

УДК 331.453:613.155:697.953:[519.6:004.94]

Н. Н. БЕЛЯЕВ^{1*}, С. Г. ЦЫГАНКОВА^{2*}

^{1*}Каф. «Гидравлика и водоснабжение», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепропетровск, Украина, 49010, тел. +38 (056) 373 15 09, эл. почта gidravlika2013@mail.ru, ORCID 0000-0002-1531-7882

^{2*}Каф. «Водоснабжение, водоотведение и гидравлика», Государственное высшее учебное заведение «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24-а, Днепропетровск, Украина, 49600, тел. +38 (0562) 47 02 79, эл. почта s-tsygankova@mail.ru, ORCID 0000-0002-9837-3109

CFD МОДЕЛИРОВАНИЕ АЭРОИОННОГО РЕЖИМА В РАБОЧИХ ЗОНАХ В УСЛОВИЯХ ИСКУССТВЕННОЙ ИОНИЗАЦИИ ВОЗДУХА

Цель. Работа предполагает создание CFD модели расчета аэроионного режима в помещениях и в рабочих зонах при искусственной ионизации воздуха путем установки ионизатора внутри помещения с учетом наиболее существенных физических факторов, оказывающих влияние на формирование концентрационного поля аэроионов. **Методика.** Предложенная CFD модель расчета аэроионного режима в рабочих зонах при искусственной ионизации воздуха путем установки ионизатора внутри помещения основана на применении уравнений аэродинамики, электростатики и массопереноса. Уравнение массопереноса учитывает взаимодействие ионов различной полярности друг с другом и с частицами пыли. Расчет скорости движения воздушных потоков в помещении осуществлялся на основе модели потенциального течения, для чего было использовано уравнение Лапласа для функции тока. Для расчета дрейфа заряженных частиц под действием электрического поля использовалось уравнение Пуассона для электрического потенциала. При моделировании учитывались: 1) влияние геометрических характеристик рабочей зоны; 2) местоположение отверстий приточно-вытяжной вентиляции; 3) расстановка мебели и оборудования; 4) режим воздухообмена в помещении; 5) наличие препятствий в процессе рассеивания аэроионов; 6) конкретное место эмиссии частиц пыли и ионов различной полярности и их взаимодействие в помещении и в рабочих зонах. **Результаты.** Разработанная CFD модель позволяет определить концентрацию отрицательных ионов в помещении и в зоне расположения органов дыхания человека. Распределение концентрации отрицательных аэроионов представлено в виде изолиний концентрационного поля. **Научная новизна.** Авторами создана 2D CFD модель для расчета аэроионного режима в рабочих зонах, предоставляющая возможность определять концентрационное поле аэроионов в заданном месте в помещении. Предложенная модель разработана с учетом: размещения мебели и оборудования в помещении; геометрических характеристик помещения; местоположения источников эмиссии пыли и ионов различной полярности; физических процессов, влияющих на формирование концентрационного поля аэроионов. **Практическая значимость.** Полученная 2D CFD модель для расчета аэроионного режима в рабочих зонах позволит рассчитывать концентрацию аэроионов в месте расположения дыхательных органов человека с учетом основных физических факторов, определяющих формирование концентрационных полей аэроионов. Это даст возможность рационально расположить ионизаторы в рабочих помещениях для создания комфортных условий работы персонала.

Ключевые слова: CFD модель; аэроионный режим; концентрационное поле аэроионов; искусственная ионизация

Введение

Для создания комфортных условий работы персонала как в производственных, так и в офисных помещениях, необходимо обеспечить в них определенные микроклиматические параметры, одним из которых является аэроионный состав воздушной среды [4–7, 13, 16].

Наиболее часто применяемым для создания и поддержания требуемого аэроионного режима способом на данный момент является искусственная ионизация воздуха в помещениях. В данной работе рассматривается искусственная ионизация помещения путем установки внутри него ионизатора воздуха. Однако, воз-

ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

никает необходимость заранее определять уровень отрицательных ионов в помещении. При этом применяемые методы расчета полей концентраций ионов должны учитывать все факторы, которые оказывают существенное влияние на рассеивание ионов в помещении, – наличие различных препятствий, мебели, оборудования и т.д.

В настоящий момент в Украине для расчета аэроионного режима в помещениях применяются в основном аналитические модели [4–12], позволяющие рассчитывать концентрацию аэроионов. Однако, существующие модели разработаны без учета влияния на аэроионный режим таких физических факторов, как источники выброса пыли в помещениях, наличие установленного оборудования и мебели и т.д. Для составления более точного прогноза уровня ионизации в помещении необходимо применение CFD моделей [2, 3, 13, 16]. Эти модели позволяют учесть аэродинамику воздушных потоков в помещении, что по мнению профессора Murakami S. [15], является главным фактором при исследовании процессов рассеивания примесей в помещениях.

