

УДК 532+697.94

ЭКОНОМИЧНЫЙ ВОЗДУХООХЛАДИТЕЛЬ РАБОЧИХ ЗОН

Т.Д. Панченко, И.А. Тузова, В.В. Челабчи, В.Н. Челабчи

У статті розглядається охолоджувач повітря для робочих зон побічно випарного типу. Описано результати математичного і натурного моделювання.

Ключові слова: робоча зона, охолоджувач повітря, побічно випарний тип, математичне моделювання.

В статье рассматривается охладитель воздуха для рабочих зон косвенно испарительного типа. Описаны результаты математического и натурного моделирования.

Ключевые слова: рабочая зона, охладитель воздуха, косвенно испарительный тип, математическое моделирование.

In the article the air cooler for workplaces indirect evaporative is considered. The results of the mathematical and natural modeling is described.

Keywords: work area, air cooler, indirect evaporative type of mathematical modeling.

Введение. Обеспечение комфортных условий работы для работников портов и предприятий морехозяйственной отрасли, несомненно, будет способствовать снижению энергетических затрат, повышению производительности труда и снижению травматизма.

Анализ существующих способов производства холода для комфортного кондиционирования воздуха позволяет выделить испарительное охлаждение воздуха, когда как расходуемый агент используется вода.

В статье рассматривается компьютерное моделирование процессов в каналах установки охлаждения воздуха непрямого испарительного типа. Подобные установки позволяют существенно экономить на потреблении электроэнергии. Кроме того, эти установки экологически безопасны.

Основой аппарата является тепло- массообменная насадка, образованная совокупностью водонепроницаемых пластин (пленок), покрытых увлажняемым пористым материалом.

Наружный воздух поступает в сухие каналы, где он охлаждается за счет теплообмена с сухой поверхностью пластины. Часть охлажденного воздуха идет потребителю, а оставшаяся часть направляется во влажные каналы, где воздух насыщается парами воды, испаряющейся с поверхности пористого материала. На испарение воды отбирается тепло от воздуха, проходящего в сухом канале.

© Панченко Т.Д., Тузова И.А., Челабчи В.В., Челабчи В.Н., 2017

В охладителе подобного типа реализуются процессы тепло-массопереноса в системе плоских каналов сложного профиля при величине отношения ширины канала к зазору от 10 до 20. Режим течения воздуха в каналах преимущественно ламинарный.

При исследовании охладителей воздуха косвенно-испарительного типа рассматривались два основных варианта:

- схема перекрестного тока (схема Мунтерса);
- схема противотока (схема Нейхарта).

С точки зрения минимизации затрат на прокачку воздуха схема Мунтерса имеет преимущества. Однако схема Нейхарта позволяет достичь более низких значений температуры охлажденного воздуха.

Для охладителей воздуха локальных рабочих зон предлагается комбинированная схема. В этом случае проводится промежуточный отбор охлаждаемого воздуха из сухих каналов, который направляется во влажные каналы. Такая схема позволяет существенно сократить расход энергии на прокачку воздуха. Компоновка насадки охладителя с комбинированной схемой течения воздуха представлена на рис. 1.

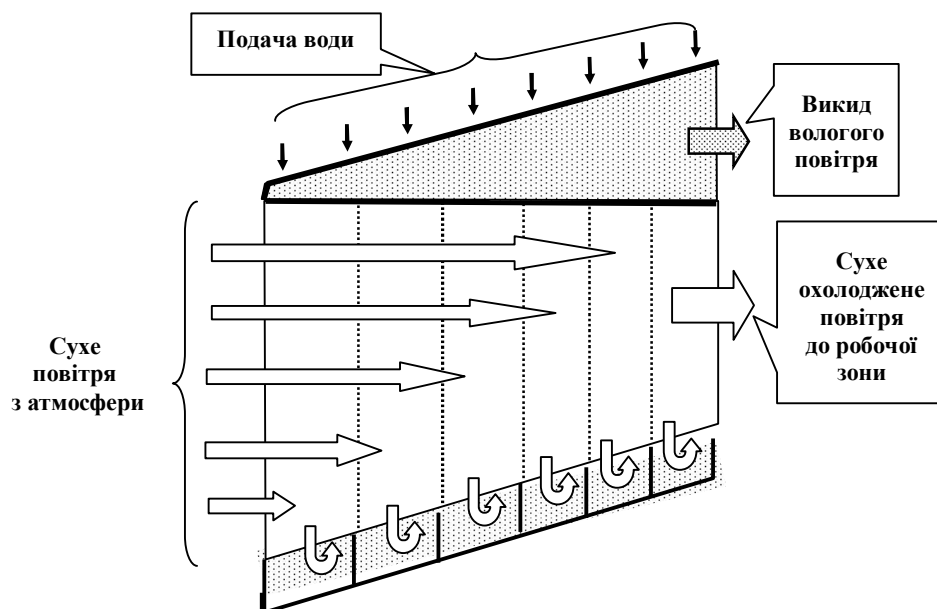


Рис. 1. Комбинированная схема распределения потоков воздуха

Для надежного прогнозирования процессов в воздухоохладителях использован метод математического моделирования.

