

- запускать процесс решения задачи минимизации;
- просматривать результаты решения в виде текста.

**Выводы.** В составе пакета программ численного моделирования процессов гидродинамики и теплообмена в теплонапряженных охлаждающих трактах с переменной массой охладителя разработан программный инструмент для обработки и представления информации о термодинамических и теплофизических свойствах теплоносителей и материалов. Разработанная методика и ее программная реализация позволяют получать аналитические формулы, с удовлетворительной точностью аппроксимирующие табличные данные от нескольких параметров. Разработанный программный инструмент может использоваться автономно при решении подобного рода задач в любой области.

#### Список литературы

1. Химмельблау Д. Прикладное нелинейное программирование. – М.: Мир, 1975. – 536 с.

*Рекомендовано до публікації д.т.н. Мецераковим Л.І.  
Надійшла до редакції 11.11.13*

УДК 519.6:504.3.054

© Н.Н. Беляев, Д.О. Затынайченко

## **АНАЛИЗ АЭРОИОННОГО РЕЖИМА В ПОМЕЩЕНИИ НА БАЗЕ CFD МОДЕЛИ**

Разработана численная модель для моделирования распространения ионов в помещении. Модель базируется на уравнении потенциального течения и уравнении массопереноса. Приводятся результаты вычислительного эксперимента.

Розроблено чисельну модель для моделювання поширення іонів в приміщенні. Модель базується на рівнянні потенціальної течії та рівнянні масопереносу. Наводяться результати обчислювального експерименту.

A numerical model was developed to simulate the air ions dispersion in the rooms. The model is based on the equation of the potential flow and equation of the mass transfer. The results of the numerical experiments are presented.

**Вступление.** Как известно, для обеспечения нормального микроклимата на рабочих местах необходимо, чтобы в рабочих зонах была определенная концентрация аэроионов [1,2,4,5]. Поэтому необходимо заранее уметь предопределять концентрацию аэроионов как во всем помещении, так и в рабочих зонах, с целью обеспечения требуемых параметров микроклимата. Решение данной задачи может быть найдено с помощью метода математического моделирования. Для практики важно иметь математические модели, позволяющие прогнозировать аэроионный режим (АР) в помещениях с учетом основных физических факторов, влияющих на процесс рассеивания аэроионов в помещении.

**Анализ публикаций.** В настоящее время, в Украине, расчет рассеивания аэроионов в помещениях осуществляется на базе аналитических моделей. Это модели построены на основе аналитического решения одномерного уравнения переноса примеси [2,3] или на основе аналитических зависимостей и полуэмпирических формул, полученных для свободных турбулентных струй [4,5]. Аналитические модели позволяют оперативно рассчитать концентрацию аэроионов в помещениях. Однако данные модели не учитывают следующие факторы:

1. Размещение в помещениях мебели, оборудования и других препятствий влияющих на формирование поля скорости воздушного потока в помещении, а значит – на распределение аэроионов в нем.

2. Различное положение отверстий приточно-вытяжной вентиляции в помещении и режим вентилирования помещения.

3. Присутствие в помещении не только специальных ионизаторов воздуха, но и иных источников эмиссии ионов, что приводит к необходимости учета их влияния на концентрацию аэроионов.

**Целью** работы является создание CFD модели для прогноза аэроионного режима в помещениях, и позволяющей при моделировании учитывать: 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.

**Уравнения модели.** Для расчета переноса аэроионов в помещении (как положительных ионов так и отрицательных - ОИ) будем использовать уравнение переноса [1,6,7]

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

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

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;  $\alpha$  – скорость рекомбинации ионов, имеющих различную полярность;  $\beta$  – скорость рекомбинации ионов с частицами пыли;  $Q_{Ci}$ ,  $Q_{Bi}$ , – интенсивность эмиссии отрицательных и положительных ионов в соответствующих точках с координатами  $x_{ci}$ ,  $y_{ci}$  и т.д.;  $\delta(x - x_i) \delta(y - y_i)$  и т.п. – дельта-функция Дирака. Ось  $Y$  направлена вертикально вверх.