Цель

Целью данной работы является создание CFD модели для расчета аэроионного режима в рабочих зонах помещений различного назначения, учитывающей при моделировании размещение мебели и оборудования в помещении, местоположение источников эмиссии пыли, а также физические процессы, влияющие на формирование концентрационного поля аэроионов.

Методика

Как известно, 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 [16]:

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

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 [16]:

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

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

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

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

Тогда получим уравнение Пуассона следующего вида [16]

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

где $q_e = -eC(x, y)$, $C(x, y)$ – концентрация отрицательных аэроионов; ϕ – скалярный по-

ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

тенциал; e – элементарний заряд. На базі даного рівняння здійснюється моделювання електричного поля.

Для описання процесів розсіяння позитивних іонів і пилу будемо використовувати рівняння переносу виду [16]:

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

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

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

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

Постановка краевых условий для моделирующих уравнений рассмотрена в [1, 13, 16].

Для численного интегрирования уравнений переноса [1, 12, 13, 16] используется неявная попеременно-треугольная разностная схема,

реализуемая по методу бегущего счета [1]. 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 [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 рабочих зонах.

На рис. 1 представлена схема расчетной области – помещения, в которое поступает воздух через два отверстия системы вентиляции. Выход воздуха из помещения происходит через отверстие на противоположной стенке. Рабочая зона представлена рабочим местом (стул и стол), слева и справа расположены стеллажи. Ионизатор располагается на левом стеллаже (рис. 1, а) и на полке, которая размещается на левой стенке помещения (рис. 1, б).

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 $Q_B = 8 \times 10^4$ частиц/с. Остальные параметры задачи таковы: размеры расчетной области $8,25 \text{ м} \times 4,2 \text{ м}$; положение входных и выходного отверстий вентиляции показано стрелками на рис. 1; $\alpha = 1,5 \cdot 10^{-12} \text{ м}^3/\text{с}$, $\beta = 1 \cdot 10^{-12} \text{ м}^3/\text{с}$ [13, 17];

ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

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, $Q_{Di} = 4 \cdot 10^4$ частиц/с (положение выброса пыли показано на рис. 1 волнистой линией).

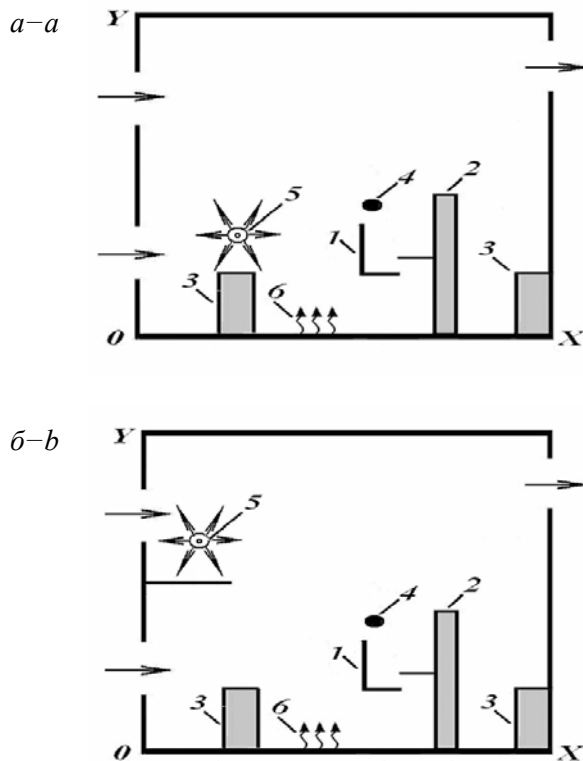


Рис. 1. Схема расчетной области:
1 – стул; 2 – рабочий стол; 3 – стеллаж;
4 – место эмиссии положительных ионов
(положение органов дыхания); 5 – ионизатор
воздуха; 6 – место эмиссии пыли

Fig. 1. The computational domain:
1 – chair; 2 – work desk; 3 – rack;
4 – place of positive ions emission
(the position of the respiratory organs);
5 – air ionizer; 6 – place of dust emission

Интенсивность эмиссии отрицательных ионов от ионизатора составляет $Q_C = 90 \cdot 10^{11}$ частиц/с (первый вариант эмиссии) и $Q_C = 70 \cdot 10^{11}$ частиц/с (второй вариант эмиссии) для случая расположения ионизатора на стеллаже, показанного на рис. 1, а. Для варианта расположения ионизатора на закрепленной на стенке по-

мещения полке (рис. 1, б) интенсивность эмиссии отрицательных ионов составляет $Q_C = 70 \cdot 10^{11}$ частиц/с.

