

УДК 536.24:697.1

Круковский П.Г., Тадля О.Ю.,
Метель М.А., Пархоменко Г.А.*Институт технической теплофизики НАН Украины*

АНАЛИЗ ПУТЕЙ УМЕНЬШЕНИЯ ЭНЕРГОЗАТРАТ ЗА СЧЕТ ПЕРИОДИЧЕСКОГО СНИЖЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЗДУХА ОТАПЛИВАЕМЫХ ПОМЕЩЕНИЙ

За допомогою моделювання теплового стану приміщення проведено порівняльний кількісний аналіз варіантів зниження витрат енергії в робочі дні тижня (5 діб) за рахунок зниження температури повітря в приміщенні (економічний режим) в період відсутності людини (8–19 год) та нічний період (23–7 год) при роботі опалювального пристрою в режимі з перериванням (вимкнено-увімкнено) та постійній температурі навколишнього середовища. Розглянуто комбінації режимів комфортної температури (20 °С) та економічного з обмеженням температури повітря у приміщенні (знизу 18 та 10 °С) в період відсутності людини, а також нічного (19 °С) режиму. Показано, що для розглянутого приміщення 5,6х5х2,8 м щодобове використання економічного режиму регулювання температури в приміщенні з нижньою межею температури повітря на рівні 10 °С дозволяє впродовж робочих днів тижня (5 діб) знизити витрати енергії на опалення до 14,7 % в порівнянні з режимом постійного утримання комфортної температури. При цьому спостерігається нерівномірна добова економія: 23% за першу добу та 9% – за п'яту.

С помощью моделирования теплового состояния помещения проведен сравнительный количественный анализ вариантов уменьшения энергозатрат в рабочие дни недели (5 суток) за счет снижения температуры воздуха помещения (экономичный режим) в периоды отсутствия человека (8–19ч) и ночной (23–7ч) при работе отопительного прибора в прерывистом режиме (выключено-включено) и постоянной температуре окружающей среды. Рассмотрены комбинации режимов комфортной температуры (20 °С) и экономичных с ограничениями температуры воздуха в помещении (снизу 18 и 10 °С) при отсутствии человека, а также ночного (19 °С). Показано, что для рассматриваемого помещения 5,6х5х2,8 м ежедневное использование экономичного режима регулирования температуры с ограничением температуры воздуха в помещении снизу 10 °С в течение 5-и рабочих дней недели позволяет уменьшить энергозатраты на отопление до 14,7% по сравнению с режимом поддержания постоянной комфортной температуры. При этом наблюдается неравномерное посуточное уменьшение энергозатрат: 23% в первые и 9% – в пятые сутки.

By means of modeling a thermal condition of an enclosure the comparative quantitative analysis of variants of decrease in power inputs is lead to the working days of week (5 day) due to decrease in temperature of air of a premise (an economic mode) during absence of the person (8a.m.–7p.m.) and the night period (11p.m.–7a.m.) at work of the heating device in a faltering mode (switched on – switched off) also to a constant ambient temperature. Combinations of modes of comfortable temperature (20 °С) and economic with (18 °С) – and without restriction of temperature (up to 10 °С) during absence of the person, and also night mode (19 °С) of decrease in temperature of air are considered in. It is shown, that for a considered enclosure 5,6x5x2,8m five-day use of an economic mode of temperature regulation of an enclosure without restriction of temperature from below allows to reduce power inputs by heating up to 14,7 % in comparison with a constant mode of comfortable temperature. Thus the economy, – 23 % in the first and 9 % in the fifth day is observed non-uniform daily.

Q – мощность отопительного прибора;
 t – температура;
 τ – текущее время.

Индексы нижние:

i – текущее значение;

k – параметр относится к комфортному режиму;
 ε – параметр относится к экономичному режиму;
 n – параметр относится к ночному режиму;
 $*$ – параметр относится ко времени включения.

