

**Н.Н. Беляев**, д-р техн. наук, профессор,  
**Д.О. Затынайченко**, магистр  
(ГВУЗ «ДНУЖТ им. В. Лазаряна»)

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ АЭРОИОННОГО РЕЖИМА В РАБОЧЕМ ПОМЕЩЕНИИ НА БАЗЕ CFD МОДЕЛИ**

**М.М. Беляев**, д-р техн. наук, профессор,  
**Д.О. Затынайченко**, магистр  
(ДВНЗ «ДНУЗТ им. В. Лазаряна»)

## **МОДЕЛЮВАННЯ АЕРОІОННОГО РЕЖИМУ В РОБОЧОМУ ПРИМІЩЕННІ НА БАЗІ CFD МОДЕЛІ**

**N.N. Bielaev**, D.Sc. (Tech.), Professor  
**D.O. Zatynaichenko**, M.S. (Tech)  
(SHEE «DNURT named after V. Lazaryan»)

## **MODELING OF THE AIR-ION DISPERSION IN THE WORKING ROOM BY USING A CFD MODEL**

**Аннотация.** В работе рассматривается численная модель для прогноза аэроионного режима в помещениях. В основу модели положено уравнение движения идеальной жидкости и уравнение массопереноса для отрицательных, положительных аэроионов и пыли. Для численного моделирования моделирующих уравнений используются разностные схемы. Численный расчет осуществляется на прямоугольной разностной сетке. Для формирования вида расчетной области и выделения ее особенностей применяется метод маркирования. Разработанная численная модель позволяет прогнозировать аэроионный режим в помещениях с учетом их формы, аэродинамики воздушных потоков, размещения внутри помещений мебели, оборудования и т.п. Модель позволяет прогнозировать аэроионный режим в помещениях при использовании компьютеров малой и средней мощности. Время расчета одного варианта задачи составляет несколько секунд. Представляются результаты проведенного вычислительного эксперимента.

**Ключевые слова:** CFD модель, аэроионный режим, уравнение потенциального течения, уравнение массопереноса, вычислительный эксперимент.

**Постановка проблемы.** В административных зданиях на объектах горно-промышленного комплекса широко используются компьютеры и оргтехника. Но при работе этой техники в помещение выделяется достаточно большое количество положительных аэроионов, что нарушает аэроионный режим (АР), а это пагубно влияет на самочувствие людей. Поэтому, создание благоприятного АР в рабочих помещениях – и в первую очередь в зоне дыхания людей является, в настоящее время, одним из важнейших факторов,

предъявляемых к качеству воздушной среды для человека [1,2,4,5]. Научное обоснование для применения специальных устройств, создающих определенный АР в помещениях, выбора их режима работы может быть оперативно выполнено с помощью метода математического моделирования. В этой связи становится очевидным важность создания эффективных математических моделей для прогноза АР в помещениях и в рабочих зонах. Математические модели для расчета АР в помещениях не имеют альтернативы на этапе проектирования новых и при реконструкции уже существующих объектов. Для практики важно иметь физически обоснованные математические модели, позволяющие прогнозировать АР в помещениях с учетом основных физических факторов, влияющих на процесс рассеивания аэроионов в помещении.

**Анализ публикаций.** Прогноз АР в помещениях в Украине осуществляется, в настоящее время, 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 могут быть использованы для оперативного прогноза концентрации аэроионов в помещениях. Но данные модели не учитывают следующие особенности, характерные для помещений:

1. Размещение мебели, оборудования в помещении. Эти объекты создают сложную аэродинамическую картину движения воздушных потоков внутри помещения.

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

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 помещениях является то, что модели данного класса не учитывают конкретную форму помещения, влияние аэродинамики воздушных потоков в помещении на процесс рассеивание ионов.

**Цель работы:** разработка 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.

#### **Моделирующие уравнения.**

Для расчета переноса аэроионов в помещении (как положительных ионов, так и отрицательных - ОИ) будем использовать уравнение переноса вида [1,6,7,9]

$$\begin{aligned}
& \frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial u C}{\partial x} + \frac{\partial v C}{\partial y} = \\
& = \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) - \\
& \quad - \alpha C B - \beta C D + \\
& + \sum Q_c(t) \delta(x - x_c) \delta(y - y_c)
\end{aligned} \tag{1}$$

$$\begin{aligned}
& \frac{\partial B}{\partial t} + \frac{\partial u B}{\partial x} + \frac{\partial v B}{\partial y} = \\
& = \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu_x \frac{\partial B}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu_y \frac{\partial B}{\partial y} \right) - \\
& \quad - \alpha C B - \beta B D + \\
& + \sum Q_B(t) \delta(x - x_B) \delta(y - y_B)
\end{aligned} \tag{2}$$

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;  $Q_{C_i}$ ,  $Q_{B_i}$  – 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.

