

ключается соответствующее тепловое оборудование, собственно, вся линия подготовки битума в традиционном ее понимании. Это оправдывает необходимость ожидаемого увеличения времени перемешивания компонентов АБС в смесителе. Сохранение производительности АБЗ может быть обеспечено, например, за счет применения двух смесителей вместо одного в составе технологической линии. Энергозатраты на производство 1 т капсулированного битума, требуемые непосредственно для работы капсулятора, оцениваются в 0,1 кг условного топлива на 1 т битума, или $\approx 0,006$ кг на 1 т АБС. Очевидно, что они несоизмеримы с потерями энергии в существующей теплотехнологической цепи подготовки битума. Это и определяет энергоэффективность предлагаемой технологии.

Представлена кафедрой
ПТЭ и ТТ

Поступила 28.03.2003

УДК 697.921.45

АНАЛИЗ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ ПОМЕЩЕНИЙ ЖИЛЫХ ЗДАНИЙ

**Канд. техн. наук СИЗОВ В. Д., кандидаты техн. наук, доценты АКЕЛЬЕВ В. Д.,
АРЕСТОВИЧ А. И., БЫКОВСКИЙ С. Г.**

Белорусский национальный технический университет

Рассматривается воздушная среда многоэтажного жилого (гражданского) здания с наружными ограждениями из капиллярно-пористых материалов (рис. 1, 2). Оконные и дверные проемы проницаемы для наружного воздуха. В результате естественного тепло- и массопереноса происходит движение газов, водяных паров, пыли и теплоты, поля скоростей и концентраций которых взаимозависимы и представляют комплекс разнородных, но взаимосвязанных процессов. Движение воздуха и газов, распространение теплоты подчиняются общим законам сохранения и превращения материи и энергии.

Тепломассопотоки здания могут быть описаны дифференциальными уравнениями сплошности движения (Навье-Стокса, Бернулли), теплопроводности (Фурье – Кирхгофа), уравнениями переноса вещества и теплообмена на границе твердого тела и жидкости.

Диапазоны реальных температур, градиентов давлений и скоростей дают основание считать, что исследуемая система может рассматриваться как несжимаемая, так как ее скорости значительно меньше скорости распространения звука. В этом случае воздушная среда оказывает сопротивление всестороннему сжатию и обладает легкой подвижностью.

