \mu'_n}{1 + \mu'_n} \cong t_b - (t_{\text{в.п}} - t_{\text{н.о}}) > t_{\text{н.о}}, \quad (9)$$

где μ'_n – коэффициент инфильтрации при расчетной наружной температуре t'_n .

Зависимости относительной отопительной нагрузки (7) от температуры наружного воздуха при температуре внутри зданий 22°C , постоянных текущих и равных расчетному значению тепловыделений $Q_{\text{тв}} = Q'_{\text{тв}}$ и постоянном значении относительных тепловыделений $\bar{q}_{\text{тв.т}} = \bar{q}'_{\text{тв.т}}$ в диапазоне 0–50% показаны на рис. 4. Зависимости практически линейны, незначительная нелинейность связана с коэффициентом инфильтрации, который для жилых зданий при $t_{\text{в.п}} = 20^\circ\text{C}$, $L_3 = 2.8$ м, $w_{\text{в}} = 5.3$ м/с и $b = 0.01$ с/м по (2) изменяется в интервале от 6.2% при $t_{\text{н}} = -33^\circ\text{C}$ до 5.5% при $t_{\text{н}} = 8^\circ\text{C}$. По рис. 4 видно, что при температуре внутри зданий 22°C , отличающейся от нормативной 20°C при теоретическом режиме, расчетная теоретическая отопительная нагрузка 100% (3) наблюдается при расчетной температуре наружного воздуха -31°C . При расчетной отопительной температуре наружного воздуха для г. Киров -33°C [15, 17] отопительная нагрузка равна 104–106% расчетной теоретической нагрузки. С ростом относительных тепловыделений в области температур наружного воздуха ниже расчетной наружной температуры отопительная нагрузка повышается. Это происходит вследствие увеличения в уравнении (7) значений относительных тепловыделений и углового коэффициента.

РАСШИРЕННЫЙ ГРАФИК РЕГУЛИРОВАНИЯ ОТОПЛЕНИЯ

В настоящее время в России принят качественный метод регулирования отопительной нагрузки с поддержанием постоянного расхода теплоносителя при изменении температуры воды, подаваемой в систему отопления здания τ_{01} , и температуры обратной воды τ_{02} , определяемых по отопительному температурному графику по общему уравнению [3, 7]

$$\tau_{01(2)} = t_{\text{в.п}} + \Delta t'_{\text{т.а}} \sqrt[n]{\bar{Q}_{\text{o.t}}} \pm \frac{\theta'_t}{2} \bar{Q}_{\text{o.t}}, \quad (10)$$

где n – степенной показатель зависимости коэффициента теплопередачи отопительных приборов от температурного напора; $\theta'_t = \tau'_{01} - \tau'_{02}$ – охлаждение воды в расчетном теоретическом режиме от температуры τ'_{01} до τ'_{02} ; $\bar{Q}_{\text{o.t}}$ – относительная отопительная нагрузка без учета тепловыделений, инфильтрации и при нормативной температуре внутри зданий; $\Delta t'_{\text{т.а}}$ – температурный напор отопления в расчетном теоретическом режиме, определяемый как среднеарифметический по формуле

$$\Delta t'_{т.а} = \frac{\tau'_{о1} + \tau'_{о2}}{2} - t_{в.п} = \tau'_{о1} - \frac{\theta'_т}{2} - t_{в.п}.$$

Уравнение (10) в большинстве СЦТ в России также является основой для расчета температурного графика регулирования отпуска тепла от его источников.

В данном исследовании рассматривается новое уравнение для расчета температуры воды, подаваемой на отопление, и температуры обратной воды [2]:

$$\tau_{ол(2)} = t_{в} + \theta'_т \frac{c'_т \bar{Q}_{о.т}}{c \bar{G}_т} \times \left[\pm 1 \mp \exp \left(\mp \frac{\theta'_т c'_т \bar{Q}_{о.т}}{\Delta t'_{т.л} c \bar{G}_т} \sqrt{\frac{k_{н.с}^{1-p} \bar{G}_т^p}{\bar{Q}_{о.т}}} \right) \right]^{-1}, \quad (11)$$

где $c'_т$ – средняя удельная теплоемкость воды в расчетном теоретическом режиме; c – средняя теплоемкость воды в текущем режиме в интервале температур от $\tau_{о1}$ до $\tau_{о2}$; $\bar{G}_т$ – относительный расход воды в систему отопления (на отопление); p – степенной показатель, см. формулу (16); $\Delta t'_{т.л}$ – расчетный теоретический температурный напор, определяемый как среднелогарифмический напор; $k_{н.с}$ – коэффициент номинального состояния (режима работы) системы отопления, характеризующий запас ее отопительной мощности, т.е. мощности, приведенной к условиям номинального режима работы установленного оборудования (отопительных приборов).

Среднелогарифмический температурный напор вычисляется по выражению

$$\Delta t'_{т.л} = \frac{\tau'_{о1} - \tau'_{о2}}{\ln \left(\frac{\tau'_{о1} - t_{в.п}}{\tau'_{о2} - t_{в.п}} \right)} = - \frac{\theta'_т}{\ln \left(1 - \frac{\theta'_т}{\tau'_{о1} - t_{в.п}} \right)}. \quad (12)$$

Относительный расход воды на отопление определяется как отношение заданного расхода воды к расходу воды в теоретическом расчетном режиме:

$$\bar{G}_т = \frac{G}{G'_т} = G \frac{c'_т \theta'_т}{Q'_{о.т}}, \quad (13)$$

где G – текущий расход; $G'_т$ – расчетный теоретический расход.

Значение коэффициента номинального состояния системы отопления определяется по формуле

$$k_{н.с} = \frac{Q_{н}}{Q_{н.т}} = \frac{Q_{о.п} + Q_{т.р}}{Q_{н.т}} = 1 + \alpha_{зап}, \quad (14)$$

где $\alpha_{зап}$ – коэффициент запаса тепловой мощности; $Q_{н} = Q_{о.п} + Q_{т.р}$ – фактическая полная номинальная мощность системы отопления, т.е. номи-

нальная мощность находящихся в отапливаемых помещениях отопительных приборов $Q_{о.п}$ и трубопроводов $Q_{т.р}$ с учетом их размеров и условий подключения и установки [22]; $Q_{н.т}$ – теоретически необходимая номинальная мощность системы, определяемая по соотношению [2]

$$Q_{н.т} = Q'_{о.т} \sqrt[1-p]{\left(\frac{c'_т}{c_{т.н}} \right)^p \left(\frac{\Delta t_{о.п}}{\Delta t'_{т.л}} \right)^{1+n}}, \quad (15)$$

где $\Delta t_{о.п}$ – номинальный температурный напор отопительных приборов [22]; $c_{т.н}$ – удельная теплоемкость теплоносителя в системе отопления при номинальном температурном напоре и нормативной температуре внутри зданий; n, p – степенные показатели коэффициента теплопередачи k в формуле [22]

$$k = k_{н} \left(\frac{\Delta t}{\Delta t_{о.п}} \right)^n \left(\frac{G}{G_{н}} \right)^p; \quad (16)$$

здесь $k_{н}$ – номинальный коэффициент теплопередачи отопительного прибора (системы отопления); Δt – текущий температурный напор; $G_{н}$ – номинальный расход воды, поступающей в отопительные приборы системы отопления.