Уменьшение запасов углеводородных топлив в мире ведет к постоянному повышению цен на энергоресурсы, что особенно ощутимо для Украины, для которой затраты энергии в жилищно-коммунальном хозяйстве (ЖКХ) относительно

производственного сектора значительно превышают мировые показатели. Так, например, в 2001 году в структуре потребления тепловой энергии Украины доля промышленности составляла 43,14 % , а доля ЖКХ – 39,7 % от общего потребления. Эти

цифры и состояние ЖКХ Украины свидетельствуют о значительном потенциале экономии энергии, большая часть которой приходится на снижение энергозатрат при отоплении помещений.

Основными путями снижения потребления энергии в ЖКХ являются следующие:

1. Повышение эффективности работы энергетического оборудования (ТЭЦ, ТЭС, котельные) и др.

2. Снижение теплопотерь зданий за счет увеличения термического сопротивления ограждающих конструкций (замена окон, утепление стен, перекрытий над подвалами и под чердаками, замена обогревательных приборов и т.д.).

3. Уменьшение энергозатрат за счет периодического снижения (по сравнению с комфортной) температуры воздуха отапливаемых помещений в периоды отсутствия людей.

В работе рассматривается способ суточного управления тепловым режимом помещения в рабочие дни недели с целью минимизации энергозатрат на его отопление.

Потенциал снижения энергозатрат хорошо известен для стационарного режима, когда снижение температуры воздуха в помещении на $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ позволяет снизить теплопотери на 2...5%. Так, при температуре окружающей среды $-22\text{ }^{\circ}\text{C}$ и нормативном значении сопротивления теплопередаче стен $2,2\text{ (м}^2 \cdot \text{К/Вт)}$ снижение температуры воздуха внутри помещения с 18 до $17\text{ }^{\circ}\text{C}$ приводит к снижению теплопотерь через стены на 2,5 %, а при температуре окружающей среды $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ до 5,5 %. Значительное снижение энергии может быть достигнуто путем снижения температуры воздуха в период отсутствия людей в жилых и офисных помещениях в среднем в течение около 10 часов в сутки, при этом необходимо рассматривать периодический нестационарный тепловой режим помещения.

Анализ литературных источников показал, что число работ, посвященных вопросу количественного анализа путей снижения энергозатрат в рабочие дни недели за счет снижения температуры воздуха в помещении в период отсутствия человека, ограничено. Существуют специальные приборы (термостаты, программаторы), которые позволяют установить желаемую температуру воздуха в помещении путем прерывистого

(включение-выключение) управления температурой (мощностью) отопительного устройства (например, котла). При использовании таких приборами важным параметром является время включения котла после снижения температуры в период отсутствия людей в помещении. Так, в инструкции к программатору [1] указано, что его пользователь должен подобрать экспериментальным путем (с помощью итераций) время включения котла, исходя из теплоинерционных характеристик своего дома, что требует определенных навыков и квалификации от владельца квартиры или дома. Этот и другие терморегуляторы, имеющиеся на строительном рынке Украины, такие как АУРАТОН и другие [2-3], также потенциально могут поддерживать заданный пользователем уровень температуры в помещении на протяжении нескольких суточных промежутков времени. При этом их разработчики пишут о возможности экономии до 30% от потребляемой энергии. Информации о времени начала перехода от экономичных режимов к комфортному и необходимой для этого мощности котла в инструкциях к этим приборам нет.

В [4-5] приводятся графики изменения температуры воздуха внутри помещения при прерывистом режиме работы системы отопления. Так, в [4] области графика, соответствующие моментам времени остывания и нагревания воздуха помещения, являются симметричными, однако автор не указывает для какого помещения или режима отопления возможна эта ситуация. В [5] автор приводит данные по изменению температуры воздуха для нетеплоёмкого офисного здания, в котором в 17 часов выключается отопление. При достижении температуры воздуха внутри помещения $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ система отопления переходит в режим термостатирования воздуха помещения в пределах $10,5...11\text{ }^{\circ}\text{C}$. Примерно в 6 часов утра система включается при определенной мощности. В 7.30 утра мощность отопления увеличивается для достижения температуры $18\text{ }^{\circ}\text{C}$ к 9 часам утра.