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

$$\begin{aligned}
& \frac{\partial D}{\partial t} + \frac{\partial u D}{\partial x} + \frac{\partial v D}{\partial y} = \\
& = \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu_x \frac{\partial D}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu_y \frac{\partial D}{\partial y} \right) + \\
& + \sum Q_{D_i}(t) \delta(x - x_{D_i}) \delta(y - y_{D_i})
\end{aligned} \tag{3}$$

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, по

толке, 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  $n$  – 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).

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

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

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 [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:

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

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 данно-

го уравнения переноса на три шага [6]:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial uC}{\partial x} + \frac{\partial vC}{\partial y} = 0,$$

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

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

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).

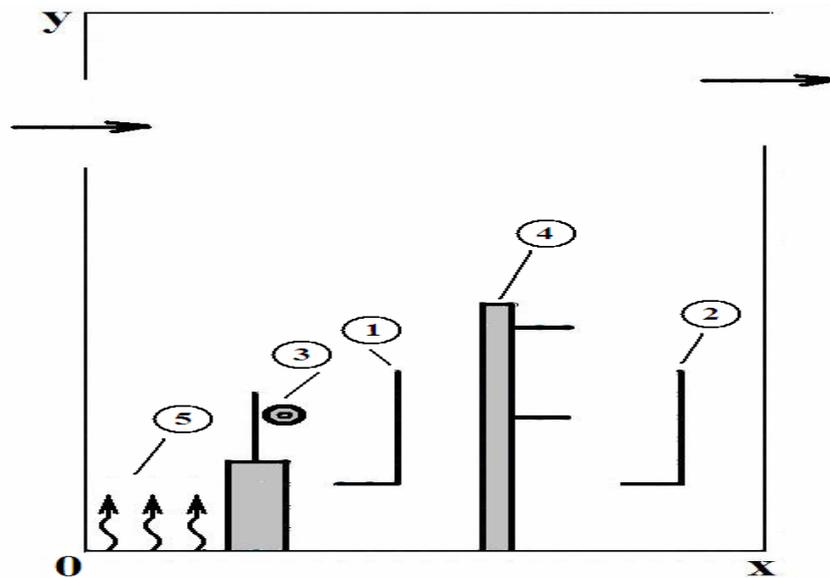
Для численного интегрирования первых двух уравнений данной системы используется попеременно – треугольная разностная схема [6,7]. При использовании этой схемы неизвестное значение концентрации ионов и пыли на каждом шаге определяется по явной формуле «бегущего счета».

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.** 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 (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.



1 – первое рабочее место (стул); 2 – второе рабочее место (стул);  
3 – источник эмиссии положительных ионов; 4 – мебель; 5 – место эмиссии пыли

Рисунок 1 – Схема расчетной области.

**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».

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

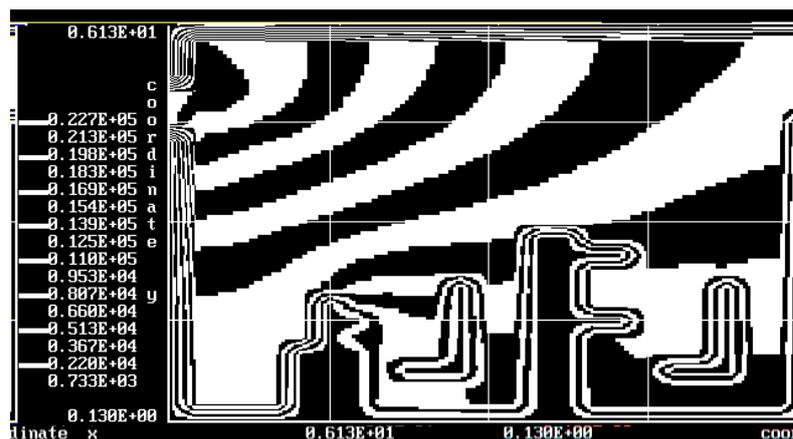
1. Вводится исходная информация, касающаяся физической постановки задачи (форма помещения и т.п.).
2. Осуществляется расчет уравнения для потенциала скорости.
3. Рассчитывается поле скорости воздушного потока в помещении.
4. Выполняется расчет рассеивания отрицательных, положительных аэроионов и пыли 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.**