Таким образом, по (11) необходимая температура воды, подаваемой на отопление, и температура обратной воды зависят от параметров расчетного теоретического режима работы системы отопления и текущего расхода воды (13), заданной температуры внутри зданий и текущей температуры наружного воздуха, коэффициента инфильтрации (2), относительных тепловыделений (6), степенных показателей температурной и расходной нелинейности теплопередачи (16) и коэффициента (14), характеризующего запас номинальной мощности системы. В общем виде эта зависимость выглядит следующим образом:

$$\tau_{ол(2)} = f(\bar{G}_т, t_{в}, t_{н}, \mu, \bar{q}_{тв.т}, c, n, p, k_{н.с}). \quad (17)$$

Средняя теплоемкость воды в системе отопления в интервале температур ее охлаждения последовательно уточняется итерационными приближениями. Используя (7), (11), (13), можно определить температуру воды, подаваемой на отопление, и обратной воды при заданном ее расходе или итерационно находить расход воды на отопление по ее температуре. Задавая зависимость расхода воды от температуры наружного воздуха, можно по (11) получать любой график качественно-количественного регулирования отопления, обеспечивающий заданную температуру внутри здания.

Уравнения (10) для качественного и (11) для качественно-количественного регулирования отопления определяют температуру обратной воды и требуемые параметры воды, поступающей в си-

стему отопления, которые могут обеспечиваться автоматизированными узлами отопления с помощью циркуляционных насосов с регулируемым приводом и регулирующих клапанов, изменяющих коэффициент инжекции в узлах смешения или расход воды, подаваемой в подогреватель отопления. В этом случае жесткая взаимосвязь между температурным графиком тепловой сети и графиком регулирования режима работы системы отопления отсутствует и появляется возможность гибкого управления отоплением здания в широких границах возможных или имеющихся условий внешнего теплоснабжения.

В [7] предлагается следующее уравнение качественно-количественного регулирования режима отопления при зависимой схеме подключения и без учета связанного с внешним теплоснабжением коэффициента инжекции:

$$\tau_{ol(2)} = t_{в.п} + \Delta t'_{т.а} \sqrt[1+n]{\bar{Q}_{о.т}} \pm \frac{\theta'_т c'_т \bar{Q}_{о.т}}{2c\bar{G}_т} \quad (18)$$

Это уравнение является не вполне корректным, так как его применение допускает возможность охлаждения обратной воды до температуры воздуха внутри зданий и даже ниже 0°C , что невозможно, при малых расходах воды на отопление [2]. Между тем, основанное на новой расчетной модели отопления [2] уравнение регулирования (11) исключает такую возможность и поэтому является более адекватным реальности во всем диапазоне расходов воды, подаваемой в систему отопления при качественно-количественном регулировании. Кроме того, приведенный ранее анализ теплового баланса отопления показывает, что расчетная отопительная нагрузка, определяемая при расчетной температуре наружного воздуха для проектирования систем отопления и обычно считающаяся постоянной, в действительности изменяется и зависит от температуры воздуха внутри зданий, тепловыделений и уровня инфильтрации. В то же время расчетная температура наружного воздуха, при которой отопительная нагрузка равна теоретическому расчетному значению, зависит в основном от температуры внутри зданий.

Также расчетная теоретическая отопительная нагрузка, определяемая при проектировании и являющаяся основой для расчета мощности системы отопления, не может, как обычно, приравниваться теоретической номинальной мощности системы вследствие различия между параметрами расчетного режима и стандартными условиями ($\Delta t_{о.п} = 70^\circ\text{C}$, расход 0.1 кг/с) [22], при которых определяется номинальная мощность отопитель-

ных приборов. Соответственно, в условиях, когда расчетная отопительная нагрузка и расчетная температура наружного воздуха зависят от текущего режима работы системы отопления, возможно и необходимо опираться только на теоретический режим и расчетную теоретическую отопительную нагрузку. По ее значению должна определяться теоретическая номинальная мощность системы отопления и после расчета фактической номинальной мощности всего установленного оборудования системы отопления могут оцениваться коэффициент запаса ее тепловой мощности и коэффициент номинального состояния, существенно влияющий на эффективность работы и регулирования режима работы системы отопления.

Наиболее эффективным из возможных является предложенный в [2, 3] новый расширенный график регулирования режима отопления, при котором происходит максимальное охлаждение теплоносителя и наиболее полное использование его теплового потенциала. В расширенном графике с включением отопления поддерживается минимально возможный (допустимый) расход воды, подаваемой в систему отопления, и вначале ее температура с понижением температуры наружного воздуха повышается (качественное регулирование). При некоторой температуре наружного воздуха, которую можно назвать температурой смены способа регулирования $t_{н.с.}$, при минимальном расходе по (11) достигается максимальная допустимая или некоторая принятая расчетная температура воды, подаваемой на отопление, которая затем с понижением температуры наружного воздуха поддерживается постоянной, а регулирование процесса отопления осуществляется увеличением расхода воды (количественное регулирование). Данное качественно-количественное регулирование должно осуществляться автоматизированным узлом управления отоплением в тепловом пункте здания. По [8, 22] снижение расхода воды в области качественного регулирования РГР до 20–30% расчетного теоретического расхода возможно для многих систем отопления.

Оценка эффективности применения РГР выполнена на примере системы теплоснабжения и климатических условий г. Киров. Как во многих городах России, в большинстве зданий этого города используется отопительный температурный график $95/70^\circ\text{C}$ ($\tau'_{о1} = 95^\circ\text{C}$, $\tau'_{о2} = 70^\circ\text{C}$). При нормативной температуре внутри зданий 20°C [18] и абсолютном давлении воды, подаваемой на отопление, 0.5 МПа параметры расчетного режима равны: $\theta'_т = 25^\circ\text{C}$, $\Delta t'_{т.п} = 61.66^\circ\text{C}$, $c'_т = 4.1974 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)}$. Регулирование отпуска тепла от основных ТЭЦ г. Киров (ТЭЦ-4, ТЭЦ-5) осуществляется по повышенному температурно-

му графику 150/70°C с температурой срезки 130°C и со спрямлением при температуре наружного воздуха выше температуры точки излома, равной 0°C, далее называемым исходным температурным графиком (ИТГ). Вследствие наличия элеваторных схем в большинстве зданий температурный график систем отопления по ИТГ в областях спрямления и срезки имеет отклонение температуры воды от линий отопительного графика 95/70°C (рис. 5), который обычно реализуется в зданиях с автоматизированными узлами управления с “погодным” регулированием по (10).

