

использована при решении региональных задач в области экологической безопасности и управления качеством воздуха.

Список литературы

1. COST-710-WG3.Final report. Harmonisation of the pre-processing of meteorological data for atmospheric dispersion models//Edited by B.E.A.Fisher and others.-Luxemburg.European Communities:1998 – 480 p.
2. Беляев Н. Н. Математическое моделирование в задачах экологической безопасности и мониторинга чрезвычайных ситуаций: Монография / Н. Н. Беляев, Е. Ю. Гунько, П. Б. Машихина. – Д.: «Акцент ПП», 2013. – 159 с.
3. Беляев Н. Н. Моделирование нестационарных процессов аварийного загрязнения атмосферы: Монография / Н. Н. Беляев, А. В. Берлов, П. Б. Машихина. – Д.: «Акцент ПП», 2014. – 127 с.
4. Марчук Г. И. Математическое моделирование в проблеме окружающей среды / Марчук Г. И. – М.: Наука, 1982. – 320 с.
5. Стефанишин Д.В. Вибрані задачі оцінки ризику та прийняття рішень за умов стохастичної невизначеності.-К.:Азимут-Україна, 2009. – 104 с.
6. Biliaiev M. Numerical Simulation of Indoor Air Pollution and Atmosphere Pollution for Regions Having Complex Topography / M. Biliaiev // Springer: Air Pollution Modeling and its Application XXI, 2012. pp.87 – 91.

*Рекомендовано до публікації д.т.н. Зберовським О.В.
Надійшла до редакції 20.01.15*

УДК 519.6

© Н.Н. Беляев, С.Г. Цыганкова

РАСЧЕТ АЭРОИОННОГО РЕЖИМА В ПОМЕЩЕНИИ И В РАБОЧЕЙ ЗОНЕ НА БАЗЕ ЧИСЛЕННОЙ МОДЕЛИ

Рассмотрена эффективная численная модель для прогноза аэроионного режима в помещениях и в рабочих зонах. Модель основывается на применении уравнений аэродинамики, электростатики и массопереноса.

Розглянута ефективна чисельна модель для прогнозу аероіонного режиму в приміщеннях і в робочих зонах. Модель ґрунтується на застосуванні рівнянь аеродинаміки, електростатики і масопереносу.

A numeral model allowing operatively to compute the dynamics of ion dispersion in rooms was developed. The model is based on equations of fluid dynamics, electrostatic and mass transfer.

Постановка проблемы. Как известно, для обеспечения нормального микроклимата на рабочих местах необходимо, чтобы в рабочих зонах была определенная концентрация аэроионов [1, 2-4]. Это ставит задачу разработки методов прогноза концентрационных полей аэроионов в любой части помещения для обоснования места расположения ионизаторов. В настоящее время, для решения задач такого класса требуется разработка специальных

методов расчета, позволяющих, оперативно и экономично, определять рациональное расположение ионизаторов в помещениях.

Анализ публикаций. Расчет распространения аэроионов в помещениях, в настоящее время, в Украине, проводится на базе аналитических моделей [2-4]. Применение данных моделей дает возможность быстро рассчитать концентрацию аэроионов. Однако данные модели не учитывают аэродинамику воздушных струй в помещении, наличие мебели, оборудования и т.п. – т.е. именно те факторы, которые определяют формирование концентрационного поля аэроионов. Аналитические модели дают возможность рассчитать концентрационное поле аэроионов только для случая «гладкая поверхность», без учета влияния стен, пола, потолка, препятствий на процесс рассеивания аэроионов. Для получения более обоснованной прогнозной информации необходимо применение CFD моделей [1].

Целью данной работы является создание эффективной CFD модели для прогноза аэроионного режима в помещениях и в рабочих зонах, позволяющей учитывать наиболее существенные физические факторы, определяющие формирование концентрационного поля аэроионов.

