



УДК 644.1

И.И. Полосин – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой отопления и вентиляции

С.Н. Кузнецов – кандидат технических наук, доцент

А.В. Портянников – инженер

А.В. Дерепасов – инженер

Воронежский государственный архитектурно-строительный университет (ВГАСУ)

ПОСТРОЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОГО ВОЗДУХООБМЕНА ДЛЯ ПОМЕЩЕНИЙ ПРОИЗВОДСТВ С МЕСТНОЙ ВЫТЯЖНОЙ ВЕНТИЛЯЦИЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

АННОТАЦИЯ

Рассмотрена двухмерная модель распространения стационарных воздушных потоков в помещении, основанная на системе стационарных уравнений неразрывности и Навье-Стокса с использованием стандартной k - ϵ модели турбулентности. Математическая модель и алгоритмы ее решения реализованы на ЭВМ в виде программы. Проанализированы результаты расчетов воздухообменов в помещении с местной вытяжной вентиляцией и выбрана наиболее эффективная схема воздухообмена.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: Вентиляция, вредные вещества, распределение воздуха, математическая модель.

I.I. Polosin – doctor of technical sciences, professor, head of Heating and Ventilation department

S.N. Kuznetsov – candidate of technical sciences, associate professor

A.V. Portjannikov – engineer

A.V. Derepasov – engineer

Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering (VSUACE)

CONSTRUCTION OF EFFECTIVE AIR EXCHANGE FOR FACTORY PREMISES WITH LOCAL EXHAUST VENTILATION USING MATHEMATICAL MODEL

ABSTRACT

A two-dimensional model of distribution of stationary air streams in premise based on a system of steady-state equations of continuity and Navier-Stokes using a standard k - ϵ turbulence model has been considered. A mathematical model and algorithms of its solution have been implemented as a computer program. Results of calculations of air exchange in premise with local exhaust ventilation have been analyzed and the most effective air exchange scheme has been selected.

KEYWORDS: Ventilation, harmful substances, distribution of air, mathematical model.

Разработка энергоэффективных схем организации воздухообмена в гальванических цехах требует учета характера движения воздуха в помещении, который зависит от выбранного типа воздухораспределения. Стоимость и трудоемкость исследований воздухообмена в натуральных условиях или на воздушно-тепловых моделях очень высоки, поэтому в настоящее время для решения этой задачи все чаще используется метод математического моделирования [5].

Математическая модель вентиляционного процесса распространения воздуха основана на уравнении неразрывности, системе осредненных по Рейнольдсу стационарных уравнений Навье-Стокса и уравнениях k - ϵ модели турбулентности [1]. Рассмотрим основные уравнения модели.

Уравнение неразрывности:

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \bar{u}_i) = 0, \quad (1)$$

где ρ – плотность воздуха, кг/м³; x_i – i -я пространственная координата, м; u_i – компоненты скорости течения воздуха, м/с.

Уравнения Навье-Стокса:

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \bar{u}_i \bar{u}_j) = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial \bar{u}_k}{\partial x_k} \right) \right) -$$



$$\left. \begin{aligned} & -\delta_{i3}\rho g + \frac{\partial}{\partial x_j}(-\rho \overline{u'_i u'_j}), \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

$$-\rho \overline{u'_i u'_j} = \mu_t \left(\frac{\partial \overline{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{u}_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \left(\rho k + \mu_t \frac{\partial \overline{u}_i}{\partial x_i} \right) \delta_{ij}, \quad (3)$$

где p – давление, Па; μ – динамическая вязкость, кг/м·с; μ_t – турбулентная динамическая вязкость кг/м·с; g – ускорение свободного падения, м/с²; k – кинетическая энергия турбулентности, м²/с²; $j = 1, 2, 3$; δ_{ij} – символ Кронекера.

Перенос кинетической энергии турбулентности в стандартной k -е модели определяется уравнениями:

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_j) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G^k + G^b - \rho \varepsilon, \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_j) &= \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + \rho C_1 S_{ij} \varepsilon - \\ & - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\mu \varepsilon}} + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} C_{3\varepsilon} G^b, \end{aligned} \quad (5)$$

где ε – скорость диссипации энергии турбулентности, м²/с³; C – константы модели турбулентности; μ_t – турбулентная динамическая вязкость, кг/м·с; σ_k и σ_ε – турбулентные числа Прантля для k и ε .

