

УДК 697.12

РАСЧЕТ КОЛИЧЕСТВА ПОТРЕБЛЯЕМОЙ ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИИ ПРИ ОБОГРЕВЕ ПОМЕЩЕНИЯ ЧУГУННЫМ РАДИАТОРОМ М-140. ЧАСТЬ 2. ПЕРИОДИЧЕСКИЙ РЕЖИМ ОТОПЛЕНИЯ

Басок Б.И., член-корреспондент НАН Украины, **Давыденко Б.В.**, докт. техн. наук,
Тимошенко А.В., канд. техн. наук, **Гончарук С.М.**, канд. техн. наук

Институт технической теплофизики НАН Украины, ул. Желябова, 2а, г. Киев, 03680, Украина

Представлено результати розрахунку кількості теплової енергії, що витрачається на обігрів приміщення за допомогою чавунного радіатора. Досліджується періодичний режим опалення, що встановлюється при періодичному вмиканні та вимиканні водогрійного пристрою.

Представлены результаты расчета количества тепловой энергии, расходуемой на обогрев помещения с помощью чугунного радиатора. Исследуется периодический режим отопления, который устанавливается при периодическом включении и отключении водогрейного устройства.

The results of the calculation of the amount of thermal energy for heating the room by cast-iron radiator are presented. We study the periodic heating regime, which is set by periodic switching on and off the device for heating of the water.

Библ. 2, рис. 7.

Ключевые слова: обогрев помещения, температурный режим, радиатор.

C , Дж/(кг·К) – теплоемкость;

c_0 , Вт/(м²К⁴) – коэффициент излучения абсолютно черного тела;

$\Delta E_{\text{наг}}$, МДж – количество энергии, затраченное на нагрев системы отопления за один период;

E_m , кВт·час/мес – количество энергии, потребляемой системой отопления за один месяц;

F , м² – площадь одной секции радиатора;

K – количество периодов нагрева-охлаждения системы отопления в календарном месяце;

m , кг – масса;

N , Вт – мощность нагревателя;

n – количество секций радиатора;

Q , Вт – тепловой поток;

R , м²К/Вт – термическое сопротивление;

S , м² – площадь наружных ограждений помещения;

t , °С – температура;

$\bar{t}_{\text{в}}$, °С – средняя за период температура воздуха в

помещении;

ε – степень черноты;

τ , с – время.

Нижние индексы:

max – максимальный;

min – минимальный;

в – воздух внутри помещения;

инф – инфильтрация;

м – месяц;

н – наружный воздух;

наг – нагрев;

окр – окружающая среда;

ох – охлаждение;

р – радиатор;

с.в – стена внутренняя;

с.н – стена наружная;

т – теплоноситель;

ч – чугун.

Введение

В [1] с использованием приближенной теплофизической модели теплопереноса в помещении, отапливаемом чугунным радиатором, рассчитывается количество тепловой энергии, необходимой для поддержания в помещении нормативной для зимнего периода температуры. Рассматривал-

ся случай централизованной системы отопления здания. Характерным для этого случая является то, что теплоноситель, подаваемый в эту систему, имеет определенную температуру и расход, которые задаются теплогенерирующим предприятием. Представленные результаты расчетов были получены для стационарных условий, при

которых температура наружного воздуха t_n и температура радиатора t_p не изменялись во времени.

Интерес представляет также случай теплоснабжения помещения с использованием индивидуального водогрейного котла, работающего в периодическом режиме. Котел может включаться и выключаться в зависимости от температуры теплоносителя или от температуры воздуха в помещении. При первом способе регулирования данной системы теплоснабжения разогрев теплоносителя начинается, когда температура радиатора снижается до значения $t_{p,\min}$ и заканчивается при достижении этой температуры значения $t_{p,\max}$. Далее процесс нагрева теплоносителя прекращается до момента времени, когда температура радиатора вновь снизится до значения $t_{p,\min}$. При втором способе регулирования разогрев теплоносителя начинается при температуре воздуха в

$$\begin{aligned} (nC_q m_p + C_r m_r) \frac{dt_p}{d\tau} = N - nF \cdot 1,66 \cdot (t_p - t_b)^{4/3} - \frac{0,25 \cdot nF \cdot c_0}{1/\varepsilon_p + 1/\varepsilon_{c.н} - 1} \left[\left(\frac{t_p + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{t_{c.н} + 273}{100} \right)^4 \right] - \\ - \frac{0,25 \cdot nF \cdot c_0}{1/\varepsilon_p + 1/\varepsilon_{c.в} - 1} \left[\left(\frac{t_p + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{t_{c.в} + 273}{100} \right)^4 \right], \end{aligned}$$

где $t_{c.н}$ – температура той части внутренней поверхности наружной стены, что находится непосредственно за радиатором; $t_{c.в}$ – значения температуры внутренних стен, пола и потолка, которые считаются примерно одинаковыми.

