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 $\boldsymbol{i}_i$ 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 $-\boldsymbol{i}_i, \boldsymbol{i}_i (i = 1, 2, 3)$. Ограждения имеют соответственно толщины $a_i^{(-)} = a_i^{(+)} = a_i$, причем вертикальные ограждения характеризуются однородной воздухопропускаемостью с сопротивлением $\boldsymbol{R}$ [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 $\boldsymbol{u}(\xi,t) = \tilde{\boldsymbol{u}}$ 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 предпосылке разделения пространства интерьера здания на зоны в виде горизонтальных слоев $n_3 = 1, \ldots, N_3$, с толщинами 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

$$
\begin{aligned}
{}_{(n_i)}\Omega_3(\xi_3) = H[\xi_3 - a_3 - (n_3-1)d_3] - \\
- H[\xi_3 - a_3 - n_3 d_3]n_3 = 1, \ldots,\ N_3,
\end{aligned}
\tag{1}
$$

определенные с помощью функции Хэвисаида.

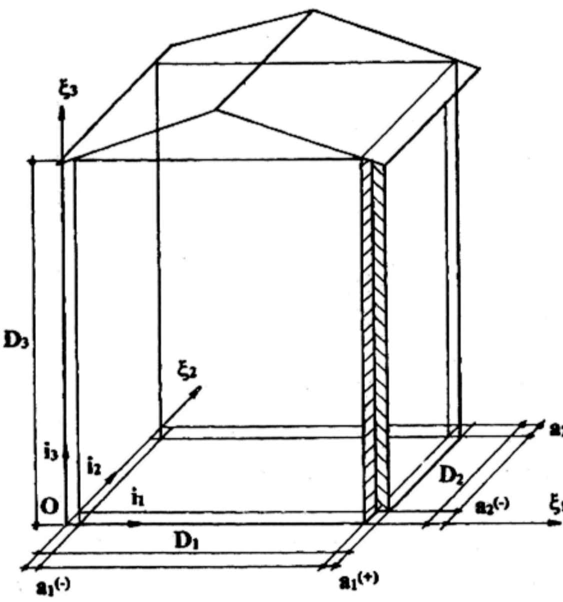

Рис.1. Схема здания с интерьером в виде отдельного помещения

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

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

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

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

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

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

$${}_{(n_3)}\hat{v}_3 = d_3\left[-\frac{1}{2}{}_{(n_3)}\hat{v}_{33} + \sum_{r_3=1}^{n_3} {}_{(r_3)}\hat{v}_{33}\right] \tag{4}$$

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

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

навязывают исчезновение слагаемых нормальных $\tilde{\boldsymbol{u}}.\boldsymbol{i}_3$ 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

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

со слагаемыми равными слагаемым $\tilde{\boldsymbol{u}}.\boldsymbol{i}_3$ 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 $\tilde{\boldsymbol{p}}_i^{(-)} = \tilde{p}_i^{(-)}\boldsymbol{i}_i$, $\tilde{\boldsymbol{p}}_i^{(+)} = \tilde{p}_i^{(+)}\boldsymbol{i}_i$ со слагаемыми выраженными в виде:

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

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 $\tilde{\boldsymbol{p}}_i^{(e)} = \tilde{p}_i^{(e)}\boldsymbol{i}_i$, $e\ =\ -i,+i$ $(i=1,2)$, $i=1,2$ а также $\tilde{\boldsymbol{p}}_i = \tilde{p}_i\,\boldsymbol{i}_i$, при i = 1, 2, 3. Их слагаемые на плоскостях контакта слоев, соответственно пространства ограждений и интерьера, выражены в виде формул:

$$\tilde{p}_i^{(-i)} = \sum_{n_3=1}^{N_3} {}_{(n_3)}\Omega_3\left[{}_{(n_3)}\hat{p}_i^{(-)} + \xi_{i\,(n_3)}\hat{p}_{ii}^{(-i)}\right],$$

$$\tilde{p}_i^{(+i)} = \sum_{n_3=1}^{N_3} {}_{(n_3)}\Omega_3\left[{}_{(n_3)}\hat{p}_i^{(+)} + (\xi_i - D_i)_{(n_3)}\hat{p}_{ii}^{(+i)}\right], \tag{8}$$

$$\tilde{p}_i = \sum_{n_3=1}^{N_3} {}_{(n_3)}\Omega_3\left[{}_{(n_3)}\hat{p}_i + (\xi_i - \tfrac{1}{2}D_i)_{(n_3)}\hat{p}_{ii}\right]$$

