

Ежи Пиотровски
Войцех Денишевски
Свентокшиской Политехники, г. Кельце, Польша

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ПРОЦЕССОВ ЕСТЕСТВЕННОГО ВОЗДУХООБМЕНА В СОВРЕМЕННЫХ ЖИЛЫХ ЗДАНИЯХ

1. Введение

Представлена концепция математического описания состояний движения воздуха в помещении здания возникших вследствие динамических воздействий наружной окружающей среды через ограждение определенной пропускаемости. Конкретные решения отнесены для случая переменных по времени разниц температуры воздуха окружения здания и внутреннего воздуха в его помещении, а также динамического воздействия ветра на ограждающую стену. Работа представляет отображение общих решений проблем математического моделирования процессов воздухопроницаемости в пространствах зданий представленных авторам в работах [1, 2].

2. Общее описание и предпосылки анализа

Решения в работе относятся к зданию со схемой представленной на рис. 1 и размерами $D_i (i=1, 2, 3)$ ребра тела параллельными к единичным векторам i_i системы отнесения. Пространство интерьера здания ограничено вертикальными и горизонтальными ограждениями, которые обозначены символами $e = -i, +i (i=1, 2, 3)$ согласно их нормальных наружных параллельных к единичным векторам $-i_i, i_i (i=1, 2, 3)$. Ограждения имеют соответственно толщины $a_i^{(-)} = a_i^{(+)} = a_i$, причем вертикальные ограждения характеризуются однородной воздухопропускаемостью с сопротивлением R [1/с] воздухопередаче. Зато горизонтальные ограждения плиты пола и перекрытия характеризует полная плотность.

Динамическими переменными описывающими воздух в состояниях движения в пространстве помещения, являются векторные поля $u(\xi, t) = \tilde{u}$ скорости движения воздуха, а также скалярные поля $\Delta p(\xi, t) = \Delta \tilde{p}$ приростов давлений воздуха в помещении.

Динамические переменные описаны приближенным методом при предположении разделения пространства интерьера здания на зоны в виде горизонтальных слоев $n_3 = 1, \dots, N_3$, с толщами d_3 и остальными размерами $d_i = D_i - 2a_i$ ($i = 1, 2, 3$). Образованные вследствие зонального разделения интервалы вариантности координат $\xi_3[(n_3 - 1)d_3, n_3 d_3]$ определяют пространственные функции

$$\begin{aligned} (n_3) \Omega_3(\xi_3) = & H[\xi_3 - a_3 - (n_3 - 1)d_3] - \\ & - H[\xi_3 - a_3 - n_3 d_3] n_3 = 1, \dots, N_3, \end{aligned} \quad (1)$$

определенные с помощью функции Хэвисаида.

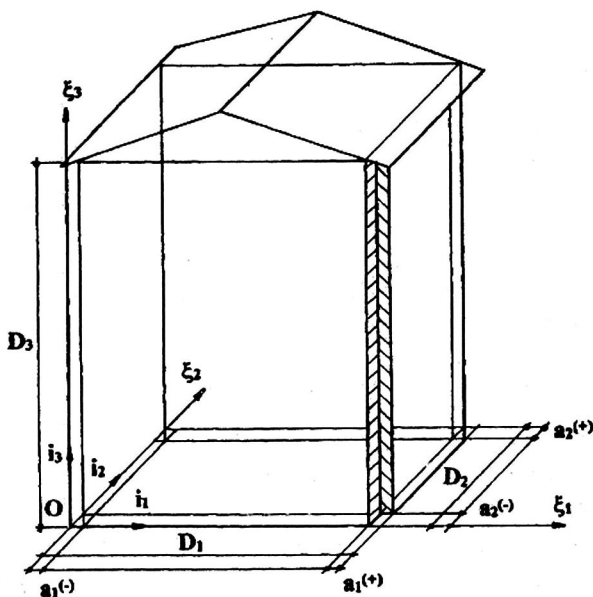


Рис.1. Схема здания с интерьером в виде отдельного помещения

Поля скорости $\tilde{u}$ воздуха определены приближенным методом, с произвольностью к коэффициентам $(n_3) v_j(t) = (n_3) \tilde{v}_j$, $(n_3) v_{jj}(t) = (n_3) \tilde{v}_{jj} \times$

