

## АНАЛИЗ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ПРЕРЫВИСТОГО РЕЖИМА ОТОПЛЕНИЯ ЗДАНИЯ

А.С. Куценко, С.В. Коваленко, В.И. ТОВАЖНЯНСКИЙ

*В статье обоснована упрощенная математическая модель управляемого процесса теплоснабжения здания. На основе предложенной модели и принципа максимума Л.С. Понтрягина получен оптимальный закон управления прерывистым режимом отопления. На основании численных экспериментов обоснованы рекомендации по условиям эффективного использования режима прерывистого отопления.*

*Ключевые слова: прерывистое отопление, управление теплоснабжением, математическая модель тепловых процессов здания.*

### ВВЕДЕНИЕ

Одним из основных направлений решения проблемы энергосбережения в системах теплоснабжения зданий наряду с утеплением и установкой теплосчетчиков является автоматизация систем управления теплоснабжением. Анализ источников информации в области энергосбережения при теплообеспечении производственных зданий позволяет прийти к заключению, что наиболее эффективным путем экономии тепловой энергии при сохранении необходимого уровня комфортности является режим прерывистого отопления (РПО), состоящий в снижении тепловой мощности (вплоть до полного отключения) на период нерабочего времени. В работах [1-4] рассмотрены некоторые подходы к реализации РПО, а также оценке его энергоэффективности, основанные на математическом моделировании процессов теплоснабжения зданий. Несмотря на высокий научный уровень этих исследований им, как и любым другим научным исследованиям, присущ ряд допущений и недостатков. Так в основополагающей работе [1] при рассмотрении процесса разогрева здания или натопа не учитываются динамические характеристики ограждений и внутренних аккумулирующих элементов (перегородок, мебели, оборудования и пр.). В то же время, нетрудно убедиться в том, что постоянная времени процесса нагревания внутреннего воздуха пренебрежимо мала по сравнению с постоянными времени тепловых процессов ограждений и внутренних аккумуляторов теплоты. Кроме того, температура внутренней поверхности внешнего ограждения принимается постоянной в процессе натопа, что очевидным образом не соответствует физике тепловых процессов зданий,

сформулированной авторами ранее. Этот недостаток также отмечается авторами [2], которые попытались сформулировать алгоритм прерывистого отопления на основании решения задачи оптимального управления по критерию экономии тепловой энергии на заданном временном интервале. Следует отметить ряд неточностей в [2] при постановке и решении задачи оптимального управления. Так, предлагаемый авторами алгоритм управления состоит из двух интервалов, на которых реализуются некоторые постоянные значения мощностей системы отопления. В то же время, применение принципа максимума Л.С. Понтрягина дает иной результат – закон управления состоит из 3-х интервалов. Это интервалы нулевой мощности, мощности, поддерживающей минимально допустимую температуру воздуха и максимальной мощности, реализующей скорейший переход от минимальной температуры воздуха к ее комфортному значению. На интуитивном уровне режим прерывистого управления, соответствующий основным положениям теории оптимального управления, описан в работе [3]. Из всех работ в этом направлении можно выделить исследование [4], в котором, на наш взгляд, наиболее удачно отражены основные ключевые моменты постановки задачи оптимального управления РПО. Так в [4] в качестве математической модели процесса рассматривается конечномерная модель теплопроводности через многослойное ограждение, а также сосредоточенные динамические модели внутреннего воздуха и перегородок здания. Несколько неточным представляется выбор минимизируемого функционала, включающего квадратичную штрафную функцию на правом конце от температуры внутреннего воздуха. Дело в том, что требуемая темпера-

тура воздуха может быть достигнута и тогда, когда все остальные температуры, определяющие полный вектор состояния системы, будут иметь значения отличные от номинальных, что приведет к изменению температуры воздуха в помещении при выходе из РПО. Кроме того применение прямых методов оптимизации вряд ли следует признать оправданным, поскольку приводит к нахождению локального экстремума. Это привело к ошибочному результату, поскольку принцип максимума для данной постановки задачи дает очевидное решение на границах области допустимых управлений.

Целью настоящей работы является совершенствование постановки задачи оптимального управления РПО на основе упрощенной математической модели тепловых процессов здания и, на основе ее решения, получение многопараметрической зависимости эффективности РПО от конструктивных параметров здания и внешних условий.