при значениях коэффициентов

$${}_{(n_3)}\hat{p}_i = \frac{1}{2}\left({}_{(n_3)}\hat{p}_i^{(-)} + a_{i\,(n_3)}\hat{p}_{ii}^{(-i)} + {}_{(n_3)}\hat{p}_i^{(+)} - a_{i\,(n_3)}\hat{p}_{ii}^{(+i)}\right),$$
$$\tag{9}$$
$${}_{(n_3)}\hat{p}_{ii} = \frac{1}{D_i - 2a_i}\left({}_{(n_3)}\hat{p}_i^{(+)} - a_{i\,(n_3)}\hat{p}_{ii}^{(+i)} - {}_{(n_3)}\hat{p}_i^{(-)} - a_{i\,(n_3)}\hat{p}_{ii}^{(-i)}\right),$$

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

$$\tilde{\boldsymbol{p}}_3=\sum_{n_3=1}^{N_3} {}_{(n_3)}\Omega_{3(n_3)}\tilde{p}_3\boldsymbol{i}_i= \\ =\sum_{n_3=1}^{N_3} {}_{(n_3)}\Omega_3\Big[{}_{(n_3)}\hat{p}_3+{}_{(n_3)}\hat{p}_{33}[\xi_3-(n_3-\tfrac{1}{2})d_3]\Big]\boldsymbol{i}_3 \tag{10}$$

на плоскостях $\xi_3=n_3d_3$, соседних слоев в пространстве интерьера здания, удовлетворяют условиям непрерывности воздействий при слагаемых ${}_{(n_3)}\hat{p}_3$ выраженных с помощью формулы

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

при значении символа

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

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 $i=1,2$

$${}_{(n_3)}\hat{p}_{ii}^{(-i)}=\frac{7}{5}\rho\Re\{{}_{(n_3)}\hat{v}_i^{(-i)}\}=\frac{7}{5}\rho\Re\{{}_{(n_3)}\hat{v}_i-\frac{1}{2}d_{i(n_3)}\hat{v}_{ii}\}\ , \\ {}_{(n_3)}\hat{p}_{ii}^{(+i)}=\frac{7}{5}\rho\Re\{{}_{(n_3)}\hat{v}_i^{(+i)}\}=\frac{7}{5}\rho\Re\{{}_{(n_3)}\hat{v}_i+\frac{1}{2}d_{i(n_3)}\hat{v}_{ii}\}, \tag{13}$$

где

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

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

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

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:

$$
\begin{gathered}
2\mu_{(n_3)}\hat{v}_{ii} + \left[\frac{d}{dt}({}_{(n_3)}\hat{v}_{ii}) + ({}_{(n_3)}\hat{v}_{ii})^2\right] d_i^2/12 + \\
+ a_i d_i\left[\frac{7}{10}\frac{d}{dt}({}_{(n_3)}\hat{v}_{ii}) + \frac{1}{2}R_{(n_3)}\hat{v}_{ii}\right] = \frac{1}{\rho}\left[{}_{(n_3)}\hat{p} + \frac{1}{2}({}_{(n_3)}\hat{p}_i^{(-)} + {}_{(n_3)}\hat{p}_i^{(+)})\right], \\
(D_i + \frac{4}{5}a_i)\frac{d}{dt}({}_{(n_3)}\hat{v}_i) + \left[{}_{(n_3)}\hat{v}_{ii}d_i + 2a_i\mathrm{R}\right]_{(n_3)}\hat{v}_i = \frac{1}{\rho}({}_{(n_3)}\hat{p}_i^{(+)} - {}_{(n_3)}\hat{p}_i^{(-)}, \\
2\mu_{(n_3)}\hat{v}_{33} + \left[\frac{d}{dt}({}_{(n_3)}\hat{v}_{33}) + ({}_{(n_3)}\hat{v}_{33})^2\right] d_3^2/12 - \\
-{}_{(n_3)}I_3\{\frac{d}{dt}({}_{(n_3)}\hat{v}_3) + {}_{(n_3)}\hat{v}_{3\,(n_3)}\hat{v}_{33}\} = \frac{1}{\rho}({}_{(n_3)}\hat{p} + \hat{p}_3) - {}_{(n_3)}I_3\{{}_{(n_3)}\hat{f}_3\}.
\end{gathered}
\tag{15}
$$