Таким образом, время включения отопительного прибора и его мощности для разогрева помещения до заданного уровня комфортной температуры с помощью программатора необходимо уметь рассчитывать, что возможно путем моделирования теплового состояния помещения с прерывистым режимом работы системы отопления.

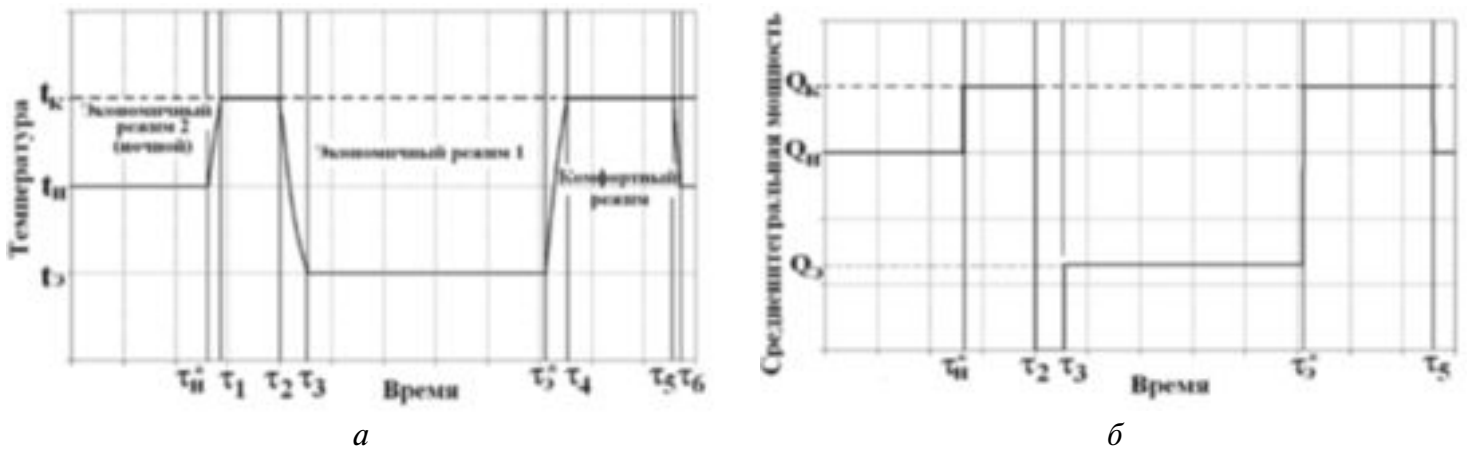


Рис. 1. Изменение температуры воздуха в помещении (а) и средней мощности отопительного прибора (б) при использовании только комфортного (пунктирная линия) и совместно с экономичными (сплошная линия) режимов отопления.

Моделирование позволяет также провести количественный анализ возможностей (путей) максимального снижения энергозатрат за счет снижения температуры воздуха помещения (применение экономичных режимов) в период отсутствия человека и ночной период, что является целью настоящей работы.

Ниже приведены некоторые определения, используемые в работе (см. также рис. 1).

Прерывистый режим отопления – способ поддержания заданной температуры воздуха в помещении посредством включения-выключения отопительного прибора при некотором уровне его мощности. Температура воздуха в заданных пределах обеспечивается с помощью различной продолжительности включенного и выключенного состояния отопительного прибора. Эта продолжительность определяется уровнем поддерживаемой (термостатом или программатором) температуры, теплоинерционными характеристиками помещения и мощностью отопительного прибора.

Комфортная температура (t_k на рис. 1, а) – температура воздуха в помещении во время присутствия в нем человека в состоянии бодрствования. В работе принята равной $20\text{ }^\circ\text{C}$.