Анализ результатов расчетных исследований

Результаты расчета температурных режимов помещения при использовании двух указанных выше способов регулирования системы отопления приведены на рис. 1...4. Рассматриваются следующие параметры настройки системы регулирования. При первом способе нагрев системы отопления начинается при $t_{p,\min} = 40$ °С и заканчивается при $t_{p,\max} = 63$ °С. При втором способе регулирования начало нагрева теплоносителя происходит при $t_{b,\min} = 19$ °С и заканчивается при $t_{b,\max} = 21$ °С. Температура наружного воздуха во всех случаях принимается равной $t_n = -5$ °С. Указанные параметры регулирования системы отопления обеспечивают приблизительно одинаковые значения средней температуры воздуха внутри помещения. Для нагрева теплоносителя могут применяться нагреватели с разной мощностью: $N = 1000...2000$ Вт. Следует также отме-

помещении $t_{b,\min}$ и заканчивается при $t_{b,\max}$. Для разогрева теплоносителя используется нагреватель мощностью N . Особенности каждого из этих способов регулирования исследуются на примере отопления рассмотренного в [1] помещения площадью 15 м².

Постановка задачи

Для расчета нестационарного температурного режима в указанном помещении используется представленная в [2] система уравнений теплового баланса для отдельных элементов помещения. Для случая переменной во времени температуры теплоносителя указанная система дополняется уравнением теплового баланса для теплоносителя и радиатора, значения температуры которых считаются приблизительно одинаковыми:

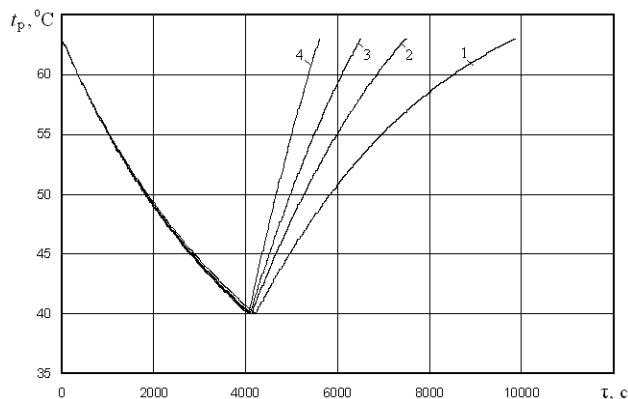
тить, что мощность N не должна быть ниже некоторого минимального значения, при котором теплота, расходуемая на нагрев теплоносителя, полностью передается воздуху в помещении и ограждениям. На нагрев же теплоносителя энергии при этом не будет хватать.

При обоих способах регулирования система отопления работает в периодическом режиме. При этом, как при первом, так и при втором способе регулирования, длительность периода Δt , который соответствует интервалу времени между двумя последовательными включениями или отключениями нагревательного устройства, зависит от мощности нагревательного устройства N .

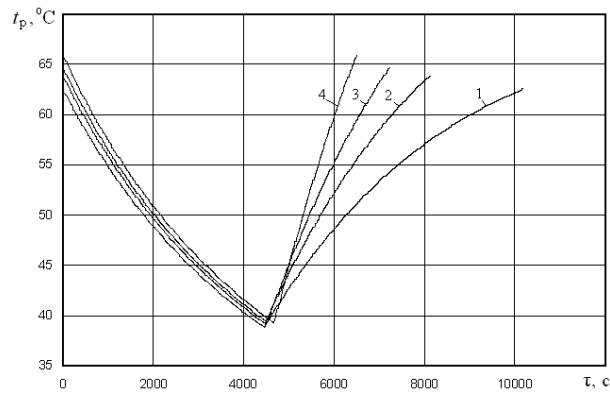
Влияние мощности нагревателя на изменение температуры радиатора во времени при двух способах регулирования представлено на рис. 1. Как видно из рисунка, при первом способе регулирования температура радиатора изменяется в заданных пределах $t_p = 40...63$ °С (рис. 1, а). При втором способе значение t_p изменяется в более широком диапазоне. Так при $N = 1000$ Вт температура радиатора изменяется в пределах $t_p = 38,8...62,5$ °С, а при $N = 2000$ – в пределах