Являются они совместно с исходными

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

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

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 $n_3 = 1, \ldots, N_3$ 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

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

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

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

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

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

получена после преобразований и при предположении исходных условий

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

система уравнений следующего вида:

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

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

$$3\mu_{(n_3)}\hat{v}_{33}+\frac{d}{dt}({}_{(n_3)}\hat{v}_{33})(d_3^2+\frac{1}{2}d^2)/12+({}_{(n_3)}\hat{v}_{33})^2(d_3^2-\frac{1}{4}d^2)/12+$$

$$+ad\left[\frac{7}{20}\frac{d}{dt}({}_{(n_3)}\hat{v}_{33})+\frac{1}{4}R_{(n_3)}\hat{v}_{33}\right]=$$

$$=\frac{1}{\rho}\left[{}_{(n_3)}\hat{p}_3-\underset{T}{\hat{p}}\frac{(D_3-2a_3)}{2}[\frac{2}{N_3}(n_3-\frac{1}{2})-1]\right], \tag{18}$$

$$\Delta\hat{p}_3=\frac{\rho}{N_3}\left[\sum_{n_3=1}^{N_3}({}_{(n_3)}\hat{v}_{33})^2(d_3^2-\frac{1}{4}d^2)/12-\right.$$

$$\left.-\sum_{n_3=1}^{N_3}{}_{(n_3)}I_3\{\frac{d}{dt}({}_{(n_3)}\hat{v}_3)+{}_{(n_3)}\hat{v}_{3\,(n_3)}\hat{v}_{33}\}\right],$$

$$\Delta_{(n_3)}\hat{p}=-\frac{1}{2}\left[\Delta\hat{p}_3+\underset{T}{\hat{p}}\frac{(D_3-2a_3)}{2}[\frac{2}{N_3}(n_3-\frac{1}{2})-1]\right]+$$

$$+\frac{1}{2}\rho\left[\eta_{(n_3)}\hat{v}_{33}+\frac{d}{dt}({}_{(n_3)}\hat{v}_{33})(d_3^2-\frac{1}{2}d^2)/12\right]+$$

$$+\frac{1}{2}\rho\left[({}_{(n_3)}\hat{v}_{33})^2(d_3^2+\frac{1}{4}d^2)/12-\frac{1}{4}ad\left[\frac{7}{5}\frac{d}{dt}({}_{(n_3)}\hat{v}_{33})R_{(n_3)}\hat{v}_{33}\right]\right]+$$

$$+\frac{1}{2}\rho_{(n_3)}I_3\{\frac{d}{dt}({}_{(n_3)}\hat{v}_{33})+{}_{(n_3)}\hat{v}_{3\,(n_3)}\hat{v}_{33}\}.$$

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

$$\underset{T}{\hat{p}}=\gamma_{ex}-\gamma_{in}=\gamma_o T_o(\frac{1}{T_{(e)}}-\frac{1}{T_{(i)}}). \tag{19}$$

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):

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

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

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

получены на основе $(18)_4$ выражения на величины

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

Оттуда после подстановки формул (20, 21) в уравнения $(18)_3$, $(18)_5$ получены выражения для приростов давлений воздуха в помещении

$$ \Delta_{(n_3)}\hat{p} = -\frac{1}{4} \underset{T}{\hat{p}} d_3 (-1)^{n_3} + $$

$$ + \frac{1}{2\rho}\left[(\mu - \frac{1}{4}adR)\hat{v}_{33} + \frac{1}{4}(\frac{4}{3}d_3^2 - \frac{1}{6}d^2 - \frac{7}{5}ad)\frac{d}{dt}(\hat{v}_{33}) \right](-1)^{n_3} + $$

$$ + \frac{1}{48\rho} d^2 ({}_{(n_3)}\hat{v}_{33})^2 , \tag{22} $$

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

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

Подстановка в решение

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

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

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

следующего выражения для воздействий

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

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

$$\hat{v}_{33} = \frac{d_3}{2\rho(3\mu + \frac{1}{4}adR)} \underset{T}{\overset{0}{p}} \exp(-\kappa t) +$$

$$+ \frac{d_3}{2\rho(3\mu + \frac{1}{4}adR)} \underset{T}{p} [\frac{1}{Kt_1}[\exp(-\kappa t) + Kt - 1][1 - H(t - t_1)] +$$

$$+ \frac{1}{K}[K + \frac{1}{t_1}\exp(-\kappa t)(1 - \exp \kappa t_1)]H(t - t_1)],$$