Режим комфортной температуры – режим работы отопительного прибора (Q_k на рис. 1, б), обеспечивающий поддержание комфортной температуры в помещении в заданном промежутке времени.

Экономичная температура (t_3 на рис. 1, а) – температура воздуха в помещении, до которой она мо-

жет снижаться и поддерживаться в период отсутствия человека. В работе принята $18\text{ }^\circ\text{C}$ для экономичного режима 1 и $10\text{ }^\circ\text{C}$ – для экономичного режима 2.

Экономичный режим – режим работы отопительного прибора (Q_3 на рис. 1, б), при котором температура воздуха помещения снижается до уровня заданной экономичной температуры и поддерживается на этом уровне (экономичный режим 1) или падает до более низкой температуры, но не ниже уровня минимально допустимой (экономичный режим 2) и возвращается к уровню комфортной температуры к заданному времени прихода человека.

Экономичный режим 2 отличается от режима 1 тем, что в качестве экономичной температуры принимается минимально допустимая температура, которая в период отсутствия человека может достигаться или не достигаться вследствие тепловой инерционности помещения.

Минимально допустимая температура – температура воздуха в помещении, определяемая сохранностью и работоспособностью конструкций и приборов, находящихся в этом помещении, а также началом нежелательной конденсации влаги. В работе задана равной $10\text{ }^\circ\text{C}$.

Ночная температура (t_n на рис. 1, а) – температура воздуха в помещении, которая поддерживается в ночное время, когда человек спит. В работе принята равной $19\text{ }^\circ\text{C}$.

Ночной экономичный режим – режим работы отопительного прибора (Q_n на рис. 1, б), при ко-

тором в заданном интервале времени температура воздуха помещения падает до уровня ночной температуры t_H , поддерживается на этом уровне и возвращается к уровню комфортной температуры t_K к заданному времени пробуждения человека. Этот режим полностью отвечает режиму 1, если принять в качестве экономичной температуры ночную.

На рис.1 приведены графики изменения температуры воздуха в помещении и средней мощности отопительного прибора для суточного режима прерывистого отопления. Экономичный режим 1 для рассматриваемого ниже примера действует в промежутках времени суток от $\tau_1 = 8$ ч до $\tau_2 = 19$ ч (дневной) и от $\tau_3 = 23$ ч до $\tau_4 = 7$ ч (ночной).

Методы, описанные в литературе и используемые на практике, суточной экономии энергии в помещении таковы:

1. Поддержание комфортной температуры t_K в заданные интервалы времени ($\tau_2 - \tau_1$ и $\tau_5 - \tau_4$) и снижение температуры воздуха в помещении днем ($\tau_4 - \tau_2$) до уровня экономичной температуры t_3 (рис.1, а). Экономия энергии составит: $Q_K(\tau_3 - \tau_2) + (Q_K - Q_3)(\tau_3^* - \tau_3)$ (рис.1, б).

2. Поддержание комфортной температуры t_K в заданные отрезки времени ($\tau_2 - \tau_1$ и $\tau_5 - \tau_4$) и снижение температуры воздуха в помещении днем ($\tau_4 - \tau_2$) до уровня (если это возможно) минимально допустимой температуры. Экономия энергии будет составлять: $Q_K(\tau_3^* - \tau_2)$.

3. Поддержание комфортной температуры t_K в заданные отрезки времени ($\tau_2 - \tau_1$ и $\tau_5 - \tau_4$), снижение температуры воздуха в помещении днем до уровня экономичной температуры t_3 в период ($\tau_4 - \tau_2$) и ночью до ночной температуры t_H в период ($\tau_5 - \tau_1$). Экономия энергии будет составлять: $Q_K(\tau_3 - \tau_2) + (Q_K - Q_3)(\tau_3^* - \tau_3) + (Q_K - Q_H)(\tau_H^* - \tau_5)$.