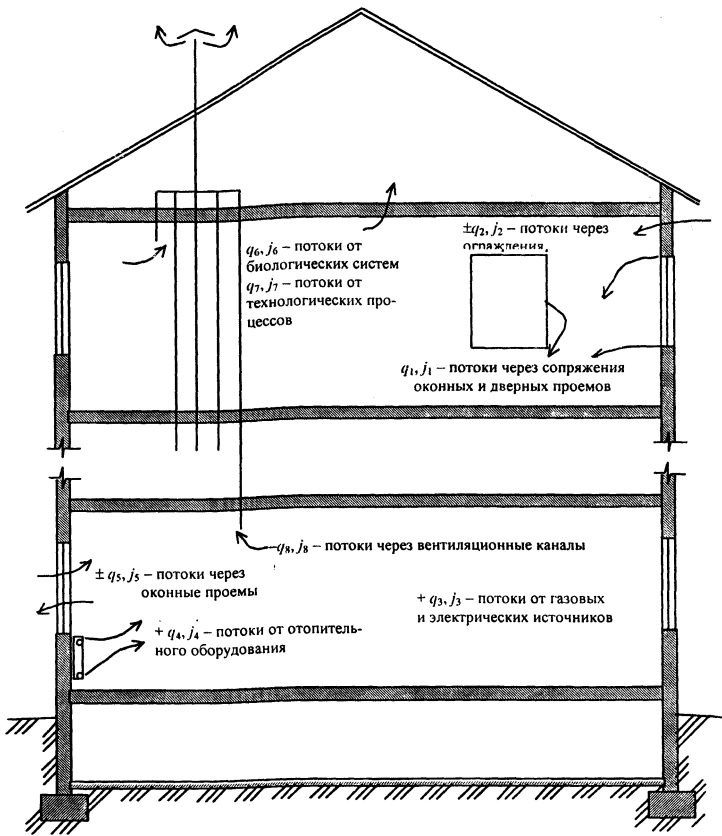


Рис. 1. Вертикальная схема тепло- и массопотоков в помещениях жилого здания

В основную систему уравнений входят тепловые и материальные балансы для всех характерных объемов и поверхностей, выделенных в расчетной схеме жилого помещения (рис. 2). В общем виде состав системы уравнений следующий.

- Уравнения баланса массы и теплоты нижней зоны (I):

$$\sum_{i=1}^n j_i^I A_i^I = 0; \quad \sum_{i=1}^n q_i^I A_i^I = 0,$$

где j_i^I , q_i^I – потоки массы и теплоты через единицу поверхности площадью A_i^I в зоне, расположенной на расстоянии $1/3$ высоты помещения от уровня пола в единицу времени, $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$, $\text{Вт}/\text{м}^2$.

- Уравнения баланса массы и теплоты средней зоны (II):

$$\sum_{i=1}^n j_i^{II} A_i^{II} = 0; \quad \sum_{i=1}^n q_i^{II} A_i^{II} = 0,$$

где j_i^{II} , q_i^{II} – потоки массы и теплоты через единицу поверхности площадью A_i^{II} в зоне, расположенной на расстоянии $2/3$ высоты помещения от уровня пола в единицу времени, $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$, $\text{Вт}/\text{м}^2$.

