

## РОЗДІЛ VII. ТЕХНОЛОГІЇ ОХОРОНИ ПРАЦІ ТА ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ

УДК 519.6:697.953:004.94

**Н.Н. Беляев**, д-р техн. наук

Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, г. Днепропетровск, Украина

**С.Г. Цыганкова**, ассистент

ГВУЗ «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры», г. Днепропетровск, Украина

### CFD МОДЕЛИРОВАНИЕ АЭРОИОННОГО РЕЖИМА В ПОМЕЩЕНИЯХ

**М.М. Біляєв**, д-р техн. наук

Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, м. Дніпропетровськ, Україна

**С.Г. Циганкова**, асистент

ДВНЗ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», м. Дніпропетровськ, Україна

### CFD МОДЕЛЮВАННЯ АЕРОІОННОГО РЕЖИМУ В ПРИМІЩЕННЯХ

**Nikolay Belyaev**, Doctor of Technical Sciences

National University of Railway Transport named after academician V. Lazaryan, Dnipropetrovsk, Ukraine

**Svetlana Tsygankova**, assistant

State Higher Educational Establishment «Pridneprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture», Dnipropetrovsk, Ukraine

### CFD SIMULATION OF AIR ION REGIME IN THE PREMISES

*Разработана численная CFD модель для прогноза аэроионного режима в офисных помещениях при искусственной ионизации воздуха, осуществляемой путем установки ионизатора внутри помещения. При моделировании учитывалось влияние геометрических характеристик рабочей зоны, местоположения отверстий приточно-вытяжной вентиляции, расстановки мебели и оборудования, места расположения ионизатора, режима воздухообмена в помещении, наличия препятствий на процесс рассеивания аэроионов, конкретного места эмиссии частиц пыли и ионов различной полярности и их взаимодействия в помещении и в рабочих зонах.*

**Ключевые слова:** CFD модель, аэроионный режим, концентрационное поле аэроионов, искусственная ионизация.

*Розроблено чисельну CFD модель для прогнозу аероіонного режиму в офісних приміщеннях при штучній іонізації повітря, що здійснюється завдяки установці іонізатора всередині приміщення. Під час моделювання враховувалась вплив геометричних характеристик робочої зони, місця розташування отворів припливно-витяжної вентиляції, розміщення меблів і устаткування, місця розташування іонізатора, режиму повітрообміну в приміщенні, наявності перешкод на процес розсіювання аероіонів, конкретного місця емісії частинок пилу й іонів різної полярності та їх взаємодії у приміщенні і в робочих зонах.*

**Ключові слова:** CFD модель, аероіонний режим, концентраційне поле аероіонів, штучна іонізація.

*A numerical CFD model for the prognosis of air ion regime in offices in the artificial air ionization, which is realized by install the ionizer indoors, is developed. Influence of the working area geometric characteristics, location of the ventilation holes, placement of furniture and equipment, the locations of the ionizer, ventilation regime in the room, presence of obstacles on the ions dispersion process, the specific location of dust particles emission and ions of different polarity and their interaction in premises and working areas taken into account at the simulation.*

**Key words:** CFD model, air ions regime, concentration field of air ions, artificial ionization

**Постановка проблемы.** В настоящее время значительное внимание уделяется вопросам обеспечения комфортного состава воздушной среды в помещениях офисного и производственного назначения, о чем свидетельствует возросшее число публикаций, посвященных данному вопросу. В свою очередь, для расчета аэроионного режима в помещениях необходимы эффективные методики, позволяющие определять концентрацию аэроионов в любом месте помещения, и соответственно, получать адекватную информацию, дающую возможность обосновать конкретный режим ионизации и рациональное расположение ионизаторов.

**Анализ последних исследований и публикаций.** В Украине для расчета аэроионного режима в основном применяются аналитические модели, позволяющие определять концентрацию аэроионов [4–12]. Однако при разработке таких моделей не учитыва-

вається наличие в помещении мебели и оборудования, источников выброса пыли и т. д., то есть различных физических факторов, влияющих на процесс переноса аэроионов. Для более точного определения концентрационных полей аэроионов в помещении необходимо применение CFD моделей [2; 3; 13; 16], позволяющих учесть аэродинамику воздушных потоков в помещении, что является важнейшим фактором при исследовании процессов рассеивания примесей в помещениях [15].

**Цель статьи.** Целью данной работы является создание численной CFD модели для расчета концентрационных полей аэроионов в помещениях различного назначения, учитывающей при моделировании физические процессы, влияющие на формирование концентрационного поля аэроионов, размещение мебели, оборудования в помещении, местоположение источников эмиссии пыли, расположение вентиляционных отверстий и т. д.

