

час задачі склав 10 сек на ПК.

**Висновки.** Побудовано чисельну модель для експрес-прогнозу теплового забруднення акваторії річок при скиді нагрітих промислових вод. На базі розробленої чисельної моделі проведено обчислювальний експеримент по дослідженню розмірів зони теплового забруднення акваторії річки. На далі планується побудова 3D моделі теплового забруднення акваторії.

#### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Згуровский М.З. Численное моделирование распространения загрязнения в окружающей среде. / М.З. Згуровский, В.В. Скопецкий, В.К. Хрущ, Н.Н. Беляев. - Киев:Наукова думка, 1997. - 348с.
2. Пуллиам Т. Х. Рекомендации по размещению и проектированию рассеивающих выпусков сточных вод. / Т. Х. Пуллиам.-М.: Стройиздат, 1981.- 224с.
3. Рудаков Д. В. Математичні моделі в охороні навколишнього середовища. Навчальний посібник / Д. В. Рудаков.- Дніпропетровськ ,2004. -160с.

УДК 697.953:537.56

Доктор техн. наук Н.Н. Беляев,  
инж. Д.О. Затынайченко

(Днепропетровский национальный университет  
железнодорожного транспорта)

### CFD МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ АЭРОИОНОВ В ПОМЕЩЕНИИ

На базі розробленої 2D CFD моделі виконано розрахунок поширення аероіонів у приміщенні. Модель базується на чисельному інтегруванні рівняння конвективно-дифузійного переносу домішки, що враховує процеси взаємодії аероіонів різної полярності та моделі потенційного руху. Наводяться результати обчислювального експерименту.

### CFD MODELLING OF THE AIR IONS DISPERSION IN THE ROOM

The 2D CFD model was developed and used to simulate the air ions dispersion in the room. The model is based on the numerical integration of the K-gradient transport model which takes into account the process of the air ions interaction having different polarity and the model of the potential flow. The results of numerical experiment are presented.

**Введение.** В настоящее время большой интерес проявляется к обеспечению необходимого аэроионного режима (АР) в помещениях (как в производственных, так и в жилых помещениях, а также в помещениях специального назначения) [1, 2, 4, 5]. Рост такого интереса обусловлен тем, что обеспечение нормального АР в помещениях является одним из важных факторов обеспечения качества воздушной среды для человека.

Прогноз АР в помещениях сводится к определению концентрации ионов той или иной полярности как в самом помещении, так и в определенных его частях – рабочих зонах и т.п. Прогноз АР в помещениях методом физического моделирования требует достаточно много времени на постановку эксперимента, проведение его, обработку результатов, многократных измерений и достаточно дорогого оборудования (например, измеритель концентрации ионов *Inti ITC -201A* (Япония), производящий измерения каждые 0.5с или лазерный измеритель концентрации частиц *Kanomax Geo*, производство – Великобритания) [1]. В то же вре-

мя, ошибка измерения количества аэроионов с помощью счетчиков, используемых в Украине, составляет порядка 40% [2]. Поэтому, в настоящее время большой интерес проявляется к разработке математических моделей прогноза АР в помещениях. Математические модели – незаменимы на этапе проектирования новых и при реконструкции уже существующих объектов, поскольку при проектировании необходим оперативный выбор наиболее оптимального варианта обеспечения требуемого АР. Но для получения адекватных прогнозных данных необходимо применение физически обоснованных математических моделей.

В Украине для прогноза АР используются только аналитические модели и, в рамках данного класса моделей, можно выделить два подхода. Первый подход – это построение модели на основе аналитического решения одномерного уравнения переноса примеси [2, 3]. Второй подход – построение модели 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 основным ограничением 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 рассеивание ионов, в моделях нет учета размещения в помещениях и в рабочих зонах различного рода препятствий. 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.