В уравнениях (1), (2) учитывается взаимодействие ионов различной полярности с частицами пыли, поэтому к данным уравнениям добавляется еще одно уравнение – уравнение рассеивания частиц пыли в помещении

$$\frac{\partial D}{\partial t} + \frac{\partial uD}{\partial x} + \frac{\partial vD}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu_x \frac{\partial D}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu_y \frac{\partial D}{\partial y} \right) + \sum Q_{Di}(t) \delta(x - x_{Di}) \delta(y - y_{Di}), \quad (3)$$

где  $D$  – концентрация пылевых частиц.

Обозначение остальных параметров в данном уравнении совпадает с аналогичными обозначениями, приведенными для уравнений (1), (2). Поскольку 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), т.к. 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]:

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

где  $n$  – единичный вектор внешней нормали 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).

Поскольку работа системы вентиляции, приводит к формированию неравномерного поля скорости воздушной среды внутри помещения, что крайне усложняет теоретическое решение задачи. Внутри помещений 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 расчета поля скорости воздушного потока в помещении необходимо решить гидродинамическую задачу. Для решения этой задачи используется модель потенциального течения. В этом случае для определения значений компонент вектора скорости воздушной среды в помещении следует, первоначально определить потенциал скорости. С этой целью необходимо проинтегрировать уравнение [8]:

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

где  $P$  – потенциал скорости.

Для уравнения (4) ставятся следующие граничные условия [6,7,8]:

- на твердых стенках:  $\frac{\partial P}{\partial n} = 0$ , где  $n$  – единичный вектор внешней нормали

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]:

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

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

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

здесь  $\eta$  - фиктивное время.

При  $\eta \rightarrow \infty$  решение уравнения (5) будет стремиться к «установлению», т.е. к решению уравнения (4).

Для численного интегрирования уравнения (5) используется неявная схема суммарной аппроксимации [9].

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. Для численного интегрирования уравнений переноса (1-3) применяется их физическое расщепление на три шага. На первом шаге расщепления учитывается процесс переноса примеси под действием направленного движения воздушного потока, на втором шаге учитывается перенос под действием диффузии, а третье уравнение учитывает изменение концентрации примеси под действием источников (стоков). Для интегрирования полученных уравнений используется неявная попеременно – треугольная разностная схема [6,8]. В разработанном коде расчет каждого шага расщепления реализован в виде отдельной подпрограммы.

**Формирование вида расчетной области.** Формирование вида расчетной области (рис.1), т.е. формы помещения и размещения в нем оборудования, мебели и т.п. осуществляется с помощью метода фиктивных областей [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.

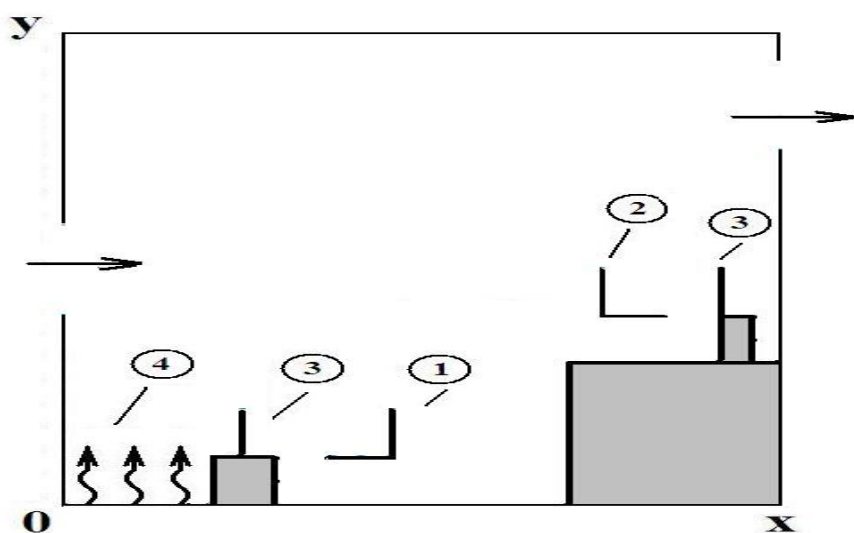


Рис.1. Схема расчетной области: 1 – первое рабочее место (стул); 2 – второе рабочее место (стул); 3 – источник эмиссии положительных ионов; 4 – место эмиссии пыли