Моделирующие уравнения. Перенос аэроионов в помещении обусловлен воздействием следующих факторов: конвективный поток воздуха, диффузия, воздействие электрического поля. Кроме этого происходит взаимодействие ионов различной полярности и взаимодействие их с частицами пыли. Для учета этих процессов, при моделировании рассеивания аэроионов, будем использовать уравнение переноса в виде [1]:

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

где C , B , D – концентрация отрицательных, положительных аэроионов и частиц пыли 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} , – интенсивность эмиссии отрицательных ионов в соответствующих точках с координатами x_c, y_c ; $\delta(x - x_i) \delta(y - y_i)$ – дельта-функция Дирака; b – коэффициент мобильности ионов; E – напряженность электрического поля.

Отметим, что ось Y направлена вертикально вверх.

Поскольку аэроионы имеют заряд, то они генерируют электрическое поле E , которое описывается следующим уравнением [1]:

$$\frac{\partial E_x}{\partial x} + \frac{\partial E_y}{\partial y} = \frac{q_e}{\varepsilon_0}, \quad (2)$$

где ε_0 – диэлектрическая проницаемость; q_e – плотность объемного заряда.

От уравнения (2) можно перейти к скалярному потенциалу, если учесть такую зависимость

$$E_x = -\frac{\partial \phi}{\partial x}, \quad E_y = -\frac{\partial \phi}{\partial y}. \quad (3)$$

Тогда получим уравнение Пуассона следующего вида [1]

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} = -\frac{q_e}{\varepsilon_0}, \quad (4)$$

где $q_e = -eC(x, y)$, $C(x, y)$ – концентрация отрицательных аэроионов; ϕ – скалярный потенциал; e – элементарный заряд. На базе данного уравнения осуществляется моделирование электрического поля.

Для описания процессов рассеивания положительных ионов и пыли будем использовать уравнение переноса вида (1)

$$\frac{\partial B}{\partial t} + \frac{\partial uB}{\partial x} + \frac{\partial vB}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_x \frac{\partial B}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_y \frac{\partial B}{\partial y} \right) - \quad (5)$$

$$- \alpha CB - \beta BD + \sum Q_B(t) \delta(x - x_B) \delta(y - y_B),$$

$$\frac{\partial D}{\partial t} + \frac{\partial uD}{\partial x} + \frac{\partial vD}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_x \frac{\partial D}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_y \frac{\partial D}{\partial y} \right) + \quad (6)$$

$$+ \sum Q_{Di}(t) \delta(x - x_D) \delta(y - y_D).$$

Обозначение физических параметров в этих уравнениях совпадает с аналогичными обозначениями, приведенными для уравнения (1).

Для расчета аэродинамики воздушных потоков в помещении будем применять модель потенциального течения. Моделирующим уравнением, в этом случае, будет уравнение Лапласа для потенциала скорости (7)

$$\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} = 0, \quad (7)$$

где P – потенциал скорости.

Компоненты вектора скорости воздушной среды связаны с потенциалом скорости следующими зависимостями

$$u = \frac{\partial P}{\partial x}, \quad v = \frac{\partial P}{\partial y}. \quad (8)$$

Постановка краевых условий для моделирующих уравнений рассмотрена в [1,5].

Численное решение моделирующих уравнений. Для численного интегрирования уравнений переноса, первоначально, проводится их физическое и геометрическое расщепление с последующим расчетом по

неявной схеме [5], для численного решения уравнения Лапласа и уравнения Пуассона применяется метод Либмана. Расчет выполняется на прямоугольной разностной сетке.

Результаты вычислительного эксперимента. Разработанная численная модель была применена для решения задачи о прогнозе концентрационного поля отрицательных аэроионов в помещении.