*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 концентрации ионов в помещении (как положительных ионов, так и отрицательных – ОИ) будем использовать уравнение конвективно-диффузионного переноса вида [1, 6, 7, 9]:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial uC}{\partial x} + \frac{\partial vC}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) - \alpha CB - \beta CD + \quad (1)$$

$$+ \sum Q_c \delta_c - x_c \delta_c - y_c \delta_c$$

$$\frac{\partial B}{\partial t} + \frac{\partial uB}{\partial x} + \frac{\partial vB}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu \frac{\partial B}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu_y \frac{\partial B}{\partial y} \right) - \alpha CB - \beta BD + \quad (2)$$

$$+ \sum Q_B \delta_B - x_B \delta_B - y_B \delta_B$$

где  $C, B$  – концентрация отрицательных и положительных аэроионов соответственно, *частиц/м<sup>3</sup>*;  $u, v$  – компоненты вектора скорости движения воздушно-

го потока в помещении,  $m/c$ ;  $\mu = (\mu_x, \mu_y)$  – коэффициенты диффузии,  $m^2/c$ ;  $t$  – время,  $c$ ;  $\alpha$  – скорость рекомбинации ионов, имеющих различную полярность,  $1/c$ ;  $\beta$  – скорость рекомбинации ионов с частицами пыли,  $1/c$ ;  $Q_{Ci}$ ,  $Q_{Bi}$  – интенсивность эмиссии отрицательных и положительных ионов в соответствующих точках с координатами  $x_c$ ,  $y_c$ ,  $m$  и т.д.,  $частиц/c$ ;  $\delta(x - x_i)$ ,  $\delta(y - y_i)$  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:

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

где  $D$  – концентрация пылевых частиц,  $частиц/m^3$ .

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), 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, 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).

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 должны удовлетворять уравнению неразрывности. Таким образом, необходимо решить гидродинамическую задачу.

Для решения гидродинамической задачи используется модель потенциально-го 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, ось  $Y$  – направлена вертикально вверх.

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:  $P = P^* = \text{const}$ ,  $y = \bar{y} + \text{const}$ .

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.** Численное интегрирование уравнений модели проводится на прямоугольной разностной сетке. 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:

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

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

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]:

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

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

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

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

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 эмиссии (стоков).

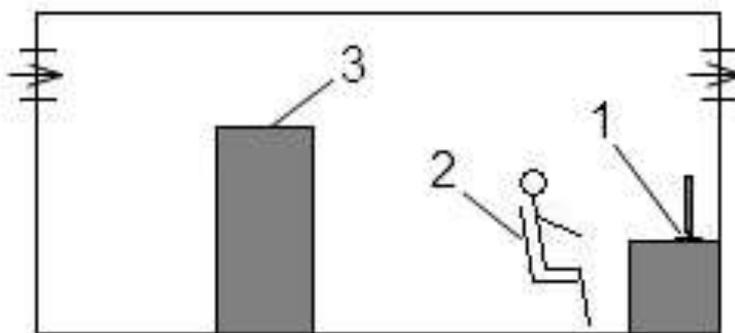
Для численного интегрирования первых двух уравнений данной системы используется попеременно-треугольная разностная схема [6, 7]. При использовании этой схемы неизвестное значение концентрации ионов и пыли на каждом шаге определяется по явной формуле «бегущего счета».

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

$$\frac{C_{ij}^{n+1} - C_{ij}^n}{\Delta t} = \sum Q_c \bar{\delta} - r_c - \alpha CB - \beta CD.$$

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

**Формирование вида расчетной области.** Для формирования вида расчетной области – формы комнаты и размещенного 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.



1 – электронное оборудование - источник эмиссии положительных ионов; 2 – рабочее место (стул); 3 – оборудование

Рис.1 – Схема расчетной области:

**Практическая реализация модели.** На основе построенной численной модели создан код “*Airlon - 2*”, реализованный на алгоритмическом языке *FORTRAN*.