Цель статьи. В статье обобщаются методы проведения вычислительного эксперимента применительно к тепло-массообменному оборудованию. Рассматривается совместное решение системы дифференциальных и алгебраических уравнений, отражающих взаимосвязанные про-

цессы переноса тепла и массы в охладителях воздуха косвенно-испарительного типа. Для каналов сложного профиля предложен эффективный метод моделирования процессов переноса. На базе результатов моделирования получены зависимости локальных коэффициентов теплообмена по длине канала, которые используются в общей модели процессов в охладителе.

Математическое моделирование тепло-массообмена в системе каналов. В качестве математической модели процессов переноса в модуле охладителя воздуха использована система обыкновенных дифференциальных уравнений первого порядка. Связь между значениями температуры воздуха в сухом и влажном каналах осуществляется за счет уравнений, описывающих процесс теплопередачи через разделяющую каналы стенку с учетом процесса испарения воды во влажный канал.

Сложность моделирования процессов в охладителях воздуха косвенно-испарительного типа заключается в том, что теплообменные матрицы содержат большое число каналов. Следует отметить, что каналы тепло-массообменных матриц (как сухие, так и влажные) отличаются малыми конструктивными размерами: зазор (1,5-2,5 мм), ширина (15-30 мм). Кроме того значения параметров (температура и влажность воздуха) мало отличаются в параллельных каналах, расположенных рядом. Поэтому представляется возможным группировать каналы с осреднения параметров потоков в направлении, перпендикулярном вектору скорости, и проводить моделирование центрального (из группы) канала.

Ориентация потоков воздуха и воды относительно координат x и y показана на рис. 2.

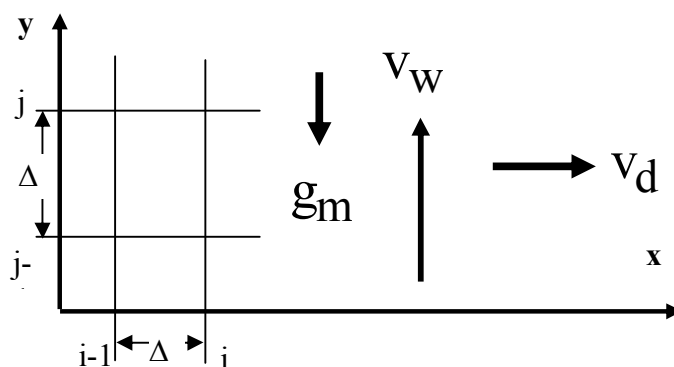


Рис. 2. Направление потоков воздуха при комбинированной схеме:

- V_d – скорость воздуха в сухом канале;
- V_w – скорость воздуха во влажном канале;
- g_m – поток воды, стекающей по разделительной стенке

Процесс переноса тепла в сухом канале описывается уравнением (1)

$$\frac{\delta_d}{2} \cdot v_d \cdot C_{p_d} \cdot \rho_d \cdot \frac{dt_d}{dx} = k_{\Sigma} \cdot (t_m - t_d), \quad (1)$$

где $k_{\Sigma_{i,j}} = 1 / \left(\frac{1}{\alpha_{d_{i,j}}} + \frac{\delta_{iz}}{\lambda_{iz}} \right)$.

Процесс теплопереноса во влажной пластине, по которой стекает вода, описывается уравнением (2)

$$g_m \cdot C_m \cdot \frac{dt_m}{dy} = -(t_d - t_m) \cdot k_{\Sigma} - \alpha_w \cdot (t_w - t_m) + m \cdot r. \quad (2)$$

Течение воды во влажной пластине описывается уравнением (3)

$$\frac{dg_m}{dy} = m, \quad (3)$$

где $m_{i,j} = \sigma_{i,j} \cdot (d_{m_{i,j}} - d_{w_{i,j}})$, $\sigma_{i,j} = \alpha_{w_{i,j}} \cdot D / (C_{p_{св}} \cdot a)$.

Процесс теплопереноса во влажном канале описывается уравнением (4)

$$\frac{\delta_w}{2} \cdot v_w \cdot C_{p_w} \cdot \rho_w \cdot \frac{dt_w}{dy} = \alpha_w \cdot (t_m - t_w) + m \cdot C_{p_{п}} \cdot t_m. \quad (4)$$

Процесс переноса влаги во влажном канале описывается уравнением (5)

$$\frac{\delta_w}{2} \cdot v_w \cdot \rho_{св} \cdot \frac{dd_w}{dx} = \sigma \cdot (d_m - d_w). \quad (5)$$

В уравнениях (2)-(5) использованы условные обозначения:

x, y – расстояние по координатным осям, м;

τ – время, с;

v_d – скорость воздуха в сухом канале, м/с;

v_w – скорость воздуха во влажном канале, м/с;

g_m – погонный расход воды, кг/(м·с);

d_d – абсолютная влажность воздуха в сухом канале, кг/кг;

d_w – абсолютная влажность воздуха во влажном канале, кг/кг;

t – температура, К (°C);