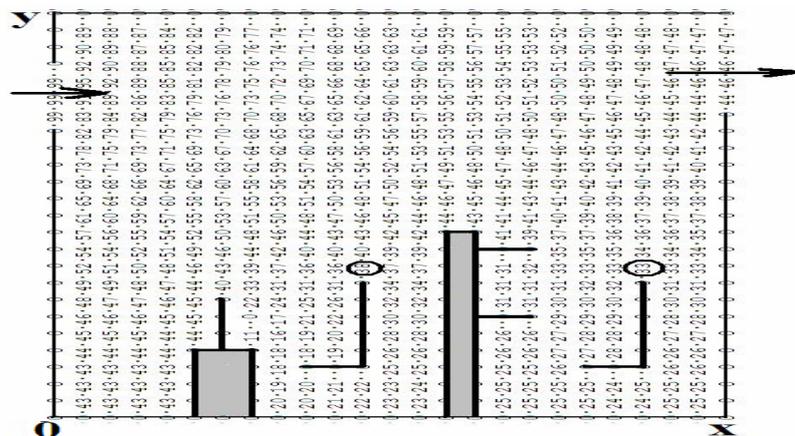
Разработанная CFD модель была применена для решения задачи о прогнозе аэроионного режима в рабочем помещении. Схема расчетной области – помеще-

ния, в котором моделируется аэрионный режим, показана на рис.1. Поступление отрицательных ионов в помещение происходит с приточным воздухом, т.е. в системе вентиляции установлено оборудование, осуществляющее генерацию отрицательных ионов. С воздушным потоком в помещение поступают отрицательные ионы, с концентрацией  $2.2 \cdot 10^9$  частиц/м<sup>3</sup>. В помещении имеется два рабочих места для персонала (рис.1). Следует подчеркнуть, что данные элементы мебели, их форма, размещение – учитываются в численной модели. В рабочей зоне (рис.1, позиция 3 – стол с электронным оборудованием) происходит эмиссия положительных ионов с интенсивностью  $10^4$  частиц/с. Полагается, что на полу, возле левой стенки помещения имеет место постоянный выброс пыли в количестве  $4 \cdot 10^5$  частиц/с (данная зона условно показана волнистыми стрелками на рис.1). Дополнительные параметры задачи: размеры расчетной области  $6.25\text{м} \times 6.25\text{м}$ ;  $\alpha = 1,5 \times 10^{-12}$  м<sup>3</sup>/с,  $\beta = 1 \times 10^{-12}$  м<sup>3</sup>/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  $1,5$  м/с.

Рассмотрим результаты CFD моделирования на базе разработанной численной модели. На рис. 2 представлено распределение концентрации отрицательных ионов внутри помещения.



а)



б)

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

Результаты расчета представлены в виде 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. Это значит, что если, например, в какой-то точке расчетное значение концентрации составляет «11.25%» от концентрации на входе в помещение, то на печать будет выведено число «11». 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, в зоне расположения органов дыхания человека. По требованию пользователя, разработанный код осуществляет вывод на печать результатов по формату «действительное число», т.е. с сохранением дробной части числа.

Из представленного рис. 2.а хорошо видно, что картина распределения концентрации отрицательных аэроионов внутри комнаты может быть условно разбита на две подзоны: подзона, относящаяся к верхней части помещения и подзона, относящаяся к его нижней части. В верхней части комнаты распределение концентрации отрицательных аэроионов имеет вид ряда полос, которые вытягиваются в направлении движения воздушного потока. Это связано с отсутствием в этой части комнаты каких либо препятствий, которые могли бы повлиять на характер распределения аэроионов. В нижней части помещения формируется сложная картина распределения концентрации отрицательных аэроионов, что связано с влиянием мебели на характер движения воздушного потока в комнате.

Как известно, особый интерес представляет прогноз аэроионного режима в помещении в тех зонах, где находится персонал и органы дыхания работников. Для оценки аэроионного режима выберем позицию 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. Здесь 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.