Скорость образования турбулентности:

$$G^k = 2\mu_t \left(\sum_i \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_i} \right)^2 \right) + \mu_t \left(\sum_{i>j} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)^2 \right), \quad (6)$$

$$G^b = \mu_t g \frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial x_3}. \quad (7)$$

Величина C_1 определяется выражением:

$$\begin{aligned} C_1 &= \max \left[0,43, \frac{\eta}{\eta + 5} \right], \\ \eta &= \rho S \frac{k}{\varepsilon}. \end{aligned}$$

Турбулентная динамическая вязкость определяется уравнением:

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}. \quad (8)$$

Константа C_μ определяется выражением:

$$C_\mu = \frac{1}{A_0 + A_s \frac{kU^*}{\varepsilon}},$$

где

$$U^* = \sqrt{S_{ij} S_{ij} + \tilde{\Omega}_{ij} \tilde{\Omega}_{ij}},$$

$$\tilde{\Omega}_{ij} = \Omega_{ij} - 2\varepsilon_{ij},$$

$$\Omega_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \overline{u}_i}{\partial x_j} - \frac{\partial \overline{u}_j}{\partial x_i} \right).$$

Константы A_0 и A_s определяются как:

$$A_0 = 4,04,$$

$$A_s = \sqrt{6} \cos \varphi,$$

где

$$\varphi = \frac{1}{3} \cos^{-1}(\sqrt{6}W),$$

$$W = \frac{S_{ij} S_{jk} S_{ki}}{\tilde{S}},$$

$$\tilde{S} = \sqrt{S_{ij} S_{ij}},$$

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right).$$

Для констант k -е модели турбулентности принимались следующие значения [1]:

$$C_{1\varepsilon} = 1,44; C_{3\varepsilon} = 1,40; C_2 = 1,9; s_k = 1,0; s_\varepsilon = 1,2.$$

Рассматриваются два типа границ: твердые стенки и свободные границы. Скорость и кинетическая энергия турбулентности на границе равны нулю, для давления выполняются условия Неймана. Коэффициент диссипации турбулентной энергии определяется непосредственно функциями пограничного слоя.

На свободной границе давление равно атмосферному, нормальные к свободной поверхности градиенты компонент скорости равны нулю. Граничными условиями для входящего потока будут условия Дирихле со значениями переменных в окружающей среде, а для выходящего потока – условия Неймана.

Для решения системы уравнений (1-8) использован метод конечных разностей с предварительным расщеплением их по физическим процессам [2] и использованием метода фиктивных областей. Подобные методы решения подробно рассмотрены в [2, 3, 4]. Решение строится с помощью двухциклической схемы покомпонентного расщепления с использованием неявной монотонной разностной схемы второго порядка.



Полученные алгоритмы решения уравнений (1-8) реализованы на ЭВМ в виде программы на языке С++.

В настоящее время уже известны подобные программные продукты, разработанные в СПбГАСУ для численного моделирования аэрации корпуса электролиза алюминия, позволяющие установить характер движения воздуха в сечении модуля корпуса. Разработанная нами математическая модель и программа, в отличие от известных, позволяют получить устойчивое решение в зонах больших градиентов скоростей течений воздуха вблизи бортовых отсосов. При помощи разработанной программы изучалось распределение двумерных стационарных воздушных потоков в поперечном сечении цеха с местными отсосами с целью определения влияния способа подачи приточного воздуха на циркуляцию воздушных потоков.

В качестве объекта исследования рассмотрено двумерное сечение цеха бесконечной длины с промышленными ваннами наружных размеров: ширина – 1100 мм и высота – 1000 мм. Ванны размещались в два ряда в поперечном сечении цеха и оборудованы двухсторонним бортовым отсосом. Помещение цеха имеет ширину 18,0 м и высоту 12,0 м. Расчетная кратность воздухообмена составляла 10 ч^{-1} . Температура ограждающих конструкций помещения и приточного воздуха принята равной $18 \text{ }^\circ\text{C}$.