$\times (j = 1, 2)$ линейных распределений ${}_{(n_3)}\tilde{u}$ в слоях $n_3 = 1, \dots, N_3$, с помощью уравнения

$$\tilde{u} = \sum_{n_3=1}^{N_3} {}_{(n_3)}\Omega_3(\xi_3) \times \left[\sum_{j=1}^2 ({}_{(n_3)}\hat{v}_j + {}_{(n_3)}\hat{v}_{jj}\xi_j) i_j + [{}_{(n_3)}\hat{v}_3 + {}_{(n_3)}\hat{v}_{33}(\xi_3 - {}_{(n_3)}c_3)] i_3 \right], \quad (2)$$

в которых символы ${}_{(n_3)}c_3 = a_3 + d_3(n_3 - \frac{1}{2})$ определяют положения плоскостей средних слоев n_3 относительно плоскости $\xi_3 = 0$. Коэффициенты ${}_{(n_3)}\hat{v}_{ii}$ удовлетворяют уравнения

$$\sum_{j=1}^3 {}_{(n_3)}\hat{v}_{ii} = 0, \quad (3)$$

вытекающие из условий непрерывности $\text{div}_{(n_3)}\tilde{u} = 0$ движения слоев n_3 . Величины коэффициентов

$${}_{(n_3)}\hat{v}_3 = d_3 \left[-\frac{1}{2} {}_{(n_3)}\hat{v}_{33} + \sum_{n_3=1}^{n_3} {}_{(n_3)}\hat{v}_{33} \right] \quad (4)$$

навязывают условия непрерывности слагаемых нормальных скорости на совместных плоскостях соседних слоев. Зато уравнения

$$\sum_{n_3=1}^{N_3} {}_{(n_3)}\hat{v}_{33} = 0 \quad (5)$$

навязывают исчезновение слагаемых нормальных $\tilde{u} \cdot i_3$ на внутренних поверхностях горизонтальных ограждений ограждающей конструкции здания.

Движение инфильтрирующего воздуха сквозь вертикальные ограждения $e = -i, +i$ ($i = 1, 2$) ограждающей конструкции описывают векторы скорости

$$\tilde{u}^{(e)} = \sum_{n_3=1}^{N_3} {}_{(n_3)}\Omega(\xi_3) {}_{(n_3)}\hat{v}_i^{(e)} i_i = \sum_{n_3=1}^{N_3} {}_{(n_3)}\Omega(\xi_3) \left[{}_{(n_3)}\hat{v}_i - \frac{1}{2} (-1)^e d_{i(n_3)} \hat{v}_{ii} \right] i_i \quad (6)$$

со слагаемыми равными слагаемым $\tilde{u}_i$ скорости движения воздуха в помещении, на внутренних стенах вертикальных ограждений $e = -i, +i$ ($i = 1, 2$) ограждающей конструкции.

Воздействия окружающей среды здания механического происхождения воздействующие соответственно на наружные стены $\xi_i = 0$, $\xi_i = D_i$ ($i = 1, 2$) ограждений $e = -i, +i$ являются поверхностными силами

$\tilde{p}_i^{(-)} = \tilde{p}_i^{(-)} i_i$, $\tilde{p}_i^{(+)} = \tilde{p}_i^{(+)} i_i$ со слагаемыми выраженными в виде:

$$\tilde{p}_i^{(-)} = \sum_{n_3=1}^{N_3} (n_3) \Omega_{3(n_3)} \hat{p}_i^{(-)}, \quad \tilde{p}_i^{(+)} = \sum_{n_3=1}^{N_3} (n_3) \Omega_{3(n_3)} \hat{p}_i^{(+)} \quad (7)$$

при значениях символов

$$(n_3) \hat{p}_i^{(-)} = \frac{1}{d_3} \int_{a_3+(n_3-1)d_3}^{a_3+n_3d_3} \tilde{p}_i^{(-)} d\xi_3, \quad (n_3) \hat{p}_i^{(+)} = \frac{1}{d_3} \int_{a_3+(n_3-1)d_3}^{a_3+n_3d_3} \tilde{p}_i^{(+)} d\xi_3.$$