Также на рис. 5 показан расширенный температурный график регулирования отопления по (11) при минимальном относительном расходе воды, подаваемой в систему отопления, равном 25%, нормативной температуре внутри зданий 20°C, $n = 0.25$, $p = 0.05$ и отсутствии тепловыделений и инфильтрации. Данный график совпадает с графиком 95/70°C в расчетном режиме, обеспечивает большее охлаждение теплоносителя и снижение температуры обратной воды на 8–18°C.

Результаты расчета температурных графиков показали, что при расходе воды на отопление, равном расчетному теоретическому расходу во всем нормативном диапазоне температур наружного воздуха, постоянной теплоемкости, равной ее значению в расчетном режиме, $n = 0.25$, $p = 0$, без учета тепловыделений, инфильтрации и запаса тепловой мощности (14) системы отопления отопительный температурный график, полученный по (11), с погрешностью до 0.15°C совпал с отопительным графиком по (10), несмотря на различную форму уравнений. Это свидетельствует о высокой степени соответствия результатов расчетов по (11) для данных упрощенных условий и верифицирует уравнение (11) для более сложных условий применения.

Формы расширенного температурного графика и связанного с ним графика расхода воды на отопление, образующих в целом расширенный график регулирования отопления, согласно (17) зависят от заданного минимального относительного расхода воды, температуры внутри зданий, относительных тепловыделений и коэффициента номинального состояния. При применении РГР вместо температурного графика (10) снижаются температура обратной воды и расход воды, подаваемой в систему отопления. На снижение расхода и температуры обратной сетевой воды, возвращающейся на источник, оказывает влияние степень использования расширенного графика в СЦТ, т.е. количество зданий (в общем случае разных типов и годов постройки) с соответствующими узлами управления.

Для оценки эффективности применения расширенного графика отопления по (17) были рас-

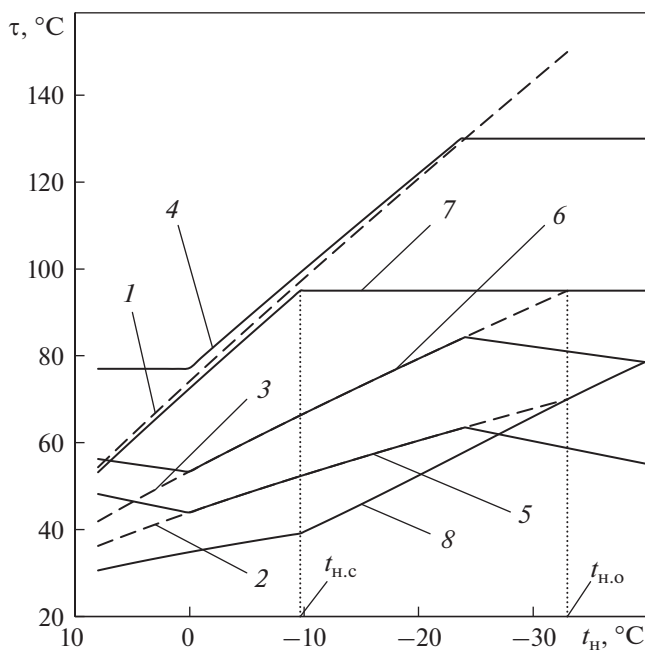


Рис. 5. Температурный график ТЭЦ системы теплоснабжения г. Киров в осенне-зимний период 2019/2020 г. и при использовании расширенного графика регулирования отопления зданий.

1, 2 – прямая и обратная сетевая вода по отопительному графику 150/70°C; 3 – вода, подаваемая в систему отопления по отопительному графику 95/70°C; 4 – прямая сетевая вода по ИТГ со срезкой при 130°C; 5 – обратная сетевая вода после элеваторных систем отопления по ИТГ; 6 – вода, подаваемая в системы отопления зданий с элеваторами по ИТГ; 7, 8 – вода, поступающая в системы отопления, и обратная сетевая вода при РГР

считаны несколько графиков регулирования режима отопления для температуры внутри зданий 22°C при минимальном расходе воды на отопление 30%, относительных тепловыделениях 0, 20, 40%, коэффициенте номинального состояния 1.0 (100%) и 1.5 (150%), т.е. без запаса и с запасом номинальной тепловой мощности 50%, и показателях $n = 0.25$ и $p = 0.05$. Данные графики (рис. 6) показывают, что увеличение тепловыделений приводит к смещению температуры начала отопления в область более низких температур наружного воздуха, а увеличение запаса номинальной мощности существенно снижает температуру обратной воды и температуру наружного воздуха смены способа регулирования. При этом вследствие того, что температура воздуха внутри зданий принята выше нормативной 20°C, происходит повышение расчетной температуры наружного воздуха от -33°C до -31°C и температуры обратной воды в расчетном режиме от 70°C до 73°C для варианта отсутствия запаса мощности системы отопления. Соответствующие темпера-

