

Conclusions. It is obvious that in the case of the accident the concentration of the toxic substance will exceed the level of the hitting concentration. This is a real danger for the people living near this Filtration Station.

References

1. Антошкина Л. И. Оценка экологического риска при авариях с химически опасными веществами / Л. И. Антошкина, Н. Н. Беляев, Е. Ю. Гунько. – Днепропетровск, 2008. – 136 с.
2. Берлянд М. Е. Современные проблемы атмосферной диффузии и загрязнения атмосферы / М. Е. Берлянд. – Л., 1975. – 448 с.
7. Методика прогнозування наслідків виливу (викиду) небезпечних хімічних речовин при аваріях на промислових об'єктах і транспорті – Київ, 2001. – 33 с.
3. Бруязцкий Е. В. Теория атмосферной диффузии радиоактивных выбросов / Е. В. Бруязцкий. – Киев, 2000. – 443 с.
10. Hanna S. Hybrid Plume Dispersion Model (HPDM) Improvements and Testing / S. Hanna, J. Chang // College on Atmospheric Boundary Layer and Air Pollution Modelling: 16 May–3 June 1994. № SMR/760–4. – P. 1491–1508.
11. Tirabashi T. Analytical Air Pollution Advection and Diffusion Models / T. Tirabashi // College on Atmospheric Boundary Layer and Air Pollution Modeling. – 16 May–3 June 1994. – № SMR / 760–9.
6. Марчук Г. И. Математическое моделирование в проблеме окружающей среды / Г. И. Марчук. – М., 1982. – 320 с.
8. Самарский А. А. Теория разностных схем / А. А. Самарский. – М., 1983. – 616 с.
4. Гунько Е. Ю. Моделирование загрязнения атмосферы при испарении жидкости из грунта / Е. Ю. Гунько // Вісник Дніпропетр. національного ун-ту залізничного транспорту ім. академіка В. Лазаряна. – 2007. – Вип. 19. – С. 35–39.
5. Гунько Е. Ю. Оценка риска токсичного поражения людей при аварийном выбросе химически опасного вещества / Е. Ю. Гунько // Вісник Дніпропетр. національного ун-ту залізничного транспорту ім. академіка В. Лазаряна. – 2008. – Вип. 20. – С. 87–90.
9. Згуровский М. З. Численное моделирование распространения загрязнения в окружающей среде / М. З. Згуровский, В. В. Скопецкий, В. К. Хрущ, Н. Н. Беляев. – Киев, 1997. – 368 с.

Надійшла до редколегії 18.10.2013.

УДК 519.6

Н. Н. Беляев, Д. О. Затынайченко

*Днепропетровский национальный университет
железнодорожного транспорта им. академика В. Лазаряна*

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ АЭРОИОННОГО РЕЖИМА В РАБОЧЕМ ПОМЕЩЕНИИ

Розроблена двовірсна модель для прогнозу аероіонного режиму у приміщеннях. Модель базується на використанні рівнянь переносу аероіонів та моделі невязкої нестислої рідини. Розв'язання задачі знаходиться за допомогою різницьових схем.

Ключові слова: аероіонний режим, приміщення, чисельне моделювання.

Разработана двухмерная модель для прогноза аэроионного режима в помещениях. Модель базируется на использовании уравнений переноса аэроионов и модели невязкой несжимаемой жидкости. Решение задачи находится с помощью разностных схем.

© Н. Н. Беляев, Д. О. Затынайченко, 2013

Ключевые слова: аэроионный режим, помещения, численное моделирование.

A 2-D model to simulate the ions regime in the rooms was developed. The model is based on the ion dispersion equations and the model of the potential flow. To solve the model equations the difference schemes are used.

Key words: ion dispersion, rooms, numerical simulation.

Введение. Обеспечение необходимого аэроионного режима (АР) в рабочих помещениях (на производстве, в медицинских учреждениях и т.п.) является одной из современных и важных задач в области экологической безопасности [1;2;4;5]. Хорошо известно, что обеспечение нормального АР в помещениях теперь оценивается как один из важнейших факторов, предъявляемых к качеству воздушной среды для человека.