$t_p = 39,2 \dots 65,9 \text{ }^\circ\text{C}$ (рис. 1, б). При изменении мощности нагревателя от $N = 1000 \text{ Вт}$ до $N = 2000 \text{ Вт}$, интервалы времени, за которые система отопления охлаждается, составляют: $\Delta\tau_{\text{ох}} = 4220 \dots 4070 \text{ с}$ – при первом способе регулирования, и $\Delta\tau_{\text{ох}} = 4460 \dots 4680 \text{ с}$ – при втором способе регулирования. Гораздо существеннее от мощности нагревательного устройства зависят интервалы времени, при которых система отопления разогревается. Так при первом способе регулирования система отопления разогревается от $t_p = 40 \text{ }^\circ\text{C}$ до $t_p = 63 \text{ }^\circ\text{C}$ за $\Delta\tau_{\text{наг}} = 5670 \text{ с}$ при $N = 1000$ и за

$\Delta\tau_{\text{наг}} = 2450 \text{ с}$ при $N = 2000 \text{ Вт}$. При втором способе регулирования воздух внутри помещения нагревается от $t_b = 19 \text{ }^\circ\text{C}$ до $t_b = 21 \text{ }^\circ\text{C}$ за $\Delta\tau_{\text{наг}} = 5750 \text{ с}$ при $N = 1000 \text{ Вт}$ и за $\Delta\tau_{\text{наг}} = 1830 \text{ с}$ при $N = 2000 \text{ Вт}$. Таким образом, при первом способе регулирования период работы системы отопления $\Delta\tau = \Delta\tau_{\text{ох}} + \Delta\tau_{\text{наг}}$ составляет 5670 с при $N = 1000 \text{ Вт}$ и 2450 с при $N = 2000 \text{ Вт}$. При втором способе регулирования, значения указанных периодов будут $\Delta\tau = 10210 \text{ с}$ при $N = 1000 \text{ Вт}$ и $\Delta\tau = 6510 \text{ с}$ при $N = 2000 \text{ Вт}$.



а)



б)

Рис. 1. Изменение во времени температуры радиатора в зависимости от мощности нагревательного устройства при первом (а) и втором (б) способах регулирования системы отопления: 1 – $N = 1000 \text{ Вт}$; 2 – 1250 ; 3 – 1500 ; 4 – 2000 .

Изменение во времени температуры воздуха внутри помещения при различных значениях N представлено на рис. 2. При втором способе регулирования температура воздуха внутри помещения изменяется в пределах, практически совпадающих с параметрами регулирования $t_{b, \text{min}}$ и $t_{b, \text{max}}$ (рис. 2, б). Незначительное увеличение t_b в течение короткого промежутка времени после отключения нагревателя, а также снижение t_b после его включения, связано с температурным влиянием внутренних ограждений помещения, тепловая инерция которых значительно превосходит тепловую инерцию воздушной среды. Интервалы времени, в течение которых происходит увеличение или уменьшение температуры воздуха в помещении, близки к интервалам увеличения и уменьшения температуры радиатора, хотя точно с ними не совпадают, что является следствием температурного влияния ограждений

на температуру воздуха.

Более сложной оказывается зависимость от мощности N пределов изменения температуры воздуха в помещении при первом способе регулирования. С увеличением мощности N уменьшаются как максимальные за период $\Delta\tau$ значения температуры t_b , так и минимальные ее значения (рис. 2, а). Так при $N = 1000 \text{ Вт}$, $t_{b, \text{min}} = 19,45 \text{ }^\circ\text{C}$; $t_{b, \text{max}} = 21,4 \text{ }^\circ\text{C}$, а при $N = 2000 \text{ Вт}$ – $t_{b, \text{min}} = 18,75 \text{ }^\circ\text{C}$; $t_{b, \text{max}} = 20,5 \text{ }^\circ\text{C}$. При первом способе регулирования с увеличением мощности N существенно уменьшаются интервалы времени, в течение которых температура воздуха увеличивается от $t_{b, \text{min}}$ до $t_{b, \text{max}}$. Интервалы времени, в течение которых температура воздуха снижается после отключения нагревателя, с увеличением N также уменьшаются, но незначительно (рис. 2, а).