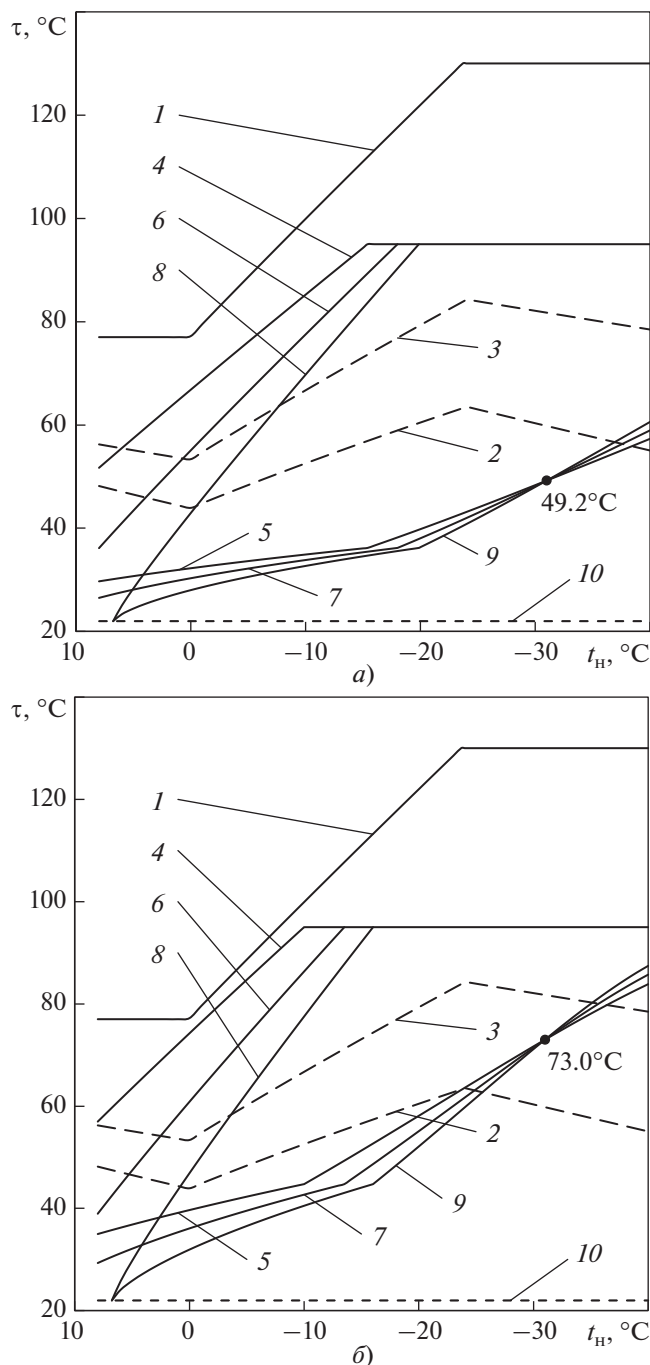


Рис. 6. Расширенные графики регулирования для условий системы теплоснабжения г. Киров при коэффициенте номинального состояния систем отопления зданий 150% (а), 100% (б) и минимальном расходе воды на отопление 30%.

1, 2 – прямая и обратная сетевая вода по ИТГ; 3 – вода, поступающая в системы отопления зданий с элеваторами по ИТГ; 4, 6, 8 – вода, поступающая в системы отопления по РГР; 5, 7, 9 – обратная вода по РГР; 10 – внутренний воздух в зданиях при РГР; $\bar{q}'_{тв}$, %: 4, 5 – 0; 6, 7 – 20; 8, 9 – 40

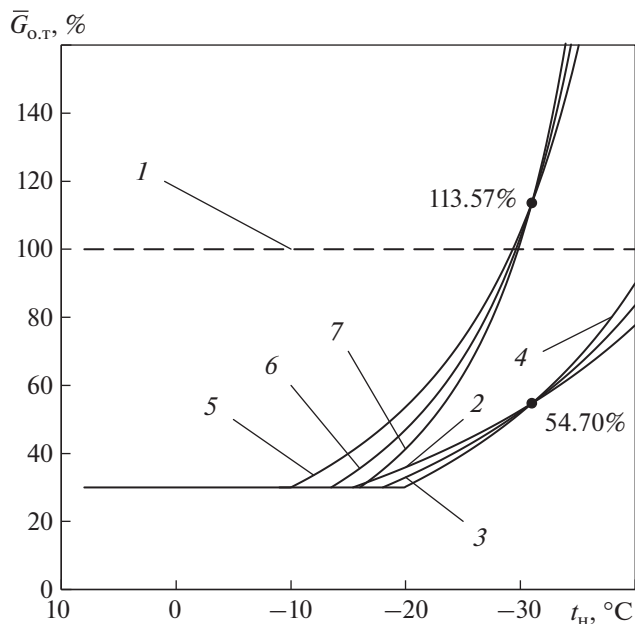


Рис. 7. Графики относительных расходов воды в системы отопления зданий, соответствующие расширенным температурным графикам регулирования по рис. 6, при минимальном относительном расходе 30%. 1 – ИТГ; 2–7 – РГР; $k_{н.с}$, %: 2–4 – 150; 5–7 – 100; $\bar{q}_{тв.т}$, %: 2, 5 – 0; 3, 6 – 20; 4, 7 – 40

турным графикам (см. рис. 6) графики относительных расходов воды на отопление (13) (рис. 7) показывают, что увеличенный запас мощности системы отопления позволяет снизить расход воды на отопление в расчетном режиме до 54.7%, а при отсутствии запаса мощности повышение температуры внутри зданий требует увеличения расчетного расхода до 113.6% расчетного теоретического расхода.

Расширенный график регулирования индивидуален для каждого здания, поэтому может обеспечиваться только работой автоматизированного узла (автоматизированной системы) управления отоплением в схемах систем отопления с насосным смешиванием. В общем случае такой график должен динамически изменяться исходя из внешних условий и параметров отопления – тепловыделений, инфильтрации и инсоляции, скорости ветра, заданного графика и температуры внутри зданий, а также изменяющихся характеристик системы отопления и теплозащиты, автоматически определяемых узлом управления [2]. Разработка алгоритмов управления отоплением по РГР и уравнению регулирования (11), а также оценка допустимых и возможных уровней снижения расхода воды на отопление при различных схемах систем отопления и типах зданий является задачей дальнейших исследований.

МОДЕЛЬНАЯ СИСТЕМА
ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ

Для количественной оценки эффективности перехода к расширенному графику отопления зданий при климатических условиях в г. Киров был рассмотрен пример упрощенной модельной системы теплоснабжения с одним типом зданий со следующими показателями: относительные тепловыделения (6) 20%, запас номинальной мощности (14) 50%, температура внутри помещений 22°C, $n = 0.25$, $p = 0.05$, минимальный расход воды на отопление 30% по РГР. Кроме того, было принято, что в сети отсутствуют потери тепла и теплоносителя.

Расширенный график (см. рис. 6) позволяет снизить температуру обратной воды на 15–20°C (до 27–37°C) в области температур наружного воздуха от +8 до –19°C, т.е. в основной части отопительного периода, с соответствующим увеличением охлаждения и снижением расхода сетевой воды. Снижение температуры обратной воды уменьшает потери тепловой энергии в сети и увеличивает эффективность теплофикационной выработки электроэнергии на ТЭЦ, а уменьшение расхода сетевой воды снижает затраты электроэнергии на сетевые насосы источника теплоснабжения.

Данные эффекты зависят от температур наружного воздуха, и для их количественной оценки в целом за отопительный период необходимо учитывать длительность стояния этих температур. Это удобно делать при повторяемости интервалов длительностью 1°C, т.е. при суммарном времени, в течение которого температура наружного воздуха находится внутри интервала или равна его верхней границе. Значения повторяемости одноградусных интервалов для г. Киров определяли по графику длительности периода с температурой наружного воздуха, равной заданному значению или ниже его, построенному кубической сплайн-интерполяцией по справочным данным повторяемости пятиградусных интервалов из [15]. График длительности температур наружного воздуха и график повторяемости интервалов 1°C для климатических условий г. Киров показаны на рис. 8.