Для обеспечения нормального АР в помещениях необходимо рассчитать концентрацию аэроионов той или иной полярности, как в самом помещении, так и в определенных его частях и, в частности, в рабочих зонах. Известно, что прогноз АР в помещениях на основе физического эксперимента требует много времени на постановку эксперимента, его проведение, на анализ и обработку результатов многократных измерений. Кроме этого современный эксперимент основывается на использовании дорогого оборудования (например, измерителя концентрации ионов *Inti ITC-201A*, производящего измерения каждые 0.5 с, или лазерного измерителя концентрации частиц *Kapomax Geo*) [1]. Также известно, что ошибка измерения количества аэроионов с помощью счетчиков, используемых в Украине, составляет величину порядка 40%, [2]. В этой связи становится очевидным важность создания математических моделей для прогноза АР в помещениях. Кроме того, математические модели не имеют альтернативы на этапе проектирования новых и при реконструкции уже существующих объектов, поскольку на этапе проектирования необходимо выполнить научное обоснование выбранной схемы создания АР в помещениях, которые еще не существуют. Однако, для получения адекватных прогнозных данных возможно применение физически обоснованных математических моделей.

В настоящее время в Украине для прогноза АР в помещениях используются только аналитические модели. Это модели, построенные на основе аналитического решения одномерного уравнения переноса примеси [2;3] или модели, построенные на основе аналитических зависимостей и полуэмпирических формул для свободных турбулентных струй [4;5]. Аналитические модели могут быть использованы для экспресс-прогноза концентрации аэроионов, особенно вблизи источников их эмиссии. Но помещение – это расчетная область, имеющая особенности, делающие расчет рассеивания аэроионов в ней значительно более сложным, чем, например, в атмосфере. Это такие особенности:

1. Наличие оборудования, мебели и т.п. в помещении, причем – часто все это концентрировано на относительно небольшом по длине участке помещения, что создает сложную аэродинамическую картину движения воздушных потоков внутри помещения.

2. Необходимость учета положения отверстий приточно-вытяжной вентиляции в помещении и различный режим его вентилирования.

3. Наличие в помещении «своих» источников эмиссии ионов, что приводит к необходимости учета их влияния на концентрацию аэроионов, которые создаются специально установленными устройствами для создания желаемого аэроионного режима.

В этой связи становится очевидным, что основным препятствием на пути широкого практического применения аналитических моделей для прогноза АР в по-

мещениях является то, что модели данного класса не учитывают конкретную форму помещения, влияние аэродинамики воздушных потоков в помещении на процесс рассеивание ионов. В данных моделях нет учета размещения в помещениях, в рабочих зонах, различного рода препятствий (рис.1). То есть аналитические модели нельзя применять для прогноза аэроионного режима во *всем* помещении или в тех его частях, где размещено оборудование и т.п., оказывающее влияние на аэродинамику воздушных потоков, а значит – на процесс рассеивания аэроионов.

Целью данной работы является разработка эффективной CFD модели для прогноза аэроионного режима в помещениях, позволяющей учитывать при моделировании: положение отверстий приточно-вытяжной вентиляции, режим воздухообмена, размещение оборудования в помещении, его форму, режим эмиссии аэроионов в помещении и пылевое загрязнение воздушной среды в помещении.

Математическая модель распространения аэроионов в помещении. Для расчета рассеивания аэроионов в помещении (как положительных ионов так и отрицательных – ОИ) будем использовать уравнение переноса вида [1;6;7;9]:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial uC}{\partial x} + \frac{\partial vC}{\partial y} = \\ & = \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) - \alpha CB - \beta CD + \\ & + \sum Q_c(t) \delta(x - x_c) \delta(y - y_c), \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial B}{\partial t} + \frac{\partial uB}{\partial x} + \frac{\partial vB}{\partial y} = \\ & = \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_x \frac{\partial B}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_y \frac{\partial B}{\partial y} \right) - \alpha CB - \beta BD + \\ & + \sum Q_B(t) \delta(x - x_B) \delta(y - y_B), \end{aligned} \quad (2)$$

где C, B – концентрация отрицательных и положительных аэроионов, соответственно; u, v – компоненты вектора скорости движения воздушного потока в помещении; $\mu = (\mu_x, \mu_y)$ – коэффициенты диффузии; t – время; α – скорость рекомбинации ионов, имеющих различную полярность; β – скорость рекомбинации ионов с частицами пыли; Q_{C_i}, Q_{B_i} – интенсивность эмиссии отрицательных и положительных ионов в соответствующих точках с координатами (x_c, y_c) и т.д.;

$\delta(x - x_i) \delta(y - y_i)$ и т.п. – дельта-функция Дирака. Ось Y направлена вертикально вверх.

