

свою очередь, повлечет за собой привлечение как международных, так и отечественных инвестиций;

создание благоприятного налогового климата, снижение налогового пресса от разработки до внедрения биогазовых технологий;

анализ потребителей биогаза и их покупательной способности;

разработка индивидуальных биогазовых установок для каждого вида потребителя с учетом особенностей биомассы;

постоянный мониторинг существующих установок по их влиянию на снижение выброса CO₂ для отчета Украины перед ООН.

1. www.climate.org.ua.

2. Гелетуха Г.Г. Перспективи розвитку технологій отримання біогазу в Україні // Зелена енергетика. – 2001. – №3. – С.12-14.

3. Калиновский В.И. Биогазовые технологии в Донбассе // Энергосбережение. – 2000. – №12. – С. 5-10.

Получено 07.02.2003

УДК 628.8

ЕЖИ ПИОТРОВСКИ, канд. техн. наук, ВОЙЦЕХ ДЕНИШЕВСКИ

Свентокшиская Политехника, г.Кельце (Польша)

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА ЕСТЕСТВЕННОГО ВОЗДУХООБМЕНА В СОВРЕМЕННЫХ ЖИЛЫХ ЗДАНИЯХ

Приведена концепция математического описания движения воздуха в помещении здания, обусловленного динамическим воздействием наружной окружающей среды. Конкретные решения полученных аналитических уравнений рассмотрены для переменных во времени разностей температур воздуха снаружи и внутри исследуемого помещения, а также при условии динамического воздействия ветра на его наружное ограждение. Отображены общие решения проблем математического моделирования процессов воздухообмена и воздухопроницаемости в пространствах зданий.

Решение проблем математического моделирования процессов воздухообмена и воздухопроницаемости в пространствах зданий подробно рассмотрено в работах [1, 2].

Произведем математическое описание движения воздуха в помещении здания, обусловленного динамическим воздействием наружной окружающей среды. При этом конкретные решения полученных аналитических уравнений рассмотрим для переменных во времени разностей температур воздуха снаружи и внутри исследуемого помещения, а также при условии динамического воздействия ветра на его наружное ограждение. В результате получим математическую модель процесса воздухообмена в помещениях зданий, учитывающую не только тип исследуемого объекта, но и погодные условия. Математи-

ческое описание процесса воздухообмена в пространстве здания выполнено для его упрощенной конструкции, ставшей основой физической модели исследуемого объекта.

Схема физической модели исследуемого объекта приведена на рисунке. Модель представляет собой здание с единым внутренним пространством и имеет линейные размеры D_i ($i = 1, 2, 3$) ребер, параллельных единичным векторам i_i системы отнесения. Пространство интерьера здания ограничено вертикальными и горизонтальными ограждениями, которые обозначены символами $e = -i, +i$ ($i = 1, 2, 3$), а их наружные нормали параллельны 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 воздухопроницаемостью с сопротивлением R [1/с]. При этом принято, что горизонтальные ограждения абсолютно герметичны, т.е. воздухопроницаемы.