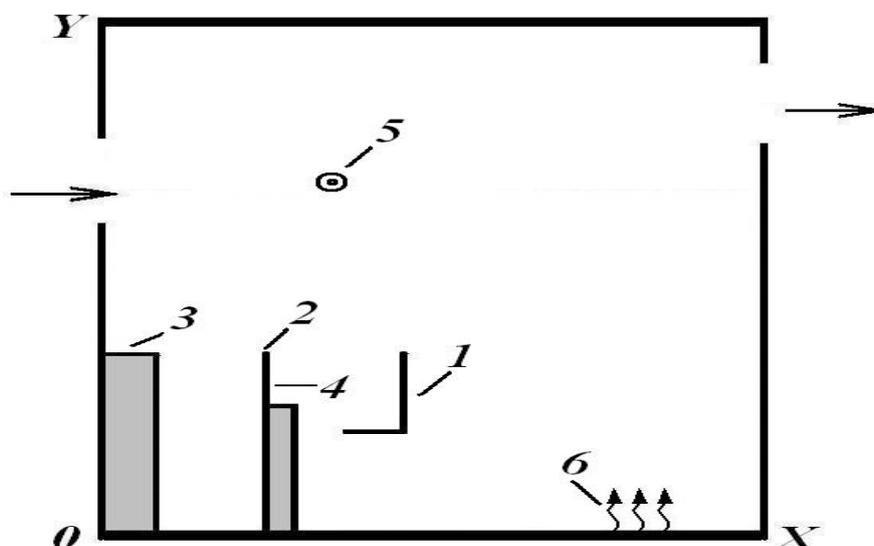


Рис .1. Схема расчетной области: 1 – стул; 2 – рабочее место; 3 –шкаф; 4 – источник эмиссии положительных ионов; 5 – ионизатор воздуха; 6 – место эмиссии пыли

Схема расчетной области – помещения, в котором моделируется аэроионный режим, показана на рис.1. В рабочей зоне (рис.1, позиция 4) происходит эмиссия положительных ионов с интенсивностью $Q_B=6 \cdot 10^4$ частиц/с. Поступление отрицательных ионов в помещение происходит от ионизатора (рис.1) интенсивностью $Q_C=20 \cdot 10^{11}$ частиц/с . В помещении происходит выброс пыли в количестве $Q_{Di}=2 \cdot 10^6$ частиц/с (зона пылевыделения условно показана волнистыми стрелками на рис.1). Остальные параметры задачи таковы: размеры комнаты 6м*4м; кратность воздухообмена 3 [1/час]; $\alpha=1.5 \cdot 10^{-12}$ м³/с, $\beta=1 \cdot 10^{-12}$ м³/с [1], коэффициенты турбулентной диффузии по всем направлениям приняты равными 10^{-7} м²/с [1]. Расчет выполнен для трех различных расположений ионизатора в помещении.

Результаты вычислительного эксперимента показаны на рис.2-4. На этих рисунках показаны матрицы значений концентрации отрицательных ионов внутри помещения (место положения ионизатора представлено условно «кружком»). Результаты приведены в безразмерном виде: каждое число – это величина концентрации в процентах от величины максимальной концентрации в помещении. Вывод на печать чисел осуществлен по формату «целое число», т.е. дробная часть числа не выдается на печать; также приводится максимальное значение концентрации в расчетной области C_{max} .

