

Кузьмин Сергей Иванович,  
к.т.н., доцент, Ангарский государственный технический университет,  
e-mail: sergey.kuzmin@mail.ru

## МЕТОД РАСЧЁТА ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЗДУХА ОБСЛУЖИВАЕМОЙ ЗОНЫ ВЕНТИЛИРУЕМОГО ПОМЕЩЕНИЯ ПРИ НЕСТАЦИОНАРНОМ ТЕПЛОВОМ РЕЖИМЕ

Kuzmin S.I.

## METHOD FOR CALCULATING THE AIR TEMPERATURE OF THE SERVICED AREA OF THE VENTILATED ROOM UNDER NON-STATIONARY THERMAL CONDITION

**Аннотация.** Приведено обоснование приема определения температуры воздуха в рабочей (обслуживаемой) зоне вентилируемого помещения при нестационарных гармонических и прерывистых теплоступлениях.

**Ключевые слова:** вентиляция, нестационарный тепловой режим, воздушный режим, воздух рабочей зоны, тепловыделения.

**Abstract.** The substantiation of the reception of determining the air temperature in the working (serviced) zone of the ventilated room with non-stationary harmonic and intermittent heat occurrences is given.

**Keywords:** ventilation, non-stationary thermal mode, air mode, working area air, heat dissipation.

В практике анализа и расчета режимов эксплуатации систем создания микроклимата за некоторый (рабочей смены, суточный, годовой, сезонный) период с учетом нестационарных тепловых потоков обычно принимают ряд допущений о формировании теплового режима внутри помещений и выражении его параметров [1, 2]. В частности, допускается равномерность температуры внутреннего воздуха по объему помещения, поверхности теплообмена изотермичными, а теплоступления не зависящими от температуры воздуха. Формирование температурного поля по объему вентилируемого помещения с выделение тепла происходит под влиянием как, собственно, величины и вида тепловыделений, так и интенсивности воздухообмена и способа его организации [3-5]. При нестационарном режиме тепловыделений на этот процесс дополнительно оказывает воздействие вид закономерности изменения теплоступлений и теплопотерь во времени, теплоустойчивость помещения.

В настоящей работе предложен метод определения температуры воздуха в обслуживаемой зоне помещения с учетом неравномерности температурного поля и нестационарном режиме теплоступлений.

Решения поставленной задачи проведем при следующих условиях и допущениях:

- внутренний объем помещения условно разделён на три относительно самостоятельных части (зоны): нижнюю (обслуживаемую)  $A_p$ ; верхнюю  $A_B$ ;

среднюю, расположенную между двумя первыми  $A_c$ . В пределах каждой зоны температурное поле равномерное;

- температура воздуха в помещении изменяется только по высоте. Интенсивность неравномерности температурного поля по вертикали выражается состоянием граничных показателей – в обслуживаемой  $t_o$  и верхней  $t_y$  зонах [8-10]:

$$m_t = \frac{t_o - t_{\Pi}}{t_y - t_{\Pi}}, \quad (1)$$

где  $t_{\Pi}$  – температура приточного воздуха, °С;

- температуры поверхностей в пределах каждой зоны одинаковы;
- температура приточного воздуха и тепловыделения от внутренних источников тепла изменяются по произвольным, но известным законам;
- тепловыделения от внутренних источников тепла зависят от температуры в обслуживаемой зоне помещения;
- теплообмен с наружной по отношению к помещению средой не учитывается;
- интенсивность конвективного и лучистого теплообменов в пределах характерных поверхностей одинакова.

Особенность известных методик расчета теплового режима помещения при нестационарных теплоступлениях заключается либо в допущении о независимости тепловыделений от изменения температуры внутреннего воздуха, либо в определении средних за период величин тепловых потоков с последующей корректировкой их значений [2]. В настоящей работе предлагается реализация приема последовательного вычисления температуры воздуха в обслуживаемой зоне начиная с начального момента  $j_0 = 1$  до расчетного (конечного в интересующем интервале)  $j_k = T$  с шагом в единичный интервал времени, с вычислением тепловых потоков по этой температуре для каждого следующего шага. При этом предполагается, что инерция тепловыделяющих источников соответствует запаздыванию на изменение температуры среды в пределах выбранного временного шага:

$$t_{B,j} = t_{B,(j-1)} + \Delta t_{B,j-(j-1)}; \Delta t_{B,j-(j-1)} = f(W_{j-(j-1)}); W_j = f(t_{B,(j-1)}), \quad (2)$$

где  $\Delta t_{B,j-(j-1)}$  – изменение температуры воздуха за единичный период времени с  $j - 1$  до  $j$ ;  $W_j$  – тепловыделения за  $j$ -й промежуток времени.