ρ – плотность, кг/м³;

λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К);

c_p – удельная теплоемкость воздуха, Дж/(кг·К);
 ν – коэффициент кинематической вязкости воздуха, м²/с;
 α_d, α_w – соответственно, эффективные коэффициенты теплообмена в сухом и влажном каналах, Вт/(м²·К);
 σ – эффективный коэффициент массообмена на поверхности пластины, кг/(м·с);
 δ_d, δ_w – соответственно, расчетный зазор в сухом и влажном каналах, м;
 δ_{iz} – толщина гидроизоляции, м;
 λ_{iz} – коэффициент теплопроводности гидроизоляции, Вт/(м·К);
 D – коэффициент диффузии водяных паров в воздухе, м²/с;
 C_m – удельная теплоемкость воды, Дж/(кг·К);
 c_n – удельная теплоемкость водяного пара на линии насыщения, Дж/(кг·К).

Для решения одномерных уравнений переноса тепла и влаги [1]-[5] использовался проекционно-сеточный метод [1]. Теплофизические свойства материалов и рабочих веществ принимались согласно литературным источникам [2]. Значения коэффициентов теплообмена в увлажненных каналах принимались согласно [3].

Моделирование процессов в канале сложного профиля. Особую сложность представляло определение значений коэффициентов теплообмена в сухом канале, имеющем сложную форму (рис. 3).

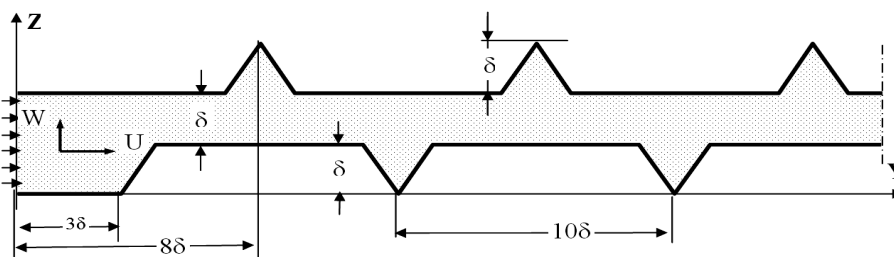


Рис. 3. Форма сухого канала

Для численного моделирования течения вязкой газа в сухом канале при ламинарных и переходных режимах течения разработан модифицированный разностный метод. Задача сформулирована в двумерной постановке.

Процесс течения описывается в естественных переменных уравнением неразрывности (6) и уравнением Навье-Стокса в проекциях на координатные оси (7)-(8). К этим уравнениям добавляется уравнение давления (9). Теплоперенос описывается уравнением (10). В математическую модель добавляется уравнение теплопереноса (10).

$$\frac{\partial U}{\partial Y} + \frac{\partial W}{\partial Z} = 0, \quad (6)$$

$$\frac{1}{v} \cdot \frac{\partial U}{\partial \tau} + \frac{U}{v} \cdot \frac{\partial U}{\partial Y} + \frac{W}{v} \cdot \frac{\partial U}{\partial Z} = -\frac{1}{v \cdot \rho} \cdot \frac{\partial P}{\partial Y} + \left(\frac{\partial^2 U}{\partial Y^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial Z^2} \right) \quad (7)$$

$$\frac{1}{v} \cdot \frac{\partial W}{\partial \tau} + \frac{U}{v} \cdot \frac{\partial W}{\partial Y} + \frac{W}{v} \cdot \frac{\partial W}{\partial Z} = -\frac{1}{v \cdot \rho} \cdot \frac{\partial P}{\partial Z} + \left(\frac{\partial^2 W}{\partial Y^2} + \frac{\partial^2 W}{\partial Z^2} \right) \quad (8)$$

$$\frac{\partial^2 P}{\partial Y^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial Z^2} = 2 \cdot \rho \cdot \left(\frac{\partial W}{\partial Z} \cdot \frac{\partial U}{\partial Y} - \frac{\partial W}{\partial Y} \cdot \frac{\partial U}{\partial Z} \right), \quad (9)$$

$$c_p \cdot \rho \cdot \left(\frac{\partial T}{\partial \tau} + U \cdot \frac{\partial T}{\partial Y} + W \cdot \frac{\partial T}{\partial Z} \right) = \lambda \cdot \left(\frac{\partial^2 T}{\partial Y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial Z^2} \right). \quad (10)$$

В формулах использованы обозначения:

Y, Z, τ – соответственно, координаты и время;

U, W, P, T – компоненты вектора скорости, давление и температура;

ратура;

c_p, λ – удельная теплоемкость и теплопроводность воздуха;

ρ, v – плотность и коэффициент кинематической вязкости воздуха.

Принятые граничные условия:

- на поверхностях теплообмена: $U=0, W=0, dP/dN=0, T_s=f(Y)$;

- на входе в канал: $W=0, U=f(Z), T=T_0, P=P_{in}$;

- на выходе из канала: $P=P_{out}, W=0, d^2U/dY^2=0, d^2T/dY^2=0$,

где P_{in}, P_{out} – соответственно, давление на входе и выходе канала;

N – нормаль к поверхности.