Оценку эффективности работы системы теплоснабжения предлагается также выполнять с помощью коэффициента использования теплового потенциала теплоносителя (сетевой воды) $k_{т.п}$, определяемого как отношение его текущего фактического охлаждения к теоретически предельно возможному охлаждению, в случае отопления — до нормативной температуры внутреннего воздуха $t_{в.п}$, по формуле

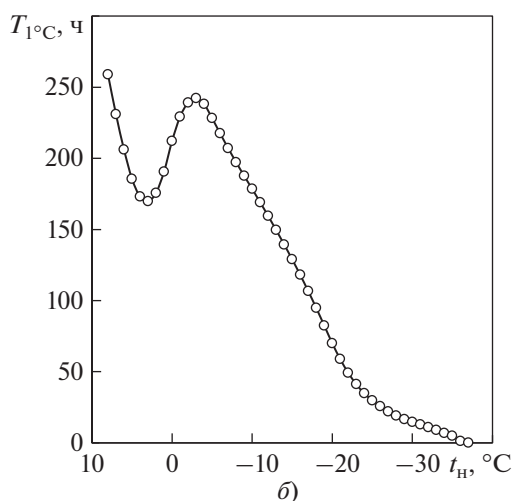
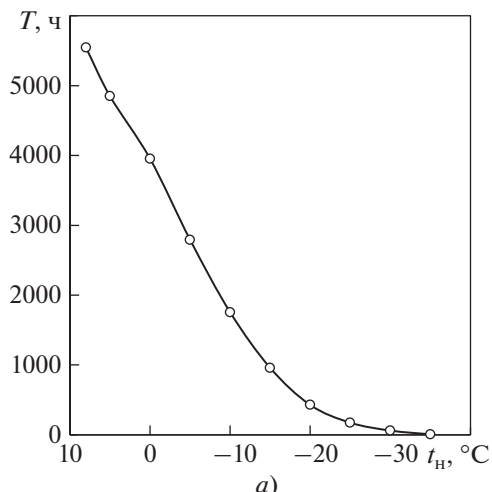


Рис. 8. Длительность периода (T) с температурой наружного воздуха равной заданному значению или ниже его (а) и повторяемость (длительность) ($T_1, ^\circ\text{C}$) температур в пределах одноградусных интервалов (б) для условий г. Киров по стандартным климатическим данным

$$k_{т.п} = \frac{\tau_{c1} - \tau_{o2}}{\tau_{c1} - t_{в.п}}, \tag{19}$$

где τ_{c1} — температура прямой сетевой воды.

Значение коэффициента $k_{т.п}$ меньше единицы, так как охлаждение воды до температуры воздуха при нормативном отоплении невозможно.

На рис. 9, а показана зависимость коэффициента использования теплового потенциала сетевой воды (19) от температуры наружного воздуха для обычного утвержденного ИТГ г. Киров и для температурного графика с применением выбранного РГР отопления зданий. Применение расширенного графика увеличивает коэффициент использования теплового потенциала сетевой воды от 50–62 до 75–89%, т.е. в 1.1–1.7 раза. Если

учесть повторяемость одноградусных интервалов, то степень использования тепла теплоносителя в целом за отопительный период повышается с 58 до 83%, т.е. в 1.4 раза, и в основной части отопительного периода составляет 82–89%.

В системе теплоснабжения г. Киров большинство зданий подключены по двухступенчатой, главным образом последовательной, схеме включения подогревателей ГВС и, соответственно, основную часть расхода сетевой воды в СЦТ в отопительный период составляет расход воды на отопление. Однако для упрощения оценки изменения затрат электроэнергии сетевыми электронасосами (СЭН), расходуемой на транспортировку сетевой воды, было принято, что здания оборудованы одноступенчатыми подогревателями ГВС, которые подключены по простой параллельной схеме. Данный подход несколько занижает эффективность перехода на РГР и является более консервативным.

Кроме того, более глубокое охлаждение теплоносителя в системе отопления до температур 30–40°C при использовании РГР делает параллельную схему сопоставимой по эффективности с двухступенчатыми схемами.

Большее охлаждение теплоносителя при расширенном графике приводит к уменьшению расходов сетевой воды и затрат энергии на ее транспортировку по тепловой сети. При этом необходимо обращать внимание на нагрузку ГВС и отличие обычного графика отопительной нагрузки от графика, учитывающего тепловыделение и температуру внутри зданий, которая отличается от нормативной. Данные зависимости удобно анализировать, используя не абсолютные значения показателей, а относительные (отношения текущих значений к расчетным).

Согласно схеме теплоснабжения г. Киров [23], присоединенная тепловая нагрузка ТЭЦ-4, ТЭЦ-5 составляла в 2019 г. 1567 МВт по отоплению и 196 МВт по ГВС, т.е. относительная нагрузка ГВС была равна 11% суммарной расчетной нагрузки ТЭЦ. На рис. 9, б показаны графики относительной суммарной тепловой нагрузки и нагрузки ГВС при обычном утвержденном ИТГ с нормативной температурой внутри помещений 20°C, а также при расширенном графике и температуре 22°C. Вследствие учета тепловыделений в зданиях в течение большей части отопительного периода тепловая нагрузка источника теплоснабжения по расширенному графику ниже, чем при ИТГ, а при расчетной отопительной температуре наружного воздуха наоборот, тепловая нагрузка по РГР выше из-за большей температуры воздуха внутри помещений. Интегрально это приводит к уменьшению отпуска тепла на отопление на 12.5% или на 10.0% с учетом ГВС.

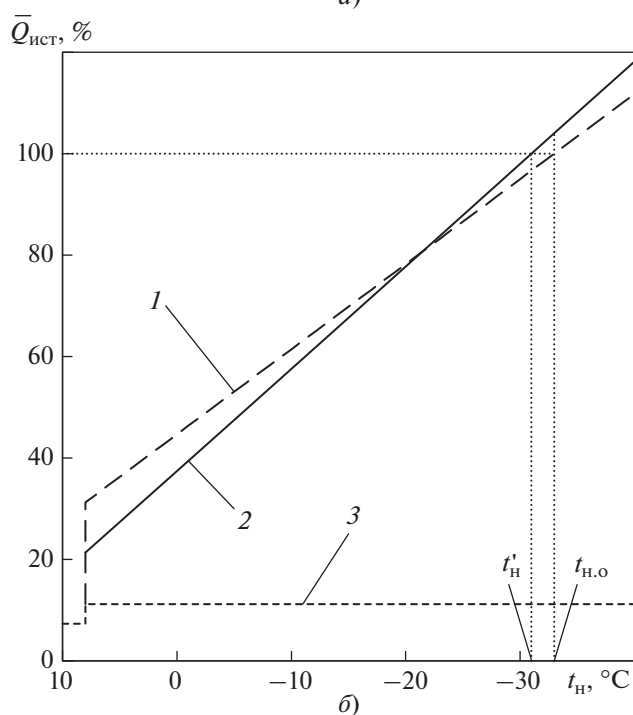
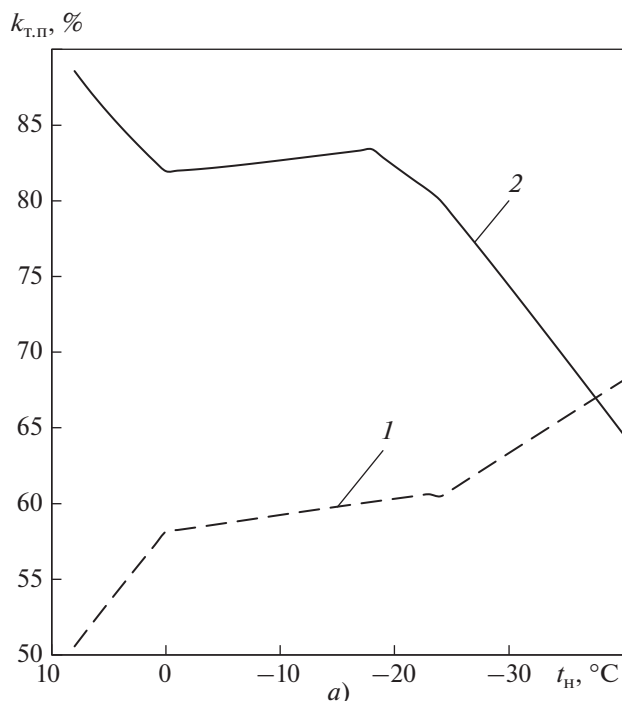