Влияние мощности нагревателя N на зависимость от времени теплового потока от радиато-

ра Q_p при двух способах регулирования системы отопления представлено на рис. 3. Как видно из данного рисунка, при первом способе регулирования зависимость Q_p от времени на стадии охлаждения системы отопления практически не зависит от мощности нагревателя N (рис. 3, а). При втором способе регулирования значения Q_p на стадии охлаждения несколько увеличиваются с увеличением N (рис. 3, б). На стадии разогрева системы отопления влияние мощности N на характер зависимости величины Q_p от времени оказывается весьма существенным. С увеличением N при обоих способах регулирования отмечается увеличение макси-

мального значения Q_p , которое достигается перед отключением системы нагрева теплоносителя, и уменьшение интервалов $\Delta t_{\text{наг}}$, при которых происходит нагрев. При первом способе регулирования диапазоны изменения Q_p при мощности $N = 1000$ Вт составляют $309,6 \text{ Вт} < Q_p < 826,0 \text{ Вт}$, а при мощности $N = 2000$ Вт – $325,7 \text{ Вт} < Q_p < 853,6 \text{ Вт}$. При втором способе регулирования диапазоны изменения Q_p будут несколько шире. При мощности $N = 1000$ Вт указанный диапазон составляет $295,0 \text{ Вт} < Q_p < 824,0 \text{ Вт}$, а при мощности $N = 2000$ Вт тепловой поток от радиатора изменяется в пределах $304,0 \text{ Вт} < Q_p < 917,5 \text{ Вт}$.

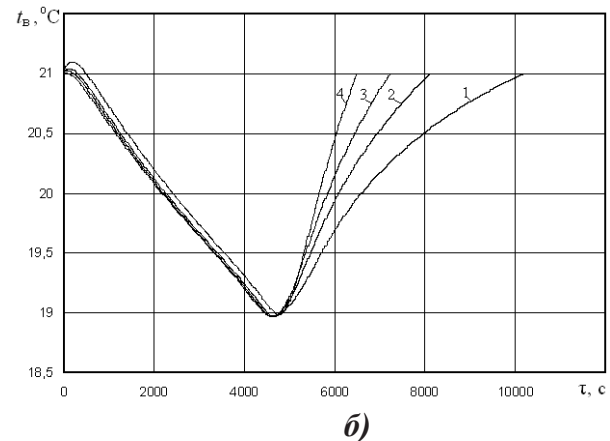
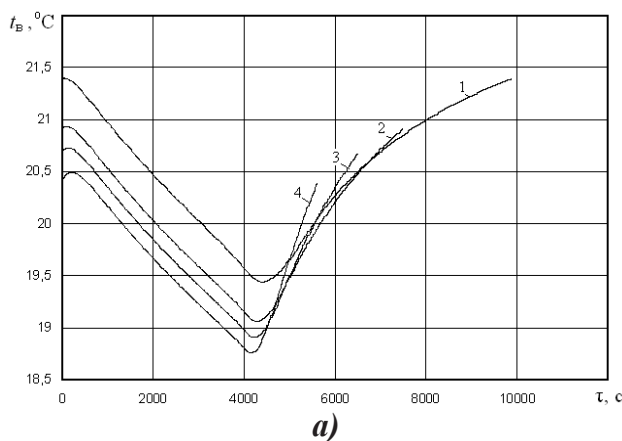


Рис. 2. Изменение во времени температуры воздуха внутри помещения в зависимости от мощности нагревательного устройства при первом (а) и втором (б) способах регулирования системы отопления: 1 – $N = 1000$ Вт; 2 – 1250; 3 – 1500; 4 – 2000.