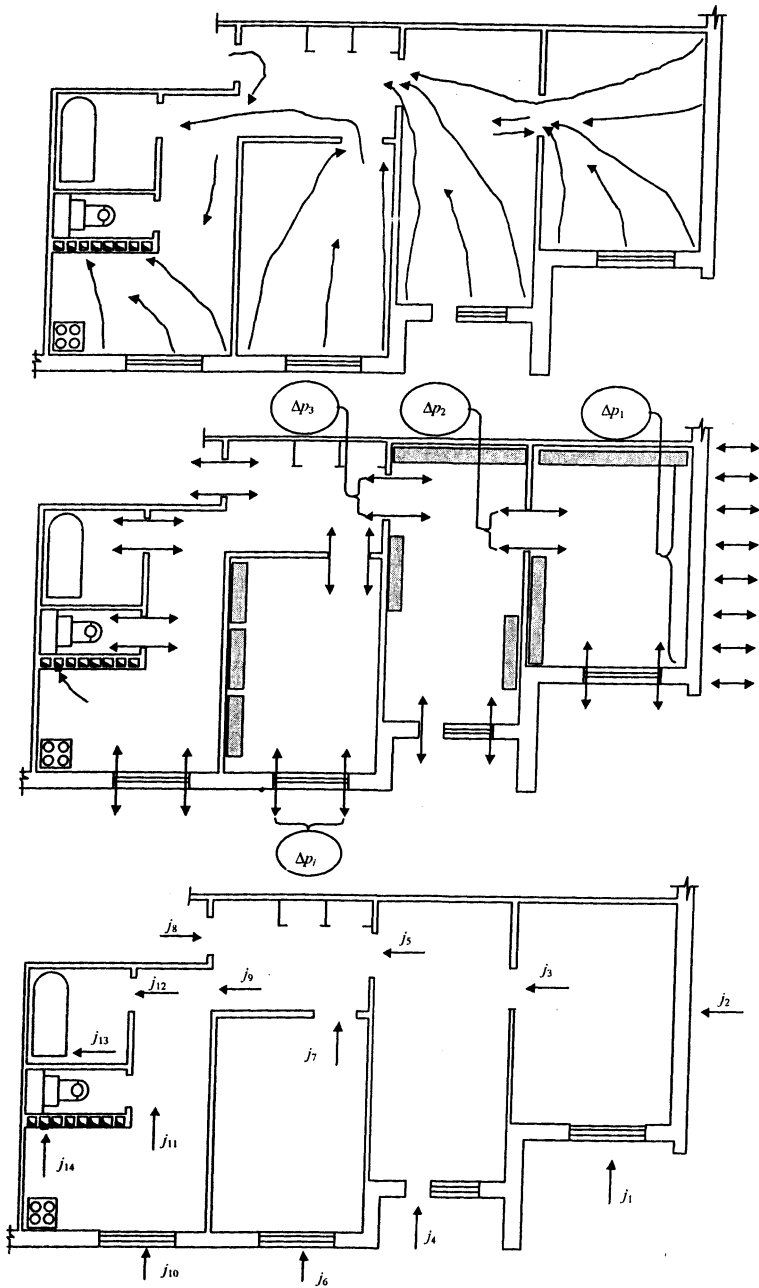


Рис. 2. Горизонтальная схема тепло- и массопотоков в квартире

- Уравнения баланса массы и теплоты верхней зоны (III):

$$\sum_{i=1}^n j_i^{\text{III}} A_i^{\text{III}} = 0; \quad \sum_{i=1}^n q_i^{\text{III}} A_i^{\text{III}} = 0,$$

где j_i^{III} , q_i^{III} – потоки массы и теплоты через единицу поверхности площадью A_i^{III} в зоне, расположенной на расстоянии $2/3$ высоты помещения от уровня пола в единицу времени, $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$, $\text{Вт}/\text{м}^2$.

• Уравнения баланса массы и теплоты трех зон (0):

$$\sum_{i=1}^n j_i^0 A_i^0 = 0; \quad \sum_{i=1}^n q_i^0 A_i^0 = 0,$$

где j_i^0, q_i^0 – суммарная плотность потока массы и теплоты через единицу поверхности площадью A_i^0 в единицу времени, кг/(м² · ч), Вт/м².

Гидравлические потери давления на трение $\Delta p_{\text{тр}}$ и местные сопротивления $\Delta p_{\text{м}}$ определяются выражением

$$\Delta p_0 = \Delta p_{\text{тр}} + \Delta p_{\text{м}}. \quad (1)$$

Их значения вычисляются по формулам

$$\Delta p_{\text{тр}} = \xi_{\text{тр}} \frac{L}{d} \frac{w^2}{2} \rho; \quad (2)$$

$$\Delta p_{\text{м}} = \xi_{\text{м}} \frac{w^2}{2} \rho, \quad (3)$$

где $\xi_{\text{тр}}$ – коэффициент гидродинамического сопротивления на трение; $\xi_{\text{м}}$ – то же местных сопротивлений; L, w, ρ – соответственно длина, м, скорость, м/с и плотность, кг/м³, потока; d – эквивалентный диаметр, м, определяемый выражением $d = 4A/\Pi$, в котором A, Π – соответственно площадь, м², и «смоченный» периметр, м, «живого» поперечного сечения потока.

Коэффициент гидродинамического сопротивления для ламинарного потока по Хагену–Пуазейлю вычисляется по формуле

$$\xi_{\text{тр}} = 64/\text{Re}, \quad (4)$$

где $\text{Re} = wd/\nu$ – число Рейнольдса; ν – коэффициент кинематической вязкости воздуха, м²/с.