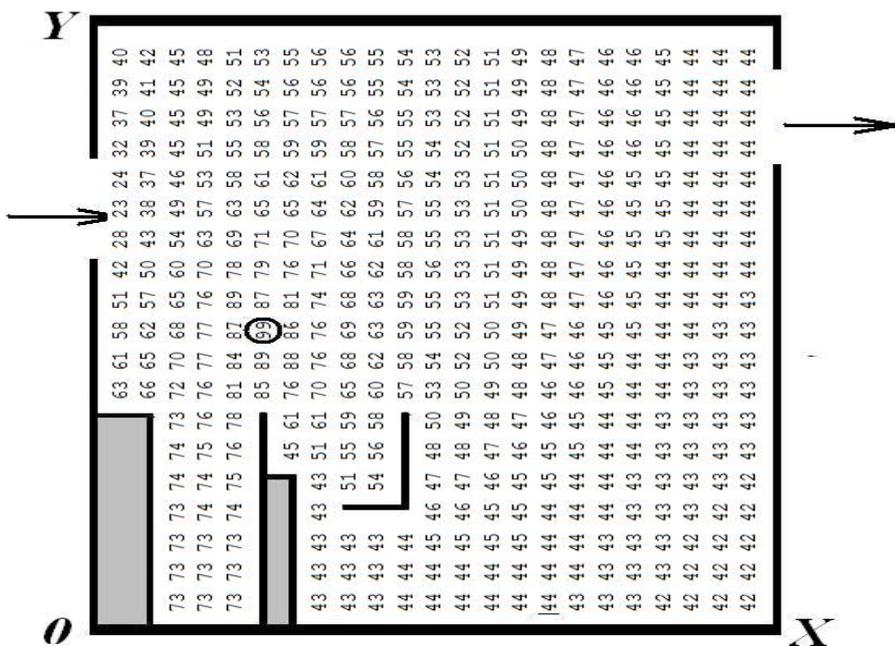


Рис.2. Распределение концентрации отрицательных аэроионов в помещении (первый вариант расположения ионизатора, $C_{\max}=0.17 \cdot 10^{12}$ частиц/м³)

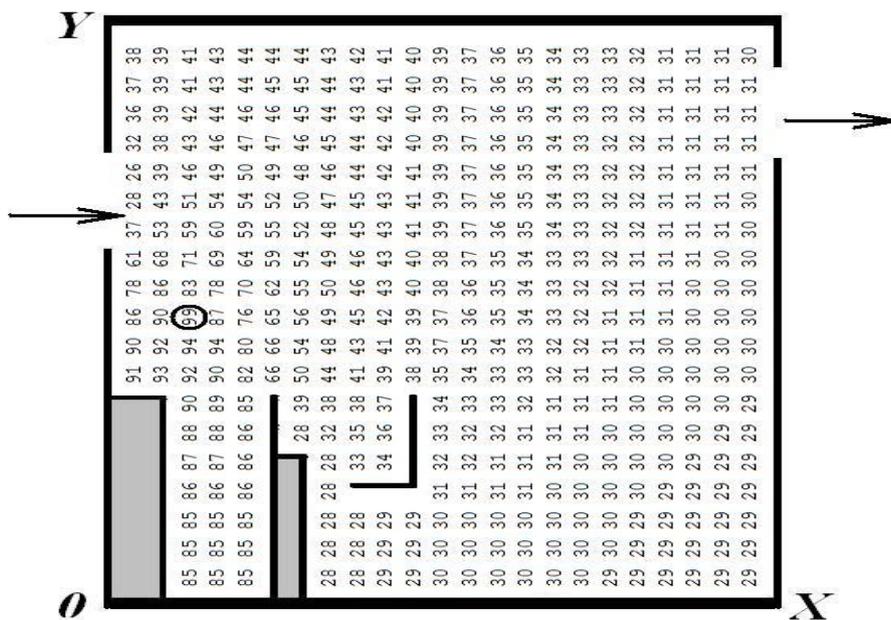


Рис.3. Распределение концентрации отрицательных аэроионов в помещении (второй вариант расположения ионизатора, $C_{\max}=0.19 \cdot 10^{12}$ частиц/м³)

