

- тного запаздывания теплоносителя // Учебное пособие для ВУЗов.- Харьков: “Золотые страницы”, 2006.
4. Слесаренко А.П., Журавлев Ю.В. Управление тепловыми процессами при точном учете геометрической информации с помощью S-функций / Восточно-европейский журнал передовых технологий. - 2014.- №4/4(70).- С.23-28.
 5. Слесаренко А.П., Журавлев Ю.В., Жиленко В.Б. Разработка методологии моделирования формообразования поверхностей и тепловых процессов с помощью S-функций / Технологический аудит и резервы производства. - 2014.- №4/1(18).- С.48-53.
 6. Андреев С.Ю. Рациональные методы реконструкции городских систем теплоснабжения: Дис. канд. техн. наук (05.23.03)/ ХГТУСиА.- Харьков, 2003.- 163 с.
 7. Химмельблау Д. Прикладное нелинейное программирование. - М.: Мир, 1975.- 536с.
 8. Бузовера Н.П. Об аппроксимации таблично заданной функции кубическим сплайном со сглаживанием. - М.: ЦАГИ, 1983. - 22 с.
 9. Андреев С.Ю. Рациональные методы реконструкции городских систем теплоснабжения. - Коммунальное хозяйство городов: Респ. межвед. научно-тех. сб.- К.: Техніка. - № 27, 2001.- С. 216-222.
 10. Андреев С.Ю., Редько А.Ф. Рациональный выбор оборудования систем теплоснабжения // Пробл. машиностроения.- 2003.- Вып. 2.- С 531-533.

УДК 519.6

Беляев Н.Н.

*Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта
имени академика В. Лазаряна*

Цыганкова С. Г.

Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры

ОЦЕНКА АЭРОИОННОГО РЕЖИМА В РАБОЧЕЙ ЗОНЕ ПРИ ИСККУСТВЕННОЙ ИОНИЗАЦИИ ВОЗДУХА В ПОМЕЩЕНИИ

Постановка проблемы. Известно, что обеспечение необходимого аэроионного состава воздушной среды в рабочих зонах является крайне важной задачей в области охраны труда [1, 2-4, 6-8]. Для решения этой задачи достаточно часто применяют искусственную ионизацию воздуха в помещениях. Однако, при этом возникает необходимость обоснования места размещения ионизаторов, с целью получения требуемого качества воздушной среды в рабочих зонах. Такое обоснование можно сделать путем применения специальных расчетных методов. Анализ литературных источников показывает, что сейчас в Украине существует определенный дефицит таких методов, что ставит важную задачу их разработки.

Анализ публикаций. Основным трендом создания методов расчета аэроионного режима в помещениях, в Украине

является применение аналитических моделей [2-4, 6-8]. Такие модели позволяют быстро рассчитать концентрацию аэроионов, однако, без учета аэродинамики воздушных струй в помещении, наличия в нем оборудования, мебели, источников выделения пыли и т.п. – т.е. комплекса факторов, который оказывает определяющее влияние на формирование концентрационного поля аэроионов в рабочих зонах. Для получения более обоснованной прогнозной информации необходимо применение CFD моделей [1].

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

Изложение основного материала исследования. Известно, что на формирование концентрационного поля аэроионов в помещении оказывает влияние комплекс физических факторов: поток воздуха, вызванный работой вентиляции, 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]:

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

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_{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 [1]:

$$\frac{\partial E_x}{\partial x} + \frac{\partial E_y}{\partial y} = \frac{q_e}{\epsilon_0}, \quad (2)$$

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]

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} = -\frac{q_e}{\epsilon_0}, \quad (4)$$

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)

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

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

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 (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].

Для численного интегрирования уравнений переноса (1,5,9) используется неявная разностная схема, реализуемая по методу бегущего счета [9]. Для численного решения уравнения Лапласа и уравнения Пуассона применяется метод Либмана. Расчет выполняется на прямоугольной разностной сетке.

На основе данных разностных схем разработан пакет программ (код) «ION-2». 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 [9]. 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 рабочих зонах.

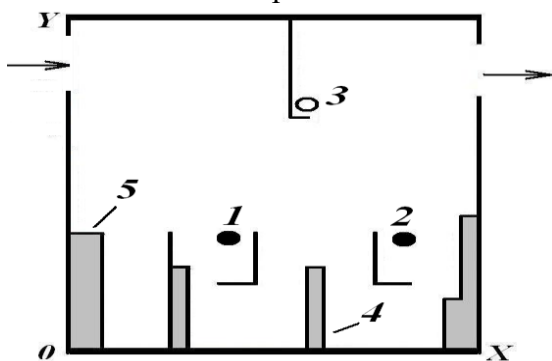


Рис .1. Схема расчетной области:

- 1, 2 – место эмиссии положительных ионов (голова работника);
- 3 – место эмиссии отрицательных ионов (положение ионизатора);
- 4 – стеллаж; 5 – шкаф

На рис. 1 представлена схема расчетной области – помещения, в котором установлено устройство для генерирования отрицательных ионов (рис. 1, позиция 3). Данное устройство размещено на специальной подставке возле потолка помещения (ее положение и форма задается маркерами). Эмиссия отрицательных ионов составляет $Q_c=6 \times 10^{11}$ частиц/с. Рабочая зона представлена двумя столами и разме-

щенными рядом стульями. Между рабочими местами расположен стеллаж, а возле левой стены помещения находится шкаф.