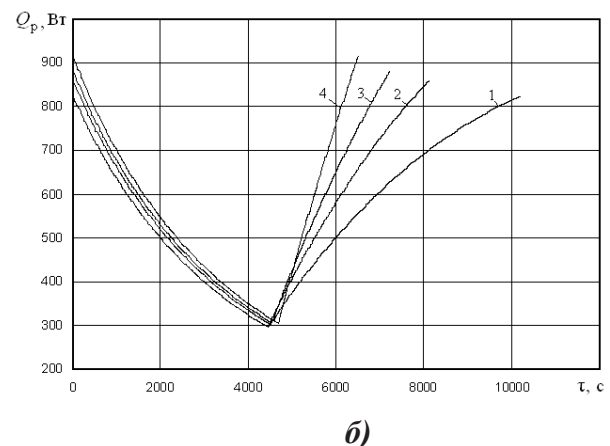
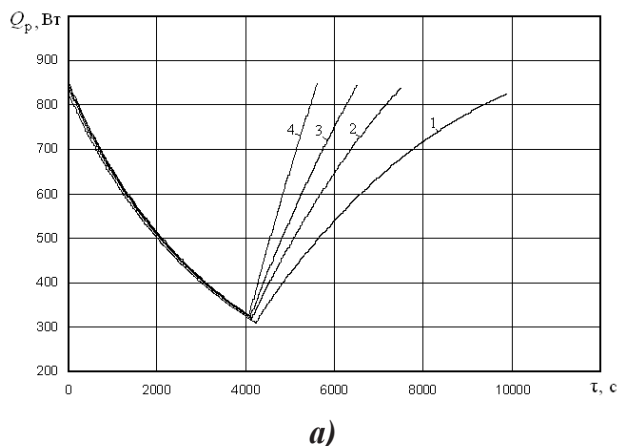
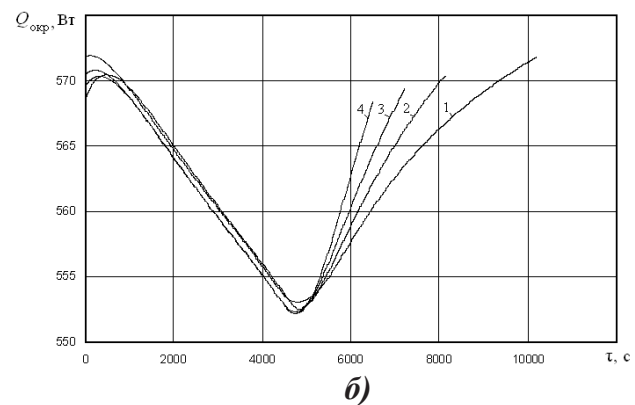
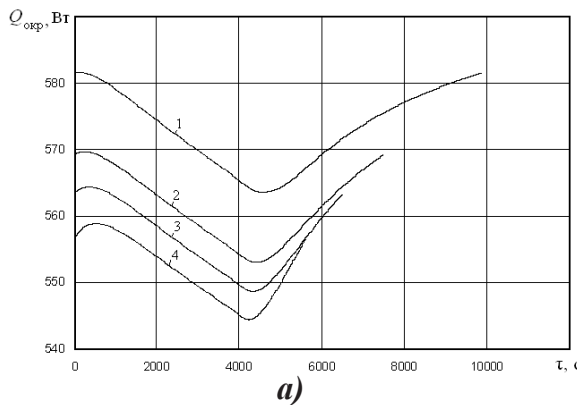


Рис. 3. Изменение во времени теплового потока от радиатора в зависимости от мощности нагревательного устройства при первом (а) и втором (б) способах регулирования системы отопления: 1 – $N = 1000$ Вт; 2 – 1250; 3 – 1500; 4 – 2000.

Зависимости от времени величины теплового потока, отводимого во внешнее пространство через наружные ограждения, представлены на рис 4. Как видно из рисунка, при втором способе регулирования тепловой поток $Q_{окр}$, отводимый в окружающее пространство на стадии охлаждения системы отопления, слабо зависит от мощности нагревателя N (рис. 4, б). На стадии нагрева системы отопления характер изменения во времени $Q_{окр}$ существенно зависит от N . Диапазоны изменения $Q_{окр}$ при втором способе регулирования слабо зависят от мощности N и составляют: $553,0 \text{ Вт} < Q_{окр} < 571,9 \text{ Вт}$ при $N = 1000 \text{ Вт}$ и

$552,5 \text{ Вт} < Q_{окр} < 568,4 \text{ Вт}$ при $N = 2000 \text{ Вт}$.