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

1. Форму помещения.
2. Размещение мебели, оборудования (или других объектов) в помещении.
3. Положение приточных и вытяжных отверстий вентиляции.
4. Скорость воздушного потока на выходе из приточного отверстия.
5. Значение коэффициентов диффузии.
6. Концентрацию отрицательных ионов на выходе из приточного отверстия вентиляции.
7. Положение и интенсивность других источников эмиссии ионов, пыли в помещении.

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

**Результаты вычислительного эксперимента.** Разработанная численная модель была применена для решения задачи о прогнозе АР рабочем помещении, где находятся два рабочих места. Схема расчетной области – помещения, в котором моделируется аэроионный режим, показана на рис.1. Помещение име-

ет особенность – второе рабочее место находится на высоте относительно пола помещения. Будем говорить, что это рабочее место находится на втором уровне. В каждой рабочей зоне (рис.1, позиция 3) происходит эмиссия положительных ионов с интенсивностью  $3 \cdot 10^4$  частиц /с. Поступление отрицательных ионов в помещение происходит с приточным воздухом, т.е. в системе вентиляции установлено оборудование, осуществляющее генерацию отрицательных ионов. Приточное отверстие размещено на середине левой стены. С воздушным потоком в помещение поступают отрицательные ионы, с концентрацией  $C_0=174 \cdot 10^7$  частиц/  $m^3$ . Полагается, что на полу, возле левой стенки помещения имеет место постоянный выброс пыли в количестве  $6 \cdot 10^6$  частиц/с (данная зона условно показана волнистыми стрелками на рис.1). Остальные параметры задачи таковы: размеры расчетной области  $6.25m \cdot 12.3m$ ;  $\alpha=1,5 \times 10^{-12} m^3/c$ ,  $\beta=1 \times 10^{-12} m^3/c$  [1], коэффициенты турбулентной диффузии по всем направлениям приняты равными  $0.4m^2/c$ , скорость входа воздушного потока через приточное отверстие вентиляции равна  $1.8 m/c$ .

Результаты CFD моделирования на базе разработанной численной модели представлены ниже. На рис. 2 показано распределение концентрации отрицательных ионов внутри помещения. Результаты расчета представлены в виде