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

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

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

$$\widetilde{\boldsymbol{u}}(\xi) = -\frac{1}{2}\hat{v}_{33}[(\xi_1 - D/2)\boldsymbol{i}_1 + (\xi_2 - D/2)\boldsymbol{i}_2][1 - 2H(\xi_3 - a_3)] +$$

$$+ \{[1 - H(\xi_3 - a_3)](\xi_3 - a_3) + H(\xi_3 - a_3)(2d_3 - \xi_3 + a_3)\}\hat{v}_{33}\boldsymbol{i}_3. \qquad (27)$$

Численный пример

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

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

$$\left|\tilde{\boldsymbol{u}}.\boldsymbol{i}_1\right|_{\xi_1=0.2м} = -\left|\tilde{\boldsymbol{u}}.\boldsymbol{i}_1\right|_{\xi_1=19.8м} = \left|\tilde{\boldsymbol{u}}.\boldsymbol{i}_2\right|_{\xi_2=0.2м} = -\left|\tilde{\boldsymbol{u}}.\boldsymbol{i}_2\right|_{\xi_2=19.8м} = 4.9\hat{v}_{33} =$$

$$= 0.59[1 - \exp(-0.687t)] \text{ [м/с]}$$

в диапазоне ξ_3 (0.25 м, 3.25 м):

$$\left|\tilde{\boldsymbol{u}}.\boldsymbol{i}_1\right|_{\xi_1=0.2м} = -\left|\tilde{\boldsymbol{u}}.\boldsymbol{i}_1\right|_{\xi_1=19.8м} = \left|\tilde{\boldsymbol{u}}.\boldsymbol{i}_2\right|_{\xi_2=0.2м} = -\left|\tilde{\boldsymbol{u}}.\boldsymbol{i}_2\right|_{\xi_2=19.8м} = -4.9\hat{v}_{33} =$$

$$= -0.59[1 - \exp(-0.687t)] \text{ [м/с]}$$

в диапазоне ξ_3 (3.25 м, 6.25 м):

$$\max\left|\tilde{\boldsymbol{u}}.\boldsymbol{i}_3\right| = \left|\tilde{\boldsymbol{u}}.\boldsymbol{i}_3\right|_{\xi_1=3.25м} = 3\hat{v}_{33} = 0.36[1 - \exp(-0.687t)] \text{ [м/с]}.$$

5. Движение воздуха в помещениях вызванное воздействием ветра

Учитывая воздействия наружной окружающей среды ${}_{(n_1)}\underset{w}{\hat{p}}{}^{(-)}_{1} = \underset{w}{\hat{p}}{}^{(-)}_{1} = \hat{C}_1^{(-)}\underset{w}{\hat{p}}$, ${}_{(n_1)}\underset{w}{\hat{p}}{}^{(+)}_{1} = \underset{w}{\hat{p}}{}^{(+)}_{1} = \hat{C}_1^{(+)}\underset{w}{\hat{p}}$, ${}_{(n_1)}\underset{w}{\hat{p}}{}^{(-)}_{2} = \underset{w}{\hat{p}}{}^{(+)}_{2} = \hat{C}_2\underset{w}{\hat{p}}$, 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 $\underset{w}{\hat{p}} = \frac{1}{2}\rho\hat{v}^2$ воздуха, получены на основе уравнений (14) при размерах $D_i = D$, $a_i = a$ выражения на коэффициенты распределений скорости движения воздуха в помещении

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

следующих видов:

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

$$\hat{v}_{ii} = \overset{0}{v}_{ii} \exp[\kappa'(t_0 - t)] + \\ + \frac{(-1)^i}{\rho(\frac{d^2}{6} + \frac{7}{5}ad)} \cdot \int_{t_0}^{t} \exp[\kappa(t' - t)] \underset{w}{\hat{p}}[C_2 - \tfrac{1}{2}(C_1{}^{(-)} + C_1{}^{(+)})]dt' \qquad (30)$$

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

а также

$$\hat{v}_1 = \overset{0}{v}_1 \exp[\int_{t}^{t_0} {}_{(n_3)}\beta_i^* dt'] + \frac{1}{\rho(d + \frac{6}{5}a)} \cdot \int_{t_0}^{t} \exp[\int_{t}^{t'} \beta^* dt''] \underset{w}{\hat{p}}(C_1{}^{(+)} + C_1{}^{(-)})dt' \qquad (31)$$

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

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.