При первом же способе регулирования отмечается существенная зависимость от N характера изменения $Q_{окр}$ во времени как на стадии охлаждения системы отопления, так и стадии ее нагрева. Диапазон изменения $Q_{окр}$ при первом способе регулирования составляет $563,5 \text{ Вт} < Q_{окр} < 581,6 \text{ Вт}$ при мощности $N = 1000 \text{ Вт}$ и $544,4 \text{ Вт} < Q_{окр} < 558,8 \text{ Вт}$ при мощности $N = 2000 \text{ Вт}$. Из представленных данных следует, что при увеличении мощности N тепловые потери во внешнее пространство за период Δt несколько снижаются.



**Рис. 4. Изменение во времени теплового потока, отводимого во внешнее пространство через наружные ограждения, в зависимости от мощности нагревательного устройства при первом (а) и втором (б) способах регулирования системы отопления:
1 – $N = 1000 \text{ Вт}$; 2 – 1250 ; 3 – 1500 ; 4 – 2000 .**

В условиях установившегося периодического режима отопления помещения (при постоянной t_n и постоянной во времени мощности N) выполняется равенство

$$\Delta E_{наг} = N \cdot \Delta \tau_{наг}(N) = \int_0^{\Delta \tau_{наг} + \Delta \tau_{ох}} Q_p(\tau) d\tau = \int_0^{\Delta \tau_{наг} + \Delta \tau_{ох}} Q_{окр}(\tau) d\tau,$$

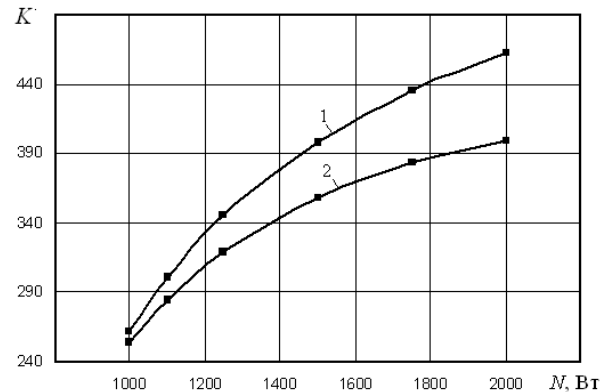
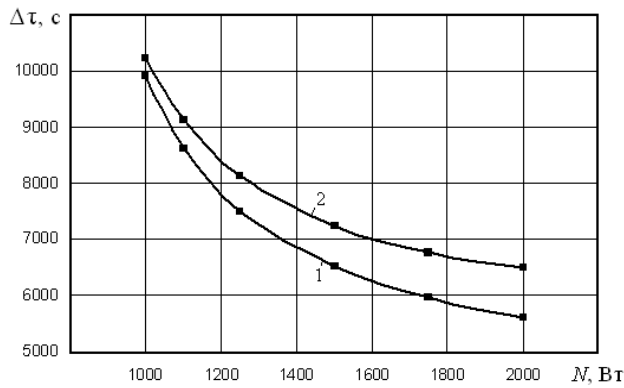
где $\Delta E_{наг}$ - количество энергии, затраченное на нагрев системы отопления за один период. Входящие в данное равенство значения $\Delta \tau_{ох}$ и $\Delta \tau_{наг}$, а также их сумма $\Delta \tau$, зависят как от мощности нагревателя N , так и от способа регулирования системы отопления. Зависимости от N периода $\Delta \tau$, т.е. интервала времени между двумя последовательными включениями или отключениями нагревателя, представлены на рис. 5, а. Как видно из данного рисунка, а также из

представленных выше рисунков, с увеличением мощности N длительность периодов Δt уменьшается. Это относится как к первому, так и ко второму способу регулирования. Очевидно, что при этом количество периодов K в одном календарном месяце (30 дней) с увеличением N также будет увеличиваться (рис. 5, б).

Зависимости от мощности нагревателя количества энергии $\Delta E_{наг}$, которая расходуется на нагрев системы отопления за один период Δt , представлены на рис. 6, а. Из данного рисунка видно, что как при первом, так и при втором способе регулирования количество затраченной за один период энергии $\Delta E_{наг}$ уменьшается с увеличением мощности N . Зависимости от мощности нагревателя средней за период Δt температуры

воздуха в помещении $\bar{t}_в$ представлены на рис. 6, б. Как видно из рисунка, при первом способе регулирования средняя температура воздуха в по-