При переменных тепловыделениях внутри помещения для единичного отрезка времени –  $j$  количество тепла воспринимаемого произвольной внутренней поверхностью  $z$  площадью  $A_z$  складывается из конвективного теплообмена с воздухом  $Q_{K.z,j}$  и радиационных потоков от внутренних источников  $Q_{r.z,j}^W$  и внутренних поверхностей  $Q_{r.z,j}^{in}$ :

$$Q_{K.z,j} \cdot A_z = Q_{K.z,j} + Q_{r.z,j}^W + Q_{r.z,j}^{in} = [\alpha_K \cdot (t_{\theta.z,j} - t_{z,j}) + \alpha_L \cdot (\bar{t}_{R,j} - t_{z,j})] \cdot A_z + \varepsilon_{r.z} \cdot W_j, \quad (3)$$

где  $\alpha_K$  и  $\alpha_L$  – коэффициенты конвективного и лучистого теплообмена для поверхности, Вт/м<sup>2</sup> · К;  $t_{B,Z}$  – температура внутреннего воздуха, соприкасающегося с  $z$ -й поверхностью, °С;  $t_z$  – температура  $z$ -й поверхностью, °С;  $\bar{t}_R$  – усреднённая температура поверхностей, окружающих  $z$ -ю поверхность, °С;  $\varepsilon_{r,z}$  – доля тепла, переходящая излучением от внутреннего источника к  $z$ -й поверхности;  $W_j$  – интенсивность тепловыделений от внутреннего источника тепла в  $j$ -й момент времени, Вт.

Температуру поверхности в  $j$  -й момент времени можно определить через среднее её значение  $\bar{t}_z$  за рассматриваемый период и изменяющуюся часть  $A_{z,j}$  [1]:

$$t_{z,j} = \bar{t}_z + A_{z,j} = \bar{t}_z + \frac{Q_{z,j}}{Y_z}, \quad (4)$$

где  $Y_z$  – коэффициент теплоусвоения  $j$  й поверхности, Вт/м<sup>2</sup> · °С.

Суммируя тепловые потоки на выделенные поверхности помещения ( $A_H, A_C, A_B$ ) и принимая, что температура воздуха в средней зоне равна среднему значению между  $t_{B,p}$  и  $t_{B,b}$ , а в  $j$ -й момент времени существует баланс между выделяемым и поглощаемым теплом, аналогично [2] можно записать:

$$\begin{aligned} \sum_z Q_{z,j} \cdot A_z = & t_{B,p,j} \cdot \left\{ \frac{\alpha_L}{\alpha_B} [A_p + 0.5 \cdot A_c(1 + m_t^{-1}) + m_t^{-1} \cdot A_B] \cdot B_o + \right. \\ & + \frac{\alpha_K}{\alpha_B} [0.5 \cdot B_{r,c} \cdot A_c \cdot (1 + m_t^{-1}) + B_H \cdot A_H + m_t^{-1} \cdot B_B \cdot A_B] \left. \right\} + t_{П,j} \left\{ \frac{\alpha_L}{\alpha_B} \cdot \right. \\ & \cdot (0.5A_c + A_B) \cdot B_o + \frac{\alpha_K}{\alpha_B} (B_c \cdot A_c + B_B \cdot A_B) \left. \right\} \cdot (1 - m_t^{-1}) - \left( \sum_z \bar{t}_z \cdot A_z \right) \cdot B_o - \\ & - W_j \cdot \left( \frac{\eta_K}{\alpha_K} + \frac{\eta_K}{\alpha_B} \right) \cdot B_o + W_j \frac{\sum_z \varepsilon_z \cdot B_z}{\alpha_B}, \end{aligned} \quad (5)$$

где  $B_z$  и  $B_o$  – коэффициенты теплопоглощения соответственно поверхности и помещения, Вт/м<sup>2</sup> · °С;  $\eta_K$  – доля конвективных тепловыделений в общем их количестве, %;  $\bar{t}_z$  – средняя температура поверхности за период, °С.