#### КВАЗИСТАТИЧЕСКИЙ ПОДХОД

Приближенную оценку экономичности процесса теплоснабжения при прерывистом режиме отопления можно получить на основе квазистатического подхода, основанного на представлении ограждения здания в виде теплового сопротивления без учета аккумуляирования теплоты. Очевидно, что такая модель процесса теплоснабжения является достаточно приближенной и в какой-то степени соответствует реальности для относительно облегченных зданий с большой площадью остекления.

Пусть  $\tau_{II}$  [час] – интервал времени пониженной мощности отопления, которому соответствует температура воздуха помещения  $T_{min}$  [°C]. Тогда режиму комфортной температуры  $T_{max}$  [°C] будет соответствовать временной период  $\tau_k = 24 - \tau_{II}$ . Удельные тепловые потоки, соответствующие режимам пониженной температуры и комфортной  $q_{min}$  и  $q_{max}$ , представим в виде

$$q_{min} = \alpha(T_{min} - T_{oc}),$$

$$q_{max} = \alpha(T_{max} - T_{oc}),$$

где  $\alpha$  – тепловая проводимость единицы поверхности ограждения,  $T_{oc}$  – температура окружающей среды.

Удельный суточный расход теплоты  $\bar{Q}$  можно вычислить по следующей формуле:

$$\bar{Q} = \alpha\tau \cdot \underline{g} + \alpha\tau_k \cdot \bar{g}, \quad (1)$$

где  $\underline{g} = T_{min} - T_{oc}$ ,  $\bar{g} = T_{max} - T_{oc}$  – избыточные температуры.

В случае комфортного режима отопления в течение суток расход теплоты составит

$$Q = 24\alpha\bar{g}. \quad (2)$$

Оценим эффективность прерывистого отопления с точки зрения экономии тепловой энергии величиной  $\eta$ , представляющей отношение абсолютной суточной экономии к суточному расходу теплоты в номинальном режиме отопления

$$\eta = \frac{Q - \bar{Q}}{Q}. \quad (3)$$

Подставляя (1) и (2) в (3), получим окончательно

$$\eta = \nu(1 - \omega), \quad (4)$$

где  $\nu = \tau_{II}/24$  – доля времени сниженного уровня отопления,  $\omega = \underline{g}/\bar{g}$  – отношение минимальной избыточной температуры к комфортной. Если предположить, что минимально допустимая температура помещения  $T_{min} = 10^\circ C$ , а комфортная  $T_{max} = 20^\circ C$ , то для диапазона изменения температуры окружающей среды  $[-20; 10]^\circ C$  величина  $\omega$  может принимать значения от 0 до 0,75. Рисунок 1 иллюстрирует взаимосвязь между параметрами  $\nu$ ,  $\omega$  и эффективностью  $\eta$  РПО в соответствии с (4).

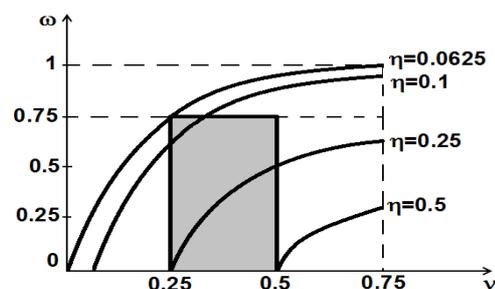


Рисунок 1 – Эффективность РПО

в зависимости от параметров

Как видно из рисунка 1 в заштрихованной области, соответствующей реально возможным значениям температурных перепадов и длительностей отопления с пониженной мощностью выигрыш в экономичности теплопотребления при прерывистом отоплении может составить от 6,25 до 50% по сравнению с режимом непрерывного теплоснабжения.

### ДИНАМИЧЕСКИЙ ПОДХОД

Как было отмечено ранее, полученные на основании квазистатической модели результаты не учитывают длительности реальных переходных процессов в системе теплоснабжения и являются предельно возможными оценками эффективности РПО.

Для оценки влияния аккумуляции теплоты ограждением здания на эффективность РПО рассмотрим упрощенную математическую модель здания, состоящую из внешнего ограждения и внутренних перегородок. Внешние ограждения и перегородки будем рассматривать как элементы с сосредоточенными параметрами, имеющими известные тепловые сопротивления и емкости. Электрический аналог тепловых процессов в здании может быть представлен в виде, изображенном на рисунке 2.