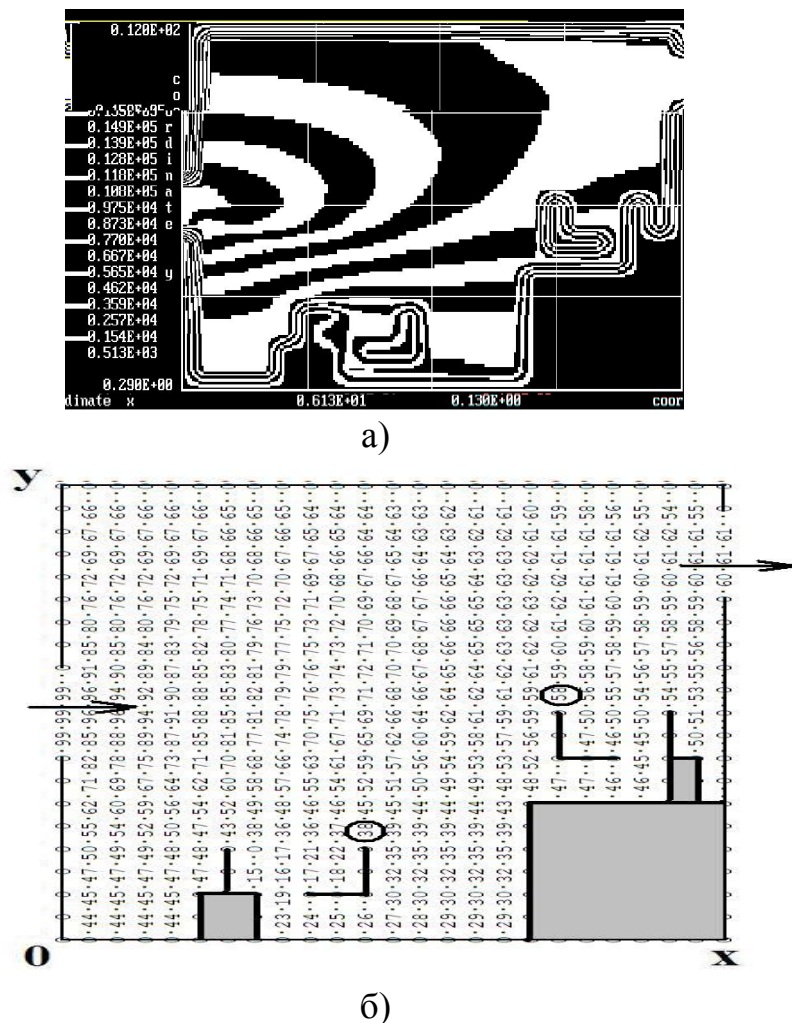


Рис.2. Распределение концентрации отрицательных аэроионов в помещении:  
 а) – изолинии концентрации ( $C \cdot 10^{-5}$ ); б) - поле концентрации.

изолиний концентрации и матриц 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. По требованию пользователя, разработанный код осуществляет вывод на печать результатов по формату *действительное число*, т.е. с сохранением дробной части числа.

Из рисунка 2 видно, что картина распределения отрицательных аэроионов в помещении условно делится на три подзоны – это две подзоны вблизи рабочих мест, где на характер распределения аэроионов основное влияние оказывает мебель и третья подзона – в середине помещения, где нет препятствий для движущегося воздушного потока.

Как известно, практический интерес представляет прогноз аэроионного режима в помещении в тех зонах, где находится персонал и органы дыхания работников. Для оценки аэроионного режима выбрана позиция над спинками стульев, т.е. там, где находится голова работника. Эта зона на рис.2,б условно представлена в виде «кружка». Результаты расчета концентрации отрицательных аэроионов для каждой такой зоны представлены в табл.1. В таблице также приведены значения скорости воздушного потока для каждой зоны, поскольку известно, что в рабочей зоне данная величина должна быть ограничена по величине для создания комфортных условий для работника.

Таблица 1

Концентрация отрицательных аэроионов в зоне дыхания работника и скорость воздушного потока в этой зоне (первый вариант задачи).

Рабочее место	Концентрация отрицательных аэроионов, частиц/м <sup>3</sup>	Скорость воздушного потока, м/с
Первое рабочее место	$5.99 \cdot 10^8$	0.167
Второе рабочее место	$9.04 \cdot 10^8$	0.580

Если принять во внимание, что минимальная концентрация отрицательных аэроионов составляет величину порядка  $6 \cdot 10^8$  частиц/м<sup>3</sup>, а нижняя граница их оптимальной концентрации равна  $30 \cdot 10^8$  частиц/м<sup>3</sup>, то видно, что на обоих рабочих местах, в зоне дыхания работников имеет место достаточная концентрация отрицательных аэроионов. Но с другой стороны, из таблиц видно, что скорость воздушного потока на втором рабочем месте значительно больше рекомендуемой величины – 15 – 20 см/с. Это объясняется «поджатием» воздушного потока, т.е. уменьшением размеров поперечного сечения потока в этом месте, а, следовательно, увеличением скорости потока. Для снижения величины скорости в этом месте установим экран перед стулом (рис.3, позиция 4) и расчетным путем определим влияние этого экрана на величину скорости воздушного потока на втором рабочем месте. Высота экрана 2.9м.