С учетом того, что  $\sum_z \varepsilon_z = (1 - \eta_K)$  и  $B_\varepsilon = (\sum_z \varepsilon_z \cdot B_z) / (\sum_z \varepsilon_z)$  из (5) определится текущая температура в обслуживаемой зоне:

$$\begin{aligned} t_{B,p,j} = & \{W_{(j-1)} \cdot [1 + \left( \frac{\eta_K}{\alpha_L} + \frac{\eta_K}{\alpha_B} \right) \cdot B_o - \frac{1 - \eta_K}{\alpha_B} B_\varepsilon] \\ & + \sum_z (\bar{t}_z \cdot B_z \cdot A_z) - t_{П,j} \cdot (1 - m_t^{-1}) \cdot \left[ \frac{\alpha_L}{\alpha_B} \cdot \right. \\ & \cdot (0.5 \cdot A_c + A_B) \cdot B_o + \frac{\alpha_K}{\alpha_B} (B_c \cdot A_c + B_B \cdot A_B) \left. \right\} \cdot \left\{ \frac{\alpha_K}{\alpha_B} [B_p \cdot A_p + 0.5 \cdot B_c \cdot A_c \cdot \right. \\ & \cdot (1 - m_t^{-1}) + m_t^{-1} \cdot B_B \cdot A_B] + \frac{\alpha_L}{\alpha_B} [A_p + 0.5 \cdot (1 - m_t^{-1}) \cdot A_c + m_t^{-1} \cdot A_B] \cdot B_o \left. \right\} \end{aligned} \quad (6)$$

В формулах (5) и (6) присутствует средняя температура поверхностей за рассматриваемый период, значение которой при зависимости тепловыделений  $W_j$  от внутренней температуры заранее не известно. Поэтому, для реализации

условия последовательного определения параметров теплового режима удобно вести расчет исходя из условий (2). При таком подходе средняя температура сокращается и выражение для изменения температуры примет вид:

$$\begin{aligned} \Delta t_{\text{в.п.н}[j-(j-1)]} = & \{ \Delta W_{[(j-1)-(j-2)]} \cdot [1 + (\frac{\eta_{\text{к}}}{\alpha_{\text{к}}} - \frac{\eta_{\text{к}}}{\alpha_{\text{в}}}) \cdot B_o - \frac{1 - \eta_{\text{к}}}{\alpha_{\text{в}}} B_{\varepsilon}] - \\ & - \Delta t_{\text{п}[j-(j-1)]} \cdot (1 - m^{-1}) \cdot [\frac{\alpha_{\text{л}}}{\alpha_{\text{в}}} (0.5 \cdot A_c + A_{\text{в}}) \cdot B_o + \frac{\alpha_{\text{к}}}{\alpha_{\text{в}}} (B_c \cdot A_c + B_{\text{в}} \cdot A_{\text{в}})] \}: \\ & : \{ \frac{\alpha_{\text{к}}}{\alpha_{\text{в}}} [A_{\text{п}} \cdot B_{\text{п}} + 0.5 \cdot A_c \cdot B_c \cdot (1 + m^{-1}) + m^{-1} \cdot A_{\text{в}} \cdot B_{\text{в}}] + \frac{\alpha_{\text{л}}}{\alpha_{\text{в}}} \cdot [A_{\text{п}} + 0.5 \cdot A_c \cdot \\ & \cdot (1 + m^{-1}) + m^{-1} \cdot A_{\text{в}}] \cdot B_o \} \end{aligned} \quad (7)$$

Таким образом, уравнение (7) позволяет вычислять изменение температуры воздуха в обслуживаемой зоне помещения за единичный момент времени с учетом способа организации воздухообмена (коэффициент  $m_t$ ), и последовательно определять значения температуры воздуха за интересующий период времени.

В интервал, когда система вентиляции не работает, а температура воздуха выравнивается по высоте помещения  $m_t = 1$  уравнение (6) принимает вид известной зависимости, соответствующей этому условию [1].