Проводится расщепление задачи на две подзадачи: определение поля скорости и определение поля давления. Согласование решений оговоренных подзадач проводится методом итераций (глобальные итерации).

В статье рассматривается метод конечных разностей (МКР). Этот метод отличается простотой реализации и удобством задания условий на границах области. Однако применение МКР требует осторожности при выборе схем аппроксимации уравнений (6)-(8), так как может возникнуть неустойчивость вычислительного процесса. Кроме того, для совместного решения уравнений (6)-(8) нужен итерационный процесс. Поэтому был разработан модифицированный метод конечных разностей (ММКР) для совместного решения уравнений (6)-(8) при обеспечении абсолютной устойчивости вычислительного процесса.

Использован подход, описанный в [4], когда комплекс, включающий члены со вторыми и первыми производными, аппроксимируется как единое целое по трехточечной схеме (11) согласно рис. 4.

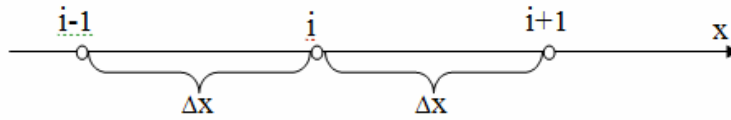


Рис. 4. Схема размещения узлов сетки

$$\frac{\partial^2 f}{\partial x^2} - D \cdot \frac{\partial f}{\partial x} \approx \frac{(A_1 \cdot f_{i-1} + A_2 \cdot f_i + A_3 \cdot f_{i+1})}{\Delta x^2}. \quad (11)$$

где $A_1 = \frac{D \cdot \Delta x \cdot (C_2 - C_1)}{C_3}, \quad A_2 = -\frac{D \cdot \Delta x \cdot C_2}{C_3}, \quad A_3 = \frac{D \cdot \Delta x \cdot C_1}{C_3},$

$$C_1 = \exp(D \cdot \Delta x) - 1, \quad C_2 = \exp(2 \cdot D \cdot \Delta x) - 1, \quad C_3 = C_2 - 2C_1,$$

Δx – шаг сетки.

Величина D может быть функцией решения. Тогда ее значение уточняется итерационным методом (локальные итерации). Расчетные зависимости для коэффициентов A_1, A_2, A_3 можно получить из аналитического решения уравнения вида (12) при постоянном значении правой части на отрезке оси ограниченном узлами сетки с индексами $i-1$ и $i+1$

$$\frac{\partial^2 f}{\partial x^2} - D \cdot \frac{\partial f}{\partial x} = \text{const}. \quad (12)$$

Одновременно можно из аналитического решения (12) получить аналогичную аппроксимирующую зависимость для первой производной (13), что важно при аппроксимации уравнения неразрывности (13)

$$\frac{\partial f}{\partial x} \approx B_1 \cdot f_{i-1} + B_2 \cdot f_i + B_3 \cdot f_{i+1}, \quad (13)$$

где $B_1 = \frac{D \cdot \Delta x \cdot (C_1 + 1) - C_2 + C_1}{C_2 - 2C_1}, \quad B_2 = \frac{C_2 - 2 \cdot D \cdot \Delta x \cdot (C_1 + 1)}{C_2 - 2C_1}, \quad B_3 = \frac{D \cdot \Delta x \cdot (C_1 + 1) - C_1}{C_2 - 2C_1},$

$$C_1 = \exp(D \cdot \Delta x) - 1, \quad C_2 = \exp(2 \cdot D \cdot \Delta x) - 1, \quad C_3 = C_2 - 2C_1.$$

Δx – шаг сетки.

Зависимость значений коэффициентов A_1-A_3 от параметра $D\Delta x$ представлена на рис. 5.

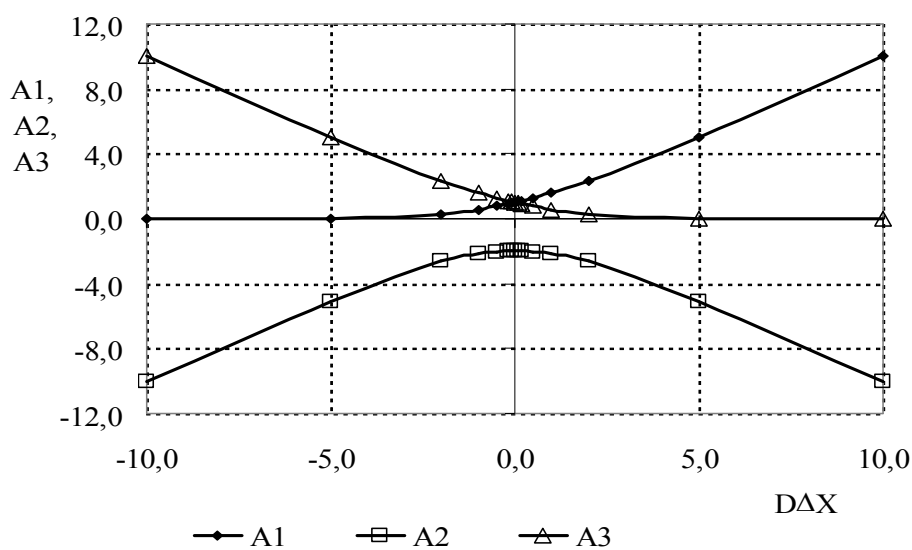


Рис. 5. Зависимость коэффициентов $A1-A3$ от параметра $D\Delta x$

Зависимость значений коэффициентов $B1-B3$ от параметра $D\Delta x$ представлена на рис. 6.