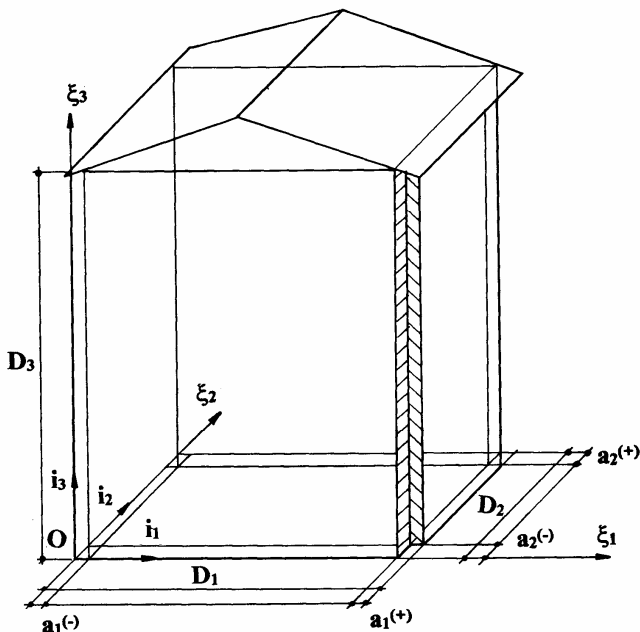


Схема здания с интерьером в виде отдельного помещения

Динамическими переменными, описывающими движение воздуха в пространстве, 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 исследуемом пространстве. Динамические переменные описаны приближенным методом, при этом принято, что пространство интерьера здания разделено на зоны в виде горизонтальных слоев $n_3 = 1, \dots, N_3$, с толщинами d_3 и остальными размерами $d_i = D_i - 2a_i$ ($i=1, 2, 3$). Образованные вследствие зонального разделения пространства здания интервалы вариантности координат $\xi_3[(n_3-1)d_3, n_3 d_3]$ определяют пространственные функции

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

определенные с помощью функции Хэвисаида.

Поля скорости \tilde{u} воздуха определены приближенным методом с использованием коэффициентов ${}_{(n_3)}v_j(t) = {}_{(n_3)}\tilde{v}_j$, ${}_{(n_3)}v_{jj}(t) = {}_{(n_3)}\tilde{v}_{jj}$ ($j=1, 2$) линейных распределений ${}_{(n_3)}\tilde{u}$ в слоях $n_3=1, \dots, N_3$

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

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

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

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

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

указывают на непрерывность составляющих скоростей, нормальных плоскостям соседних слоев. Выполнение равенства

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

указывает на исчезновение составляющих $\tilde{\mathbf{u}}_{i3}$, нормальных внутренним поверхностям горизонтальных ограждений здания.

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

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

со слагаемыми, равными составляющим $\tilde{\mathbf{u}}_{i3}$ скорости движения воздуха на внутренних поверхностях вертикальных ограждений $e=-i,+i$ ($i=1,2$) здания.

Степень воздействия окружающей среды на наружные поверхности $\xi_i=0$, $\xi_i=D_i$ ($i=1,2$) ограждений $e=-i,+i$ здания можно представить поверхностными силами $\tilde{\mathbf{p}}_i^{(-)} = \tilde{p}_i^{(-)} \mathbf{i}_i$, $\tilde{\mathbf{p}}_i^{(+)} = \tilde{p}_i^{(+)} \mathbf{i}_i$ со слагаемыми в виде

$$\tilde{p}_i^{(-)} = \sum_{n_3=1}^{N_3} \Omega_3 {}_{(n_3)} \hat{p}_i^{(-)}, \quad \tilde{p}_i^{(+)} = \sum_{n_3=1}^{N_3} \Omega_3 {}_{(n_3)} \hat{p}_i^{(+)} \quad (7)$$

при следующих значениях символов:

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

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

Эти поверхностные силы обуславливают движение воздуха в пространстве здания и образование в объемах его вертикальных ограждений и интерьера полей напряжений $\tilde{\mathbf{p}}_i^{(e)} = \tilde{p}_i^{(e)} \mathbf{i}_i$, $e=-i,+i$ ($i=1,2$), $i=1,2$ а также $\tilde{\mathbf{p}}_i = \tilde{p}_i \mathbf{i}_i$, при $i=1,2,3$. Их слагаемые на плоскостях контакта слоев тела ограждения и интерьера представлены выражениями

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

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

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

при значениях коэффициентов

$$(n_3) \hat{P}_i = \frac{1}{2} \left((n_3) \hat{P}_i^{(-)} + a_i (n_3) \hat{P}_{ii}^{(-)} + (n_3) \hat{P}_i^{(+)} - a_i (n_3) \hat{P}_{ii}^{(+)} \right), \quad (9)$$

$$(n_3) \hat{P}_{ii} = \frac{1}{D_i - 2a_i} \left((n_3) \hat{P}_i^{(+)} - a_i (n_3) \hat{P}_{ii}^{(+)} - (n_3) \hat{P}_i^{(-)} - a_i (n_3) \hat{P}_{ii}^{(-)} \right),$$

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

$$\tilde{P}_3 = \sum_{n_3=1}^{N_3} (n_3) \Omega_3 (n_3) \tilde{P}_3 i = \sum_{n_3=1}^{N_3} (n_3) \Omega_3 \left[(n_3) \hat{P}_3 + (n_3) \hat{P}_{33} \left[\xi_3 - \left(n_3 - \frac{1}{2} \right) d_3 \right] \right]_3 \quad (10)$$