Анализ рис.1,а показывает, что одновременное снижение энергозатрат и обеспечение комфортных условий для человека невозможно без достаточно точного определения времени включения отопительного прибора τ_3^* и τ_H^* для достижения комфортной температуры в заданные моменты времени τ_4 и τ_1 .

Максимальная экономия энергии, по нашему мнению, возможна путем применения эконо-

мичного режима 2, когда температура воздуха помещения снижается до уровня самой низкой температуры, но не ниже уровня минимально допустимой, и возвращается к уровню комфортной температуры к заданному времени прихода человека.

Для количественного анализа экономии энергии при использовании экономичного режима в рабочие дни недели (5 суток) проведем моделирование теплового состояния помещения. Построим компьютерную модель теплового режима вентилируемого жилого помещения размером $5,6 \times 5 \times 2,8$ м с одной наружной стеной при кратности воздухообмена 1. Температура окружающей среды принята постоянной и равной 15°C . На внешней поверхности наружной стены задано граничное условие третьего рода (коэффициент теплоотдачи $25 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$). Площадь окна составляла $4,05 \text{ м}^2$, толщина наружной стены $0,4$ м, внутренних стен – $0,14$ м. Теплопроводность стен составляла $0,6 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$, эквивалентная теплопроводность окна $1 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$. В помещении теплота передается от радиатора к воздуху конвективным путем, а к ограждающим конструкциям помещения и между ними – радиационным путем. Степень черноты всех поверхностей внутри комнаты составляет $0,8$, поверхности радиатора – $0,3$. Теплообмен с соседними помещениями отсутствует.

Моделирование проводилось в нестационарной постановке. В качестве начального приближения использовалось стационарное распределение температур в помещении с такой мощностью отопительного прибора (радиатора), которая обеспечивала комфортную температуру в помещении. Эта мощность составляла $1,613 \text{ кВт}$. Далее проводился расчет нестационарного теплового состояния помещения с момента времени 7 ч утра (рис. 2) и работой отопительного прибора в прерывистом режиме с мощностью 3 кВт в течение 5-ти суток с различными вариантами использования экономичных режимов. Диапазон поддержания температур воздуха составлял $\pm 0,25^\circ\text{C}$ от заданной величины. Моделирование проводилось с помощью компьютерной программы ТАВС (Thermal Analysis of Building Construction) расчета теплового режима и теплопотерь помещений [6]. Количество узлов модели составляло 161, количество тепловых связей

между узлами – 199. Узлы располагались по одному для объема воздуха в помещении и на радиаторе и по 20 по толщине каждого ограждения. Модель верифицировалась следующим образом. По нормативной методике была рассчитана мощность системы отопления для данного помещения, которая затем сравнивалась с мощностью, найденной с помощью программы ТАВС. Расхождение между этими величинами составляло 4,5%, что объясняется небольшим различием зависимостей для расчета значений коэффициентов теплоотдачи на поверхностях внутри и снаружи помещения.

Были рассмотрены следующие варианты теплового режима помещения:

1. Поддержание только комфортной температуры (20 °С) в течение суток (вариант 1).

2. Поддержание комфортной температуры 20 °С в периоды времени 7–8 и 19–23 ч и снижение температуры воздуха в помещении днем в период времени 7–19 ч до уровня экономичной температуры 19 °С (экономичный режим 1), а также снижение температуры воздуха в ночной период времени 23–7 ч до уровня 18 °С (вариант 2).

3. Поддержание комфортной температуры в периоды времени 7–8 и 19–23 ч 20 °С и снижение температуры воздуха в помещении днем в период времени 7–19 ч до самой низкой температуры, но не ниже уровня минимально допустимой 10 °С (экономичный режим 2), а также, снижение температуры воздуха в ночной период времени 23–7 ч до уровня 18 °С (вариант 3).

Вариант 2 описан в литературе, а вариант 3, как отмечалось выше, не описан и поэтому представляет интерес.