Вызывают они состояния движения воздуха и образование в его пространствах вертикальных ограждений и интерьера помещения полей напряжений $\tilde{p}_i^{(e)} = \tilde{p}_i^{(e)} i_i$, $e = -i, +i$ ($i = 1, 2$), $i = 1, 2$ а также $\tilde{p}_i = \tilde{p}_i i_i$, при $i = 1, 2, 3$. Их слагаемые на плоскостях контакта слоев, соответственно пространства ограждений и интерьера, выражены в виде формул:

$$\begin{aligned} \tilde{p}_i^{(-i)} &= \sum_{n_3=1}^{N_3} (n_3) \Omega_3 \left[(n_3) \hat{p}_i^{(-)} + \xi_i (n_3) \hat{p}_{ii}^{(-i)} \right], \\ \tilde{p}_i^{(+i)} &= \sum_{n_3=1}^{N_3} (n_3) \Omega_3 \left[(n_3) \hat{p}_i^{(+)} + (\xi_i - D_i) (n_3) \hat{p}_{ii}^{(+i)} \right], \\ \tilde{p}_i &= \sum_{n_3=1}^{N_3} (n_3) \Omega_3 \left[(n_3) \hat{p}_i + (\xi_i - \frac{1}{2} D_i) (n_3) \hat{p}_{ii} \right] \end{aligned} \quad (8)$$

при значениях коэффициентов

$$\begin{aligned} (n_3) \hat{p}_i &= \frac{1}{2} \left((n_3) \hat{p}_i^{(-)} + a_i (n_3) \hat{p}_{ii}^{(-i)} + (n_3) \hat{p}_i^{(+)} - a_i (n_3) \hat{p}_{ii}^{(+i)} \right), \\ (n_3) \hat{p}_{ii} &= \frac{1}{D_i - 2a_i} \left((n_3) \hat{p}_i^{(+)} - a_i (n_3) \hat{p}_{ii}^{(+i)} - (n_3) \hat{p}_i^{(-)} - a_i (n_3) \hat{p}_{ii}^{(-i)} \right), \end{aligned} \quad (9)$$

вытекающих из условий непрерывности воздействий на внутренних стенах вертикальных ограждений $e = -i, +i$ ($i = 1, 2$) ограждающей конструкции. Поля напряжений

$$\begin{aligned}\tilde{p}_3 &= \sum_{n_3=1}^{N_3} (n_3) \Omega_3(n_3) \tilde{p}_3 i_i = \\ &= \sum_{n_3=1}^{N_3} (n_3) \Omega_3 \left[(n_3) \hat{p}_3 + (n_3) \hat{p}_{33} \left[\xi_3 - \left(n_3 - \frac{1}{2} \right) d_3 \right] \right] i_i\end{aligned}\quad (10)$$

на плоскостях $\xi_3 = n_3 d_3$, соседних слоев в пространстве интерьера здания, удовлетворяют условиям непрерывности воздействий при слагаемых $(n_3) \hat{p}_3$ выраженных с помощью формулы

$$(n_3) \hat{p}_3 = \hat{p}_3 + (n_3) I_3 \{ (n_3) \hat{p}_{33} \}, \quad (11)$$

при значении символа

$$(n_3) I_3 \{ (n_3) (\cdot) \} = d_3 \left[-\frac{1}{2} \sum_{n_3=1}^{N_3} (n_3) (\cdot) - \frac{1}{2} (n_3) (\cdot) + \sum_{n_3=1}^{n_3} (n_3) (\cdot) \right]. \quad (12)$$

Коэффициенты $(n_3) \hat{p}_{ii}^{(-i)}$, $(n_3) \hat{p}_{ii}^{(+i)}$, $(n_3) \hat{p}_i$, $(n_3) \hat{p}_{ii}$ распределений напряжений воздуха соответственно в пространствах вертикальных ограждений $e = -i, +i$ ($i = 1, 2$), а также в пространстве интерьера здания связаны с коэффициентами $(n_3) \hat{v}_i$, $(n_3) \hat{v}_{ii}$ распределений скорости движения воздуха физическими соединениями, которые выведены в [1]. Принимают они вид уравнений:

— по отношению к пространствам вертикальных ограждений при $i = 1, 2$

$$\begin{aligned}(n_3) \hat{p}_{ii}^{(-i)} &= \frac{7}{5} \rho \Re \{ (n_3) \hat{v}_i^{(-i)} \} = \frac{7}{5} \rho \Re \{ (n_3) \hat{v}_i - \frac{1}{2} d_i (n_3) \hat{v}_{ii} \}, \\ (n_3) \hat{p}_{ii}^{(+i)} &= \frac{7}{5} \rho \Re \{ (n_3) \hat{v}_i^{(+i)} \} = \frac{7}{5} \rho \Re \{ (n_3) \hat{v}_i + \frac{1}{2} d_i (n_3) \hat{v}_{ii} \},\end{aligned}\quad (13)$$

где

$$\Re_i \{ \cdot \} = \frac{d}{dt} (\cdot) + \frac{5}{7} R(\cdot);$$

— в пространстве интерьера здания при $i = 1, 2, 3$

$$\begin{aligned} (n_3) \hat{p}_i &= -(n_3) \hat{p} + 2\eta_{(n_3)} \hat{v}_{ii} + \rho \left[\frac{d}{dt} ((n_3) \hat{v}_{ii}) + ((n_3) \hat{v}_{ii})^2 \right] d_i^2 / 12, \\ (n_3) \hat{p}_{ii} &= \rho \left[-\delta_{i3} (n_3) \hat{f}_3 + \frac{d}{dt} ((n_3) \hat{v}_i) + (n_3) \hat{v}_i (n_3) \hat{v}_{ii} \right]. \end{aligned} \quad (14)$$

3. Уравнение движения воздуха в помещении здания

Подстановка в уравнение (8) и (10) соответственно выражений на коэффициенты $(n_3) \hat{p}_{ii}^{(-i)}$, $(n_3) \hat{p}_{ii}^{(+i)}$, $(n_3) \hat{p}_i$, $(n_3) \hat{p}_{ii}$, дает уравнения движения воздуха следующих видов:

$$\begin{aligned} & 2\mu_{(n_3)} \hat{v}_{ii} + \left[\frac{d}{dt} ((n_3) \hat{v}_{ii}) + ((n_3) \hat{v}_{ii})^2 \right] d_i^2 / 12 + \\ & + a_i d_i \left[\frac{7}{10} \frac{d}{dt} ((n_3) \hat{v}_{ii}) + \frac{1}{2} R_{(n_3)} \hat{v}_{ii} \right] = \frac{1}{\rho} \left[(n_3) \hat{p} + \frac{1}{2} ((n_3) \hat{p}_i^{(-)} + (n_3) \hat{p}_i^{(+)} \right], \\ (D_i + \frac{4}{5} a_i) \frac{d}{dt} ((n_3) \hat{v}_i) + \left[(n_3) \hat{v}_{ii} d_i + 2a_i R \right] (n_3) \hat{v}_i &= \frac{1}{\rho} ((n_3) \hat{p}_i^{(+)} - (n_3) \hat{p}_i^{(-)}), \quad (15) \\ & 2\mu_{(n_3)} \hat{v}_{33} + \left[\frac{d}{dt} ((n_3) \hat{v}_{33}) + ((n_3) \hat{v}_{33})^2 \right] d_3^2 / 12 - \\ & - (n_3) I_3 \left\{ \frac{d}{dt} ((n_3) \hat{v}_3) + (n_3) \hat{v}_3 (n_3) \hat{v}_{33} \right\} = \frac{1}{\rho} ((n_3) \hat{p} + \hat{p}_3) - (n_3) I_3 \{ (n_3) \hat{f}_3 \}. \end{aligned}$$

Являются они совместно с исходными

$$\begin{aligned} & \left| (n_3) \hat{v}_{ii} \right|_{t=t_0} = (n_3) \dot{v}_{ii} \quad (i = 1, 2, 3), \\ & \left| (n_3) \hat{v}_i \right|_{t=t_0} = (n_3) \dot{v}_i \quad (i = 1, 2) \end{aligned}$$

сплошности (3) и краевыми условиями (5) комплектом уравнений, описывающих переменные динамические скорости $(n_3) \hat{v}_i$ ($i = 1, 2$), $(n_3) \hat{v}_i$ ($i = 1, 2, 3$), а также давлений $(n_3) \hat{p}$, $\hat{p}_3$, воздуха в слоях $n_3 = 1, \dots, N_3$ в состояниях движения в пространстве помещения здания.