Рис. 9. Зависимость коэффициента использования теплового потенциала сетевой воды $k_{т.п.}$ (а) и относительной тепловой нагрузки источника теплоснабжения модельной СЦТ $\bar{Q}_{ист.}$ (б) при ИТГ (1), РГР (2), ГВС (3) от температуры наружного воздуха

Температурный график систем отопления зданий модельной СЦТ показан на рис. 10. Принято, что температура воды после подогревателя ГВС постоянна и равна температуре обратной воды

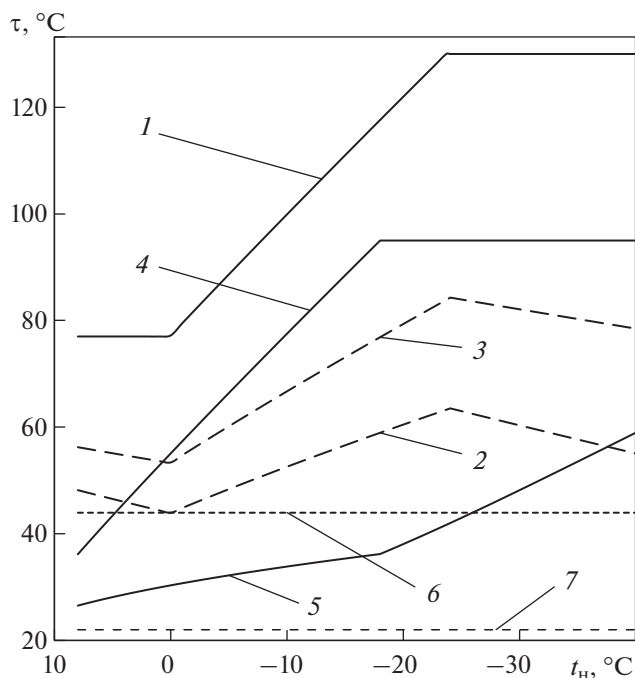


Рис. 10. Температурный график систем отопления и ГВС зданий модельной СЦТ.
 1 – прямая сетевая вода; 2 – обратная сетевая вода при ИТГ; 3 – вода, подаваемая в системы отопления зданий с элеваторами при ИТГ; 4 – вода, подаваемая в системы отопления зданий при РГР; 5 – обратная вода системы отопления зданий при РГР; 6 – обратная вода от подогревателей ГВС при параллельной схеме; 7 – воздух внутри помещений при РГР

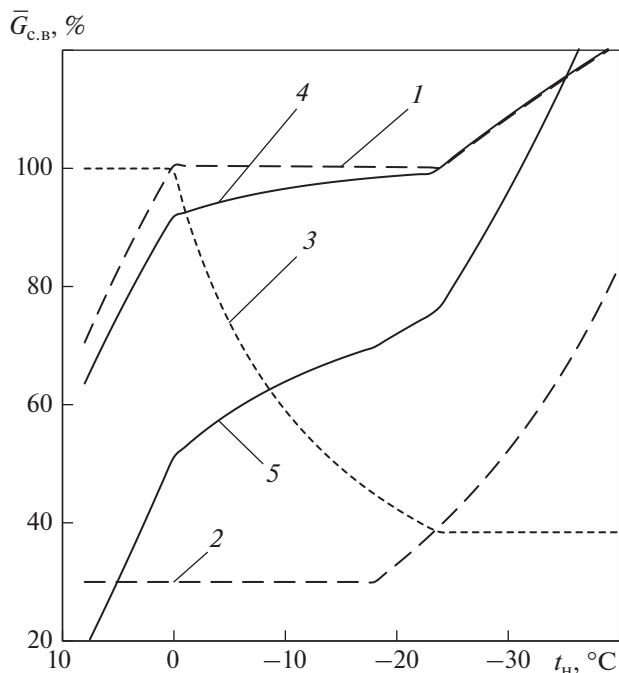


Рис. 11. График относительного расхода сетевой воды и воды на отопление и ГВС для зданий модельной системы теплоснабжения.
 1, 2 – вода, подаваемая в системы отопления зданий при ИТГ и РГР; 3 – вода, подаваемая в подогреватели ГВС; 4, 5 – сетевая вода на отопление зданий при ИТГ и РГР

после отопления в точке излома температурного графика. Это условие объясняется модельным характером расчета, цель которого – оценка эффектов в наиболее неблагоприятных условиях перехода на РГР. При таком консервативном подходе несколько завышаются расходы воды на ГВС и снижается эффективность перехода.

На рис. 11 показаны графики относительных расходов сетевой воды $\bar{G}_{c.v}$ на отопление и ГВС. Расходы воды определяли с учетом средних теплоемкостей воды в интервалах температур ее охлаждения в системе отопления и подогревателе ГВС. Расчетный расход сетевой воды на ГВС находили по ее охлаждению в точке излома, расчетный теоретический расход на отопление – по охлаждению при расчетной отопительной температуре наружного воздуха при ИТГ, а их сумма являлась расчетным расходом, используемым при определении относительных расходов сетевой воды от источника теплоснабжения.

На рис. 11 видно, что при ИТГ имеются области количественного регулирования отопления при температурах наружного воздуха выше температуры точки излома и ниже температуры

срезки температурного графика. При использовании РГР относительный расход воды на отопление вплоть до температуры смены регулирования (-18°C) остается постоянным и равным 30%, а при более низких температурах наружного воздуха повышается до 60% при расчетной отопительной температуре наружного воздуха. Расход обратной воды в узел смешивания зависит от ее температуры. Прямая сетевая вода по повышенному ИТГ имеет более высокую температуру в сравнении с отопительно-бытовым графиком. Поэтому относительный расход сетевой воды на отопление с увеличением температуры наружного воздуха снижается и находится по ИТГ на уровне 92–100% до точки излома, резко снижаясь до 64% при температуре включения отопления. Для РГР относительный расход сетевой воды находится в интервале 51–76% от точки излома до температуры срезки и резко снижается до 18% при температуре включения отопления.