Исследовалось три варианта подачи приточного воздуха на высоте $0,8h$ (9,6 м) от пола:

- плоскими струями с подачей воздуха вертикально вниз;
- плоскими струями с использованием перфорированного воздуховода круглого сечения, с углом раскрытия струи 45° и подачей воздуха вниз;
- плоскими струями с подачей воздуха вертикально вниз по центру помещения и под углом 20° к вертикали по сторонам помещения.

Схемы подачи приточного воздуха приведены на рис. 1.

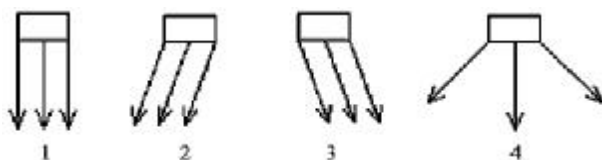


Рис. 1. Схемы подачи приточного воздуха:

- 1 – плоская струя; 2, 3 – плоская струя с подачей воздуха под углом 20° к вертикали;
4 – подача через перфорированный воздуховод

Удаление загрязненного воздуха из помещения цеха осуществлялось бортовыми отсосами от ванн в объеме 90 % от общего количества приточного воздуха и 10 % из верхней зоны через отверстие в перекрытии цеха (см. рис. 2).

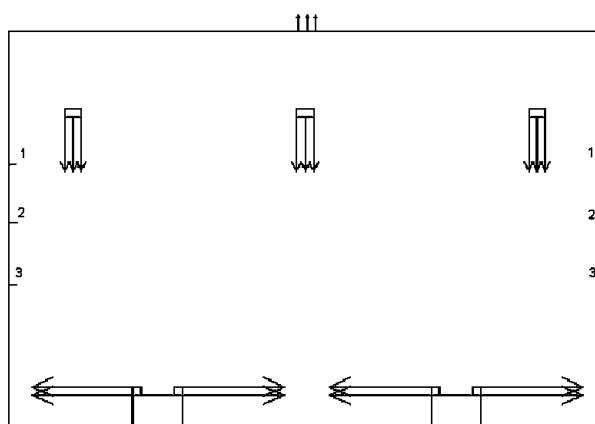


Рис. 2. Схема помещения. Стрелками показаны места подачи и удаления воздуха: 1-1, 2-2, 3-3 – сечения, в которых исследовалась вертикальная составляющая скорости воздуха

Анализ полученных результатов, приведенных на рис. 3-4, позволяет сделать ряд выводов. Поток воздуха от воздухораспределителей движется вниз, взаимодействует с зонами циркуляции и ограждающими конструкциями, отражается от пола, разворачивается и, отдавая часть воздуха местным отсосам, поднимается вверх. Во всех вариантах по обе стороны от нисходящих приточных струй образуются зоны циркуляции. Размер зон циркуляции по горизонтали примерно равен половине расстояния между воздухораспределителями, а по вертикали – высоте установки воздухораспределителей.

Вдоль стен помещения во всех случаях наблюдается низкоскоростной восходящий воздушный поток, направленный к местам удаления воздуха в верхней зоне помещения.

Сравнение двух первых вариантов подачи приточного воздуха показало, что использование плоских струй с подачей воздуха вертикально вниз даёт схожую картину распределения воздушных потоков и скорости движения воздуха, как в объеме помещения, так и в рабочей зоне.

В реальном помещении струи приточного воздуха от воздухораспределителей находятся в условиях стеснения строительными конструкциями и технологическим оборудованием. Воздух вокруг струй находится не в состоянии «покоя», а движется навстречу, в результате чего профиль скоростей струи сильно деформируется. Скорость воздуха на оси струй зависит от типа воздухораспределителя на расстояниях до 4,6 м от воздухораспределителя. При больших расстояниях от воздухораспределителя скорость воздуха на оси струй слабо зависит от типа воздухораспределителя.