Для турбулентного режима коэффициент гидродинамического сопротивления вычисляется по формуле

$$\xi_{\text{тр}} = 0,3164/\text{Re}^{0,25}. \quad (5)$$

Закон сохранения массы для потока воздуха можно представить уравнением

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho w) = 0, \quad (6)$$

которое при $\rho = \text{const}$ принимает вид

$$\text{div}(w) = \frac{\partial w_x}{\partial x} + \frac{\partial w_y}{\partial y} + \frac{\partial w_z}{\partial z} = 0. \quad (7)$$

Из (7) следует, что при движении несжимаемой жидкости скорость ее объемной деформации равна нулю. При установившемся режиме течения жидкости в потоке ее расход в каждом сечении остается постоянным, т. е.

$$\int_i \rho_i w_m dA = \text{const}, \quad (8)$$

где w_m – скорость движения жидкости в точке m , нормальная к элементу поверхности dA . Если скорости совпадают с направлением нормали к поверхности интегрирования, а в поперечном сечении значения плотности и скорости не изменяются, то

$$\rho_i w_i A_i = \text{const}. \quad (9)$$

Для влажного воздуха плотность потока может быть вычислена по формуле

$$\rho = \frac{\rho(28,95 - 10,93\varphi)}{8314,41(t + 273)} = \frac{0,00131\rho(2,649 - \varphi)}{(t + 273)}. \quad (10)$$

Используя (2), (4), (10), получим формулу для расчета потерь давления на трение при ламинарном режиме движения воздушного потока

$$\Delta p_{\text{тр}}^{\text{лам}} = \frac{64 L \Pi w^2}{\text{Re } 4A^2} \frac{0,00131\rho(2,649 - \varphi)}{(t + 273)} = \frac{0,00262wL\Pi^2\nu\rho(2,649 - \varphi)}{A^2(t + 273)}. \quad (11)$$

Из выражений (1)...(4), (10), (11) получим уравнения для расчета общих потерь давления при ламинарном режиме движения воздушного потока

$$\begin{aligned} \Delta p_o^{\text{лам}} &= \frac{0,00262wL\nu\Pi^2\rho(2,649 - \varphi)}{A^2(t + 273)} + \xi_m \frac{w^2}{2} \frac{0,00131\rho(2,649 - \varphi)}{(t + 273)} = \\ &= \frac{0,00065w\rho(2,649 - \varphi)}{(t + 273)} \left(\frac{0,00197L\Pi^2\nu}{A^2} + \xi_m w \right). \end{aligned} \quad (12)$$

Из выражений (1)...(3), (5), (10) получим формулу для расчета потерь давления на трение при турбулентном режиме движения воздушного потока

$$\begin{aligned} \Delta p_{\text{тр}}^{\text{тур}} &= \frac{0,3164 \cdot 0,00131\rho(2,649 - \varphi)\Pi^{1,25}Lw^{1,75}\nu^{0,25}}{A^{1,25} \cdot 11,3(t + 273)} = \\ &= \frac{0,000036\rho(2,649 - \varphi)\Pi^{1,25}Lw^{1,75}\nu^{0,25}}{A^{1,25}(t + 273)}. \end{aligned} \quad (13)$$

Общие потери давления для турбулентного режима можно рассчитать по формуле

$$\Delta p_{\circ}^{\text{тур}} = \frac{0,000036 p (2,649 - \varphi) w^{1,75}}{(t + 273)} \left(\frac{\Pi^{1,25} L w^{0,25} \nu^{0,25}}{A^{1,25}} \right) + 0,00062 \xi_m. \quad (14)$$

В качестве примера вычислим потери давления для ламинарного и турбулентного режимов по формулам (12) и (14) при следующих исходных данных:

$$p = 101325 \text{ Па}; t = 10 \text{ }^\circ\text{C}; \nu = 14,16 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}; \varphi = 0,5; w = 0,6 \text{ м/с};$$

$$L = 7 \text{ м}; A = 0,0000071 \text{ м}^2; \Pi = 0,0094 \text{ м}; \xi_m = 0.$$

$$\Delta p_{\circ}^{\text{лам}} = \frac{0,00065 \cdot 0,6 \cdot 101325 \cdot (2,649 - 0,5)}{10 + 273} \times$$