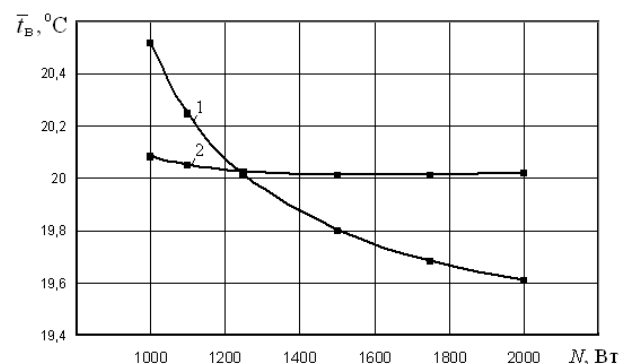
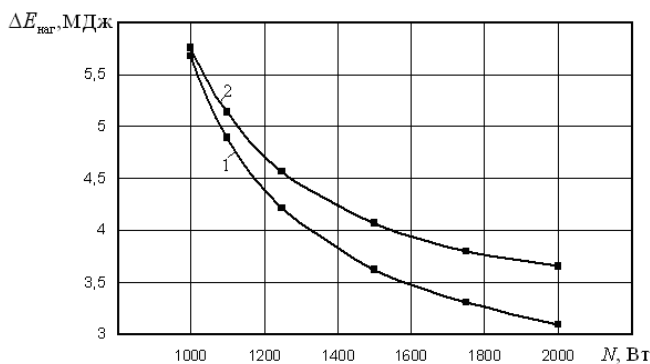
мещении уменьшается с увеличением мощности N . При втором же способе регулирования средняя температура воздуха от N зависит незначительно.



а)

б)

Рис. 5. Зависимости длительности периода (а) и количества периодов в месяце (б) от мощности нагревателя при первом (1) и втором (2) способах регулирования.



а)

б)

Рис. 6. Зависимости от мощности нагревателя N количества энергии, затраченной на нагрев системы отопления за один период $\Delta\tau$ (а) и средней за период $\Delta\tau$ температуры воздуха в помещении (б): 1 – первый способ регулирования; 2 – второй способ регулирования.

Используя данные, представленные на рис. 5 и 6, можно определить количество энергии E_m , потребляемой рассмотренной системой отопления за один месяц при использовании нагревателей с различной мощностью N . Как уже отмечалось, с увеличением мощности нагревателя N уменьшается количество энергии $\Delta E_{нар}$, расходуемой на нагрев системы отопления за один период (рис. 6, а). Однако при этом с увеличением мощности N уменьшается длительность периода $\Delta\tau$ (рис. 5, а) и увеличивается количество периодов K включения системы отопления за один месяц (рис. 5, б). Вследствие этого, значение $E_m = K \cdot \Delta E_{нар}$ оказывается слабо зависящим от величины N . Указанные зависимости, полученные для двух

способов регулирования системы отопления, представлены на рис. 7, а. Как видно из данного рисунка, при первом способе регулирования значение E_m уменьшается с увеличением N (кривая 1). Однако, при увеличении мощности N в 2 раза, значение E_m уменьшается лишь на 3,7 %. Следует также отметить, что при увеличении N уменьшается также средняя за период температура воздуха внутри помещения $\bar{t}_в$ (рис. 6, б).

Для оценки эффективности указанной системы отопления целесообразно рассмотреть также зависимость от мощности нагревателя N величины

$$R = \frac{(\bar{t}_в - t_n) \cdot S \cdot (\Delta\tau_{нар} + \Delta\tau_{ох})}{N \cdot \Delta\tau_{нар}}, \quad (1)$$

которая имеет размерность термического сопротивления. Как было показано ранее, величины t_v , $\Delta t_{наг}$ и $\Delta t_{ох}$, входящие в выражение (1), зависят от мощности N . Однако при этом величина R от N практически не зависит (рис. 7, б) и имеет зна-

чение $R \approx 0,4 \text{ м}^2\text{К/Вт}$ (кривая 1). Еще меньше от N зависят величины E_m и R , полученные при втором способе регулирования системы отопления (кривые 2 на рис. 7 а, б).