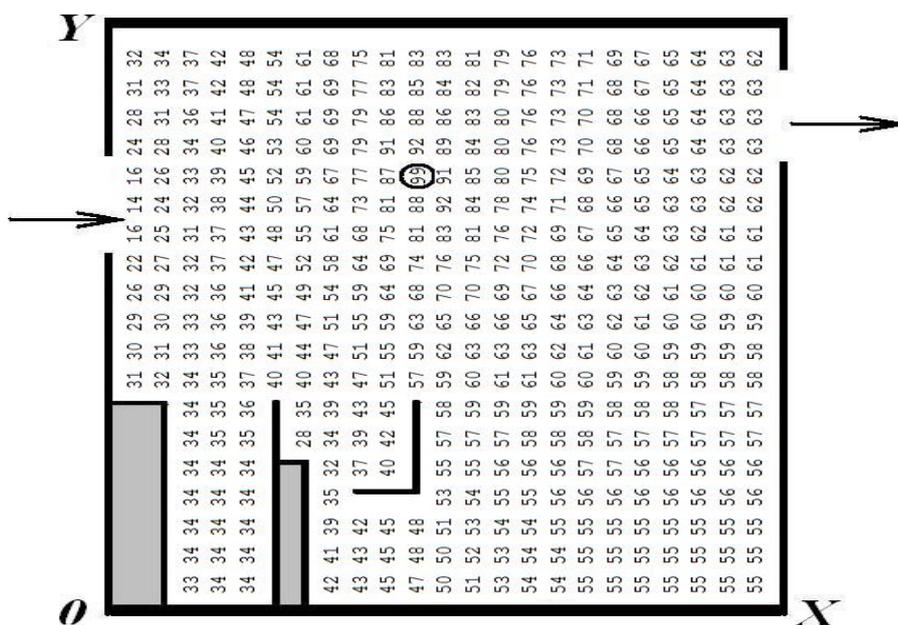


Рис.4. Распределение концентрации отрицательных аэроионов в помещении (третий вариант расположения ионизатора, $C_{\max}=0.22 \cdot 10^{12}$ частиц/м³)

Из данных рисунков видно, что картина распределения отрицательных аэроионов в помещении имеет существенно неравномерный характер.

Практический интерес представляет прогноз аэроионного режима в рабочих зонах, в частности, там, где находятся органы дыхания работников. Для оценки аэроионного режима выбрана позиция над спинкой стула, т.е. там, где находится голова работника (эта зона на рисунках условно представлена в виде «прямоугольника»). Результаты расчета концентрации C_w отрицательных аэроионов для каждой такой зоны таковы: первый вариант $C_w=0.09 \cdot 10^{12}$ частиц/м³; второй вариант $C_w=0.07 \cdot 10^{12}$ частиц/м³; третий вариант $C_w=0.12 \cdot 10^{12}$ частиц/м³. Так как максимально допустимая концентрация отрицательных ионов не должна быть более $0.05 \cdot 10^{12}$ частиц/м³, то очевидно, что в каждом варианте имеет место превышение этой нормы. Для достижения этой нормы необходимо, например, уменьшить интенсивность их эмиссии. Так, в случае третьего варианта, интенсивность эмиссии ионов следует уменьшить, примерно в три раза.

В заключение отметим, что расчет одного варианта задачи на базе разработанной CFD модели составляет порядка 3 минуты компьютерного времени.

Выводы. Рассмотрена новая CFD модель, позволяющая оперативно рассчитывать концентрационное поле аэроионов в помещениях и в рабочей зоне. 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., Sleight P. A., Beggs C. B., Shepherd S. J. (2008) Air ion behavior in ventilated rooms. *Indoor and Built 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. Игнашина, Д. В. Вергинский, 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. Беляев Н. Н. Защита зданий от проникновения в них опасных веществ: Монография / Н. Н. Беляев, Е. Ю. Гунько, Н. В. Росточило. – Д.: «Акцент ПП», 2014. – 136 с.

*Рекомендовано до публікації д.т.н. Зберовським О.В.
Надійшла до редакції 20.01.15*

УДК 519.6

© В.В. Беляева, А.В. Берлов

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАГРЯЗНЕНИЯ АТМОСФЕРНОГО ВОЗДУХА ПРИ АВАРИИ НА ХИМИЧЕСКИ-ОПАСНОМ ОБЪЕКТЕ

Представлена численная модель, позволяющая оперативно рассчитать динамику загрязнения атмосферного воздуха и риска токсичного поражения людей при чрезвычайной ситуации на химически - опасном объекте. Рассмотрено применение построенной модели для расчета динамики загрязнения атмосферы в случае аварийного выброса химически-опасного вещества в хранилище твердого ракетного топлива.

Представлена чисельна модель, що дозволяє оперативно розрахувати динаміку забруднення атмосферного повітря і ризику токсичного ураження людей під час надзвичайної ситуації на хімічно - небезпечному об'єкті. Розглянуто застосування побудованої моделі для розрахунку динаміки забруднення атмосфери в разі аварійного викиду хімічно-небезпечної речовини в сховище твердого ракетного палива.

A numeral model allowing operatively to compute the dynamics of contamination of atmospheric air and risk of toxic defeat of people at an emergency on chemically is worked out - dangerous object. The application of the model constructed to calculate the dynamics of air pollution in the event of an accidental release of chemical hazardous substances in the vault of solid rocket propellant.

Вступление. Как известно на территории Павлоградского химического завода в специальных хранилищах (рис.1.) находится твердое ракетное топливо ракетной системы РС-22 (рис.2).