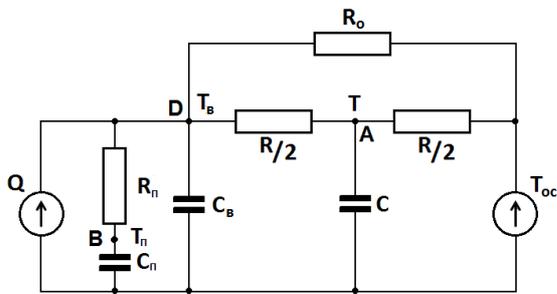


Рисунок 2 – Электрический аналог тепловой модели здания

На рисунке 2  $R$ , и  $R_{II}$  – тепловые сопротивления ограждения и перегородок;  $R_0$  – суммарное тепловое сопротивление, обусловленное остеклением и воздухообменом с окружающей средой;  $C$ ,  $C_{II}$  и  $C_е$  – теплоемкости ограждения, перегородок и внутреннего воздуха;  $T$ ,  $T_{II}$ ,  $T_е$  и  $T_{oc}$  – температуры ограждения, перегородок, воздуха и окружающей среды соответственно;  $Q$  – тепловой поток из отопительной системы.

Для узлов  $A$ ,  $B$ ,  $D$  электрического аналога (рисунок 2) составим уравнения 1-го закона Кирхгофа:

$$\begin{aligned} C \frac{dT}{dt} &= \frac{T_е - T}{R} - \frac{T - T_{oc}}{R}, \\ C_{II} \frac{dT_{II}}{dt} &= \frac{T_е - T_{II}}{R_{II}}, \\ C_е \frac{dT_е}{dt} &= -\frac{T_е - T_{II}}{R_{II}} - \frac{T_е - T}{R} - \frac{T_е - T_{oc}}{R_0} + Q, \end{aligned} \quad (5)$$

где  $\bar{R} = R/2$ . Обозначая  $\vartheta_i = T_i - \bar{T}_{oc}$ , где  $\bar{T}_{oc}$  – среднее значение температуры окружающей среды на интервале пониженной температуры внутреннего воздуха, преобразуем систему (5) к следующему виду:

$$\begin{aligned} \varepsilon \frac{d\vartheta}{dt} &= \vartheta_е - 2\vartheta + \Delta, \\ \varepsilon_{II} \frac{d\vartheta_{II}}{dt} &= \vartheta_е - \vartheta_{II}, \\ \varepsilon_е \frac{d\vartheta_е}{dt} &= -(1 + \gamma + \delta)\vartheta_е + \gamma\vartheta_{II} + \delta\Delta\vartheta + \bar{R}Q, \end{aligned} \quad (6)$$

где  $\varepsilon = C\bar{R}$ ,  $\varepsilon_{II} = C_{II}R_{II}$ ,  $\varepsilon_е = C_е\bar{R}$  – постоянные времени тепловых процессов ограждения, перегородок и внутреннего воздуха;  $\Delta = T_{oc} - \bar{T}_{oc}$  – отклонение внешней температуры от ее среднего (на интервале с пониженной температурой помещения) значения;  $\gamma = \bar{R}/R_{II}$ ,  $\delta = \bar{R}/R_0$ .

Нетрудно видеть, что постоянная времени внутреннего воздуха  $\varepsilon_е$  на 2-3 порядка меньше постоянной времени  $\varepsilon$ . Постоянная времени перегородок здания  $\varepsilon_{II}$  может колебаться в зависимости от конструкции здания в широких пределах, но для получения упрощенных оценок будем также предполагать малость  $\varepsilon_{II}$  по сравнению с  $\varepsilon$ . Такие системы относятся к классу тихоновских [5]. Это позволяет правые части 2- и 3-го уравнений системы (6) приравнять нулю. Примем также, что температура окружающей среды на интервале переключения режимов отопления изменяется незначительно. Т.е. в системе уравнений (6)  $\Delta = 0$ . Принятые допущения позволяют привести систему (6) к виду

$$\begin{aligned} \frac{d\vartheta}{d\tau} &= -a\vartheta + bqr, \\ \vartheta_e &= b\vartheta + bqr, \end{aligned} \quad (7)$$

где  $a = \frac{1+2\delta}{1+\delta}$ ,  $b = \frac{1}{1+\delta}$ ,  $q = Q/F$ ,  $r = \bar{R}F$ ,  $\tau = t/\varepsilon$  – безразмерное время,  $F$  – площадь поверхности внешнего ограждения здания.