Так как в модели (1), (2) учитывается взаимодействие ионов различной полярности с частицами пыли, то к данным уравнениям добавляется еще одно уравнение – уравнение рассеивания частиц пыли в помещении

$$\begin{aligned}
& \frac{\partial D}{\partial t} + \frac{\partial uD}{\partial x} + \frac{\partial vD}{\partial y} = \\
& = \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_x \frac{\partial D}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_y \frac{\partial D}{\partial y} \right) + \\
& + \sum Q_{Di}(t) \delta(x - x_D) \delta(y - y_D),
\end{aligned} \tag{3}$$

где D – концентрация пылевых частиц.

Обозначение остальных параметров совпадает с аналогичными обозначениями, приведенными для модели (1), (2). Так как рассматривается распространение в помещении пылевых частиц малого размера, то в уравнение переноса (3) не включено слагаемое, отвечающее за гравитационное оседание пылевых частиц.

Постановку граничных условий для уравнений модели (1) – (3) рассмотрим на примере уравнения (1), так как постановка граничных условий для других уравнений модели – аналогична. Для уравнения (1) на стенах комнаты, потолке, полу, а также твердых стенках различных препятствий в помещении (шкафы, стулья и т.п.) ставится граничное условие вида [6;7;9]:

$$\frac{\partial C}{\partial n} = 0,$$

где n – внешняя нормаль к твердой поверхности.

На границе входа воздушного потока в помещение ставится условие:

$$C|_{ent} = C,$$

где C – известное значение концентрации ионов.

На выходе воздушного потока из помещения в дискретной модели ставится «циклическое» граничное условие вида

$$C(i+1, j) = C(i, j),$$

где $i+1, j$ – номер разностной ячейки на выходе из расчетной области.

В начальный момент времени полагается $C=C_0$, где C_0 – заданное значение концентрации ионов в расчетной области (в рассматриваемой ниже задаче, для отрицательных аэроионов – данная величина равна нулю).

Движение воздушной среды в помещении, при работе системы вентиляции, приводит к формированию неравномерного поля скорости воздушной среды. Решение задачи усложняется еще тем, что внутри помещений (как производственных, так и жилых) находятся различные препятствия, например – мебель, оборудование и т.п. Эти препятствия, а также положение приточных и вытяжных отверстий и определяют, в основном, аэродинамику воздушных потоков в помещениях. Поэтому, прежде чем решать задачу прогноза концентрации ионов в помещении, на базе приведенных уравнений, необходимо рассчитать компоненты вектора скорости воздушного потока в помещении с учетом нахождения в помещении препятствий. Эти компоненты вектора скорости должны удовлетворять уравнению неразрывности. Таким образом, необходимо решить гидродинамическую задачу.

Для решения гидродинамической задачи используется модель потенциального течения. Поэтому, для определения значений компонент вектора скорости воздушной среды в помещении следует, первоначально, решить задачу по определению

нию потенциала скорости. Для этого необходимо проинтегрировать уравнение [8; 11]

$$\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} = 0, \quad (4)$$

где P – потенциал скорости.

Для уравнения (4) ставятся следующие граничные условия [5]:

– на твердых стенках: $\frac{\partial P}{\partial n} = 0$, где n – внешняя нормаль к твердой границе;

– на месте расположения приточного отверстия: $\frac{\partial P}{\partial n} = V_n$, где V_n – известное

значение скорости входящего воздушного потока;

– на месте расположения вытяжного отверстия:

$$P = P^*(x = const, y) + const.$$

Для определения компонент вектора скорости воздушной среды используются зависимости [8; 11]

$$u = \frac{\partial P}{\partial x}, \quad v = \frac{\partial P}{\partial y}.$$

Численное интегрирование уравнений модели. Для численного интегрирования уравнений модели используется прямоугольная разностная сетка. Для численного интегрирования уравнения (4) используется идея установления решения по времени, поэтому численно интегрируется следующее уравнение

$$\frac{\partial P}{\partial \eta} = \frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2}, \quad (5)$$

где η – фиктивное время. При $\eta \rightarrow \infty$ решение уравнения (5) будет стремиться к «установлению», то есть к решению уравнения (4).