$$\times \left(\frac{0,00197 \cdot 7 \cdot 14,16 \cdot 0,0094^2}{10^6 \cdot 0,0000071^2} + 0 \right) = 0,102 \text{ Па};$$

$$\Delta p_{\circ}^{\text{тур}} = \frac{0,000036 \cdot 101325 \cdot (2,649 - 0,5) \cdot 0,6^{1,75}}{10 + 273} \times$$

$$\times \frac{0,0094^{1,25} \cdot 7 \cdot 0,6^{0,25} \cdot 14,16^{0,25}}{1000000^{0,25} \cdot 0,0000071^{1,25}} = 33,6 \text{ Па}.$$

Оценим влияние относительной влажности воздуха на потери давления при ламинарном и турбулентном режимах, принимая: $\varphi_1 = 0,3$; $\varphi_2 = 0,7$; $p = 101325 \text{ Па}$; $t = 10 \text{ }^\circ\text{C}$; $\nu = 14,16 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$; $w = 0,6 \text{ м/с}$; $L = 7 \text{ м}$; $A = 0,0000071 \text{ м}^2$.

При ламинарном режиме результаты следующие:

$$\Delta p_{\circ 1}^{\text{лам}} = \frac{0,00065 \cdot 0,6 \cdot 101325 \cdot (2,649 - 0,3)}{283} \times$$

$$\times \left(\frac{0,00197 \cdot 7 \cdot 14,16 \cdot 0,0094^2}{10^6 \cdot 0,0000071^2} \right) = 0,111 \text{ Па};$$

$$\Delta p_{\circ 2}^{\text{лам}} = \frac{0,00065 \cdot 0,6 \cdot 101325 \cdot (2,649 - 0,7)}{283} \times$$

$$\times \left(\frac{0,00197 \cdot 7 \cdot 14,16 \cdot 0,0094^2}{10^6 \cdot 0,0000071^2} \right) = 0,092 \text{ Па};$$

$$\Delta p_{\circ, \text{ср}}^{\text{лам}} = 0,1016 \text{ Па}.$$

При турбулентном режиме результаты следующие:

$$\Delta p_{o1}^{\text{тип}} = \frac{0,000036 \cdot 101325 \cdot (2,649 - 0,3) \cdot 0,6^{1,75}}{10 + 273} \times \\ \times \frac{0,0094^{1,25} \cdot 7 \cdot 0,6^{0,25} \cdot 14,16^{0,25}}{1000000^{0,25} \cdot 0,0000071^{1,25}} = 36,8 \text{ Па};$$

$$\Delta p_{o2}^{\text{тип}} = \frac{0,000036 \cdot 101325 \cdot (2,649 - 0,7) \cdot 0,6^{1,75}}{10 + 273} \times \\ \times \frac{0,0094^{1,25} \cdot 7 \cdot 0,6^{0,25} \cdot 14,16^{0,25}}{1000000^{0,25} \cdot 0,0000071^{1,25}} = 30,56 \text{ Па};$$

$$\Delta p_{o,\text{ср}}^{\text{тип}} = 33,63 \text{ Па}.$$

Результаты расчетов для ламинарного и турбулентного режимов показывают, что относительная влажность воздуха φ оказывает влияние на потери давления. Поэтому для точных расчетов следует использовать формулы (12) и (14). При относительной влажности воздуха $\varphi = 0,5$ эти формулы для ламинарного и турбулентного режимов имеют вид:

$$\Delta p_o^{\text{лам}} = \frac{0,00139 w p}{t + 273} \left(\frac{0,00197 L \Pi^2 v}{A^2} + \xi_m w \right); \quad (15)$$

$$\Delta p_o^{\text{тип}} = \frac{0,000077 p w^{1,75}}{t + 273} \left(\frac{\Pi^{1,25} L w^{0,25} v^{0,25}}{A^{1,25}} \right) + 0,00062 \xi_m. \quad (16)$$

Оценим влияние атмосферного давления на потери давления при ламинарном и турбулентном режимах, принимая: $p_1 = 97307 \text{ Па}$; $p_2 = 102641 \text{ Па}$ (остальные исходные данные оставим без изменения).