Источником эмиссии положительных ионов в помещении являются люди, поэтому в зоне расположения их органов дыхания (рис. 1, позиция 1 и 2) задаются точечные источники эмиссии положительных ионов с интенсивностью $Q_v=4 \times 10^7$ частиц/с. Остальные параметры задачи таковы: размеры расчетной области $6,25 \times 4,20$ м; кратность воздухообмена 2,5 [1/час], положение входного и выходного отверстий вентиляции показано стрелкой на рис.1; $\alpha=1,5 \times 10^{-12}$ м³/с, $\beta=1 \times 10^{-12}$ м³/с [1,2], 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 отсутствует эмиссия пыли. Цель расчета – определить концентрацию отрицательных ионов в помещении и в зоне расположения органов дыхания людей.

Результаты численного моделирования показаны на рис. 2. На данном рисунке показано концентрационное поле отрицательных ионов внутри помещения. Результаты моделирования приведены в безразмерном виде: каждое число – это величина концентрации в процентах от величины максимальной концентрации ионов в помещении St_{max} . Вывод на печать чисел осуществлен по формату «целое число», т.е. дробная часть числа не выдается на печать. Отметим, что такой формат печати означает, что если в какой – либо точке концентрация составляет, например, величину 32,55%, то на печать будет выведено число «32».

Выбранный подход к представлению результатов моделирования в виде печати матрицы концентрации ионов в расчетной области позволяет легко определить уровень ионизации воздуха в любой под-зоне помещения.

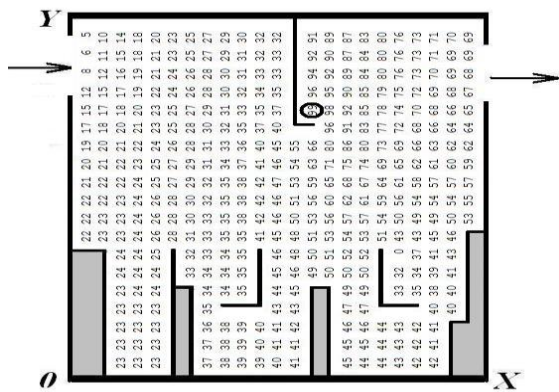


Рис.2. Распределение концентрации отрицательных аэроионов в помещении ($C_{\max}=0,12 \times 10^{12}$ частиц/м³)

Так концентрация C_w отрицательных аэроионов в зоне расположения органов дыхания людей (подзона вблизи верхней части стульев) составляет порядка $C_w=39\%$ ($C_w=0,04 \times 10^{12}$ частиц/м³) – в первой рабочей зоне и $C_w=71\%$ ($C_w=0,08 \times 10^{12}$ частиц/м³) – во второй рабочей зоне. Если принять во внимание, что максимально допустимая концентрация отрицательных ионов не должна быть более $0,05 \times 10^{12}$ частиц/м³, то очевидно, что в первой рабочей зоне имеет место соответствие этой норме, а во второй – нет. Если уменьшить интенсивность эмиссии отрицательных ионов до величины $Q_c=4 \times 10^{11}$ частиц/с, то расчет показывает, что концентрация отрицательных ионов на первом рабочем месте составит $C_w=0,03 \times 10^{12}$ частиц/м³, а на втором рабочем месте $C_w=0,05 \times 10^{12}$ частиц/м³.

В заключение отметим, что для решения задачи на базе разработанной CFD модели потребовалось порядка 3 минуты компьютерного времени.

Выводы. Предложена новая CFD модель для экспресс прогноза аэроионного режима в помещениях с искусственной ионизацией воздуха. Модель позволяет учесть основные физические факторы, определяющие формирование концентрационных полей аэроионов в помещении и в рабочих зонах. Дальнейшее развитие модели следует проводить в направлении создания пространственной численной модели прогноза аэроионного режима в помещениях.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Fletcher L. A. Air ion behavior in ventilated rooms / L. A. Fletcher, C. J. Noakes, P. A. Sleigh, C. B. Beggs, S. J. Shepherd // *Indoor and Built Environment*. – USA, 2008. – Vol. 17, no. 2, pp. 173-182.
2. Noakes C. J. Modelling the air cleaning performance of negative air ionisers in ventilated rooms / C. J. Noakes, P. A. Sleigh, C. B. Beggs // *Proceedings of the 10th International Conference on Air Distribution in Rooms – Roomvent 2007*, 13-15 June 2007, Helsinki.
3. 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.
4. 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*. – 2002. – №1. – С.30–36.
5. 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. Барбащин // *Проблеми надзвичайних ситуацій*. – 2010. – Випуск 11. – С.137-145.
6. Глива В. А. Дослідження просторових розподілів аероіонів навколо джерел іонізації повітря у робочих приміщеннях / В. А. Глива // *Проблеми охорони праці в Україні*. – 2010. – Вип. 19. – С. 123–127.
7. Левченко Л. О. Тривимірне моделювання просторових розподілів концентрацій аероіонів у повітрі приміщень / Л. О. Левченко, В. А. Глива, О. В. Сидоров // *Управління розвитком складних систем*. – 2012. Вип. 11. – С. 115 – 118.
8. Чураков А. Я. Визначення однакової концентрації аероіонів в робочій зоні / А. Я. Чураков, О. В. Сторокань // *Енергосбережение, энергетика, энергоаудит*. – Х.: НТУ «ХП», 2010. – №9. – С. 57-60.
9. 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.