4. Движение воздуха в помещении вызванное изменениями температуры

Определены состояния движения воздуха в помещении вызванные изменениями температуры $\hat{T}_{(e)}$ воздуха окружающей среды и температуры внутреннего воздуха $\hat{T}_{(i)}$ здания размерами $D_i = D$, $a_i = a$ ($i = 1, 2$). Разным температурам воздуха окружающей среды и помещения соответствуют разные его удельные плотности, соответственно составляющие $\rho_{(e)}$, $\rho_{(i)}$.

Воздействия окружающей среды на здания выражены в виде гравитационных напоров воздуха

$${}_{(n_3)}\hat{p}_i^{(-)} = {}_{(n_3)}\hat{p}_i^{(+)} = -p_{od} - \gamma_{ex} \frac{1}{2}(D_3 - 2a_3) \left[1 - \frac{2}{N_3} \left(n_3 - \frac{1}{2} \right) \right] \quad (16)$$

на стены слоев вертикальных ограждений, определяя их с произвольностью к давлениям отнесения p_{od} , зато давления воздуха в помещении

$${}_{(n_3)}\hat{p} = \Delta[{}_{(n_3)}\hat{p}] + p_o + \gamma_{in} \frac{1}{2}(D_3 - 2a_3) \left[1 - \frac{2}{N_3} \left(n_3 - \frac{1}{2} \right) \right] \quad (17)$$

выражены разницей $\Delta[{}_{(n_3)}\hat{p}]$ давлений вызванных разными переменными по времени температурами $\hat{T}_{(e)}$, $\hat{T}_{(i)}$, принимая при этом $\hat{p}_3 = -p_o + \Delta p_3$.

Учитывая в уравнениях (14), описывающих состояния движения внутреннего воздуха, принятые предпосылки и определения (16—17), а также подставляя вытекающее из их определения значения символов

$${}_{(n_3)}f_3 = -g, \quad {}_{(n_3)}I\{1\} = -\frac{1}{2}(D_3 - 2a_3) \left[1 - \frac{2}{N_3} \left(n_3 - \frac{1}{2} \right) \right]$$

получена после преобразований и при предположении исходных условий

$$\left| {}_{(n_3)}\hat{v}_i \right|_{t=t_0} = 0 \quad (i = 1, 2)$$

система уравнений следующего вида:

$${}_{(n_3)}\hat{v}_i = 0,$$

$${}_{(n_3)}\hat{v}_{ii} = -\frac{1}{2}{}_{(n_3)}\hat{v}_{33},$$

$$\begin{aligned}
& 3\mu_{(n_3)}\hat{v}_{33} + \frac{d}{dt}((n_3)\hat{v}_{33})(d_3^2 + \frac{1}{2}d^2)/12 + ((n_3)\hat{v}_{33})^2(d_3^2 - \frac{1}{4}d^2)/12 + \\
& + ad\left[\frac{7}{20}\frac{d}{dt}((n_3)\hat{v}_{33}) + \frac{1}{4}R_{(n_3)}\hat{v}_{33}\right] = \\
& = \frac{1}{\rho}\left[(n_3)\hat{p}_3 - \hat{p}_T \frac{(D_3 - 2a_3)}{2} \left[\frac{2}{N_3}(n_3 - \frac{1}{2}) - 1\right]\right], \quad (18)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\Delta\hat{p}_3 &= \frac{\rho}{N_3} \left[\sum_{n_3=1}^{N_3} ((n_3)\hat{v}_{33})^2(d_3^2 - \frac{1}{4}d^2)/12 - \right. \\
& \left. - \sum_{n_3=1}^{N_3} (n_3)I_3 \left\{ \frac{d}{dt}((n_3)\hat{v}_3) + (n_3)\hat{v}_3(n_3)\hat{v}_{33} \right\} \right], \\
\Delta_{(n_3)}\hat{p} &= -\frac{1}{2}\left[\Delta\hat{p}_3 + \hat{p}_T \frac{(D_3 - 2a_3)}{2} \left[\frac{2}{N_3}(n_3 - \frac{1}{2}) - 1\right]\right] + \\
& + \frac{1}{2}\rho\left[\eta_{(n_3)}\hat{v}_{33} + \frac{d}{dt}((n_3)\hat{v}_{33})(d_3^2 - \frac{1}{2}d^2)/12\right] + \\
& + \frac{1}{2}\rho\left[(n_3)\hat{v}_{33})^2(d_3^2 + \frac{1}{4}d^2)/12 - \frac{1}{4}ad\left[\frac{7}{5}\frac{d}{dt}((n_3)\hat{v}_{33})R_{(n_3)}\hat{v}_{33}\right]\right] + \\
& + \frac{1}{2}\rho(n_3)I_3\left\{\frac{d}{dt}((n_3)\hat{v}_{33}) + (n_3)\hat{v}_3(n_3)\hat{v}_{33}\right\}.
\end{aligned}$$