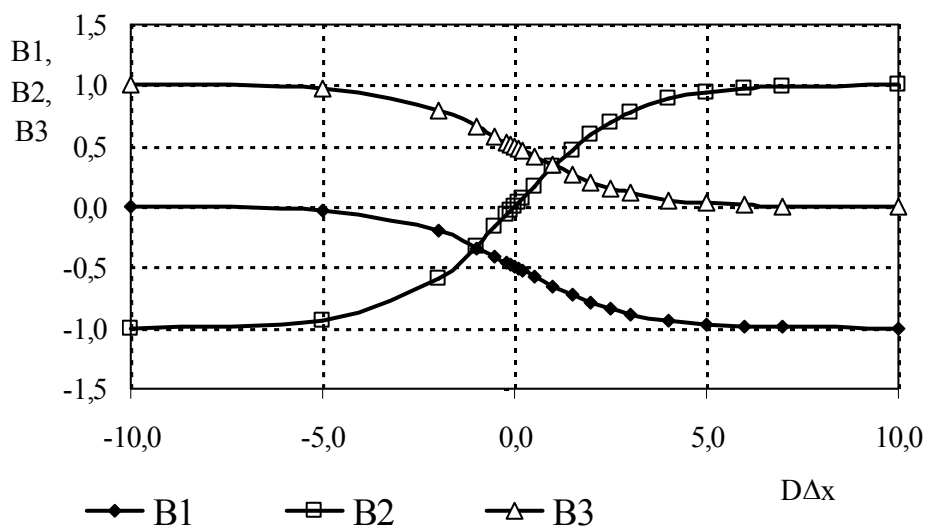


Рис. 6. Зависимость коэффициентов $B1-B3$ от параметра $D\Delta x$

Индексация узлов расчетной сетки для исследования процессов переноса в сухом канале сложного профиля приведена на рис. 7.

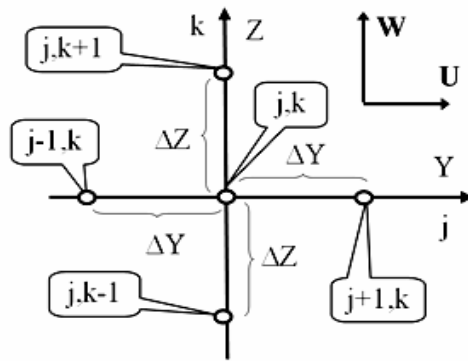


Рис. 7. Схема индексации узлов сетки

Используя приведенные схемы аппроксимации (11), (13) систему уравнений (6)-(8) можно представить в виде (19)-(15). Индексы при коэффициентах A_1-A_3 , B_1-B_3 отражают компоненту вектора скорости (u, w) и координатную ось (y, z). Первая производная по времени отражается неявной схемой.

Уравнение неразрывности (6) приводится к виду (14)

$$U_{j,k} \cdot a_1 + W_{j,k} \cdot b_1 = c_1, \quad (14)$$

где

$$a_1 = \frac{B_{2uy}}{\Delta Y}, \quad b_1 = \frac{B_{2wz}}{\Delta Z},$$

$$c_1 = -\frac{1}{\Delta Y} \cdot (B_{1uy} \cdot U_{j-1,k} + B_{3uy} \cdot U_{j+1,k}) - \frac{1}{\Delta Z} \cdot (B_{1wz} \cdot W_{j,k-1} + B_{3wz} \cdot W_{j,k+1}).$$

Уравнение (7) приводится к виду (15), (16)

$$\left(\frac{\partial^2 U}{\partial Y^2} - D_u \cdot \frac{\partial U}{\partial Y} \right) + \left(\frac{\partial^2 U}{\partial Z^2} - D_w \cdot \frac{\partial U}{\partial Z} \right) = \frac{1}{v \cdot \rho} \cdot \frac{\partial P}{\partial Y} + \frac{1}{v} \cdot \frac{\partial U}{\partial \tau}, \quad (15)$$

где $D_u = U/v$; $D_w = W/v$.