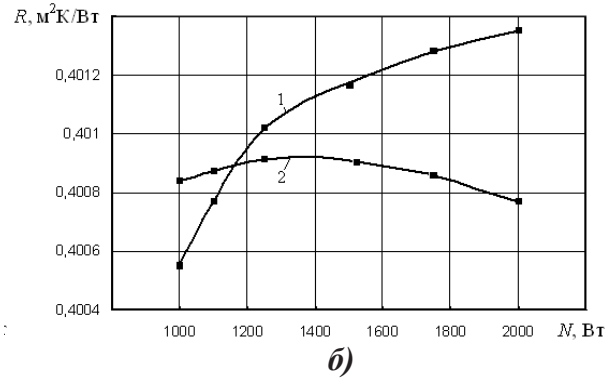
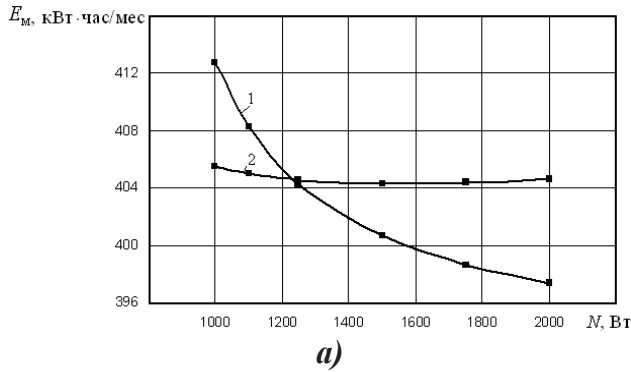


Рис. 7. Зависимости от мощности нагревателя количества энергии, потребляемой системой отопления за месяц (а), и параметра R системы отопления (б): 1 – первый способ регулирования; 2 – второй способ регулирования.

Выводы

Из представленных результатов следует, что увеличение мощности работающего в периодическом режиме индивидуального водогрейного устройства в системе отопления помещения позволяет снизить количество энергии, потребляемой за один период. При этом также уменьшается продолжительность одного периода. Однако вследствие увеличения количества циклов включения-выключения водогрейного устройства в течение месяца общий объем потребляемой в месяц энергии от мощности водогрейного устройства практически не зависит.

ЛИТЕРАТУРА

1. Басок Б.И. Температурный режим отапливаемого помещения. Приближенная теплофизическая модель / Б.И. Басок, Б.В. Давыденко, С.М. Гончарук, О.Н. Лысенко // Промышленная теплотехника. – 2013. – Т.35, № 4. – С. 23-30.
2. Басок Б.И. Расчет количества потребляемой тепловой энергии при обогреве помещения чугунным радиатором М-140. Часть 1. Стационарный режим отопления / Б.И. Басок, Б.В. Давыденко, А.В. Тимошенко // Промышленная теплотехника. – 2015, т. 37, №6. – С. 72 – 78.

**CALCULATION THE AMOUNT OF HEAT
ENERGY CONSUMPTION FOR
HEATING THE ROOM BY
CAST-IRON RADIATOR M-140.
PART 2. THE PERIODIC REGIME
OF HEATING**

**Basok B.I., Davydenko B.V., Timoshchenko A.V.,
Goncharuk S.M.**

Institute of Engineering Thermophysics of the
National Academy of Sciences of Ukraine,
vul. Zhelyabova, 2a, Kyiv-57, 03057, Ukraine

The unsteady regime of heating of the room by a
cast-iron radiator M-140 is investigated. Unsteady
(periodic) regime may be organized through the
use of individual water heating device (boiler),
which can be switched on and off depending
on the temperature of heat transfer agent or the
air temperature in the room. The results of
computational studies shows that increasing of
power of heating device which is working in
periodic regime allows reducing the amount of

heat energy consumption during one period. At
that the duration of one period is also reduces. But
because of increasing the number of switching on
and switching off cycles of the device for water
heating the total amount of the energy consumption
during the month is not practically dependent on
the capacity of heater.

References 2, figures 7.

Key words: heating of the room, temperature
regime, radiator.

1. *Basok B.I.* Temperature regime of the heated
room. An approximate thermophysical model /
B.I. Basok, B.V. Davydenko, S.M. Goncharuk,
O.N. Lysenko // *Promyshlennaya teplotekhnika.* –
2013. – V. 35, № 4, P. 23–30. (Rus.)

2. *Basok B.I.* Calculation the amount of heat energy
consumption for heating the room by cast-iron
radiator M-140. Part 1. Stationary heating regime /
B.I. Basok, B.V. Davydenko, A.V. Timoshchenko
// *Promyshlennaya teplotekhnika.* – 2015. – V. 37,
№ 6, P. 72–78. (Rus.)

Получено 04.01.2016

Received 04.01.2016