Появляющийся в уравнениях (18) символ $\hat{p}_T$ [Па/м] имеет значения

$$\hat{p}_T = \gamma_{ex} - \gamma_{in} = \gamma_o T_o \left(\frac{1}{T_{(e)}} - \frac{1}{T_{(i)}} \right). \quad (19)$$

Решение системы уравнений (18) представлено по отношению к самому простому двухзональному разделению пространства здания слоями $n_3 = 1, 2$ с толщинами $d_3 = \frac{1}{2}(D_3 - 2a_3)$. Учитывая принимающие в этом случае следующие значения операторов (12):

$$({}_1)I_3\{\cdot\} = -\frac{1}{2}d_{3(2)}(\cdot), \quad ({}_2)I_3\{\cdot\} = -\frac{1}{2}d_{3(1)}(\cdot),$$

а также вытекающие из краевых условий (5) и из условий сплошности (4) зависимости коэффициентов

$$({}_1)\hat{v}_{33} = -({}_2)\hat{v}_{33} = \hat{v}_{33}, \quad ({}_1)\hat{v}_3 = ({}_2)\hat{v}_3 = \frac{1}{2}d_3\hat{v}_{33} \quad (20)$$

получены на основе (18)₄ выражения на величины

$$\Delta\hat{p}_3 = -\frac{1}{6}\rho(d_3^2 + \frac{1}{8}d^2)(\hat{v}_{33})^2. \quad (21)$$

Оттуда после подстановки формул (20, 21) в уравнения (18)₃, (18)₅ получены выражения для приростов давлений воздуха в помещении

$$\begin{aligned} \Delta({}_{n_3})\hat{p} = & -\frac{1}{4}\frac{\hat{p}}{T}d_3(-1)^{n_3} + \\ & + \frac{1}{2\rho}\left[(\mu - \frac{1}{4}adR)\hat{v}_{33} + \frac{1}{4}\left(\frac{4}{3}d_3^2 - \frac{1}{6}d^2 - \frac{7}{5}ad\right)\frac{d}{dt}(\hat{v}_{33})\right](-1)^{n_3} + \\ & + \frac{1}{48\rho}d^2({}_{n_3})\hat{v}_{33}^2, \end{aligned} \quad (22)$$

а также дифференциальное уравнение для коэффициентов $\hat{v}_{33}$ распределения скорости движения воздуха

$$\left(\frac{1}{3}d_3^2 + \frac{1}{24}d^2 + \frac{7}{20}ad\right)\frac{d}{dt}(\hat{v}_{33}) + (3\mu + \frac{1}{4}adR)\hat{v}_{33} = \frac{1}{2\rho}d_3\frac{\hat{p}}{T}. \quad (23)$$

Подстановка в решение

$$\hat{v}_{33} = \frac{d_3}{2\rho(3\mu + \frac{1}{4}adR)} \left[\frac{0}{T} \exp(-\kappa t) + \kappa \int_0^t \exp[\kappa(t-t')] \frac{\hat{p}(t')}{T} dt' \right] \quad (24)$$