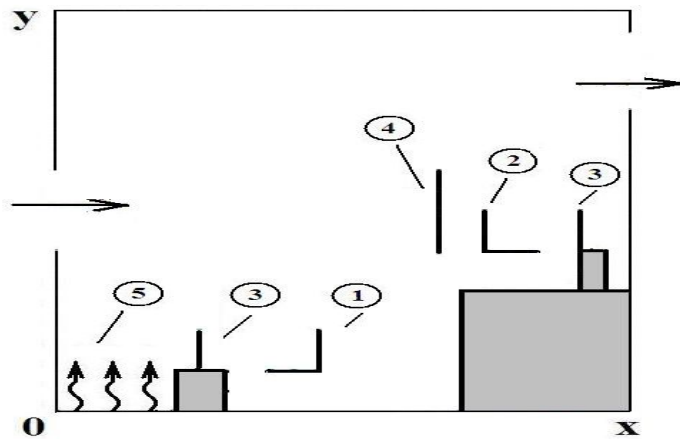
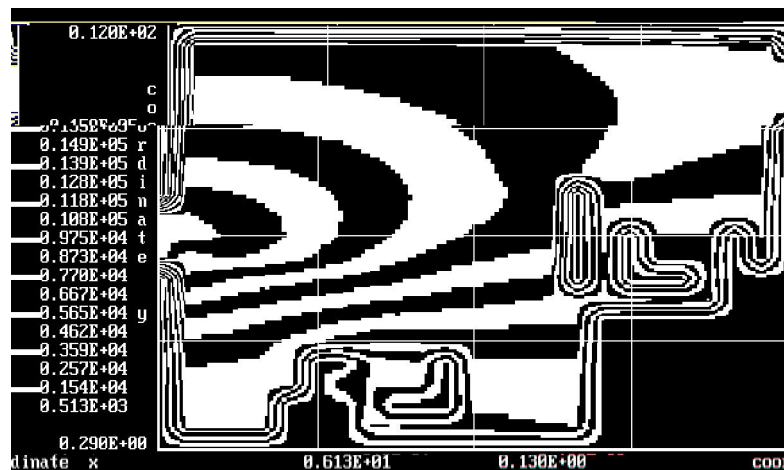
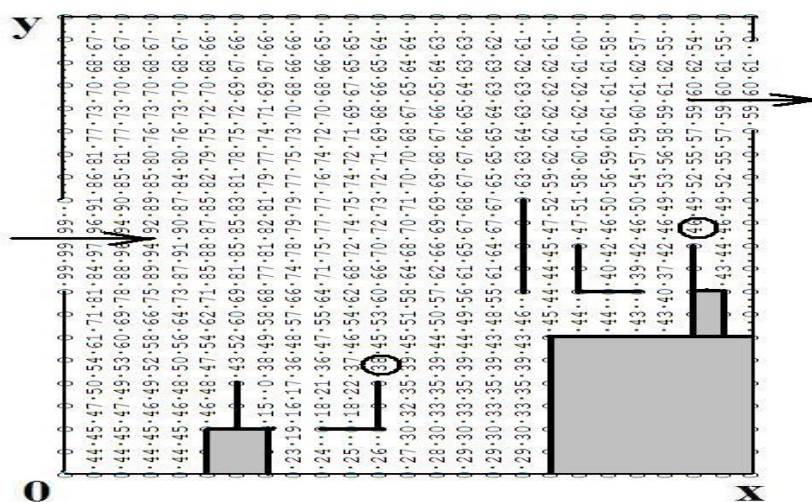


Рис.3. Схема расчетной области: 1 – первое рабочее место (стул); 2 – второе рабочее место (стул); 3 – источник эмиссии положительных ионов; 4 – экран; 5 – место эмиссии пыли.



а)



б)

Рис.4. Распределение концентрации отрицательных аэроионов в помещении при размещении экрана возле второго рабочего места: а) – изолинии концентрации ( $C \cdot 10^{-5}$ ); б) - поле концентрации.



Результаты расчета концентрации отрицательных аэроионов в помещении при установке экрана показаны на рис 4 и представлены в табл.2.

Таблица 2.

Концентрация отрицательных аэроионов в зоне дыхания работника и скорость воздушного потока в этой зоне при наличии экрана (второй вариант задачи).