**Изложение основного материала.** На формирование концентрационного поля аэроионов в помещении влияет комплекс физических факторов: вызванный работой вентиляции поток воздуха, диффузия, воздействие электрического поля. Помимо этого, ионы различной полярности взаимодействуют друг с другом и с частицами пыли. Для учета этих процессов, при моделировании рассеивания аэроионов, будем использовать уравнение переноса в виде [16]:

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

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;  $\alpha$  – скорость рекомбинации ионов, имеющих различную полярность;  $\beta$  – скорость рекомбинации ионов с частицами пыли;  $Q_{ci}$ , – 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 [16]:

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

где  $\varepsilon_0$  – 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 [16]

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

где  $q_e = -eC(x, y)$ ,  $C(x, y)$  – концентрация отрицательных аэроионов;  $\phi$  – 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 [16]:

$$\frac{\partial B}{\partial t} + \frac{\partial uB}{\partial x} + \frac{\partial vB}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu_x \frac{\partial B}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu_y \frac{\partial B}{\partial y} \right) - \alpha CB - \beta BD + \sum Q_B(t) \delta(x - x_B) \delta(y - y_B), \quad (5)$$

$$\frac{\partial D}{\partial t} + \frac{\partial uD}{\partial x} + \frac{\partial vD}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu_x \frac{\partial D}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu_y \frac{\partial D}{\partial y} \right) + \sum Q_{Di}(t) \delta(x - x_D) \delta(y - y_D). \quad (6)$$

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

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

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; 13; 16].

Для численного интегрирования уравнений переноса используется неявная попеременно-треугольная разностная схема, реализуемая по методу бегущего счета [1]. Для численного решения уравнения Лапласа применяется схема суммарной аппроксимации. Для решения уравнения Пуассона применяется метод Либмана. Расчет выполняется на прямоугольной разностной сетке.

На основе данных разностных схем разработан пакет программ (код) «ION-2а». Данный пакет построен на модульном принципе, каждая подпрограмма реализует численное интегрирование конкретного моделирующего уравнения и реализацию соответствующих граничных условий.

Особенностью моделируемого процесса является наличие в помещении мебели, т. е. объектов, влияющих на формирование концентрационного поля ионов. Для «воспроизведения» этих и других объектов в численной модели используется технология «*porosity technique*», называемая также методом маркирования [1]. Суть данной технологии заключается в кодировке разностных ячеек, которые относятся к таким объектам и реализацией в них соответствующих граничных условий.

**Результаты.** Разработанная численная модель была применена для решения задачи о прогнозе концентрационного поля отрицательных аэроионов в офисном помещении и

в его рабочей зоне в условиях искусственной ионизации воздуха, организованной с помощью установки ионизатора непосредственно внутри помещения.

На рис. 1 представлена схема расчетной области – помещения, в которое поступает воздух через одно отверстие системы вентиляции. Выход воздуха из помещения происходит через отверстие на противоположной стенке. Рабочая зона представлена рабочим местом (стул и стол), перед и за рабочим местом расположены стеллажи. Ионизатор располагается на крайнем левом стеллаже. При моделировании учитывается скорость выхода ионизированной струи воздуха.

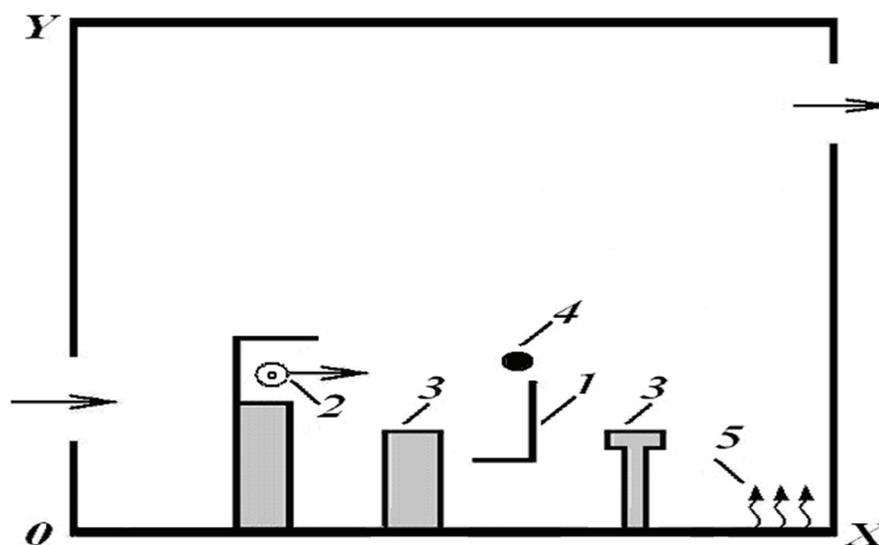


Рис. 1. Схема расчетной области: 1 – стул; 2 – ионизатор воздуха; 3 – стеллажи; 4 – место эмиссии положительных ионов (положение органов дыхания); 5 – место эмиссии пыли