Ниже на рис. 2 приведены результаты моделирования этих вариантов. Результаты свидетельствуют о том, что для данного помещения минимально достижимая температура воздуха в помещении при применении экономичного режима 2 (вариант 3) равна 11 °С и достигается к 16 ч. В это же время заданная экономичная температура 18 °С при применении экономичного режима 1 (вариант 2) достигается через 1 час (к 9 ч утра). Выход на ночной режим осуществляется в течение получаса, в то время как разогрев помещения утром до комфортной температуры составляет примерно три четверти часа. Из графиков, особенно при применении экономич-

ного режима 2, видно, что время остывания воздуха в помещении не равно времени его прогрева. Это объясняется тем, что скорость прогрева воздуха в помещении зависит преимущественно от мощности отопительного прибора и объема воздуха, в то время как скорость его остывания зависит также от теплоинерционных характеристик ограждений помещения. Так, для варианта 2 время нагрева помещения составляет меньше одного часа, для варианта 3 – около двух часов.

Проведенные предварительные исследования показали, что изменение ряда параметров модели помещения также влияет на экономию энергии. Так, увеличение кратности воздухообмена помещения с 0,3 до 1,0 приводит к увеличению экономии энергии до 10%. Экономия энергии в различные сутки оказалась различной: максимальной в первые сутки, минимальной в пятые (см. таблицу). Это можно объяснить анализируя динамику прогрева стен и воздуха во времени. Сравнение средней температуры стен показывает, что в первые сутки она выше, чем в пятые, при которых режим прогрева можно считать установившимся. Следовательно, в неустановившемся режиме в первые несколько суток происходит отдача дополнительного количества теплоты, накопившейся в стенах, в воздух, что и приводит к завышению величины экономии. Уменьшение средней температуры стен приводит к тому, что для их прогрева необходимо большее количество теплоты и времени. Это увеличивает время прогрева воздуха до комфортной температуры в пятые сутки при применении экономичного режима 2 (вариант 3) по сравнению с первыми сутками.

В работе подбиралось необходимое время включения отопительного прибора в каждые сутки $\tau_{\text{Э}}^*$ и $\tau_{\text{Н}}^*$ при применении экономичного режима 2 (вариант 3). В первые сутки необходимое время включения составляло 17 ч, в пятые – 16 ч. Это вызвано тем, что в первые сутки влияет начальное (стационарное) распределение температур в ограждающих конструкциях и необходимо меньшее количество времени для прогрева воздуха. Это следует и из анализа температуры воздуха в помещении – в первые сутки минимально достигнутая температура составляла около 12 °С, а в пятые – около 11 °С.