Для ламинарного режима получены следующие результаты:

$$\Delta p_{o1}^{\text{лам}} = \frac{0,00065 \cdot 0,6 \cdot 97309 \cdot (2,649 - 0,5)}{10 + 273} \times \\ \times \left(\frac{0,00197 \cdot 7 \cdot 14,16 \cdot 0,0094^2}{10^6 \cdot 0,0000071^2} \right) = 0,098 \text{ Па};$$

$$\Delta p_{o2}^{\text{лам}} = \frac{0,00065 \cdot 0,6 \cdot 102641 \cdot (2,649 - 0,5)}{10 + 273} \times \\ \times \left(\frac{0,00197 \cdot 7 \cdot 14,16 \cdot 0,0094^2}{10^6 \cdot 0,0000071^2} \right) = 0,103 \text{ Па};$$

$$\Delta p_{o,\text{ср}}^{\text{лам}} = 0,101 \text{ Па}.$$

Для турбулентного режима получены следующие результаты:

$$\Delta p_{o1}^{\text{тур}} = \frac{0,000036 \cdot 97309 \cdot (2,649 - 0,5) \cdot 0,6^{1,75}}{10 + 273} \times \\ \times \frac{0,0094^{1,25} \cdot 7 \cdot 0,6^{0,25} \cdot 14,16^{0,25}}{1000000^{0,25} \cdot 0,0000071^{1,25}} = 32,1 \text{ Па};$$

$$\Delta p_{o2}^{\text{тур}} = \frac{0,000036 \cdot 102641 \cdot (2,649 - 0,5) \cdot 0,6^{1,75}}{10 + 273} \times \\ \times \frac{0,0094^{1,25} \cdot 7 \cdot 0,6^{0,25} \cdot 14,16^{0,25}}{1000000^{0,25} \cdot 0,0000071^{1,25}} = 34,08 \text{ Па};$$

$$\Delta p_{o,\text{ср}}^{\text{тур}} = 33,08 \text{ Па.}$$

Приведенные расчеты показывают, что потери давления при ламинарном и турбулентном режимах зависят от барометрического давления. Для выполнения точных расчетов следует использовать уравнения (12) и (14). При давлении $p = 101325$ Па эти формулы для ламинарного и турбулентного режимов имеют вид:

$$\Delta p_o^{\text{лам}} = \frac{65,86w(2,649 - \varphi)}{t + 273} \left(\frac{0,00197L\Pi^2v}{A^2} + \xi_m w \right); \quad (17)$$

$$\Delta p_o^{\text{тур}} = \frac{3,647w^{1,75}(2,649 - \varphi)}{t + 273} \left(\frac{\Pi^{1,25}Lw^{0,25}v^{0,25}}{A^{1,25}} \right) + 0,00062\xi_m. \quad (18)$$

Формулы (15) и (16) или (17) и (18) при $\varphi = 0,5 = \text{const}$ и $p = 101325 = \text{const}$ можно представить в виде:

$$\Delta p_o^{\text{лам}} = \frac{140,84w}{t + 273} \left(\frac{0,00197L\Pi^2v}{A^2} + \xi_m w \right); \quad (19)$$

$$\Delta p_o^{\text{тур}} = \frac{7,802w^{1,75}}{t + 273} \left(\frac{\Pi^{1,25}Lw^{0,25}v^{0,25}}{A^{1,25}} \right) + 0,00062\xi_m. \quad (20)$$

Оценим влияние вязкости на потери давления при ламинарном и турбулентном режимах, принимая: $v_1 = 11,994 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$; $t_1 = -24 \text{ }^\circ\text{C}$; $v_2 = 14,88 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$; $t_2 = 18 \text{ }^\circ\text{C}$ (остальные исходные данные оставим без изменения).