Для численного интегрирования уравнения (5) используется неявная схема суммарной аппроксимации [10]. В этом случае, процесс интегрирования разбивается на два шага. Разностные уравнения на каждом дробном шаге имеют вид:

$$\frac{P_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} - P_{i,j}^n}{\Delta t} = \left[\frac{-P_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + P_{i-1,j}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta x^2} \right] + \left[\frac{-P_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + P_{i,j-1}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta y^2} \right],$$

$$\frac{P_{i,j}^{n+1} - P_{i,j}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta t} = \left[\frac{P_{i+1,j}^{n+1} - P_{i,j}^{n+1}}{\Delta x^2} \right] + \left[\frac{P_{i,j+1}^{n+1} - P_{i,j}^{n+1}}{\Delta y^2} \right].$$

Величина $P_{i,j}$ определяется в центре каждой разностной ячейки. На каждом шаге расщепления расчет идет по явной формуле – методу бегущего счета [10].

После расчета поля потенциала скорости осуществляется расчет компонент вектора скорости потока на сторонах разностных ячеек:

$$u_{ij} = \frac{P_{i,j} - P_{i-1,j}}{\Delta x};$$

$$v_{ij} = \frac{P_{i,j} - P_{i,j-1}}{\Delta y}.$$

Перед началом численного интегрирования уравнения (5) задается поле потенциала скорости для «начального» момента фиктивного времени.

Принцип интегрирования уравнений переноса (1)–(3) рассмотрим на примере уравнения (1). На дифференциальном уровне выполняется расщепление данного уравнения переноса на три шага [6]:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial u C}{\partial x} + \frac{\partial v C}{\partial y} = 0,$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_y \frac{\partial C}{\partial y} \right),$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \sum Q_c(t) \delta(r - r_c) - \alpha C B - \beta C D,$$

где $r_c = (x_c, y_c)$ – координаты источника выброса примеси.

Здесь первое уравнение описывает процесс переноса примеси под действием направленного движения воздушного потока, второе уравнение – перенос под действием диффузии, а третье – изменение концентрации примеси под действием источников (стоков).

Для численного интегрирования первых двух уравнений данной системы используется попеременно-треугольная разностная схема [6;7]. При использовании этой схемы неизвестное значение концентрации ионов и пыли на каждом шаге определяется по явной формуле «бегущего счета».

На следующем расчетном шаге определяется значение концентрации на верхнем временном слое под действием источников (стоков) на базе зависимости

$$\frac{C_{ij}^{n+1} - C_{ij}^n}{\Delta t} = \sum Q_c(t) \delta(r - r_c) - \alpha C_{ij}^n B_{ij}^n - \beta C_{ij}^n D_{ij}^n.$$

В разработанном коде расчет каждого шага расщепления реализован в виде отдельной подпрограммы.

Формирование вида расчетной области. Для формирования вида расчетной области – формы комнаты и размещения в ней оборудования, мебели и т.п. используется метод фиктивных областей (техника «porosity technique»), [6;7]. Для задания в численной модели положения отверстий приточно-вытяжной вентиляции, места эмиссии ионов или пыли используется метод маркирования [6;7]. Формирование вида расчетной области пользователь осуществляет в файле исходных данных. Изменение вида расчетной области не требует внесения изменения в разработанный код.