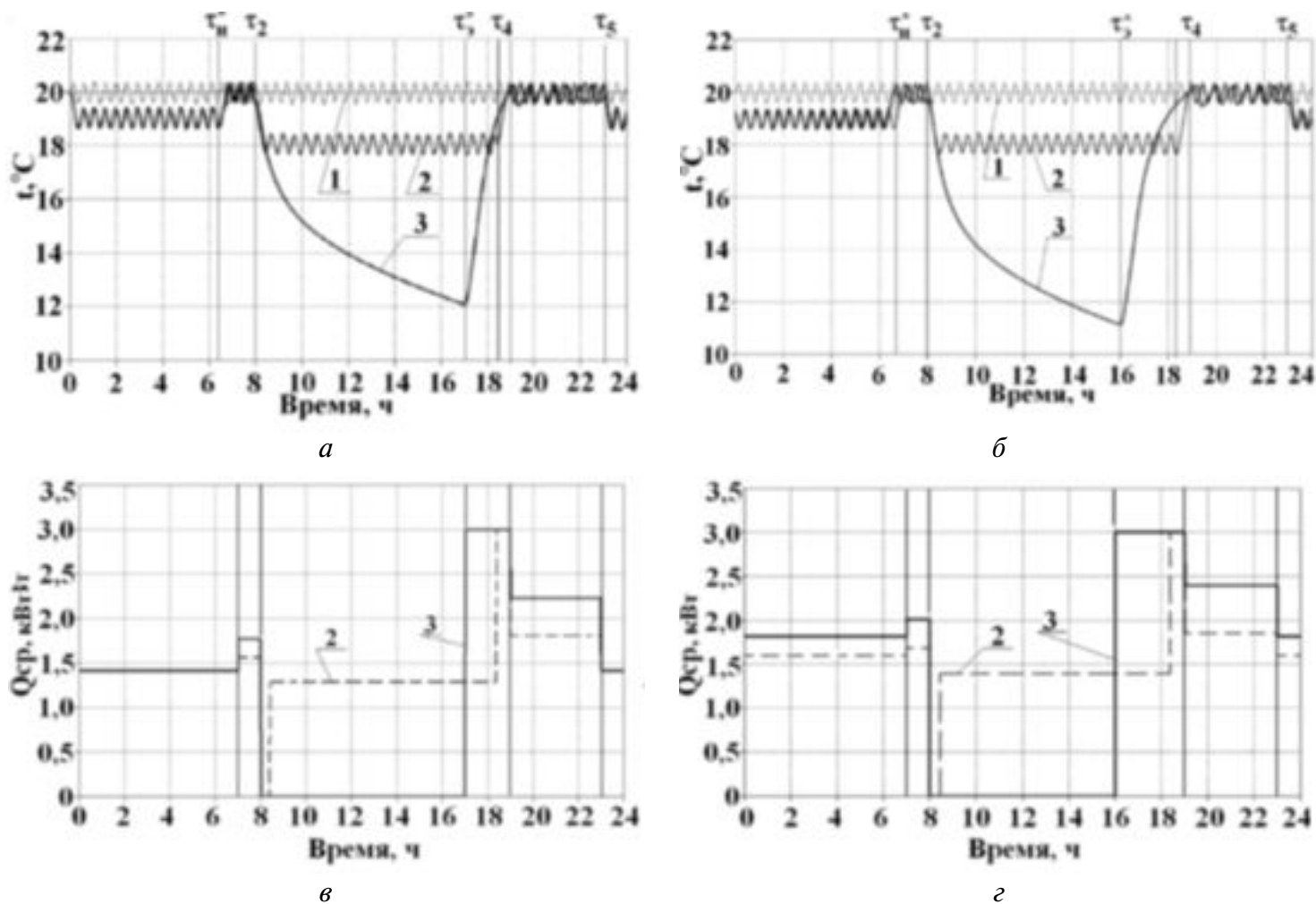


Рис. 2. Изменение температуры воздуха в помещении при различных вариантах ее поддержания (кривые а и в – первые, б и г – пятые сутки). Цифрами обозначены соответствующие режимы: 1 – вариант 1; 2 – вариант 2; 3 – вариант 3.

Среднеинтегральная мощность отопительного прибора Q_{cp} рассчитывалась как сумма произведений мощности отопительного прибора Q_i на время его включения или выключения τ_i для текущего режима, деленная на время действия того или иного режима его работы $\Sigma\tau_i$:

$$Q_{cp} = \Sigma Q_i \cdot \tau_i / \Sigma \tau_i.$$

Оценим количественно относительную экономию энергии (по отношению к варианту 1) которую можно получить, используя анализируемые варианты (см. таблицу).

Таким образом, если днем снижать температуру воздуха до минимально допустимой и ночью до ночной (вариант 3), то по сравнению с вари-

антом 2 экономия энергии будет в 2,5 раза больше, то есть дополнительная экономия в первые сутки составляет 12,4%, в пятые – 5,5%. Абсолютная экономия видна из таблицы, а средняя же за 5 суток составляет 14,7%. Если система отопления на протяжении 5 рабочих дней в неделю будет работать с экономичным 2 и ночным режимами, а два выходных дня – только в комфортном, то недельное и месячное сокращение энергопотребления для отопления рассматриваемого помещения составит около 15%, что является достаточно весомым резервом снижения энергозатрат.