этого уравнения при исходном условии $\frac{0}{T} p = \rho_0 g T_0 \left(\frac{1}{T_e^0} - \frac{1}{T_i^0} \right)$ полученного после введения обозначения

$$\kappa = \frac{3\mu + \frac{1}{4}adR}{\frac{1}{3}(d_3)^2 + \frac{1}{24}(d)^2 + \frac{7}{20}ad} [1/c], \quad (25)$$

следующего выражения для воздействий

$$\hat{p}_T = g\rho_0 T_0 \left(\frac{1}{T_e} - \frac{1}{T_i} \right) \left[\frac{t}{t_1} [1 - H(t - t_1)] + H(t - t_1) \right],$$

вызванных изменяющимися во времени $t[0, t_1]$ температурами от величин T_e^0, T_i^0 до величины T_e, T_i дает формулу для коэффициентов скорости в виде:

$$\begin{aligned} \hat{v}_{33} = & \frac{d_3}{2\rho(3\mu + \frac{1}{4}adR)} \frac{p}{T} \exp(-\kappa t) + \\ & + \frac{d_3}{2\rho(3\mu + \frac{1}{4}adR)} \frac{p}{T} \left[\frac{1}{Kt_1} [\exp(-\kappa t) + Kt - 1][1 - H(t - t_1)] + \right. \\ & \left. + \frac{1}{K} \left[K + \frac{1}{t_1} \exp(-\kappa t)(1 - \exp \kappa t_1) \right] H(t - t_1) \right], \end{aligned}$$

которая в случае исчезновения исходных величин $\frac{p}{T} = 0$, а также моментального возникновения (при $t_1 = 0$) разницы температур, принимает упрощенный вид:

$$\hat{v}_{33} = p \frac{d_3}{T 2\rho(3\mu + \frac{1}{4}adR)} [1 - \exp(-\kappa t)]. \quad (26)$$

Подстановка в (2) соответственно формул (18)₍₁₋₂₎, (20) дает выражения определенные коэффициентами $\hat{v}_{33}$ следующего вида:

$$\begin{aligned} \tilde{u}(\xi) = & -\frac{1}{2} \hat{v}_{33} [(\xi_1 - D/2)i_1 + (\xi_2 - D/2)i_2][1 - 2H(\xi_3 - a_3)] + \\ & + \{[1 - H(\xi_3 - a_3)](\xi_3 - a_3) + H(\xi_3 - a_3)(2d_3 - \xi_3 + a_3)\} \hat{v}_{33} i_3. \quad (27) \end{aligned}$$

Численный пример

Принимая следующие численные данные: $\rho_0 = 1.293 \text{ кг/м}^3$ при 0°C , $g = 9.81 \text{ м/с}^2$, $T_0 = 273 \text{ K}$, $T_e = 273 \text{ K} - 10^\circ \text{C} = 263 \text{ K}$, $T_i = 273 \text{ K} + 20^\circ \text{C} = 293 \text{ K}$, $\gamma_0 = 12.68 \text{ Па/м}$, $D = 20 \text{ м}$, $D_3 = 6.5 \text{ м}$, $a = 0.2 \text{ м}$, $a_3 = 0.25 \text{ м}$, $d = D - 2a = 19.6 \text{ м}$, $d_3 = 6.5 - 0.5/2 = 3 \text{ м}$, $R = 14.3 \text{ 1/с}$,

$\rho = 1.204 \text{ кг/м}^3$, $\mu = 0.149 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$ получено: $\frac{0}{T} = 1.35 \text{ Па/м}$, $K = 0.687 \text{ 1/с}$, откуда на основе (26), (2) экстремальные значения слагаемых скорости движения воздуха в пространстве интерьера здания составляют:

$$\begin{aligned} |\tilde{u} \cdot i_1|_{\xi_1=0.2\text{ м}} &= -|\tilde{u} \cdot i_1|_{\xi_1=19.8\text{ м}} = |\tilde{u} \cdot i_2|_{\xi_2=0.2\text{ м}} = -|\tilde{u} \cdot i_2|_{\xi_2=19.8\text{ м}} = 4.9 \hat{v}_{33} = \\ &= 0.59[1 - \exp(-0.687t)] \text{ [м/с]} \end{aligned}$$