Источником эмиссии положительных ионов в помещении является человек, поэтому в зоне расположения его органов дыхания (рис. 1, позиция 4) задается точечный источник эмиссии положительных ионов с интенсивностью  $Q_B = 7 \times 10^5$  частиц/с. Остальные параметры задачи таковы: размеры расчетной области  $12,25 \times 3,50$  м; положение входного и выходного отверстий вентиляции показано стрелками на рис. 1;  $\alpha = 1,5 \times 10^{-12}$  м<sup>3</sup>/с,  $\beta = 1 \times 10^{-12}$  м<sup>3</sup>/с [13; 16]; коэффициенты турбулентной диффузии по всем направлениям приняты равными  $\mu_x = \mu_y = kV$  (здесь  $k = 0,1$  – параметр,  $V$  – местная скорость в конкретной расчетной точке, эта скорость определяется из решения аэродинамической задачи). В помещении происходит эмиссия пыли,  $Q_{Di} = 52 \times 10^6$  частиц/с (положение выброса пыли показано на рис. 1 волнистой линией). Скорость вдува ионизированной струи составляет 0,3 м/с, концентрация отрицательных ионов в этой струе  $25 \times 10^9$  частиц/м<sup>3</sup>. Таким образом, в данной задаче учитывается аэродинамика взаимодействия вентиляционного потока воздуха со струей ионизированного воздуха.

Цель численного моделирования – определить концентрацию отрицательных ионов в помещении и в зоне расположения органов дыхания человека.

Результаты численного моделирования показаны на рис. 2. На данном рисунке показано концентрационное поле отрицательных ионов внутри помещения.

Хорошо видна подзона с большим градиентом концентрации ионов возле ионизатора на стеллаже, то есть там, где выходит струя ионизированного воздуха. В рабочей зоне, там где размещена голова работника, концентрация отрицательных ионов составляет  $0,016 \times 10^{12}$  частиц/м<sup>3</sup>, что соответствует принятым нормативам.

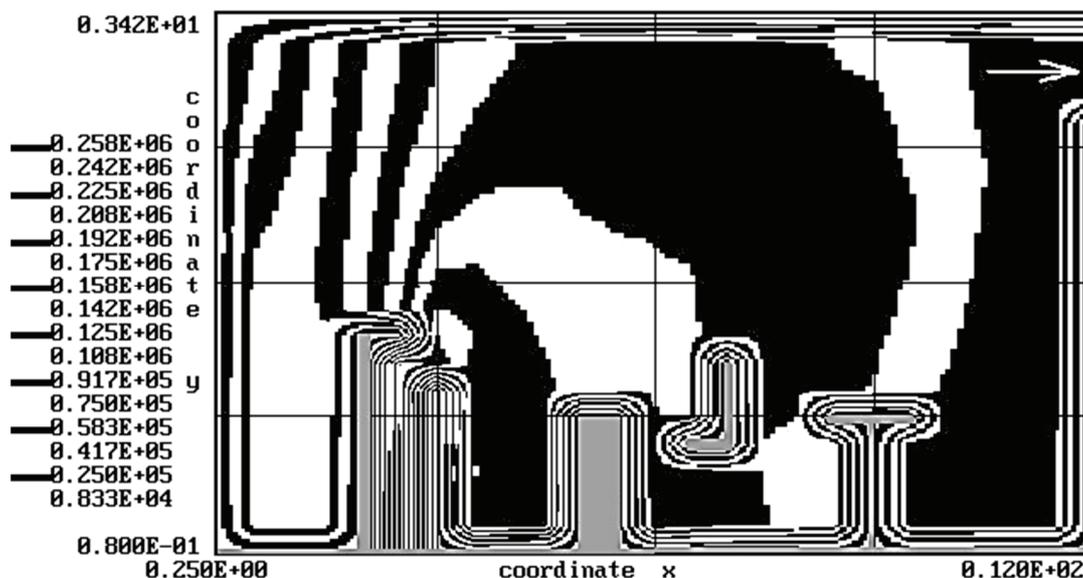


Рис. 2. Распределение концентрации отрицательных аэроионов в помещении

В заключение отметим, что для решения задачи на базе разработанной CFD модели потребовалось порядка 1 минуты компьютерного времени.