Сформулируем теперь постановку задачи оптимального управления прерывистым теплоснабжением. Управляемый процесс будем представлять в упрощенном виде как одномерный (7). Целью управления является изменение температуры  $\vartheta_e$  на интервале времени  $(0, \tau_{II})$  такое, что  $\vartheta_e(\tau_{II}) = \vartheta_e(0) = \bar{\vartheta}$ . Ограничением на  $q$  является ограничение на максимальное значение мощности отопительной системы:

$$0 \leq q \leq q_{\max}. \quad (8)$$

Кроме ограничения (8) на фазовую траекторию также наложено ограничение на минимально допустимое значение температуры внутреннего воздуха

$$\vartheta_e(t) \geq \underline{\vartheta}, \quad (9)$$

что обусловлено предотвращением явления конденсации паров воды в помещении.

Критерием качества прерывистого процесса отопления является расход теплоты на интервале переключений

$$J = \int_0^{\tau_{II}} q(t) dt. \quad (10)$$

Для нахождения оптимального закона теплоснабжения  $q(t)$  воспользуемся принципом максимума [6]. Гамильтониан задачи примет вид

$$H = -q + \psi(-a\vartheta + bqr),$$

а сопряженное дифференциальное уравнение запишется как

$$\frac{d\psi}{dt} = -\frac{\partial H}{\partial \vartheta} = a\psi. \quad (11)$$

На основании принципа максимума оптимальный закон управления без учета фазового ограничения (9) примет вид

$$q = \arg \max_{0 \leq q \leq q_{\max}} H = \begin{cases} 0, & \text{если } \psi \leq 0; \\ q_{\max}, & \text{если } \psi > 0. \end{cases} \quad (12)$$

Заметим также, что решение сопряженного уравнения (11), определяющее закон управления (12), имеет вид

$$\psi(t) = \psi(0)e^{at}$$

и представляет собой монотонно возрастающую функцию времени. Следовательно,  $\psi(t)$  может менять свой знак не более одного раза.

Полученный закон управления имеет место при выполнении условия (9) на фазовую траекторию. В случае достижения границы допустимой области для простейшей структуры ограничения вида (9) [6] оптимальное управление находится исходя из требования движения по границе  $\vartheta_e(t) = \underline{\vartheta}$ . Такому движению соответствует постоянное значение тепловой мощности  $\underline{q}$ , получаемое приравнением правой части уравнения процесса (7) нулю. Таким образом, на границе допустимой области

$$q(t) = \underline{q} = \frac{a}{(a+b)br} \underline{\vartheta}.$$

Окончательно оптимальный закон управления примет вид

$$q = \begin{cases} 0, & \text{если } \psi \leq 0 \text{ и } \vartheta_e > \underline{\vartheta}; \\ q_{\max}, & \text{если } \psi > 0 \text{ и } \vartheta_e > \underline{\vartheta}; \\ \frac{a\underline{\vartheta}}{(a+b)rb}, & \text{если } \vartheta_e = \underline{\vartheta}. \end{cases}$$

Проведенные выводы позволяют рассматривать два типа оптимальных законов управления теплоснабжением, иллюстрированных на качественном уровне рисунками 3 и 4.

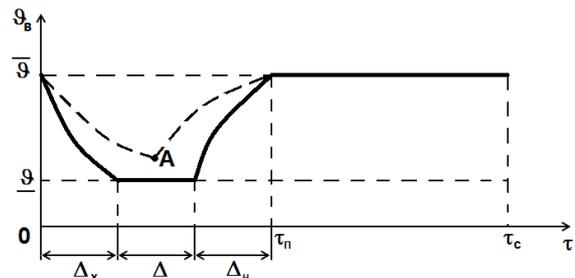


Рисунок 3 – График изменения температуры воздуха при прерывистом отоплении

На рисунке 3 интервал переключений режимов отопления  $\tau_{II}$  разбит на подынтервалы длительностей  $\Delta_x$ ,  $\underline{\Delta}$ ,  $\Delta_n$  – охлаждения, обеспечения минимально допустимой температуры и натопа соответственно. Приведенный график (сплошная линия) реализуется в случае, если суммарная длительность процессов охлаждения и натопа не превышает длительности интервала переключений, т.е.:

$$\Delta_x + \Delta_n < \tau_{II}. \quad (13)$$

Выполнение этого условия зависит от интенсивности охлаждения, определяемой температурой окружающей среды и интенсивности натопа, определяемой максимальной мощностью системы отопления.