на плоскостях $\xi_3 = n_3 d_3$ соседних слоев в пространстве здания удовлетворяют условиям непрерывности воздействий при слагаемых $(n_3) \hat{P}_3$, выраженных формулой

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

при значении символа

$$(n_3) I_3 \{ (n_3) (\cdot) \} = d_3 \left[-\frac{1}{2} \sum_{n_3=1}^{N_3} (n_3) (\cdot) - \frac{1}{2} (n_3) (\cdot) + \sum_{r_3=1}^{n_3} (n_3) (\cdot) \right]. \quad (12)$$

Коэффициенты $(n_3) \hat{P}_{ii}^{(-)}$, $(n_3) \hat{P}_{ii}^{(+)}$, $(n_3) \hat{P}_i$, $(n_3) \hat{P}_{ii}$ распределений напряжений в пространствах вертикальных ограждений $e=-i, +i$ ($i=1,2$) и в пространстве интерьера здания связаны с коэффициентами $(n_3) \hat{v}_i$, $(n_3) \hat{v}_{ii}$ распределений скорости движения воздуха выражениями, полученными в [1]. Они принимают вид уравнений:

в пространствах вертикальных ограждений при $i=1, 2$

$$(n_3) \hat{P}_{ii}^{(-)} = \frac{7}{5} \rho \Re \{ (n_3) \hat{v}_i^{(-)} \} = \frac{7}{5} \rho \Re \left\{ (n_3) \hat{v}_i - \frac{1}{2} d_i (n_3) \hat{v}_{ii} \right\}, \quad (13)$$

$$(n_3) \hat{P}_{ii}^{(+)} = \frac{7}{5} \rho \Re \{ (n_3) \hat{v}_i^{(+)} \} = \frac{7}{5} \rho \Re \left\{ (n_3) \hat{v}_i + \frac{1}{2} d_i (n_3) \hat{v}_{ii} \right\},$$

где

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

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

$${}_{(n_3)}\widehat{P}_i = -{}_{(n_3)}\widehat{P} + 2\eta_{(n_3)}\widehat{v}_{ii} + \rho \left[\frac{d}{dt}({}_{(n_3)}\widehat{v}_{ii}) + ({}_{(n_3)}\widehat{v}_{ii})^2 \right] d_i^2 / 12, \quad (14)$$

$${}_{(n_3)}\widehat{P}_{ii} = \rho \left[-\delta_{i3} {}_{(n_3)}\widehat{f}_3 + \frac{d}{dt}({}_{(n_3)}\widehat{v}_i) + ({}_{(n_3)}\widehat{v}_i) ({}_{(n_3)}\widehat{v}_{ii}) \right].$$

Подстановка в уравнения (8), (10), соответственно, выражений ${}_{(n_3)}\widehat{P}_{ii}^{(-i)}$, ${}_{(n_3)}\widehat{P}_{ii}^{(+i)}$, ${}_{(n_3)}\widehat{P}_i$, ${}_{(n_3)}\widehat{P}_{ii}$ дает уравнения движения воздуха следующих видов:

$$\begin{aligned} 2\mu_{(n_3)}\widehat{v}_{ii} + \left[\frac{d}{dt}({}_{(n_3)}\widehat{v}_{ii}) + ({}_{(n_3)}\widehat{v}_{ii})^2 \right] d_i^2 / 12 + a_i d_i \left[\frac{7}{40} \frac{d}{dt}({}_{(n_3)}\widehat{v}_{ii}) + \frac{1}{2} R_{(n_3)}\widehat{v}_{ii} \right] = \\ = \frac{1}{\rho} \left[({}_{(n_3)}\widehat{P} + \frac{1}{2} ({}_{(n_3)}\widehat{P}_i^{(-)} + {}_{(n_3)}\widehat{P}_i^{(+)}) \right], \\ (D_i + \frac{4}{5} a_i) \frac{d}{dt}({}_{(n_3)}\widehat{v}_i) + ({}_{(n_3)}\widehat{v}_{ii} d_i + 2a_i R_{(n_3)}\widehat{v}_i) = \frac{1}{\rho} ({}_{(n_3)}\widehat{P}_i^{(+)} - {}_{(n_3)}\widehat{P}_i^{(-)}), \quad (15) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} 2\mu_{(n_3)}\widehat{v}_{33} + \left[\frac{d}{dt}({}_{(n_3)}\widehat{v}_{33}) + ({}_{(n_3)}\widehat{v}_{33})^2 \right] d_3^2 / 12 - ({}_{(n_3)}I_3 \left\{ \frac{d}{dt}({}_{(n_3)}\widehat{v}_3) + ({}_{(n_3)}\widehat{v}_3) ({}_{(n_3)}\widehat{v}_{33}) \right\} = \\ = \frac{1}{\rho} ({}_{(n_3)}\widehat{P} + \widehat{P}_3) - ({}_{(n_3)}I_3 \{ ({}_{(n_3)}\widehat{f}_3 \}). \end{aligned}$$

Эти выражения совместно с исходными уравнениями

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

а также уравнением сплошности (3) и краевыми условиями (5) являются комплектом уравнений, описывающих переменные динамические составляющие скоростей ${}_{(n_3)}\widehat{v}_i$ ($i=1,2$), ${}_{(n_3)}\widehat{v}_i$ ($i=1,2,3$), а также

давлений ${}_{(n_3)}\widehat{P}$, \widehat{P}_3 воздуха в слоях $n_3=1, \dots, N_3$ при его движении в пространстве здания.

Определим скорость движения воздуха в пространстве здания, обусловленного разностью температур $\widehat{T}_{(e)}$ окружающей среды и внутри $\widehat{T}_{(i)}$ здания, размеры которого $D_i=D$, $a_i=a$ ($i=1,2$). Различным температурам воздуха окружающей среды и помещения соответствуют различные его плотности, соответственно, составляющие $\rho_{(e)}$, $\rho_{(i)}$. Воздействие окружающей среды на ограждения здания можно представить в виде гравитационного напора воздуха на вертикальные ограждения здания:

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

определяя их в зависимости от величины давления отнесения p_{od} . При этом давление воздуха в пространстве здания

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

выражено разностью $\Delta [{}_{(n_3)}\widehat{p}]$ давлений, обусловленных различными, переменными во времени температурами $\widehat{T}_{(e)}, \widehat{T}_{(i)}$, принимая при этом $\widehat{p}_3 = -p_o + \Delta p_3$.

Учитывая в уравнениях (14), описывающих движение воздуха в пространстве здания, принятые предпосылки и определения (16), (17), а также принимая во внимание выражение

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

и начальные условия

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

после соответствующих преобразований получим систему уравнений следующего вида:

$$\begin{aligned} {}_{(n_3)}\widehat{v}_i &= 0, \\ {}_{(n_3)}\widehat{v}_{ii} &= -\frac{1}{2} {}_{(n_3)}\widehat{v}_{33}, \\ 3\mu {}_{(n_3)}\widehat{v}_{33} + \frac{d}{dt} ({}_{(n_3)}\widehat{v}_{33}) (d_3^2 + \frac{1}{4}d^2) / 12 + ({}_{(n_3)}\widehat{v}_{33})^2 (d_3^2 - \frac{1}{4}d^2) / 12 + \\ &+ ad \left[\frac{7}{20} \frac{d}{dt} ({}_{(n_3)}\widehat{v}_{33}) + \frac{1}{4} R {}_{(n_3)}\widehat{v}_{33} \right] = \\ &= \frac{1}{\rho} \left[{}_{(n_3)}\widehat{p}_3 - \widehat{p} \frac{(D_3 - 2a_3)}{T} \left[\frac{2}{N_3} (n_3 - \frac{1}{2}) - 1 \right] \right], \quad (18) \end{aligned}$$

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

$$+ \frac{1}{2} \rho_{(n_3)} I_3 \left\{ \frac{d}{dt} (\widehat{v}_{33})_{(n_3)} + (\widehat{v}_{33})_{(n_3)} \widehat{v}_{33} \right\}.$$