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

Результаты численного моделирования показаны на рис. 2, 3.

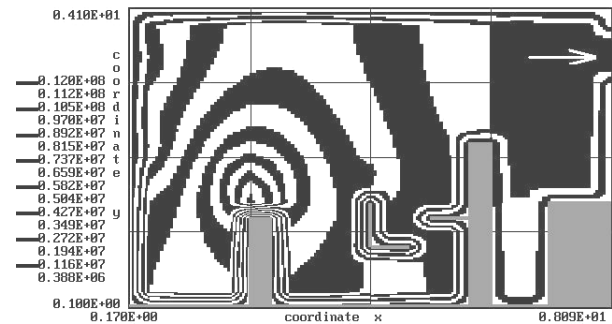


Рис. 2. Распределение концентрации отрицательных аэроионов в помещении для расположения ионизатора, соответствующего рис. 1, а ($Q_C = 70 \cdot 10^{11}$ частиц/с)

Fig. 2. Distribution of the negative air ions concentration in the room for ionizer location corresponding Fig. 1, a ($Q_C = 70 \cdot 10^{11}$ particles/s)

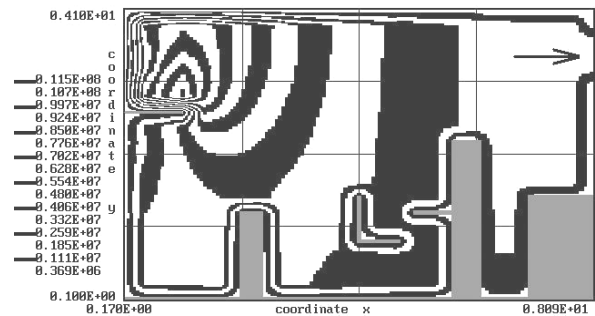


Рис. 3. Распределение концентрации отрицательных аэроионов в помещении для расположения ионизатора, соответствующего рис. 1, б ($Q_C = 70 \cdot 10^{11}$ частиц/с)

Fig. 3. Distribution of the negative air ions concentration in the room for ionizer location corresponding Fig. 1, b ($Q_C = 70 \cdot 10^{11}$ particles/s)

В результате проведенного вычислительного эксперимента установлено, что концентрация отрицательных ионов в зоне расположения органов дыхания человека составляет $C = 0,631 \cdot 10^{12}$ частиц/м³ (рис. 1, а, первый вариант эмиссии), $C = 0,48 \cdot 10^{12}$ частиц/м³ (второй

ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

вариант эмиссии), и $C = 0,27 \cdot 10^{12}$ частиц/м³ для ионизатора, расположенного на полке (рис. 1, б). Таким образом, для всех рассмотренных вариантов имеет место превышение допустимой нормы, которая составляет $0,05 \times 10^{12}$ частиц/м³.

Следует отметить, что изменить интенсивность концентрационного поля ионов в помещении можно не только изменяя положение ионизатора или его интенсивность, но и путем применения экрана. Экран может быть расположен различным образом в помещении относительно ионизатора и рабочих зон. Рациональное размещение экрана в помещении может быть определено путем расчета различных вариантов его размещения с помощью разработанной численной модели. Например, выберем вариант размещения экрана перед полкой, где расположен ионизатор (рис. 4) и выполним расчет концентрационного поля отрицательных аэроионов.

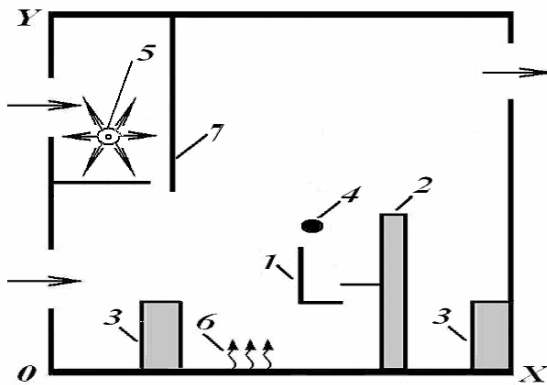


Рис. 4. Схема расчетной области:
1 – стул; 2 – рабочий стол; 3 – стеллаж;
4 – место эмиссии положительных ионов
(положение органов дыхания);
5 – ионизатор воздуха;
6 – место эмиссии пыли; 7 – экран

Fig.4. The computational domain:
1 – chair; 2 – work desk; 3 – rack;
4 – place of positive ions emission
(the position of the respiratory organs);
5 – air ionizer; 6 – place of dust emission;
7 – shield

Распределение концентрационного поля аэроионов в случае размещения экрана перед полкой, на которой установлен ионизатор, показано на рис. 5.