В случае невыполнения условия (13), что может иметь место при высоких отрицательных значениях  $T_{oc}$ , переключение с режима охлаждения на режим натопа может быть осуществлено до достижения температуры  $\underline{g}$ . Температурный график такого процесса показан пунктирной линией на рисунке 3.

Таким образом, графики изменения тепловой мощности в режиме прерывистого отопления при оптимальном управлении будут иметь структуру, показанную на рисунке 4.

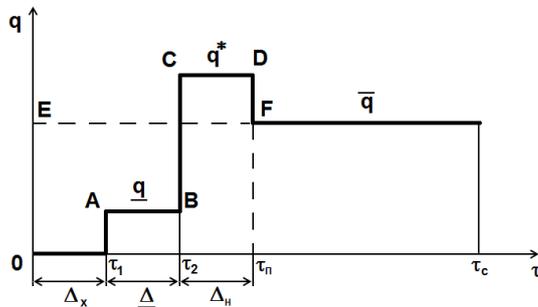


Рисунок 4 – Оптимальные законы управления

На рисунке 4 тепловые потоки  $\bar{q}$  и  $\underline{q}$  соответствуют своим установившимся максимальному и минимальному значениям, определенным температурами  $T_{min}$ ,  $T_{max}$  и  $T_{oc}$ . Тепловой поток  $q^*$ , определяющий длительность периода натопа  $\Delta_n$ , выбирается из условия

$$q_{max} \geq q^* > \bar{q}.$$

Рассмотрим случай, когда соотношение (13) выполняется. Для нахождения интервалов  $\Delta_x$  и  $\Delta_n$  проинтегрируем дифференциальное уравнение системы (7) при условии

постоянства тепловых потоков на различных подынтервалах интервала переключений  $\tau_{II}$ . Интегрирование дифференциального уравнения (7) с учетом уравнения выхода дает следующие результаты. Для участка охлаждения:

$$g(\tau) = g(0)e^{-a\tau}. \quad (14)$$

Для участка натопа:

$$g(\tau) = g(\tau_2)e^{-a(\tau-\tau_2)} + (1 - e^{-a(\tau-\tau_2)}) \frac{a+b}{a} brq^*. \quad (15)$$

Обратим внимание на то, что установившаяся температура воздуха  $g_{ycm}$  и соответствующий установившийся тепловой поток  $q_{ycm}$ , как следует из (7), связаны соотношением

$$g_{ycm} = \frac{a+b}{a} brq_{ycm}. \quad (16)$$

Таким образом, вместо теплового потока  $q^*$  в соотношении (15) можно использовать величину  $g^*$ , представляющую собой температуру перегрева воздуха для стационарного режима, соответствующего повышенной тепловой мощности при натопе. Тогда соотношение (15) с учетом (16) можно записать в виде

$$g(\tau) = g(\tau_2)e^{-a(\tau-\tau_2)} + g^*(1 - e^{-a(\tau-\tau_2)}). \quad (17)$$

Аналогичным образом, вместо тепловых потоков  $\underline{q}$  и  $\bar{q}$  на стационарных участках будем использовать соответствующие значения избыточных температур  $\underline{g}$  и  $\bar{g}$  пропорциональные тепловым потокам в соответствии с соотношением (16).

Из (14) и (15) продолжительности охлаждения и натопа принимают следующий вид:

$$\Delta_x = -\frac{1}{a} \ln \omega, \quad (18)$$

$$\Delta_n = \frac{1}{a} \ln \frac{\omega - \mu}{1 - \mu}, \quad (19)$$

где безразмерные параметры  $\omega = \underline{g}/\bar{g}$ ,  $\mu = g^*/\bar{g}$  представляют собой отношения соответствующих тепловых мощностей в установившемся режиме.