Входящий в уравнения (18) символ \widehat{p}_T [Па/м] равен

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

Решение системы уравнений (18) получено 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) значения коэффициентов

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

на основе четвертого уравнения системы (18) получено выражение

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

После подстановки формул (20) и (21) в третье и пятое уравнения системы (18) получим выражения приростов давлений воздуха в пространстве здания:

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

а также дифференциальное уравнение, описывающее коэффициенты \widehat{v}_{33} распределения скорости движения воздуха:

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

Подставим в выражение

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

это уравнение при начальном условии $\widehat{p}_T = \rho_o g T_o \left(\frac{1}{T_e} - \frac{1}{T_i} \right)$ и введем

обозначения

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

Получим следующее выражение для определения давления:

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

вызванного изменяющимися во времени $t[0, t_1]$ температурами от величины T_e^o, T_i^o до величины T_e, T_i . Тогда уравнение для определения коэффициентов скорости движения воздуха приобретает вид

$$\begin{aligned} \hat{v}_{33} = & \frac{d_3}{2\rho(3\mu + \frac{1}{4}adR)} \frac{o}{T} p \exp(-kt) + \\ & + \frac{d_3}{2\rho(3\mu + \frac{1}{4}adR)} \frac{p}{T} \left[\frac{1}{Kt_1} [\exp(-kt) + Kt - 1][1 - H(t - t_1)] + \right. \\ & \left. + \frac{1}{K} [K + \frac{1}{t_1} \exp(-kt)(1 - \exp kt_1)] H(t - t_1) \right]. \end{aligned}$$

В случае исчезновения начальных величин $\frac{o}{T} p = 0$, а также мгновенного возникновения (при $t_1=0$) разности температур последнее выражение упрощается:

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

Подстановка в (2) первых двух уравнений (18) и выражения (20) приводит к уравнению вида

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

Рассмотрим на конкретном примере последовательность определения скорости движения воздуха в пространстве здания при следующих исходных данных: $\rho_o=1,293 \text{ кг/м}^3$ при температуре 0°C ;

$g=9,81 \text{ м/с}^2$; $T_o=0^\circ\text{C}$; $T_e=-10^\circ\text{C}$; $T_i=+20^\circ\text{C}$; $\gamma_o=12,68 \text{ Па/м}$; $D=20 \text{ м}$;

$D_3=6,5 \text{ м}$; $a=0,2 \text{ м}$; $a_3=0,25 \text{ м}$; $d=D-2a=19,6 \text{ м}$; $d_3=(6,5-0,5)/2=3 \text{ м}$;

$R=14,3 \text{ 1/с}$; $\rho=1,204 \text{ кг/м}^3$; $\mu=0,149 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$.

Тогда получим: $\overset{o}{p} = 1,35 \text{ Па/м}$, $\kappa = 0,687 \text{ 1/с}$, откуда из уравнений

(26) и (2) экстремальные значения составляющих скорости движения воздуха в пространстве здания составляют

$$|\overset{o}{\mathbf{u}} \cdot \mathbf{i}_1|_{\xi_1=0,2\text{м}} = -|\overset{o}{\mathbf{u}} \cdot \mathbf{i}_1|_{\xi_1=19,8\text{м}} = |\overset{o}{\mathbf{u}} \cdot \mathbf{i}_2|_{\xi_2=0,2\text{м}} = -|\overset{o}{\mathbf{u}} \cdot \mathbf{i}_2|_{\xi_2=19,8\text{м}} = 4,9\widehat{v}_{33} = 0,59[1 - \exp(-0,687t)], \text{ м/с};$$

в диапазоне $\xi_3 (3,25 \text{ м}; 6,25 \text{ м})$:

$$\max |\overset{o}{\mathbf{u}} \cdot \mathbf{i}_3| = |\overset{o}{\mathbf{u}} \cdot \mathbf{i}_3|_{\xi_3=3,25\text{м}} = 3\widehat{v}_{33} = 0,36[1 - \exp(-0,687t)], \text{ м/с}.$$

Рассмотрим движение воздуха в пространстве здания, вызванное воздействием ветра.