Местные отсосы сильно изменяют направление движения струи. Так, при расстоянии от воздухораспределителя 5,6 м отклонение оси струи может достигать 0,7 м, а в рабочей зоне – 2 м. В

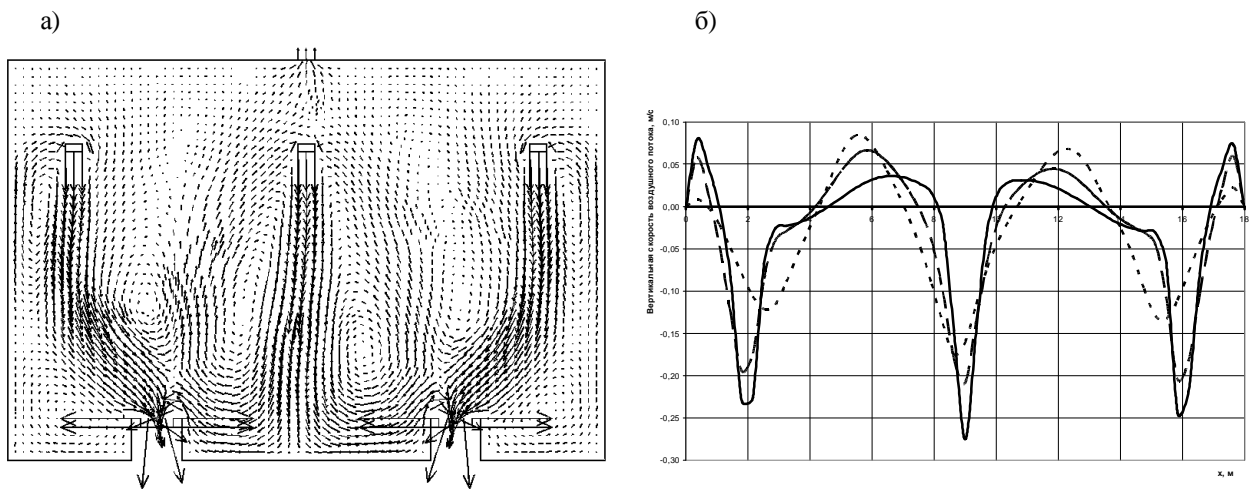


Рис. 3. Подача воздуха плоскими струями вертикально вниз: а) векторное поле скоростей воздушных потоков; б) вертикальная составляющая скорости воздуха: _____ — на высоте 8 м от уровня пола (сечение 1-1); — — — — на высоте 6 м от уровня пола (сечение 2-2); — на высоте 4 м от уровня пола (сечение 3-3)

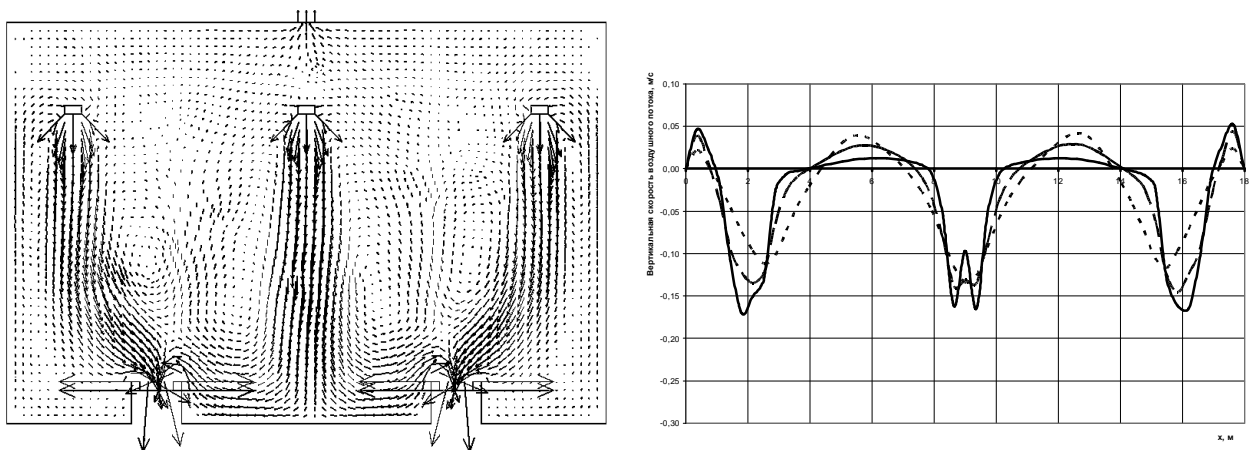


Рис. 4. Подача воздуха через перфорированный воздуховод вертикально вниз: обозначения те же, что и на рис. 3