Разработанная CFD модель была использована для моделирования процесса рассеивания отрицательных ионов в производственном помещении (рис.1). В помещении размером  $5.5\text{ м} \times 4.4\text{ м}$ , работает вентиляция, положение отверстий приточно–вытяжной вентиляции показано на рис.1 стрелками. 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  $5 \cdot 10^9\text{ частиц/м}^3$ . В помещении имеется рабочее ме-

сто для персонала (рис.1, поз.2 – стул, рядом стол). В помещении также размещается оборудование, что создает преграду на пути рассеивания отрицательных ионов, выходящих из приточного отверстия вентиляции (рис.1., поз.3). Полагается, что на этом оборудовании происходит постоянный выброс пыли в количестве  $2 \cdot 10^4$  частиц/с. В рабочей зоне (рис.1, позиция 1 – стол с электронным оборудованием) происходит эмиссия положительных ионов с интенсивностью  $10^4$  частиц/с. Место выброса пыли и положительных ионов показано условными знаками на рис.2. Дополнительные параметры задачи:  $\alpha = 1,5 \times 10^{-6}$  см<sup>3</sup>/с,  $\beta = 1 \times 10^{-6}$  см<sup>3</sup>/с [1], коэффициенты турбулентной диффузии по всем направлениям приняты равными  $0,3$  м<sup>2</sup>/с.

Исследуется процесс распространения отрицательных ионов в помещении для следующих сценариев:

1. При наличии одного входного отверстия приточно–вытяжной вентиляции и различных режимах воздухообмена: скорость входа воздушного потока в помещение различна, а именно  $1,2$  м/с,  $1,5$  м/с и  $2,5$  м/с.

2. При наличии двух входных отверстий приточно–вытяжной вентиляции и одного вытяжного отверстия (скорость входа воздушного потока через каждое отверстие равна  $1,5$  м/с).

Рассмотрим результаты CFD моделирования на базе разработанной модели. На рис. 2 – 4 представлено распределение концентрации отрицательных ионов внутри помещения при различном воздухообмене и при наличии одного входного отверстия приточно–вытяжной вентиляции. На рис.5 представлено распределение концентрации ОИ при подаче ОИ через два входных отверстия приточно–вытяжной вентиляции. Значение концентрации на этих рисунках представлено в безразмерном виде: каждое число – это величина концентрации в процентах от величины входной концентрации. Вывод на печать чисел осуществлен по формату «целое число», т.е. дробная часть числа не выводится на печать. Это значит, что, если, например, в какой-то точке расчетное значение концентрации составляет «28.67%» от концентрации на входе в помещение, то на печать будет выведено число «28». 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 оперативно анализировать информацию относительно величины концентрации ионов в любой части помещения: в рабочей зоне, возле оборудования, отверстий вентиляции и т.п. Следует отметить, что по требованию пользователя, код осуществляет вывод на печать результатов по формату «действительное число», т.е. с сохранением дробной части числа.

Видно, что увеличение скорости входного потока (увеличение воздухообмена) приводит к повышению концентрации ОИ внутри помещения, т.к. увеличивается общее количество ОИ, поступающих в помещение.