Учитывая воздействия наружной окружающей среды

$${}_{(n_1)}\widehat{p}_w^{(-)} = \widehat{p}_w^{(-)} = \widehat{C}_1^{(-)} \widehat{p}, \quad {}_{(n_1)}\widehat{p}_w^{(+)} = \widehat{p}_w^{(+)} = \widehat{C}_1^{(+)} \widehat{p},$$

$${}_{(n_1)}\widehat{p}_w^{(-)} = \widehat{p}_w^{(+)} = \widehat{C}_2 \widehat{p}, \text{ обусловленные наличием ветра, направление}$$

которого перпендикулярно к наветренной стороне ограждения $e = -1$, а также принимая во внимание значения коэффициентов свободного динамического давления $\widehat{p} = \frac{1}{2} \rho \widehat{v}^2$ воздуха, на основании уравнений

(14), получим выражения для определения коэффициентов распределения скорости движения воздуха в помещении

$$\overset{o}{\mathbf{u}} = \widehat{v}_1 \mathbf{i}_1 + \sum_{i=1}^2 \widehat{v}_{ii} (\xi_i - D/2) \mathbf{i}_i \quad (28)$$

следующих видов:

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

$$\widehat{v}_{ii} = \overset{o}{v}_{ii} \exp[\kappa'(t_o - t)] + \frac{(-1)^i}{\rho(\frac{d^2}{6} + \frac{7}{5}ad)} \int_{t_o}^t \exp[\kappa(t'-t)] \widehat{p}_w [C_2 - \frac{1}{2}(C_1^{(-)} + C_1^{(+)})] dt' \quad (30)$$

при $\kappa' = \frac{2\mu + \frac{1}{2}adR}{\frac{7}{10}ad + \frac{1}{12}(d)^2} [1/с]$ и начальном условии $|\widehat{v}_{ii}|_{t=t_o} = \overset{o}{v}_{ii} = (-1)^i \overset{o}{v}$,

а также

$$\widehat{v}_1 = v_1^0 \exp\left[\int_t^{t_0} (\beta_3) \beta_i^* dt'\right] + \frac{1}{\rho(d+\frac{6}{5}a)} \cdot \int_{t_0}^t \exp\left[\int_t^{t'} \beta^* dt''\right] \widehat{p}(C_1^{(+)} + C_1^{(-)}) dt' \quad (31)$$

при $\beta = \frac{d}{d+14/5a} \left[2 \frac{a}{d} R + (\beta_3) \widehat{v}_{11}\right]$ и начальном условии $|\widehat{v}_1|_{t=t_0} = v_1^0$.

Таким образом, зная скорость воздушных масс, движение которых обусловлено наличием разности температур окружающей среды и внутри помещения, а также действием ветра через неплотности наружных ограждений, несложно определить интенсивность воздухообмена в пространстве исследуемого здания.

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.

Получено 04.02.2003

УДК 542.48

В.Г.ПАВЛОВА

Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»

ТЕПЛООБМЕН ПРИ ПЛЕНОЧНОМ ТЕЧЕНИИ ТРЕХФАЗНОЙ ЖИДКОСТНОЙ СУСПЕНЗИИ В ВЫПАРНЫХ АППАРАТАХ

Исследуется теплообмен при пленочном течении трехфазной жидкостной суспензии с переменным содержанием фаз. Рассматриваются вопросы парообразования и кристаллизации. Обосновывается использование пленочных выпарных аппаратов со стекающей пленкой для кристаллизирующихся растворов, используемых при опреснении сточных вод, производстве каустической соды, шелоков и др.

В различных отраслях промышленности нашли широкое применение процессы упаривания растворов, которые являются неотъемлемой частью технологических процессов (например, при опреснении сточных вод, производстве каустической соды, шелоков и др.). Большинство упариваемых растворов, применяемых в производстве, содержат соли, кристаллизующиеся в процессе выпаривания. Для таких растворов, как правило, применяют выпарные аппараты с вынесенной зоной кипения. Применение пленочных выпарных аппаратов со стекающей пленкой в таких случаях не рекомендуется из-за инкрустации поверхностей теплообмена, которая приводит к ухудшению теплопередачи и забиванию проходного сечения труб. Однако ряд преимуществ пленочных выпарных аппаратов, таких как высокая эффективность, малые габариты и металлоемкость, малое время контакта