Предложенная схема снижения энергозатрат подходит и для управления тепловым режимом офисных помещений (школы, библиотеки и т.д.), в которых необходимо днем, когда присутствуют

Таблица. Суточные энергозатраты для различных суток и вариантов управления тепловым режимом помещения

№	Используемые режимы, время, ч				Первые сутки		Пятые сутки	
	Комфортный	Экономичный 1	Экономичный 2	Ночной	Энергозатраты (кВт·ч)	Экономия, % (по сравнению с вар.1)	Энергозатраты (кВт·ч)	Экономия, % (по сравнению с вар.1)
1	7.00 – 7.00	нет	нет	нет	38,4	0,0	38,6	0
2	7.00 – 8.00, 19.00 – 7.00	8.00 – 19.00	нет	23.00 – 7.00	34,5	10,9	37,3	3,7
3	7.00 – 8.00, 19.00 – 23.00	нет	8.00 – 19.00	23.00 – 7.00	29,7	23,3	35,1	9,2

люди, поддерживать комфортную температуру воздуха в помещениях, а на ночь и в выходные дни для экономии энергии необходимо ее снижать.

Следует отметить необходимость продолжения изложенных выше исследований с учетом в модели переменности во времени температуры окружающей среды, мощности отопительного прибора, а также разработки алгоритма определения времени включения $\tau_{\text{Э}}^*$ и $\tau_{\text{Н}}^*$ при применении экономичных режимов.

Выводы

1. С помощью моделирования теплового состояния помещения проводится сравнительный количественный анализ вариантов снижения энергозатрат в рабочие дни недели и суточном циклах за счет уменьшения температуры воздуха помещения днем в период отсутствия человека и ночной период при работе отопительного прибора в прерывистом режиме при постоянной температуре окружающей среды.

2. Рассмотрены комбинации режимов комфортной температуры (20 °С) и экономичных с ограничениями температуры воздуха (снизу 18 и 10 °С) в помещении в период отсутствия человека, а также ночного (19 °С) режима.

3. Показано, что для рассматриваемого помещения ежесуточное использование экономичного режима с ограничением температуры воздуха в помещении 10 °С в течении 5-и рабочих дней недели позволяет уменьшить энергозатраты на отопление до 14,7% по сравнению с постоянным режимом комфортной температуры. При этом наблюдается неравномерное посуточное уменьшение энергозатрат: 23% в первые и 9% в пятые сутки.

4. Предложенная схема снижения энергозатрат может быть использована для управления тепловым режимом офисных и общественных (школы, библиотеки и т.д.) помещений, в которых необходимо днем, когда присутствуют люди, поддерживать комфортную температуру воздуха в помещениях, а на ночь и в выходные – снижать. Такая схема может быть также использована в индивидуальных тепловых пунктах для управления тепловым режимом зданий.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Регулятор* отопления Е8 фирмы Kromschroder. Инструкция по монтажу и обслуживанию. – 64 с.
2. *Программируемый* терморегулятор AURATON 2005. Инструкция пользователя. – 11 с.
3. *Сасин В.И.* Термостаты в российских системах отопления // АВОК. – 2004. – № 5. – С. 64–68.
4. *Р.Б. Жуйков* Строительство и эксплуатация “эффективного здания” // Информационный бюллетень Инфстрой. – 2004. – №5. – С. 2–11.
5. *Гершкович В.Ф.* О возможности практической реализации регулирования теплотребления зданий методом периодического прерывания потока теплоносителя. – <http://www.energsovet.ru/stat148p2.html>.
6. *Круковский П.Г., Судак О.Ю.* Расчетно-экспериментальный подход к анализу теплового состояния и теплотеря помещений // Пром. теплотехника. – 2001. – №6. – С.1–7.

Получено 30.01.2008 г.