В компактном виде (16)

$$U_{j,k} \cdot a_2 + W_{j,k} \cdot b_2 = c_2, \quad (16)$$

где $a_2 = \frac{A_{2uy}}{(\Delta Y)^2} + \frac{A_{2uz}}{(\Delta Z)^2} / -\frac{1}{v \cdot \Delta \tau}$, $b_2 = 0$.

$$c_2 = -\frac{A_{1uy} \cdot U_{j-1,k} + A_{3uy} \cdot U_{j+1,k}}{(\Delta Y)^2} - \frac{A_{1uz} \cdot U_{j,k-1} + A_{3uz} \cdot U_{j,k+1}}{(\Delta Z)^2} + \frac{P_{j+1,k} - P_{j-1,k}}{2 \cdot v \cdot \rho \cdot \Delta Y} - \frac{U_{j,k}^*}{v \cdot \Delta \tau}.$$

Уравнение (8) приводится к виду (17), (18)

$$\left(\frac{\partial^2 W}{\partial Y^2} - D_u \cdot \frac{\partial W}{\partial Y} \right) + \left(\frac{\partial^2 W}{\partial Z^2} - D_w \cdot \frac{\partial W}{\partial Z} \right) = \frac{1}{v \cdot \rho} \cdot \frac{\partial P}{\partial Z} - \frac{1}{v} \cdot \frac{\partial W}{\partial \tau}. \quad (17)$$

В компактном виде (18)

$$U_{j,k} \cdot a_3 + W_{j,k} \cdot b_3 = c_3, \quad (18)$$

где

$$a_3 = 0, \quad b_3 = \frac{A_{2uy}}{(\Delta Y)^2} + \frac{A_{2uz}}{(\Delta Z)^2} - \frac{1}{v \cdot \Delta \tau},$$

$$c_3 = -\frac{A_{1uy} \cdot W_{j-1,k} + A_{3uy} \cdot W_{j+1,k}}{(\Delta Y)^2} - \frac{A_{1uz} \cdot W_{j,k-1} + A_{3uz} \cdot W_{j,k+1}}{(\Delta Z)^2} + \frac{P_{j,k+1} - P_{j,k-1}}{2 \cdot v \cdot \rho \cdot \Delta Z} - \frac{W_{j,k}^*}{v \cdot \Delta \tau}.$$

Уравнение (9) с использованием трехточечной разностной схемы приводится к расчетной формуле (19)

$$P_{j,k} = \frac{\Delta Z^2 \cdot (P_{j-1,k} + P_{j+1,k})}{2 \cdot (\Delta Z^2 + \Delta Y^2)} + \frac{\Delta Y^2 \cdot (P_{j,k-1} + P_{j,k+1})}{2 \cdot (\Delta Z^2 + \Delta Y^2)} + \frac{\rho \cdot \Delta Z \cdot \Delta Y}{4 \cdot (\Delta Z^2 + \Delta Y^2)} \cdot (U_{j,k+1} - U_{j,k-1}) \cdot (W_{j+1,k} - W_{j-1,k}) - \frac{\rho \cdot \Delta Z \cdot \Delta Y}{4 \cdot (\Delta Z^2 + \Delta Y^2)} \cdot (W_{j,k+1} - W_{j,k-1}) \cdot (U_{j+1,k} - U_{j-1,k}). \quad (19)$$

При моделировании полей компонентов скорости W , U необходимо решить переопределенную систему уравнений (14), (16), (18). Минимизируя функционал δ (20) согласно (21) получим систему уравнений (22), (23)

$$\delta = (U_{j,k} \cdot a_1 + W_{j,k} \cdot b_1 - c_1)^2 + (U_{j,k} \cdot a_2 + W_{j,k} \cdot b_2 - c_2)^2 + (U_{j,k} \cdot a_3 + W_{j,k} \cdot b_3 - c_3)^2. \quad (20)$$

$$\frac{\partial \delta}{\partial U_{j,k}} = 0, \quad \frac{\partial \delta}{\partial W_{j,k}} = 0. \quad (21)$$

$$U_{j,k} \cdot d_1 + W_{j,k} \cdot f_1 = m_1, \quad (22)$$

$$U_{j,k} \cdot f_1 + W_{j,k} \cdot d_1 = m_2. \quad (23)$$

где с учетом $b_2=0$ и $a_3=0$

$$d_1 = a_1^2 + a_2^2, \quad f_1 = a_1 \cdot b_1,$$

$$m_1 = a_1 \cdot c_1 + a_2 \cdot c_2, \quad m_2 = b_1 \cdot c_1 + b_3 \cdot c_3.$$

При моделировании полей давления и скорости требуется согласованное решение уравнений (22), (23), (19).

Алгоритм моделирования заключается в задании в первом приближении значений P, W, U . Затем моделируется выход на установившийся режим течения путем итерационной сшивки решений (22), (23) и (19) при уточнении значений d_1, f_1, m_1, m_2 на каждой итерации.