На рис. 12 приведена зависимость относительного суммарного расхода сетевой воды $\bar{G}_{c.v}$ на ГВС и отопление по ИТГ и РГР от температуры наружного воздуха. Расход сетевой воды по ИТГ находится в интервале 72–95% с максимальным значением в точке излома. Для РГР относитель-

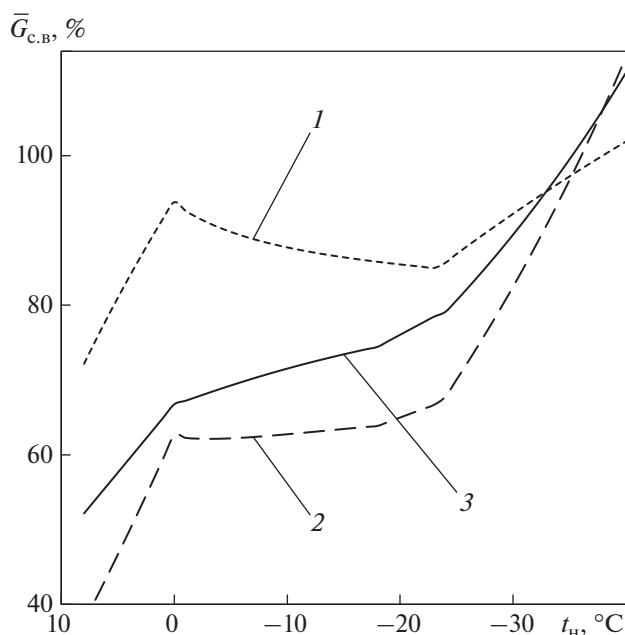


Рис. 12. Зависимость относительного суммарного расхода сетевой воды на ГВС и отопление по ИТГ (1), РГР (2) и РГР относительно ИТГ (3) от температуры наружного воздуха

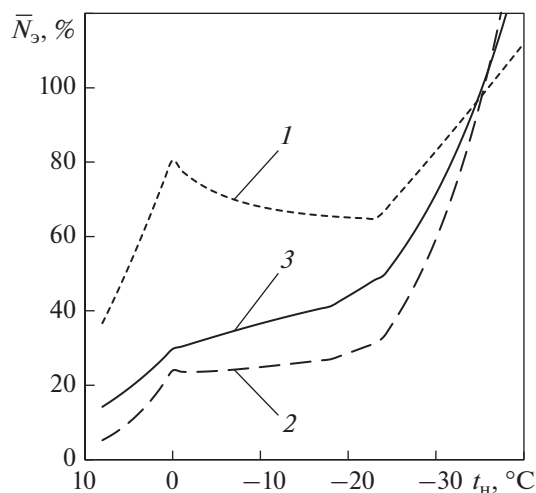


Рис. 13. Зависимость относительной электрической мощности сетевых насосов источника теплоснабжения при использовании ИТГ (1), РГР (2) и РГР относительно ИТГ (3) от температуры наружного воздуха

ный расход сетевой воды имеет практически постоянное значение 62–67% в основной части отопительного периода, снижаясь до 38% при температуре включения отопления.

Для сопоставимости результатов расчетной оценки эффективности перехода на расширенный график в модельной СЦТ предполагалось частотное регулирование СЭН. Кроме того, было принято, что основной вклад в гидравлические

потери вносят оборудование и трубопроводы источника теплоснабжения, а также тепловая сеть с турбулентным режимом течения и пренебрежимо малым влиянием режима работы регулирующих клапанов абонентов. Поэтому с изменением расхода сетевой воды квадратично изменяются потери давления в СЦТ и источнике теплоснабжения и, соответственно, повышение давления СЭН. Расчетный расход сетевой воды принимали равным расчетному расходу при ИТГ. Мощность СЭН в расчетном режиме определяли при этом расходе и номинальном повышении давления сетевых насосов типа СЭ-1250-140 ТЭЦ-4 при КПД равном 0.8. Мощность считали равной произведению объемного расхода сетевой воды на повышение давления СЭН, деленному на КПД насосов 0.8, принятым постоянным. Относительную мощность определяли как отношение мощности в текущем режиме к мощности в расчетном режиме.

График относительной мощности $\bar{N}_э$ СЭН источника теплоснабжения при ИТГ и РГР (рис. 13) показывает, что если для ИТГ относительная мощность составляет 65–80% расчетной, то для РГР потребляемая мощность снижается до 24–31% в основной части отопительного периода, а с учетом повторяемости температурных интервалов 1°C средневзвешенная по интервалам мощность при ИТГ равна 66%, при РГР – 22% расчетной потребляемой мощности.

Таким образом, применение РГР в автоматизированных узлах отопления зданий может позволить более точно поддерживать заданный уровень температуры внутри зданий и одновременно обеспечивать более полное охлаждение и уменьшение расходов воды на отопление и сетевой воды. Это ведет к кратному уменьшению количества электроэнергии, потребляемой сетевыми насосами, и снижению температуры обратной сетевой воды, повышению эффективности ТЭЦ и уменьшению тепловых потерь в сети.

ВЫВОДЫ

1. Предложенное новое уравнение качественно-количественного регулирования режима отопления позволяет определять необходимую температуру воды, подаваемой в систему отопления, и температуру обратной воды, причем оно хорошо согласуется с широко применяемым уравнением качественного регулирования режима отопления.

2. Применение расширенного графика регулирования приводит в основной части отопительного периода к снижению температуры обратной воды до 30–40°C, что обуславливает минимальный расход воды на отопление, снижает затраты электроэнергии на сетевые насосы, а также уменьшает потери тепловой энергии в сети. Воз-

возможность глубокого охлаждения теплоносителя также обеспечивает высокую эффективность параллельной схемы подключения систем отопления и горячего водоснабжения зданий, сопоставимую с эффективностью двухступенчатых схем.

3. Оценка эффектов, выполненная на основе модельной системы теплоснабжения, показала, что при переходе систем отопления зданий на расширенный график регулирования интегральный коэффициент использования теплового потенциала теплоносителя, предложенный в данном исследовании для оценки тепловой эффективности работы системы теплоснабжения, возрастает с 58 до 83%. Учет внутренних тепловыделений при регулировании обеспечивает снижение отопительной нагрузки в основной части отопительного периода и уменьшение отпуска тепла на отопление за весь период на 12.5% или на 10.0% с учетом ГВС.