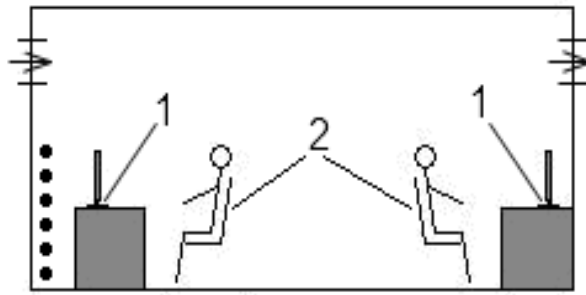


Рис. 1. Схема расчетной области: 1 – электронное оборудование – источник эмиссии положительных ионов; 2 – рабочее место (стул);
 ■ – место эмиссии пыли

Исходные данные для проведения CFD моделирования. Для практической реализации построенной CFD модели необходимо задать:

- форму помещения;
- размещение мебели, оборудования (или других объектов) в помещении.
- положение приточных и вытяжных отверстий вентиляции.
- скорость воздушного потока на выходе из приточного отверстия.
- значение коэффициентов диффузии.
- концентрацию отрицательных ионов на выходе из приточного отверстия вентиляции.
- положение и интенсивность других источников эмиссии ионов, пыли в помещении.

Задание исходных данных осуществляется в файле исходных данных типа «DAT».

Алгоритм расчета. Проведение вычислительного эксперимента на базе разработанной численной модели осуществляется в такой последовательности:

1. Вводится исходная информация, касающаяся физической постановки задачи (форма помещения и т.п.).
2. Осуществляется расчет уравнения для потенциала скорости.
3. Рассчитывается поле скорости воздушного потока в помещении.
4. Выполняется расчет рассеивания отрицательных, положительных аэроионов и пыли в помещении и процесс их взаимодействия.
5. Осуществляется печать результатов моделирования (концентрация отрицательных аэроионов и т.д.) как для всего помещения, так и для отдельной части помещения – по желанию пользователя.

Результаты вычислительного эксперимента. Разработанная CFD модель была применена для решения задачи о прогнозе аэроионного режима в рабочем помещении. Схема расчетной области – помещения, в котором моделируется аэроионный режим, показана на рис.1. Поступление отрицательных ионов в помещение происходит с приточным воздухом, то есть в системе вентиляции установлено оборудование, осуществляющее генерацию отрицательных ионов. С воздушным потоком в помещение поступают отрицательные ионы, с концентрацией $5 \cdot 10^9$ частиц/м³. В помещении имеется два рабочих места для персонала (рис.1, поз.2 – стул, рядом стол). Следует подчеркнуть, что данные элементы мебели, их форма, размещение – учитываются в численной модели. В рабочей зоне (рис.1, позиция 1 – стол с электронным оборудованием) происходит эмиссия положительных ионов с интенсивностью $5 \cdot 10^9$ частиц /с. Полагается, что

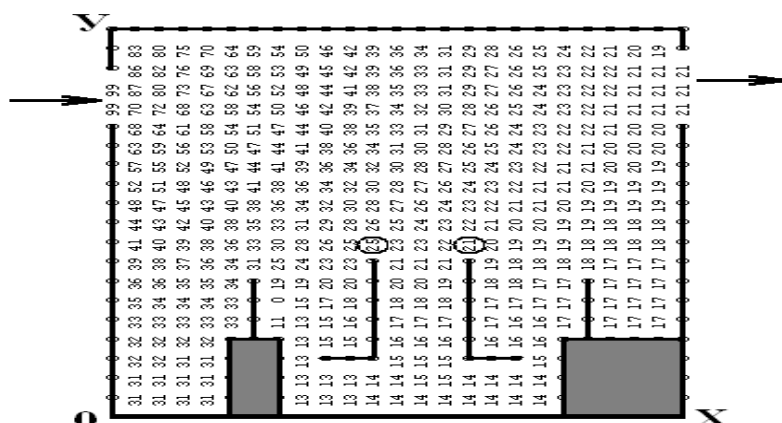
на левой стенке помещения имеет место постоянный выброс пыли в количестве $6 \cdot 10^4$ частиц/с (данная зона условно показана точками на рис. 1). Дополнительные параметры задачи: размеры расчетной области $6 \text{ м} \times 4.8 \text{ м}$; $\alpha = 1.5 \times 10^{-12} \text{ м}^3/\text{с}$, $\beta = 1 \times 10^{-12} \text{ м}^3/\text{с}$ [1], коэффициенты турбулентной диффузии по всем направлениям приняты равными $0.3 \text{ м}^2/\text{с}$, скорость входа воздушного потока через приточное отверстие вентиляции равна 1.3 м/с . Рассматриваются два варианта организации воздухообмена в помещении:

1-й вариант – приточное отверстие вентиляции расположено на левой стенке помещения.