В дальнейшем для моделирования полей температуры уравнение (10) приводится к виду (24).

$$\left(\frac{\partial^2 T}{\partial Y^2} - D_{Ty} \cdot \frac{\partial T}{\partial Y} \right) + \left(\frac{\partial^2 T}{\partial Z^2} - D_{Tz} \cdot \frac{\partial T}{\partial Z} \right) = D_{T\tau} \cdot \frac{\partial T}{\partial \tau}, \quad (24)$$

где

$$D_{Ty} = \frac{c_p \cdot \rho \cdot U}{\lambda}, \quad D_{Tz} = \frac{c_p \cdot \rho \cdot W}{\lambda}, \quad D_{T\tau} = \frac{c_p \cdot \rho}{\lambda}.$$

При аппроксимации левой части уравнения (24) используются зависимости вида (11). Аппроксимация правой части (24) проводится по неявной разностной схеме. Расчетная формула имеет вид (25)

$$T_{j,k} = \frac{\left(\begin{aligned} & (A_{1ty} \cdot T_{j-1,k} + A_{3ty} \cdot T_{j+1,k}) / (\Delta Y)^2 + \\ & + (A_{1tz} \cdot T_{j,k-1} + A_{3tz} \cdot T_{j,k+1}) / (\Delta Z)^2 - D_{T\tau} \cdot T_{j,k}^{n-1} \end{aligned} \right)}{\left(A_{2ty} / (\Delta Y)^2 + A_{2tz} / (\Delta Z)^2 - D_{T\tau} / \Delta \tau \right)}, \quad (25)$$

где $\Delta Y, \Delta Z, \Delta \tau$ – соответственно шаги по осям Y, Z и во времени.

Полученные поля температуры позволяли определить изменение значений коэффициентов теплообмена по длине канала. Для каждого сечения канала значения температуры на стенках канала T_s принимались одинаковыми.

Рассчитывалось изменение средней температуры воздуха T_{dj} по сечениям канала (26)

$$T_{dj} = \left(\sum_{k=1}^{k_{\max}} T_{j,k} \cdot \Delta Z \right) / \left(\sum_{k=1}^{k_{\max}} \Delta Z \right). \quad (26)$$

В связи со сложной периодической формой стенок канала (рис. 3) проводилось сглаживание изменения средней температуры воздуха по координате Y с использованием метода [6]. При этом автоматически рассчитывались сглаженные значения производной dT_d/dY .

Расчет значений коэффициентов теплообмена α_d для каждого сечения канала с индексом j проводился по зависимости (27)

$$\alpha_{dj} = \frac{\delta_d \cdot v_d \cdot C_{p_d} \cdot \rho_d}{2 \cdot (T_{sj} - T_{dj})} \cdot \left(\frac{dT_d}{dY} \right)_j. \quad (27)$$

Полученные зависимости $Nu=f(Y/\delta)$ для некоторых режимов течения приведены на рис. 8.

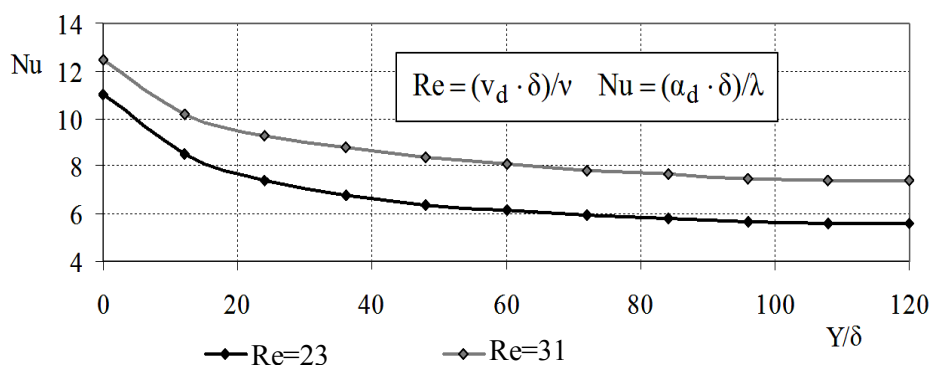


Рис. 8. Зависимость $Nu=f(Y/\delta)$

В первом приближении значения коэффициентов теплообмена в каналах принималось по рекомендациям [3]. При дальнейшем итерационном уточнении результатов моделирования зависимость коэффициентов теплообмена от параметров процесса в расчетных каналах сложного профиля уточнялась с использованием методов, описанных выше и в [22], [23]. При этом учитывалось изменение величин коэффициентов обмена по направлению движения воздуха.

Результаты моделирования охладителя воздуха для рабочих зон. Результаты математического и натурного моделирования процессов в охладителе воздуха, ориентированного на охлаждение рабочих зон, приведены на рис. 9. Линиями отражены результаты математического моделирования. Там же маркерами отмечены результаты натурного эксперимента.