4. Переход на расширенный график регулирования режима отопления в течение отопительного периода приводит к снижению расхода сетевой воды с 88 до 38% расчетного расхода и уменьшению мощности сетевых электронасосов с 66 до 22% расчетной мощности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Комплексная** оценка технологической трансформации электроэнергетики России / А.А. Макаров, Ф.В. Веселов, А.С. Макарова, Л.В. Урванцева // Теплоэнергетика. 2019. № 10. С. 3–18. <https://doi.org/10.1134/S0040363619100047>
2. **Пятин А.А.** Новая модель регулирования – теоретическая основа высокоэффективного отопления // ЭКО-ТЭК. 2019. № 1 (70). С. 15–30. http://www.energy-saving.ru/uploads/files/eko-tek_itog_70.pdf
3. **Пятин А.А.** Сбалансированное отопление – новые возможности эффективности и энергосбережения // ЭКО-ТЭК. 2018. № 3 (68). С. 23–34. http://www.energy-saving.ru/uploads/files/1-68_3.pdf
4. **Технология** разработки эксплуатационных режимов крупных систем теплоснабжения на базе методов многоуровневого теплогидравлического моделирования / Н.Н. Новицкий, З.И. Шалагинова, В.В. Токарев, О.А. Гребнева // Изв. РАН. Энергетика. 2018. № 1. С. 12–24.
5. **Токарев В.В., Шалагинова З.И.** Методика многоуровневого наладочного расчета теплогидравлического режима крупных систем теплоснабжения с промежуточными ступенями управления // Теплоэнергетика. 2016. № 1. С. 71–80. <https://doi.org/10.1134/S0040363616010112>
6. **Шалагинова З.И., Токарев В.В.** Прикладные проблемы и методические подходы к организации эксплуатационных режимов теплоснабжающих систем // Теплоэнергетика. 2019. № 10. С. 33–49. <https://doi.org/10.1134/S0040363619100059>
7. **Соколов Е.Я.** Теплофикация и тепловые сети. М.: Изд-во МЭИ, 2001.
8. **Шарапов В.И., Ротов П.В.** Регулирование нагрузки систем теплоснабжения. М.: Новости теплоснабжения, 2007.
9. **Hydraulic** performance optimization of meshed district heating network with multiple heat sources / Y. Wang, S. You, H. Zhang, W. Zheng, X. Zheng, Q. Miao // Energy. 2017. V. 126. P. 603–621. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.03.044>
10. **Optimal** operation of large district heating networks through fast fluid-dynamic simulation / E. Guelpa, C. Toro, A. Sciacovelli, R. Melli, E. Sciubba, V. Verda // Energy. 2016. V. 102. P. 586–595. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.02.058>
11. **Vesterlund M., Toffolo A., Dahl J.** Optimization of multi-source complex district heating network, a case study // Energy. 2017. V. 126. P. 53–63. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.03.018>
12. **Guelpa E., Sciacovelli A., Verda V.** Thermo-fluid dynamic model of large district heating networks for the analysis of primary energy savings // Energy. 2019. V. 184. P. 34–44. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.07.177>
13. **A detailed** MILP optimization model for combined cooling, heat and power system operation planning / A. Bischi, L. Taccari, E. Martelli, E. Amaldi, G. Manzolini, P. Silva, S. Campanari, E. Macchi // Energy. 2014. V. 74. P. 12–26. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.02.042>
14. **МДС 41-4.2000.** Методика определения количеств тепловой энергии и теплоносителя в водяных системах коммунального теплоснабжения. М.: Госстрой России, 2000.
15. **Наладка** и эксплуатация водяных тепловых сетей: справочник / В.И. Манюк, Я.И. Киплинский, Э.Б. Хиж, А.И. Манюк, В.К. Ильин. М.: Стройиздат, 1988.
16. **СП 50.13330.2012.** Тепловая защита зданий. М.: Минрегион России, 2012.
17. **СП 131.13330.2012.** Строительная климатология. М.: Минстрой России, 2015.
18. **Постановление** Правительства РФ от 06.05.2011 № 354 (ред. от 29.06.2020) “О предоставлении коммунальных услуг собственникам и пользователям помещений в многоквартирных домах и жилых домов”.
19. **СП 60.13330.2012.** Отопление, вентиляция и кондиционирование. М.: Минрегион России, 2012.
20. **ГОСТ 30494-2011.** Здания жилые и общественные. Параметры микроклимата в помещениях. М.: Стандартинформ, 2013.
21. **Письмо** Минстроя России от 29.11.2016 № 40222-АЧ/04. М.: Минстрой России, 2016.
22. **Сканави А.Н., Махов Л.М.** Отопление: учеб. для вузов. М.: АСВ, 2002.
23. **Актуализированная схема** теплоснабжения г. Киров на период до 2035 г. <http://www.mo-kirov.ru/gorozhanam/zhkh/skhema-teplosnabzheniya/>

An Extended Heating Regulation Schedule: Definition and Assessment of Its Efficiency in Heat-Supply Systems

A. A. Pyatin^{a, *} and D. M. Suvorov^b

^a*Kirov Branch of PAO T Plus, Kirov, 610044 Russia*

^b*Vyatka State University, Kirov, 610000 Russia*

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

Abstract—An extended heating regulation schedule with which the heat-transfer agent thermal potential is utilized to the maximum possible extent, the required indoor temperature in the heated rooms is maintained, and the energy expenditures for heat-transfer agent transportation are kept to a minimum is studied. A new equation of relative heating load at which the required indoor air temperature is maintained taking into account heat release and heat expenditures for infiltration is considered. A new heating regime regulation equation is used and verified, which takes into account the heating load, water flowrate supplied to the heating system, the system's nominal capacity margin, the power exponents of the heat-transfer coefficient dependences on the temperature difference and water flowrate through the system, and other factors. With using the extended schedule, the return water temperature is decreased in the heating season's main part down to 30–40°C provided that a sufficient heating system capacity margin is available. As a result, the heat-transfer agent is cooled to a fuller extent, its flowrate is decreased, smaller energy expenditures are required for driving the heat-supply source network pumps, a smaller amount of heat is lost in the network, and more efficient operation of the combined heat and power plant is achieved. For estimating the heat-supply system's performance, it is proposed to use the heat-transfer agent's thermal potential utilization factor. An assessment of the effects resulting from transition of the heating systems to the extended schedule, which was carried out on a model heat-supply system for a heating season, has shown that the heat-transfer agent's thermal potential utilization factor determined taking into account the recurrence of one-degree outdoor air temperature interval increases from 58 to 83% with such a transition, the supply water flowrate decreases from 88 to 38% of its design value, the energy expenditures for driving the network pumps are decreased by a factor of three, and the amount of heat supplied from the heat-supply source is decreased by 12.5%, or by 10.0% with taking hot-water supply into account.

Keywords: heat-supply system, heating load, heating regulation, temperature schedule, extended schedule of regulation