Рабочее место	Концентрация отрицательных аэроионов, частиц/м <sup>3</sup>	Скорость воздушного потока, м/с
Первое рабочее место	$8,5 \cdot 10^8$	0,17
Второе рабочее место	$7,9 \cdot 10^8$	0,05

Если принять во внимание, что рекомендуемая, 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 табл.1 видно, что скорость воздушного потока на втором рабочем месте значительно меньше рекомендуемой величины – 15 – 20 см/с.

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

**Выводы.** В работе рассмотрена новая 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. 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.

#### 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. Запорожець, О.І. Принципи моделювання динаміки аероіонного складу повітря у приміщеннях/ О.І. Запорожець, В.А. Глива, О.В. Сидоров // Вісник НАУ, 2011 - №2. -С. 120-124.
3. Моделирование распределения концентрации ионов вблизи ионизатора / В.Е. Бахрушин, М.А. Игнахина, 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. - Випуск 11 - С.137-145.
5. Толкунов, И.А. Біполярна іонізація повітряного середовища приміщень функціональних підрозділів мобільного госпіталю МНС / И.А. Толкунов // *Проблеми надзвичайних ситуацій*, 2014. - Випуск 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. Гунько. - Наука и образование: Днепропетровск, 2008. - 132с.
7. Численное моделирование распространения загрязнения в окружающей среде / М. З. Згуровский, В. В. Скопецкий, В. К. Хрущ, Н. Н. Беляев. – К.: Наук. думка, 1997. 368 с.
8. Лойцянский, Л. Г. Механика жидкости и газа. Л.Г. Лойцянский. - М.: Наука, 1978.- 735 с.
9. Марчук, Г. И. Математическое моделирование в проблеме окружающей среды. / Г.И. Марчук. – М.: Наука, 1982. - 320 с.
10. Самарский, А. А. Теория разностных схем. / А.А. Самарський - М.: Наука, 1983 - 616 с.
11. Гуревич, М.И. Теория струй идеальной жидкости / М.И. Гуревич – М.: Наука, 1979. 536с.

## REFERENCES

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. Zaporozhets O.I., Gliva V.A. and Sidorov O.V. (2011), "Principles of simulation dynamics of aeroionic composition of air in the apartments", *Vysnyk NAU*, no.2, pp. 120-124
3. Bahrushyn V.E., Ignahina M.A., Vertinski D.V. and Yeevsiukov A.Ju. (2002), "Simulation of distributing concentration of ions neardy ionizator ", *Skladni systemy ta procesy*, no 1, pp. 30-36.
4. Tolkunov I.A., Popov I.I. and Barbashin V.V (2010), "Theoretical research of processes of transfer of aeroions in blasts in the apartments of the special setting of MES of Ukraine", *Problemy nadzvychainykh situatsiy*, no 11, pp. 137-145.
5. Tolkunov I.A. (2014), "Bipolar ionization of air environment of apartments of functional subsections of the mobile hospital MES", *Problemy nadzvychainykh situatsiy*, no 14, pp. 161-170
6. Antoshkina L.I., Biliaiev N.N. and Gunko E. Ju. (2008), *Otsenka ekologicheskogo riska pri avari-yakh s himicheskimi opasnymi veshchestvami* [Estimation of ecological risk at failures with the chemically hazardous substances,] Nauka i obrazovaniye, Dnepropetrovsk, Ukraine.
7. Zgurovsky M.Z. (1997), *Sislemnoye modelirovanie rasprostraneniya zagriazneniya v okrugayushchey srede* [Numerical design of distribution of contamination in an environment], Naukova dumka, Kiev, Ukraine.
8. Lojtsiansky L.G. (1978), *Mekhanika zhydkosti i gaza* [Mechanics of liquid and gas],- Nauka, Moscow, SU.
9. Marchuk G.I. (1982), *Matematicheskoye modelirovanie v probleme okruzhayushchey sredy* [Mathematical simulation in the problem of environment].- Nauka, Moscow, SU.
10. Samarsky A.A. (1983), *Teoriya raznostnykh skhem* [Theory of difference charts], Nauka, Moscow, SU.
11. Gurevich M.I. (1979), *Teoriya struy idealnoy zhydkosti* [Theory of streams of ideal liquid], Nauka, Moscow, SU.

## Об авторах

**Беляев Николай Николаевич**, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Гидравлика и водоснабжение» Государственного высшего учебного заведения Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна (ГВУЗ «ДНУЖТ им. В. Лазаряна»), Днепропетровск, Украина.