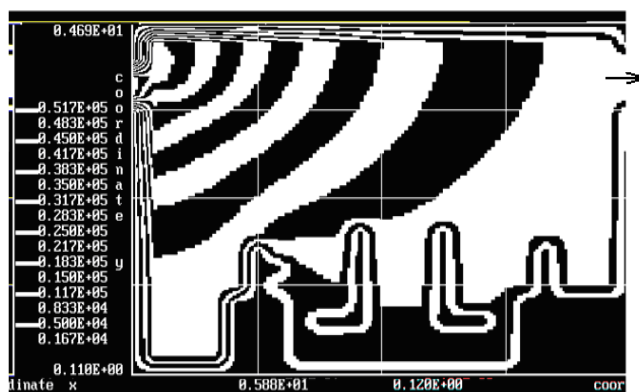
2-й вариант – приточное отверстие расположено на потолке помещения.

В обоих вариантах вытяжное отверстие вентиляции располагается на правой стенке.

Рассмотрим результаты CFD моделирования на базе разработанной численной модели. На рис. 2, 3 представлено распределение концентрации отрицательных ионов внутри помещения для рассматриваемых вариантов воздухообмена.



а)



б)

Рис. 2. Распределение концентрации отрицательных аэроионов в помещении (вариант 1: приточное отверстие вентиляции расположено на левой стенке помещения): а) – поле концентрации; б) – изолинии концентрации ($C \cdot 10^{-5}$)

Результаты расчета представлены в виде изолиний концентрации и матрицы значения концентрации. Здесь, на матрицах, значение концентрации представлено в безразмерном виде: каждое число – это величина концентрации в процентах от величины максимальной (в данном случае – входной) концентрации. Вывод на печать чисел осуществлен по формату «целое число», т.е. дробная часть числа не выдается на печать. Это значит, что если, например, в какой-то точке расчетное значение концентрации составляет «15.84%» от концентрации на входе в помещение, то на печать будет выведено число «15». Такой вывод результатов на печать эффективен при проведении серийных расчетов, когда осуществляется «перебор» различных вариантов с целью выбора наиболее оптимального для конкретной ситуации. Указанное представление результатов расчета в виде «целых» чисел позволяет очень быстро анализировать информацию относительно величины концентрации аэроионов (или других параметров) в любой части помещения – в рабочей зоне, возле оборудования, отверстий вентиляции и т.п. По требованию пользователя, разработанный код осуществляет вывод на печать результатов по формату «действительное число», то есть с сохранением дробной части числа.

Из представленных рисунков хорошо видно, что изменение места поступления воздушного потока в помещение влияет на картину распределения концентрации аэроионов в помещении.