В случае выполнения соотношения (9) из условия временного баланса

$$\Delta_x + \Delta_n + \underline{\Delta} = \tau_{II} \quad (20)$$

можно определить длительность участка минимального теплоподвода  $\underline{\Delta}$ . Абсолютный выигрыш в экономичности теплоснабжения  $\Delta Q_{II}$  на интервале переключения можно получить как разницу площадей на рисунке 4 под ломаной  $ACD$  и прямой  $EF$ , соответствующих режимам прерывистого отопления и номинальному,

$$\Delta Q_{II} = \bar{g}\tau_{II} - (g\underline{\Delta} + g^*\Delta_n),$$

а относительный выигрыш составит

$$\eta_{II} = \frac{\Delta Q_{II}}{g\tau_{II}} = 1 - \frac{1}{\tau_{II}}(\omega\underline{\Delta} + \mu\Delta_n),$$

или, с учетом условия баланса времени (20) и соотношений для  $\Delta_x$  и  $\Delta_n$  (18), (19)

$$\eta_{II} = (1 - \omega) + \frac{1}{a\tau_{II}} \left( \omega \ln \frac{1}{\omega} + (\omega - \mu) \ln \frac{\omega - \mu}{1 - \mu} \right). \quad (21)$$

Относительную эффективность за суточный цикл  $\eta_c$  можно вычислить на основании очевидного соотношения

$$\eta_c = \eta_{II} \nu. \quad (22)$$

Таким образом, на основании соотношений (21) и (22), получим окончательно:

$$\eta_c = \nu(1 - \omega) + \frac{1}{a\tau_c} \left( \omega \ln \frac{1}{\omega} + (\omega - \mu) \ln \frac{\omega - \mu}{1 - \mu} \right). \quad (23)$$

Нетрудно видеть, что первое слагаемое в (23) в точности соответствует соотношению (4), полученному для квазистатической модели процесса прерывистого отопления. Следовательно, второе слагаемое в (23) представляет собой поправку на динамические свойства процессов, связанных с переключениями режимов отопления, и обращается в нуль при  $\tau_c = \infty$ , т.е. при постоянной времени  $\varepsilon = 0$ , что соответствует квазистатической, безынерционной модели процессов охлаждения и нагревания здания.

Рассмотрим случай, когда суммарная длительность интервалов охлаждения и на-топа, соответствующая заданной минимальной избыточной температуре  $\underline{g}$ , превышает длительность  $\tau_{II}$  заданного интервала пере-

ключений. Этому случаю соответствует пунктирный график на рисунке 3. Для определения температуры  $g_A$  в точке  $A$  переключения с режима охлаждения на режим на-топа воспользуемся условием временного баланса (20), принимающего в нашем случае вид

$$\Delta_x + \Delta_n = \tau_{II}. \quad (24)$$

Тогда уравнение для определения  $g_A$ , полученное в результате подстановки (18) и (19) в (24), примет вид

$$-\frac{1}{a} \ln \omega_A + \frac{1}{a} \ln \frac{\omega_A - \mu}{1 - \mu} = \nu \tau_c, \quad (25)$$

где  $\omega_A = g_A / \bar{g}$ .

Решение (25) относительно  $\omega_A$  дает следующий результат:

$$\omega_A = \frac{\mu}{1 + (\mu - 1)e^{a\nu\tau_c}}, \quad (26)$$

следовательно, длительность интервала на-топа  $\Delta_n$  можно вычислить по формуле

$$\Delta_n = \frac{1}{a} \ln \frac{\mu - \omega_A}{1 - \mu}. \quad (27)$$

Абсолютный выигрыш в экономичности теплоснабжения в соответствии с рисунком 4 может быть получен как разность площадей под отрезками прямых  $EF$  и  $CD$

$$\Delta Q_{II} = \bar{g}\tau_{II} - g^*\Delta_n, \quad (28)$$

а относительный выигрыш в виде

$$\eta_{II} = \frac{\Delta Q_{II}}{g\tau_{II}}. \quad (29)$$

На основании соотношений (22), (27), (28), (29) относительная эффективность СПО за сутки может быть вычислена как

$$\eta_c = \nu(1 - \mu) - \frac{\mu}{\tau_c} \ln \frac{\mu}{1 + (\mu - 1)e^{a\nu\tau_c}}. \quad (30)$$

Численный анализ эффективности РПО

Полученные соотношения (23) и (30) для оценки эффективности РПО позволяют получить величины относительной экономии расходов теплоты  $\eta_c$  как функции параметров  $\omega$ ,  $\mu$ ,  $\nu$ ,  $\tau_c$ ,  $\delta$ .

## АНАЛИЗ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ПРЕРЫВИСТОГО РЕЖИМА ОТОПЛЕНИЯ ЗДАНИЯ

Предварительно согласно (26) вычисляется отношение избыточных температур  $\omega_A$ . Если  $\omega_A \leq \omega$ , то в этом случае  $\eta_c$  вычисляется в виде (23). В противном случае по формуле (30).