**Выводы.** Разработанная 2D CFD модель для расчета аэроионного режима в помещениях с искусственной ионизацией воздуха, осуществляемой путем установки ионизатора воздуха внутри помещения дает возможность определять концентрационное поле аэроионов в рабочих зонах с учетом физических процессов, влияющих на формирование концентрационного поля аэроионов, размещения мебели и оборудования в помещении, местоположения источников эмиссии пыли. Полученные результаты дают возможность обосновать конкретный режим ионизации и рациональное расположение ионизаторов. В дальнейшем развитие модели следует проводить в направлении создания 3D CFD модели расчета аэроионного режима в помещениях.

#### Список использованных источников

1. *Беляев Н. Н.* Защита зданий от проникновения в них опасных веществ : монография / Н. Н. Беляев, Е. Ю. Гунько, Н. В. Росточило. – Днепропетровск : Акцент ПП, 2014. – 136 с.
2. *Беляев Н. Н.* Математическое моделирование аэроионного режима в помещении при искусственной ионизации воздуха / Н. Н. Беляев, С. Г. Цыганкова // Строительство, материаловедение, машиностроение : сборник научных трудов. Серия «Безопасность жизнедеятельности». – 2015. – Вып. 83. – С. 40–46.
3. *Беляев Н. Н.* Расчет аэроионного режима в помещении и в рабочей зоне на базе численной модели / Н. Н. Беляев, С. Г. Цыганкова // Збірник наукових праць Національного гірничого університету. – Дніпропетровськ, 2015. – № 47. – С. 137–143.
4. *Визначення та прогнозування динаміки зміни аероіонного складу повітря виробничих приміщень* / В. А. Глива, В. І. Клапченко, С. М. Пономаренко та ін. // Вісник національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут». Серія «Гірництво». – 2010. – Вип. 19. – С. 161–168.
5. *Деякі аспекти забезпечення нормативного аероіонного режиму робочого середовища приміщень спеціального призначення МНС України* / І. О. Толкунов, В. В. Маринюк, І. І. Попов, В. В. Пономар // Проблеми надзвичайних ситуацій. – 2008. – № 8. – С. 198–206.
6. *Запорожець О. І.* Нормування аероіонного складу повітря робочих приміщень та основні напрями його вдосконалення / О. І. Запорожець, В. А. Глива, О. В. Сидоров // Вісник національного авіаційного університету. – 2011. – № 1. – С. 139–143.
7. *Запорожець О. І.* Принципи моделювання динаміки аероіонного складу повітря у приміщеннях / О. І. Запорожець, В. А. Глива, О. В. Сидоров // Вісник національного авіаційного університету. – 2011. – № 2. – С. 120–124.

## TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

8. *Левченко Л. О.* Тривимірне моделювання просторових розподілів концентрацій аеріонів у повітрі приміщень / Л. О. Левченко, В. А. Глива, О. В. Сидоров // *Управління розвитком складних систем.* – 2012. – № 11. – С. 198–206.
9. *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.
10. *Толкунов І. О.* Біполярна іонізація повітряного середовища приміщень функціональних підрозділів мобільного госпітально МНС / І. О. Толкунов // *Проблеми надзвичайних ситуацій.* – 2014. – Вип. 14. – С. 161–170.
11. *Толкунов І. О.* Моделювання процесів формування полів концентрації аеріонів у повітряному середовищі приміщень спеціального призначення МНС України / І. О. Толкунов, І. І. Попов // *Проблеми надзвичайних ситуацій.* – 2010. – Вип. 12. – С. 175–184.
12. *Толкунов І. 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.
13. *Air ion behavior* in ventilated rooms / L. A. Fletcher, C. J. Noakes, P. A. Sleight, C. B. Beggs, S. J. Shepherd // *Indoor and Built Environment.* – 2008. – Vol. 17, no. 2. – P. 173–182.
14. *Drexler P.* Numerical modeling of accuracy of air ion field measurement / Petr Drexler, Pavel Fiala, Karel Bartusek // *Journal of Electrical Engineering.* – 2006. – Vol. 57. – № 8/S. – P. 62–65.
15. *Murakami S.* Computational wind engineering / S. Murakami // *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics.* – 1990. – Vol. 36, Part 1. – P. 517–538.
16. *Noakes C. J.* Modelling the air cleaning performance of negative air ionisers in ventilated rooms / Noakes C. J, Sleight P. A, Beggs C. // *Proceedings of the 10<sup>th</sup> International Conference on Air Distribution in Rooms.* – Roomvert 2007, 13–15 June 2007, Helsinki.