**Затынайченко Дмитрий Олегович**, ассистент кафедры «Гидравлика и водоснабжение» Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна. Днепропетровск, Украина.

## About the authors

**Bielaev Nikolai Nikolaievich**, Doctor of Technical Sciences (D.Sc), professor, head of the department «Hydraulics and water supply» of Dnepropetrovsk State higher educational establishment «National university of railway transport named after V. Lazaryan (SHEE «DNURT named after V. Lazaryan») of Ministry of Education and Science of Ukraine (NMU), Dnepropetrovsk, Ukraine.

**Zatynaichenko Dmitriy Olegovich**, Master of Science, assistant of the department «Hydraulics and water supply» of Dnepropetrovsk State higher educational establishment «National university of railway transport named after V. Lazaryan (SHEE «DNURT named after V. Lazaryan») of Ministry of Education and Science of Ukraine (NMU), Dnepropetrovsk, Ukraine.

**Анотація.** У роботі розглядається чисельна модель для прогнозу аероіонного режиму в приміщеннях. У основу моделі покладено рівняння руху ідеальної рідини і рівняння масопереносу для негативних, позитивних аероіонів і пилу. Для чисельного моделювання моделюючих рівнянь використовуються різницеві схеми. Чисельний розрахунок здійснюється на прямокутній різницевій сітці. Для формування виду розрахункової області і виділення її особливостей застосовується метод маркування. Розроблена чисельна модель дозволяє прогнозувати аероіонний режим в приміщеннях з урахуванням їх форми, аеродинаміки повітряних потоків, розміщення усередині приміщень меблів, устаткування і тому подібне. Модель дозволяє прогнозувати аероіонний режим в приміщеннях при використанні комп'ютерів малої і середньої потужності. Час розрахунку одного варіанту завдання складає декілька секунд. Видаються результати проведеного обчислювального експерименту.

**Ключові слова:**

CFD модель, аероіонний режим, рівняння потенціальної течії, рівняння масопереносу, обчислювальний експеримент.

**Abstract.** This paper presents a numerical model for predicting air-ion dispersion inside the rooms. The model is based on equations of ideal fluid motion and mass transfer equation for the negative and positive ions and dust. The numerical simulation of modeling equations uses finite difference schemes. The numerical calculation is carried out on a rectangular computational grid. Markers are used for forming a computational domain. The developed numerical model predicts air-ion dispersion mode with taking into account the room shape, aerodynamics air flows, indoor furniture, equipment, etc. The model predicts air-ion dispersion in the rooms when computers of small and medium power are used. Calculation time for one variant is few seconds. Results of a computational experiment are presented.

**Keywords:**

2-D numerical model, air-ion dispersion, equation of potential flow, equation of mass transfer, numerical experiment.

*Статья поступила в редакцию 6.01. 2014*

*Рекомендовано к печати д-ром техн. наук В.Г. Шевченко*

УДК 622.5: 628.35: 519.6

**Н.Н. Беляев**, д-р техн. наук, профессор,  
**Е.Ю. Гунько**, канд. техн. наук, доцент,  
**В.А. Козачина**, магистр  
(ГВУЗ «ДНУЖТ им. В. Лазаряна»)

## **ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОСВЕТЛЕНИЯ ШАХТНЫХ ВОД В ГОРИЗОНТАЛЬНОМ ОТСТОЙНИКЕ**

**М.М. Беляев**, д-р техн. наук, профессор,  
**О.Ю. Гунько**, канд. техн. наук, доцент,  
**В.А. Козачина**, магистр  
(ДВНЗ «ДНУЗТ ім. В. Лазаряна»)

## **ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ОСВІТЛЕННЯ ШАХТНИХ ВОД У ГОРИЗОНТАЛЬНОМУ ВІДСТІЙНИКУ**

**N.N. Bielaev**, D.Sc. (Tech.), Professor,  
**E. Yu. Gunko**, Associate Professor, Ph.D. (Tech.)  
**V.A. Kozachyna**, Master of Science  
(SHEE «DNURT named after V. Lazaryan»)

## **NUMERICAL SIMULATION OF THE MINE WATERS TREATMENT IN HORIZONTAL SETTLER**

**Аннотация.** Горизонтальные отстойники являются одним из важнейших элементов в технологической схеме очистки шахтных вод. Их применение связано с возможностью пропуска достаточно больших объемов сточных вод. При реконструкции или проектировании горизонтальных отстойников возникает ответственная задача по оценке их эффективности.