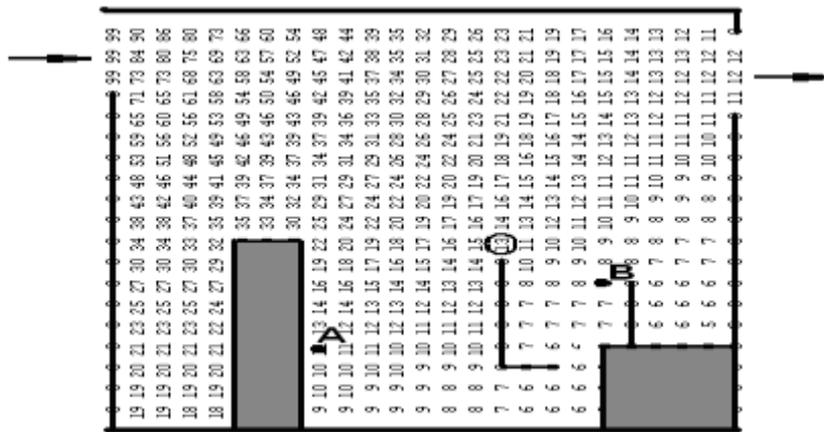


Рис.2 – Распределение концентрации отрицательных ионов в помещении (*сценарий 1*: скорость входа воздушного потока в помещение  $1.2 \text{ м/с}$ ): **А** - место эмиссии пыли; **В** – место эмиссии положительных ионов

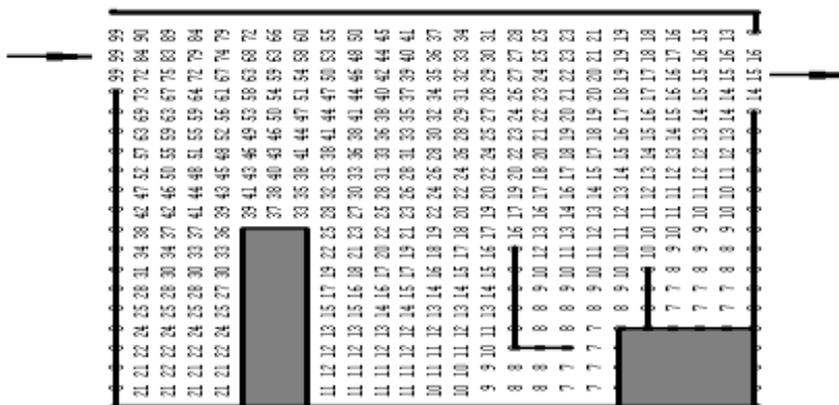


Рис.3 – Распределение концентрации отрицательных ионов в помещении (*сценарий 2*: скорость входа воздушного потока в помещении  $1.5 \text{ м/с}$ )

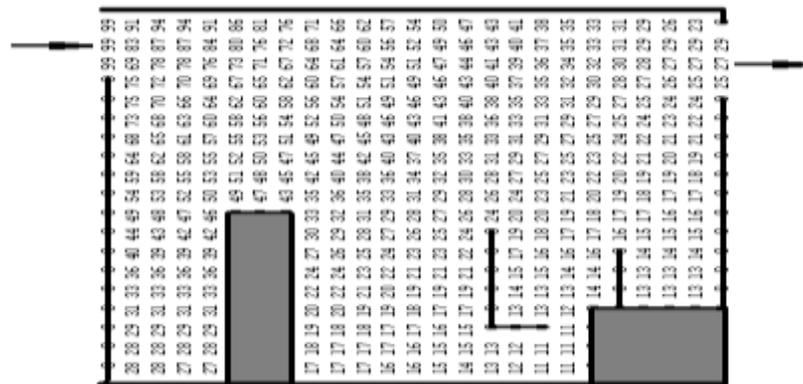


Рис.4 – Распределение концентрации отрицательных ионов в помещении (*сценарий 3*: скорость входа воздушного потока в помещении  $2.5 \text{ м/с}$ )

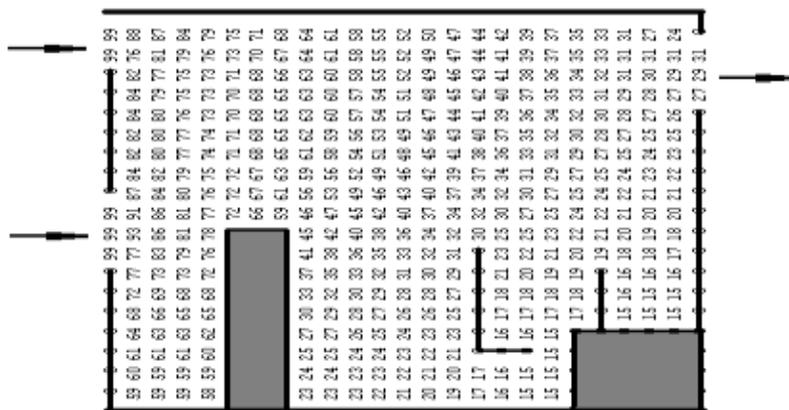


Рис.5 – Распределение концентрации отрицательных ионов в помещении (сценарий 4: вход воздушного потока в помещение осуществляется через два отверстия, скорость входа воздушного потока в помещение 1.5 м/с)