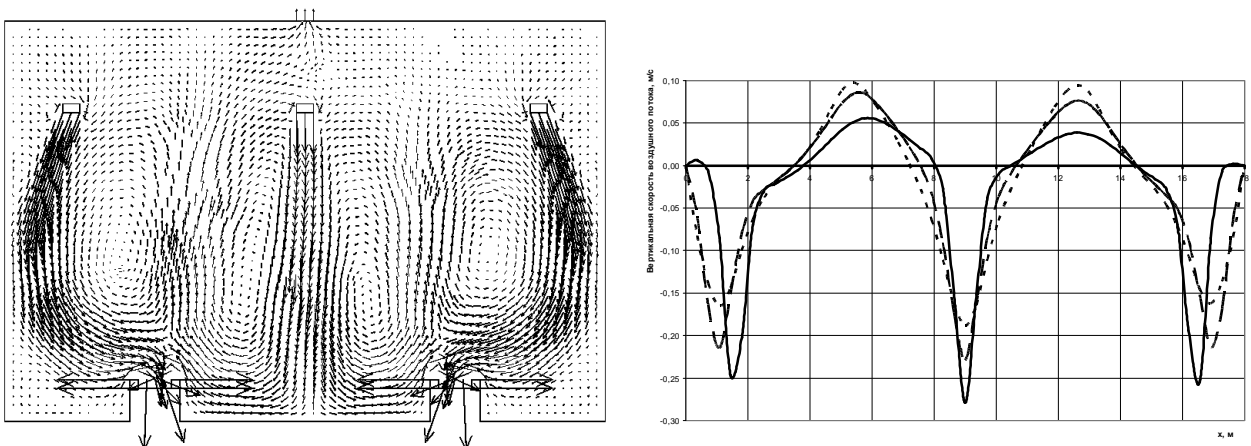


Рис. 5. Подача приточного воздуха плоскими струями вертикально вниз по центру помещения и под углом 20° к вертикали по сторонам помещения: обозначения те же, что и на рис. 3



результате чистый воздух поступает не в рабочую зону, а к местным отсосам и удаляется ими.

Кроме 1 и 2 вариантов, исследовались также другие способы подачи приточного воздуха. Наиболее эффективным оказался вариант с подачей приточного воздуха плоскими струями вертикально вниз по центру помещения и под углом 20° к вертикали по сторонам помещения (см. рис. 5).

Чистый воздух подается на рабочие места и только затем поступает в зону действия местных отсосов. Восходящие потоки находятся над ваннами и выносят вредные вещества из рабочей зоны в верхнюю зону помещения.

Таким образом, установлено, что при взаимодействии со строительными конструкциями и местными отсосами происходит сильная деформация струй. Видимо, корректнее говорить не о струях, а о воздушных потоках.

Для исследования концентрации вредных веществ в рабочей зоне важно знать, как в рабочую зону поступает чистый воздух и как удаляется из нее загрязненный. Первые два варианта создают неэффективный воздухообмен, т.к. чистый воздух удаляется местными отсосами и не поступает в рабочую зону. В третьем случае чистый воздух поступает в рабочую зону и только затем удаляется местными отсосами. Восходящие потоки находятся над ваннами и выносят вредные вещества из рабочей зоны в верхнюю зону помещения.

Предложенный подход позволяет рассчитать и выбрать систему воздушных потоков в помещениях, наиболее эффективно использующую приточный воздух и повысить эффективность действия вентиляции.

Литература

1. Патанкар С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 152 с.
2. Марчук Г.И. Методы вычислительной математики. – М.: Наука, 1977. – 456 с.
3. Иванов М.Я., Крупа В.Г., Нигматулин Р.З. Неявная схема С.К. Годунова повышенной точности для интегрирования уравнений Навье-Стокса // Журнал вычислит. математики и математич. физики, 1989, т. 29, № 6. – С. 888-901.
4. Мелькумов В.Н., Кузнецов И.С. Расчет нестационарного поля концентраций двухкомпонентной газовой смеси // Вестник ВГТУ. Сер. Энергетика, 2006, т. 2, № 6. – С. 125-127.
5. Посохин В.Н., Зиганшин А.М. Численное моделирование конвективных течений над протяженными теплоисточниками // Известия КазГАСУ, 2005, № 1 (3). – С. 136-140.