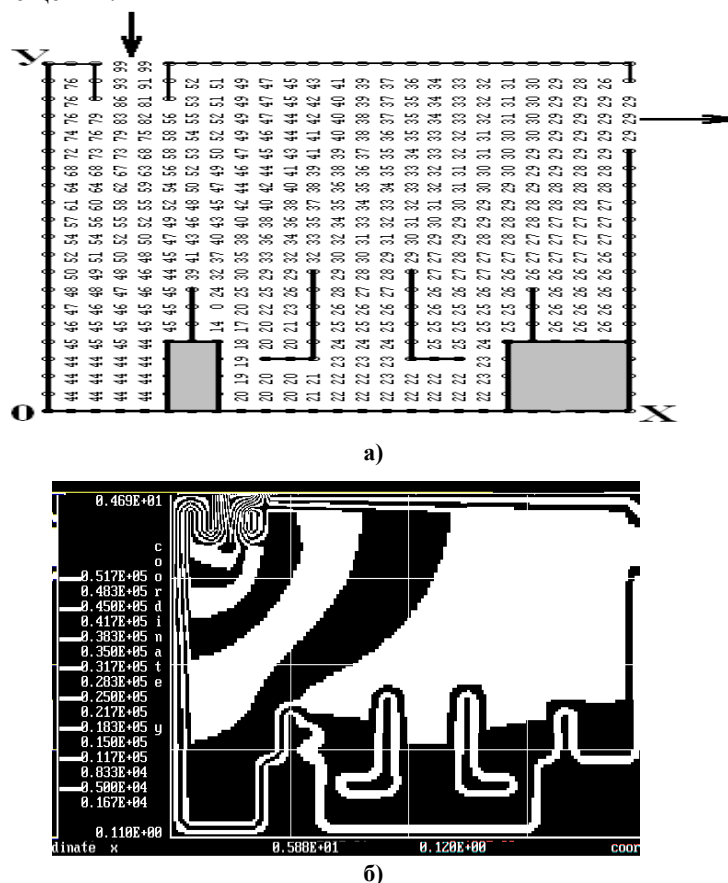


Рис. 3. Распределение концентрации отрицательных аэроионов в помещении (вариант 2: приточное отверстие вентиляции расположено на потолке помещения): а) – поле концентрации; б) – изолинии концентрации ($C \cdot 10^{-5}$)

На последующих рисунках приведено распределение концентрации положительных аэроионов и пыли в помещении для второго варианта задачи.

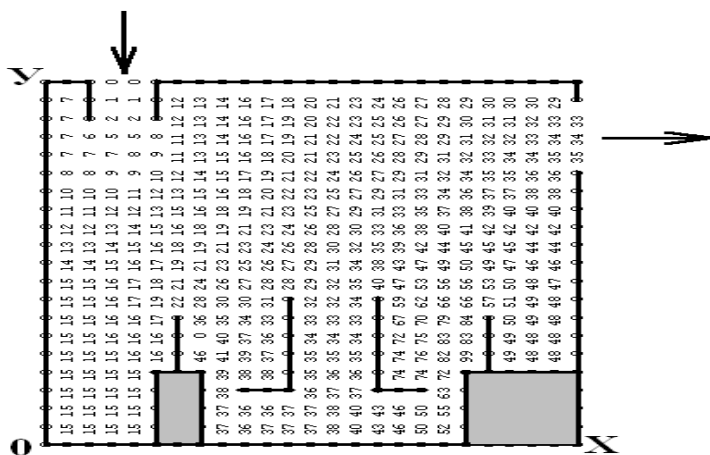


Рис. 4. Распределение концентрации положительных аэроионов в помещении (приточное отверстие вентиляции расположено на потолке помещения, $V_{\max}=0.45 \cdot 10^4$)

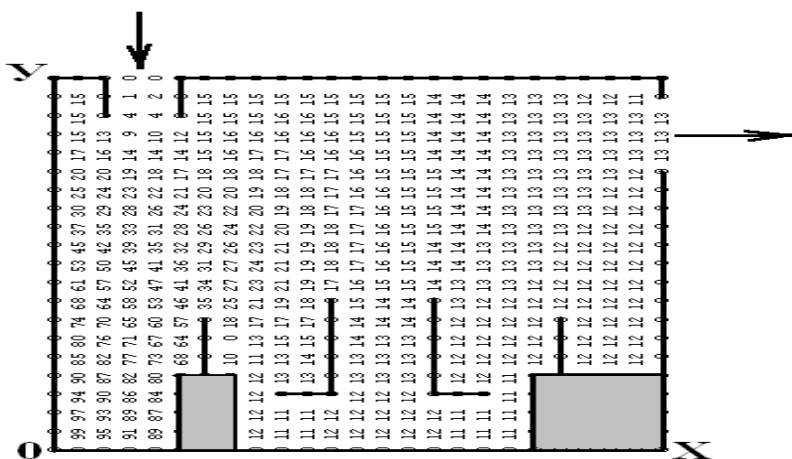


Рис. 5. Распределение концентрации пыли в помещении (приточное отверстие вентиляции расположено на потолке помещения, $D_{\max}=0.31 \cdot 10^6$)