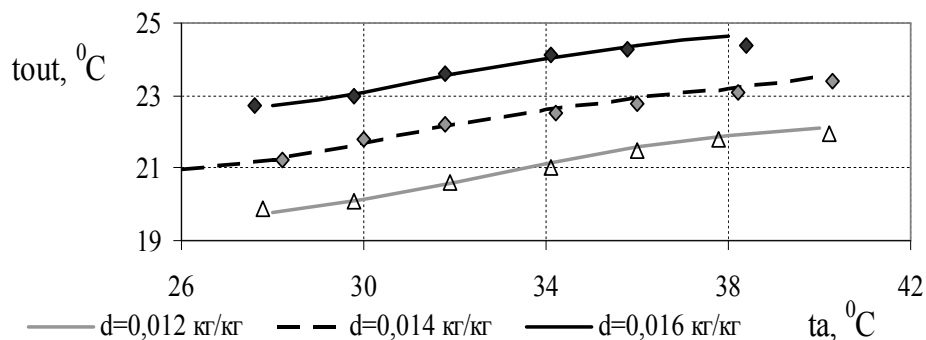


Рис. 9. Результаты математического и натурного моделирования:
 t_a – температура наружного воздуха;
 t_{out} – температура охлажденного воздуха

Сравнение результатов вычислительного и натурного экспериментов показало высокую достоверность информации, получаемой при проведении вычислительного эксперимента.

Выводы и рекомендации. Разработанные методы математического моделирования успешно применялись для исследования процессов в установках косвенного испарительного охлаждения других типов [6].

Математическое моделирование позволяет получать достоверную информацию о процессах, протекающих в установках испарительного охлаждения воздуха, где происходит совокупность взаимосвязанных процессов переноса массы, импульса и концентрации. Поэтому методика компьютерного моделирования может быть использована для моделирования тепло-массообменников различного типа.

Предложенная комбинированная схема потоков воздуха (рис. 1) в охладителе показала свою эффективность и может использоваться в установках для охлаждения воздуха в локальных рабочих зонах. Вариант возможной установки показан на рис. 10.

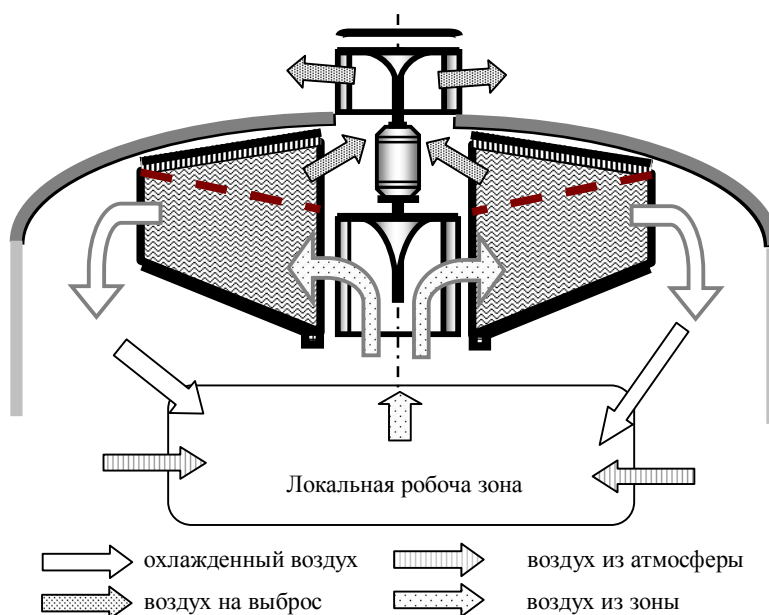


Рис. 10. Схема охлаждения рабочей зоны

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Челабчі В.М. Чисельні методи: Навч. посібник / І.А. Тузова, В.В. Челабчі, В.М. Челабчі. – Одеса: ОНМУ, 2012. – 39 с.
2. Воронец Д.В. Влажный воздух. Термодинамические свойства и применение [Текст] / Д.В. Воронец, Д.Е.Козин. – М.: Энергоиздат, 1984. – 135 с.
3. Справочник по теплообменникам: В 2т. Т.1 [Текст] / Пер.с англ., под ред. Б.С. Петухова, В.К. Шишкова. –М.: Энергоатомиздат, 1987. – 560 с.
4. Patankar S.V. Numerical Heat Transfer and Fluid Flow McGraw-Hill S.V. Patankar [Text]. – Hemisphere Publishing Corporation. – 1980. – 197 p.
5. Челабчи В.В. Численное моделирование течений в каналах [Текст] / В.В. Челабчи, В.Н. Челабчи // Materialy VI Megdynarodowej naukovowi-praktycznej konferencij «Stosowane naukowe opracowania – 2010». – Przenysil: Nauka i studia, 2010. –Vol. 8. – С. 17-22.
6. Chelabchi V.V. Smoothing out of experimental dependences [Text] / V.V. Chelabchi, V.N. Chelabchi // Сб. научн. трудов Sword. – Иваново: МАРКОВА АД, 2013. – Вып. 4. –Т. 5. – С. 47-51.

7. Челабчі В.В. Орієнтація проекту «Повітроохолоджувачі непрямого випарного типу» [Текст] / С.В. Руденко, В.В. Челабчі // Вісник Одеського національного морського університету: Зб. наук. праць. – Одеса: ОНМУ, 2016. – № 2 (48).

Стаття надійшла до редакції 25.04.2017

Рецензенти:

доктор технічних наук, професор кафедри Інформатики Одеського державного екологічного університету **І.О. Чмирь**

кандидат технічних наук, доцент кафедри «Суднові енергетичні установки та технічна експлуатація» Одеського національного морського університету **Л.С. Вітюк**