Особый интерес представляет прогноз AP в помещении в тех зонах, где находится персонал. В табл.1 представлено значение концентрации ОИ в рабочей зоне.

Таблица 1 – Концентрация ОИ в рабочей зоне

№ сценария	Концентрация ОИ в процентах от входящей концентрации
сценарий 1: скорость входа воздушного потока в помещение 1.2 м/с	13%
сценарий 2: скорость входа воздушного потока в помещение 1.5 м/с	16%
сценарий 3: скорость входа воздушного потока в помещение 2.5 м/с	24%
сценарий 4: вход воздушного потока в помещение осуществляется через два отверстия	30%

В таблице для оценки AP выбрана позиция над спинкой стула, т.е. там, где находится голова работника. Эта точка на рис.2 условно представлена над спинкой стула в виде «кружка». Для анализа AP для других сценариев задачи – на последующих рисунках также выбирается эта точка. Если представляет интерес значение величины концентрации ОИ в другой части помещения, то это значение легко определить с помощью той формы печати, которая принята для презентации результатов.

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

**Выводы.** В работе представлена новая, эффективная CFD модель для расчета аэроионного режима в помещениях. Моделирование аэроионного режима основывается на предварительном расчете поля скорости воздушного потока в помещении и последующем решении задачи о рассеивания ионов в помещении. Отличительной особенностью разработанной модели является то, что она позво-

ляет учесть при моделировании особенности помещений: наличие оборудования, мебели, приточных и вытяжных отверстий и т.п. При этом для расчета требуется несколько секунд времени на ПК. Это является крайне важным при проведении серийных расчетов. Построенная 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. (2008) Air ion behavior in ventilated rooms. / Fletcher L.A., Noakes C.J., Sleigh P.A., Beggs C.B., Shepherd S.J. *Indoor and Built Environment*, 17 (2). pp. 173-182
2. Запорожец О.І. Принципи моделювання динаміки аероіонного складу повітря у приміщеннях/ О.І. Запорожец, Глива В.А., Сидоров О.В. / Вісник НАУ. 2011, №2. С. 120-124.
3. Бахрушин В.Е. Моделирование распределения концентрации ионов вблизи ионизатора / Бахрушин В.Е., Игнашина М.А., Вертинский Д.В., Евсюков А.Ю. / *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 / Толкунов И.А. Попов И.И. Барбашин, В.В. *Проблемы надзвичайних ситуацій*. Випуск 11,2010.С.137 -145.
5. Толкунов И.А. Біполярна іонізація повітряного середовища приміщень функціональних підрозділів мобільного госпіталю МНС *Проблемы надзвичайних ситуацій*. Випуск 14,2011.С.161 -170.
6. Антошкина Л.И. Оценка экологического риска при авариях с химически опасными веществами / Антошкина Л.И., Беляев Н.Н., Гунько Е.Ю., *Наука и образование*, Днепропетровск,2008.132с.
- 7.Згуровский М. З. 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*. - М.: Наука, 1978. – 735 с.
- 9.Марчук Г. И. *Математическое моделирование в проблеме окружающей среды*. – М.: Наука, 1982. – 320 с.
- 10.Самарский А. А. *Теория разностных схем*. - М.: Наука, 1983. – 616 с.
11. Гуревич М.И. *Теория струй идеальной жидкости* – М.: Наука, 1979.- 536с.