Для ламинарного режима получены следующие результаты:

$$\Delta p_{o1}^{\text{лам}} = \frac{0,00065 \cdot 0,6 \cdot 101325 \cdot (2,649 - 0,5)}{273 - 24} \times$$

$$\times \left(\frac{0,00197 \cdot 7 \cdot 11,994 \cdot 0,0094^2}{10^6 \cdot 0,0000071^2} \right) = 0,0988 \text{ Па};$$

$$\Delta p_{o2}^{\text{лам}} = \frac{0,00065 \cdot 0,6 \cdot 101325 \cdot (2,649 - 0,5)}{273 + 18} \times$$

$$\times \left(\frac{0,00197 \cdot 7 \cdot 14,88 \cdot 0,0094^2}{10^6 \cdot 0,0000071^2} \right) = 0,1048 \text{ Па};$$

$$\Delta p_{o,\text{ср}}^{\text{лам}} = 0,102 \text{ Па}.$$

Для турбулентного режима получены следующие результаты:

$$\Delta p_{o1}^{\text{тур}} = \frac{0,000036 \cdot 101325 \cdot (2,649 - 0,5)}{273 - 24} \times$$

$$\times \frac{0,0094^{1,25} \cdot 7 \cdot 0,6^{0,25} \cdot 11,994^{0,25}}{1000000^{0,25} \cdot 0,0000071^{1,25}} = 33,9 \text{ Па};$$

$$\Delta p_{o2}^{\text{тур}} = \frac{0,000036 \cdot 101325 \cdot (2,649 - 0,5) \cdot 0,6^{1,75}}{273 + 18} \times$$

$$\times \frac{0,0094^{1,25} \cdot 7 \cdot 0,6^{0,25} \cdot 14,88^{0,25}}{1000000^{0,25} \cdot 0,0000071^{1,25}} = 30,4 \text{ Па};$$

$$\Delta p_{o,\text{ср}}^{\text{тур}} = 32,1 \text{ Па}.$$

При средних значениях: $\varphi = 0,5$; $p = 101325 \text{ Па}$; $t = -2 \text{ }^\circ\text{C}$; $\nu = 13,53 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ формулы (12) и (14) можно записать:

$$\Delta p_o^{\text{лам}} = 0,0139 \cdot 10^{-6} \left(\frac{wL\Pi^2}{A^2} \right) + 0,522 w^2 \xi_{\Sigma}; \quad (21)$$

$$\Delta p_o^{\text{тур}} = \frac{0,00179 w^2 \Pi^{1,25} L}{A^{1,25}} + 0,000018 w^{1,75} \xi_{\Sigma}. \quad (22)$$

По формуле (22) построены зависимости (рис. 3...6) общих потерь давления для ламинарного режима.

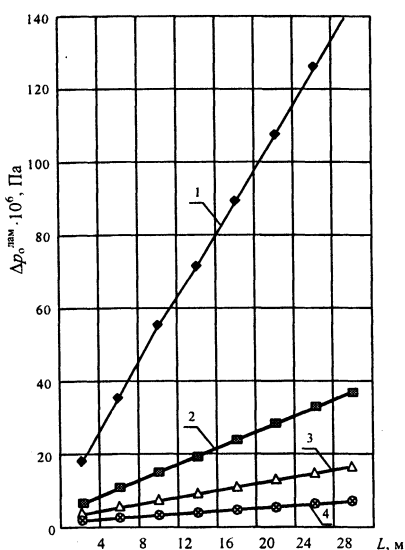


Рис. 3. Потери давления при ламинарном режиме: 1 – $A = 0,1 \text{ м}^2$; 2 – $0,2 \text{ м}^2$; 3 – $0,3 \text{ м}^2$; 4 – $0,4 \text{ м}^2$; $w = 0,2 \text{ м/с}$; $\Pi = 4 \text{ м}$