Кроме этого, последовательное (пошаговое) определение температуры воздуха дает возможность учитывать не только гармонически изменяющиеся теплоступления (в основном трансмиссионные потоки через ограждения), но и прерывистые (солнечная радиация через светопрозрачные проемы, технологическое оборудование).

Из условия теплового баланса на момент времени  $j$  и с учетом (1) можно записать выражение для температуры воздуха в рабочей зоне:

$$\begin{aligned} t_{\text{в.п.}j}^d = & \left\{ \frac{W_{j-1}^d \cdot \eta_{\text{к}}}{\alpha_{\text{к}}} + \bar{t}_r \cdot A_o - t_{\text{п}[j-(j-1)]} \cdot (1 - m^{-1}) \cdot (A_{\text{в}} + 0.5 \cdot A_c) + \frac{W_{\text{max}}^d}{Y_o} \cdot \Omega_j \right\}: \\ & : \{ A_{\text{п}} + m^{-1} \cdot A_{\text{в}} + 0.5 \cdot (1 + m^{-1}) \cdot A_c \}, \end{aligned} \quad (8)$$

где  $W_{j-1}^d$  и  $W_{\text{max}}^d$  – прерывистые теплоступления соответственно в час, предшествующий расчетному и максимальные в периоде, Вт;  $\bar{t}_r$  – средняя температура всех поверхностей, °С;  $Y_o$  – коэффициент теплоусвоения, усредненный по всем поверхностям, Вт/м<sup>2</sup> · °С;  $\Omega_j$  – коэффициент, учитывающий изменение температуры воздуха под влиянием периодических тепловыделений на  $j$ -й момент времени.

Соответственно, интервальное изменение температуры:

$$\begin{aligned} \Delta t_{\text{в.п.}[j-(j-1)]}^d = & \left\{ \frac{W_{j-(j-1)}^d \cdot \eta_{\text{к}}}{\alpha_{\text{к}}} - \Delta t_{\text{п}[j-(j-1)]} \cdot (1 - m^{-1}) \cdot (A_{\text{в}} + 0.5 \cdot A_c) + \right. \\ & \left. + \frac{W_{\text{max}}^d}{Y_o} \cdot \Omega_{j-(j-1)} \right\} : \{ A_{\text{п}} + m^{-1} \cdot A_{\text{в}} + 0.5 \cdot (1 + m^{-1}) \cdot A_c \} \end{aligned} \quad (9)$$

При наличии в помещении нескольких источников прерывистых теплопо-

ступления с различной интенсивностью и периодом работы вклад каждого источника в изменение температуры определяется отдельно по (9) и результирующее значение  $\Delta t_{в.п}[j-(j-1)]^d$  определится по методу суперпозиций.

Надо отметить, что точность метода зависит не только от обоснованности исходно информации и соответствующих коэффициентов, но от выбранного интервала времени  $j$ . Чем меньше этот интервал, тем выше точность в определении температуры. При естественном для гармонических колебаний суточном периоде, даже интервал в один час не исключает накопление ошибок, приводящих в конечном итоге к грубым результатам. Поэтому рекомендуется снижать расчетный интервал до минимально возможного уровня. При этом, естественно, увеличивается количество вычислительных операций. Но быстродействие современных ЭВМ достаточно высоко, что позволяет реализовать даже громоздкие алгоритмы в приемлемые сроки. Получаемые при этом результаты могут быть полезными для анализа условий формирования теплового режима помещений и разработки решений по его оптимизации.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Шкловер, А.М.** Теплопередача при периодических тепловых воздействиях. – М.: Госэнергоиздат. – 1961. – 160 с.
2. **Богословский, В.Н.** Тепловой режим здания. – М.: Стройиздат. – 1979. – 242 с.
3. **Успенская, Л.Б.** Математическая статистика в вентиляционной технике. – М.: Стройиздат. – 1980. – 108 с.
4. **Кузьмин, С.И., Кутняков, Д.В.** Расчёт внешних теплоступлений в помещение при динамическом режиме // Сборник трудов «Современные технологии и научно-технический прогресс», АГТА. – 2001. – С.-95-99.
5. **Успенская, Л.Б.** Закономерности распределения параметров воздуха в вентилируемых помещениях // Сборник научных трудов // ВНИИГС. – вып.30. – 1973. – С. 21-34.