Рабочее место	Концентрация отрицательных аэроионов, частиц/м <sup>3</sup>	Скорость воздушного потока, м/с
Первое рабочее место	6.00*10 <sup>8</sup>	0.181
Второе рабочее место	7.39*10 <sup>8</sup>	0.196

Как видно из табл.2 применение экрана позволило снизить скорость воздушного потока во второй рабочей зоне до комфортного уровня с сохранением концентрации отрицательных аэроионов на оптимальном, для человека, уровне.

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

**Выводы.** В работе разработана CFD модель для расчета аэроионного режима в помещениях. Расчет рассеивания аэроионов в помещении 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. Основной особенностью построенной CFD модели является то, что она позволяет быстро проводить расчет с учетом таких важных факторов как наличие мебели в помещении, положения приточных и вытяжных отверстий вентиляции и т.п. Построенная численная модель может служить 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.

#### Список литературы

1. Fletcher L.A., Noakes C.J., Sleigh P.A., Beggs C.B., Shepherd S.J. (2008) Air ion behavior in ventilated rooms. *Indoor and uilt Environment*, 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. Игнахина, Д.В. Вертинский, А.Ю. Евсюков // Складні системи та процеси. №1, 2002. – 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. Випуск 11,2010.С.137-145.
5. Толкунов И.А. Біполярна іонізація повітряного середовища приміщень функціональних підрозділів мобільного госпіталю МНС / Проблеми надзвичайних ситуацій. Випуск 14, 2011. – С.161-170.

6. Антошкина Л.И. Оценка экологического риска при авариях с химически опасными веществами / Л.И. Антошкина, Н.Н. Беляев, Е.Ю. Гунько // Наука и образование, 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. – К.: Наукова думка, 1997. – 368 с.
8. Лойцянский Л. Г. Механика жидкости и газа. - М.: Наука, 1978. 735 с.
9. Самарский А. А. Теория разностных схем. - М.: Наука, 1983. 616 с.

*Рекомендовано до публікації д.т.н. Мещеряковим Л.І.  
Надійшла до редакції 11.11.13*

УДК 614.89

© В.І. Голінько, Т.І. Долгова, С.І. Чеберячко

## **ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ПРОТИПИЛОВИХ ЗАСОБІВ ІНДИВІДУАЛЬНОГО ЗАХИСТУ ОРГАНІВ ДИХАННЯ**

В статті проаналізовано як помилки при випробуваннях протипилових респіраторів призводять до неточності у виборі засобів індивідуального захисту органів дихання (ЗІЗОД). Запропоновано схему визначення кількості неякісних протипилових півмасок, які можуть потрапити до користувачів через похибку вимірювань. Досліджено вплив невизначеності вимірювань методів випробувань та лабораторного обладнання на кількість неякісних респіраторів, які можуть пройти випробування.

В статті проаналізовано влияние качества испытаний респираторов на ошибки при выборе средств индивидуальной защиты органов дыхания (СИЗОД). Предложена модель для определения количества некачественных противопылевых полумасок, которые могут попасть к пользователям из-за величины неопределенности измерений. Исследовано влияние погрешности измерений методов испытаний и лабораторного оборудования на количество некачественных фильтрующих респираторов, которые могут пройти испытание.

Tests in laboratory quality impact on respirators error in their selection analyzed in the article. We propose a model of low-quality respirators to determine the amount that can go to production because of the magnitude of measurement uncertainty. The effect of measurement error test methods and laboratory equipment to the number of low-quality respirators.

**Актуальність.** Проблема професійної захворюваності гірників на пневмокніоз стоїть дуже гостро. Не зважаючи, на наявний арсенал засобів знепилення концентрація пилу у гірничих виробках інколи сягає 300–400 мг/м<sup>3</sup>. В такому випадку основним захисним пристроєм є протипиловий респіратор. Його використання нормується низкою нормативних актів з охорони праці [1–3]. Крім того, відповідно до Закону України з охорони праці роботодавець повинен забезпечити працівника засобами індивідуального захисту органів дихання (ЗІЗОД). Проте, кількість захворювань на пилову етіологію не зменшується. Тому, встановлення основних причин погіршення протипилового захисту працівників і пошук шляхів підвищення ефективності використання ЗІЗОД є актуальним питанням.