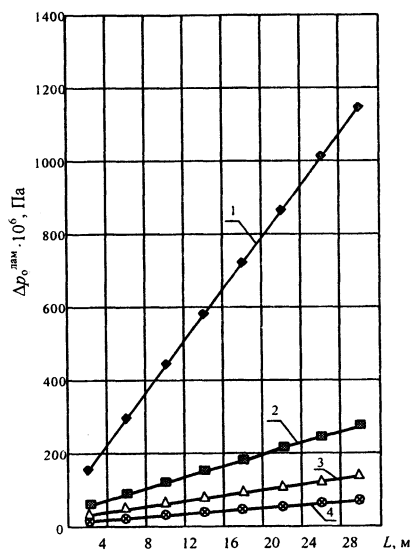


Рис. 4. Потери давления при ламинарном режиме: 1 – $A = 0,1 \text{ м}^2$; 2 – $0,2 \text{ м}^2$; 3 – $0,3 \text{ м}^2$; 4 – $0,4 \text{ м}^2$; $w = 0,4 \text{ м/с}$; $\Pi = 8 \text{ м}$

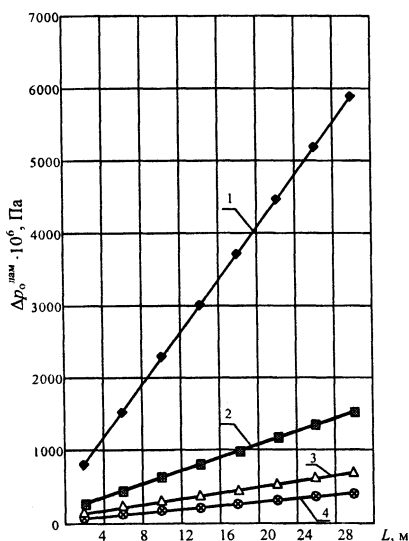


Рис. 5. Потери давления при ламинарном режиме: 1 – $A = 0,1 \text{ м}^2$; 2 – $0,2 \text{ м}^2$; 3 – $0,3 \text{ м}^2$; 4 – $0,4 \text{ м}^2$; $w = 0,6 \text{ м/с}$; $\Pi = 15 \text{ м}$

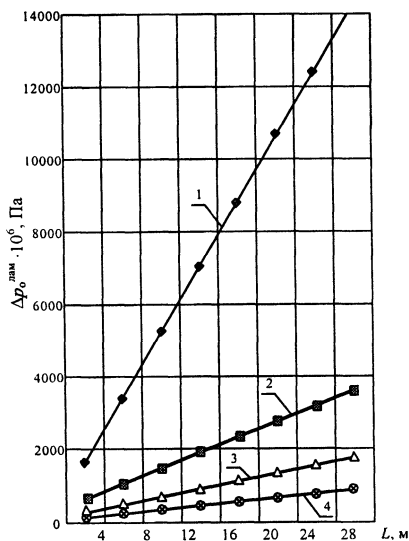


Рис. 6. Потери давления при ламинарном режиме: 1 – $A = 0,1 \text{ м}^2$; 2 – $0,2 \text{ м}^2$; 3 – $0,3 \text{ м}^2$; 4 – $0,4 \text{ м}^2$; $w = 0,8 \text{ м/с}$; $\Pi = 20 \text{ м}$

Приведенные зависимости и графики позволяют исследовать, оценивать и прогнозировать условия вентилирования внутренних помещений жилых зданий. Эта методика применима также для анализа воздушных потоков в производственных зданиях.

ЛИТЕРАТУРА

1. Самойлович Г. С. Гидрогазодинамика. – М.: Машиностроение, 1990.
2. Дейч М. Е., Зарянкин А. Е. Гидрогазодинамика. – М.: Энергоатомиздат, 1984.

Представлена кафедрой
теплоснабжения и вентиляции

Поступила 24.09.2003