в диапазоне $\xi_3 (0.25 \text{ м}, 3.25 \text{ м})$:

$$\begin{aligned} |\tilde{u} \cdot i_1|_{\xi_1=0.2\text{ м}} &= -|\tilde{u} \cdot i_1|_{\xi_1=19.8\text{ м}} = |\tilde{u} \cdot i_2|_{\xi_2=0.2\text{ м}} = -|\tilde{u} \cdot i_2|_{\xi_2=19.8\text{ м}} = -4.9 \hat{v}_{33} = \\ &= -0.59[1 - \exp(-0.687t)] \text{ [м/с]} \end{aligned}$$

в диапазоне $\xi_3 (3.25 \text{ м}, 6.25 \text{ м})$:

$$\max |\tilde{u} \cdot i_3| = |\tilde{u} \cdot i_3|_{\xi_1=3.25\text{ м}} = 3 \hat{v}_{33} = 0.36[1 - \exp(-0.687t)] \text{ [м/с]}.$$

5. Движение воздуха в помещениях вызванное воздействием ветра

Учитывая воздействия наружной окружающей среды ${}_{(n_1)}\hat{p}_w^{(-)} = {}_{\hat{p}_w^{(-)}} = \hat{C}_1^{(-)} \hat{p}_w$, ${}_{(n_1)}\hat{p}_w^{(+)} = \hat{p}_w^{(+)} = \hat{C}_1^{(+)} \hat{p}_w$, ${}_{(n_1)}\hat{p}_w^{(-)} = \hat{p}_w^{(+)} = \hat{C}_2 \hat{p}_w$, вызванные действием ветра, в направлении перпендикулярном к наветренной стороне ограждения $e = -1$, в виде определенном динамическими коэффициентами (определенными напр. в [1]) части свободного динамического давления $\hat{p}_w = \frac{1}{2} \rho \hat{v}^2$ воздуха, получены на основе уравнений (14) при размерах $D_i = D$, $a_i = a$ выражения на коэффициенты распределений скорости движения воздуха в помещении

$$\tilde{u} = \hat{v}_1 i_1 + \sum_{i=1}^2 \hat{v}_{ii} (\xi_i - D/2) i_i \quad (28)$$

следующих видов:

$$_{(n_3)}\hat{v}_2 = {}_{(n_3)}\hat{v}_3 = 0, \hat{v}_{11} = -\hat{v}_{22} = 0, {}_{(n_3)}\hat{v}_{33} = 0 \quad (29)$$

$$\begin{aligned} \hat{v}_{ii} = & v_{ii}^0 \exp[\kappa'(t_0 - t)] + \\ & + \frac{(-1)^i}{\rho(\frac{d^2}{6} + \frac{7}{5}ad)} \cdot \int_{t_0}^t \exp[\kappa(t' - t)] \hat{p}_w [C_2 - \frac{1}{2}(C_1^{(-)} + C_1^{(+)})] dt' \end{aligned} \quad (30)$$

при $\kappa' = \frac{2\mu + \frac{1}{2}adR}{\frac{7}{10}ad + \frac{1}{12}(d)^2}$ [1/c] и исходном условии $|\hat{v}_{ii}|_{t=t_0} = v_{ii}^0 = (-1)^i v_1^0$,

а также

$$\hat{v}_1 = v_1^0 \exp\left[\int_{t_0}^t {}_{(n_3)}\beta_i^* dt'\right] + \frac{1}{\rho(d + \frac{6}{5}a)} \cdot \int_{t_0}^t \exp\left[\int_t^{t'} \beta^* dt''\right] \hat{p}_w (C_1^{(+)} + C_1^{(-)}) dt' \quad (31)$$

при $\beta = \frac{d}{d + 14/5a} \left[2 \frac{a}{d} R + {}_{(n_3)}\hat{v}_{11} \right]$ и исходном условии $|\hat{v}_1|_{t=t_0} = v_1^0$.

Использованная литература

1. Piotrowski J. Z., Dzieniszewski W., Faryniak L. (1999). Air Infiltration through Elements of Building Partition. Grant Project 7 TO7 E01609. Kielce-Warszawa.

2. Piotrowski J. Z. (2000). Generalized Functional Form of Air Flow for Microclimate Calculations. KILiW PAN. Wrocław – Warszawa, Vol. 3, pp. 139—146.