Особый интерес представляет прогноз аэроионного режима в помещении в тех зонах, где находится персонал. С помощью разработанной модели имеется возможность выполнять такой прогноз. Например, для оценки аэроионного режима выберем позицию над спинкой стула, то есть там, где находится голова работника. Эта зона на рис. 2 условно представлена над спинкой стула в виде «кружка». Как видно из представленных данных, для первого варианта вентиляции помещения (подача воздуха происходит через отверстие на левой стенке), концентрация ОИ над первым стулом составит величину порядка 25 %, а над вторым стулом – порядка 21 % от концентрации ионов на входе в помещение. Аналогично для второго варианта вентиляции помещения (подача воздуха осуществляется на потолке), концентрация ОИ над первым стулом составит величину порядка 32 %, а над вторым стулом – порядка 29 %. То есть, для второго режима вентиляции концентрация отрицательных ионов больше для рассматриваемой зоны.

В заключение отметим, что расчет одного варианта задачи на базе разработанной CFD модели составляет 5 с компьютерного времени.

Выводы. В работе рассмотрена новая CFD модель для расчета аэроионного режима в помещениях. Расчет рассеивания аэроионов основывается на решении двух задач: первая задача – гидродинамическая (расчет поля скорости воздушного потока в помещении при выбранном режиме вентиляции), вторая задача – расчет транспорта аэроионов в помещении. Особенностью построенной CFD модели является то, что она позволяет учесть при моделировании особенности помещений – размещение в них мебели, положения приточных и вытяжных отверстий вентиляции и т.п. При этом для расчета требуется несколько секунд времени на ПК. Это является крайне важным при проведении серийных расчетов. Разработанная CFD модель может служить эффективным инструментом решения задач по определению оптимального аэроионного режима в производственных, жилых и общественных помещениях. Дальнейшее развитие модели следует проводить в направлении создания пространственной численной модели прогноза аэроионного режима в помещениях.

Библиографические ссылки

1. **Fletcher L.A.** Air ion behavior in ventilated rooms / L.A. Fletcher, C.J. Noakes, P.A. Sleight, C.B. Beggs, S.J. Shepherd // Indoor and uilt Environment. – 2008. –17 (2). – P. 173 – 182.
2. **Запорожец О.І.** Принципи моделювання динаміки аероіонного складу повітря у приміщеннях / О.І. Запорожец, В.А. Глива, О.В. Сидоров // Вісник НАУ. – 2011, №2. – С. 120 – 124.
3. **Бахрушин В.Е.** Моделирование распределения концентрации ионов вблизи ионизатора / В.Е. Бахрушин, М.А. Игнашина, Д.В. Вертинский, А.Ю. Евсюков // Складні системи та процеси. – 2002. – №1. – С. 30 – 36.
4. **Толкунов И.А.** Теоретическое исследование процессов переноса аэроионов в потоках воздуха в помещениях специального назначения МЧС Украины / И.А. Толкунов, И.И. Попов, В.В. Барбашин // Проблеми надзвичайних ситуацій. 2010. – Вип. 11. – С.137 – 145.
5. **Толкунов И.А.** Біполярна іонізація повітряного середовища приміщень функціональних підрозділів мобільного госпіталю МНС / И.А. Толкунов И.А. // Проблеми надзвичайних ситуацій. – 2011. – Вип. 14. – С.161 – 170.
6. **Антошкина Л.И.** Оценка экологического риска при авариях с химически опасными веществами / Л.И. Антошкина, Н.Н. Беляев, Е.Ю. Гулько // Днепропетровск. – 2008. – 132 с.
7. **Згуровский М. З.** Численное моделирование распространения загрязнения в окружающей среде / М. З. Згуровский, В. В. Скопецкий, В. К. Хрущ, Н. Н. Беляев. – Киев, 1997. – 368 с.
8. **Лойцянский Л. Г.** Механика жидкости и газа / Л. Г. Лойцянский. – М., 1978. – 735с.
9. **Марчук Г. И.** Математическое моделирование в проблеме окружающей среды / Г.И. Марчук. – М., 1982. – 320 с.
10. **Самарский А. А.** Теория разностных схем / А.А. Самарский. – М., 1983. – 616 с.
11. **Гуревич М.И.** Теория струй идеальной жидкости / М.И. Гуревич. – М., 1979. – 536 с.

Надійшла до редколегії 18.10.2013.