Результаты численных экспериментов при  $\alpha = 1$  представлены в таблице, в которой тепловая эффективность РПО выражена в процентах.

*Таблица 1 - Результаты численных экспериментов тепловой эффективности РПО*

$\varepsilon$ [час]	$\tau_{II}$	$\mu$											
		1,25			1,5			2			3		
		$\omega$			$\omega$			$\omega$			$\omega$		
		0,2	0,6	0,8	0,2	0,6	0,8	0,2	0,6	0,8	0,2	0,6	0,8
24	0,4	1,7	1,7	1,7	2,8	2,8	2,8	4,0	4,0	4,0	5,1	5,1	5,1
	0,5	2,7	2,7	2,7	4,4	4,4	4,4	6,2	6,2	6,0	7,8	7,8	6,9
	0,6	4,0	4,0	4,0	6,3	6,3	6,3	8,9	8,9	8,0	11,1	11,1	8,9
12	0,4	3,7	3,7	3,7	5,7	5,7	5,1	7,8	7,8	6,0	9,6	9,4	6,4
	0,5	6,0	6,9	5,7	9,0	9,0	7,1	12,0	11,8	8,0	14,5	13,4	8,4
	0,6	8,8	8,8	7,7	13,0	12,9	9,1	17,0	15,8	10,0	20,2	17,4	10,4
8	0,4	5,9	5,9	5,9	8,6	8,6	6,1	11,3	10,5	6,7	13,5	11,6	7,0
	0,5	9,5	9,5	7,1	13,5	12,6	8,1	17,2	14,5	8,7	20,0	15,6	9,0
	0,6	14,1	13,5	9,1	19,4	16,6	10,1	24,0	18,5	10,7	27,4	19,6	11,0
6	0,4	8,2	8,1	5,9	11,5	10,4	6,6	14,5	11,9	7,0	16,8	12,7	7,2
	0,5	13,2	12,1	7,9	17,8	14,4	8,6	21,7	15,9	9,0	24,5	16,7	9,2
	0,6	19,4	16,1	9,9	25,1	18,4	10,6	29,6	19,9	11,0	32,5	20,7	11,2

На основании полученных численных результатов можно сделать следующие выводы:

1. Эффективность РПО возрастает с уменьшением постоянной времени  $\varepsilon$  здания.
2. Увеличение избыточной тепловой мощности  $\mu$  на интервале натопа способствует увеличению тепловой эффективности РПО.
3. Эффективность РПО возрастает при снижении  $\omega$ , что соответствует росту температуры окружающей среды.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Табунщиков Ю.А. Математическое моделирование и оптимизация тепловой эффективности зданий / Ю.А. Табунщиков, М.М. Бродач. – М.: АВОК – ПРЕСС, 2002. – 194с.
2. Панферов В.И. Анализ возможности экономии тепловой энергии при прерывистом режиме отопления / В.И.Панферов, Е.Ю. Анисимова // Вестник ЮУрГУ. Серия «Строительство и архитектура». – 2008. – Вып 6. - №12. – С. 30-37.
3. Гершкович В.Ф. О возможности практической реализации регулирования теплопотребления зданий методом периодического прерывания пото-

ка теплоносителя / В.Ф. Гершкович // Новости теплоснабжения. – 2000. - №10. – С.16-23.

4. Васильев Г.П. Численный метод оптимизации прерывистого режима отопления / Г.П. Васильев, В.А. Личман, Н.В. Песков // Математическое моделирование, 2010. – том 22. - №11. – С. 123-130.

5. Моисеев Н.Н. Математические задачи системного анализа / Н.Н. Моисеев. – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1981. – 488с.

6. Лернер А.Я. Оптимальное управление / А.Я. Лернер, Е.А. Розенман. – М.: Энергия, 1970. – 360с.

**Куценко А.С., д.т.н., проф., зав. кафедрой системного анализа и управления, НТУ «ХПИ», e-mail: kuzenko@kpi.kharkov.ua**

**Коваленко С.В., ст. преподаватель, кафедра системного анализа и управления, НТУ «ХПИ», e-mail: kovalsvt@rambler.ru**

**Товажнянский В.И., магистр, кафедра системного анализа и управления, НТУ «ХПИ».**

*Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», Харьков, Украина.*