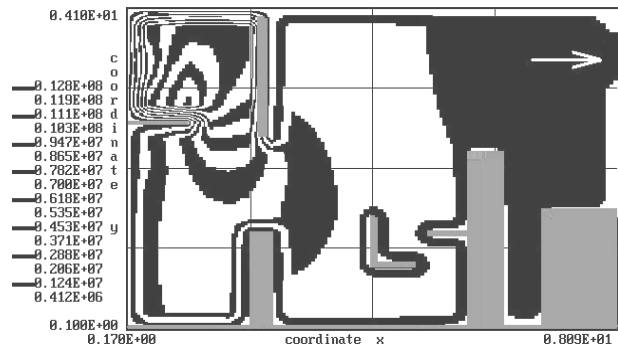


Рис. 5. Распределение концентрации отрицательных аэроионов в помещении для расположения ионизатора, соответствующего рис. 4

Fig. 5. Distribution of the negative air ions concentration in the room for ionizer location corresponding Fig. 4

Как видно из рис. 5, экран существенно повлиял на форму концентрационного поля в помещении. Это влияние проявляется и в изменении концентрации ионов на рабочем месте. Так, в зоне дыхания концентрация отрицательных ионов составляет $C = 0,14 \cdot 10^{12}$ частиц/м³. То есть, концентрация в рабочей зоне уменьшилась в два раза при использовании экрана.

В заключение отметим, что для решения задачи на базе разработанной CFD модели потребовалось порядка 2 минут компьютерного времени.

Научная новизна и практическая значимость

Разработана новая 2D CFD модель для расчета аэроионного режима в помещениях с искусственной ионизацией воздуха. Модель, основанная на применении уравнений аэродинамики, электростатики и массопереноса, позволяет учесть основные физические факторы, определяющие формирование концентрационных полей аэроионов в помещении и в рабочих зонах. Данная CFD модель позволяет рассчитывать концентрационное поле аэроионов в рабочих зонах помещения в условиях искусственной ионизации воздуха с учетом установленного оборудования и заданного местоположения ионизаторов.

Выводы

1. 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.

2. Предложенная численная модель позволяет учесть при расчете размещение мебели и оборудования в помещении, местоположение источников эмиссии пыли, а также физические процессы, влияющие на формирование концентрационного поля аэроионов.

3. Дальнейшее развитие модели следует проводить в направлении создания 3D CFD модели прогноза 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. Гулько, Н. В. Росточило. – Днепропетровск : Акцент ПП, 2014. – 136 с.
2. Беляев, Н. Н. Оценка аэроионного режима в рабочих зонах на базе CFD модели / Н. Н. Беляев, С. Г. Цыганкова // Зб. наук. пр. / Нац. гірн. ун-т. – Дніпропетровськ, 2015. – № 46. – С. 168–173.
3. Беляев, Н. Н. Расчет аэроионного режима в помещении и в рабочей зоне на базе численной модели / Н. Н. Беляев, С. Г. Цыганкова // Зб. наук. пр. / Нац. гірн. ун-т. – 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.] // Вісн. нац. техн. ун-ту України «Київський політехн. ін-т». Серія : «Гірництво». – Київ, 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 : зб. наук. пр. / Нац. ун-т цивіл. захисту України. – Харків, 2008. – Вип. 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 // Вісн. нац. авіац. ун-ту : зб. наук. пр. – Київ, 2011. – Вип. 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 // Вісн. нац. авіац. ун-ту : зб. наук. пр. – Київ, 2011. – Вип. 2. – С. 120–124.
8. 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 : зб. наук. пр. / Київ. нац. ун-т буд-ва і архіт. – Київ, 2012. – № 11. – С. 198–206.
9. Моделирование распределения концентрации ионов вблизи ионизатора / В. Е. Бахрушин, М. А. Игнашина, 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 госпіталю МНС / І. О. Толкунов // Проблеми надзвичайних ситуацій : зб. наук. пр. / Нац. ун-т цивіл. захисту України. – Харків, 2014. – Вип. 14. – С. 161–170.
11. Толкунов, І. О. Моделювання процесів формування полів концентрації аероіонів у повітряному середовищі приміщень спеціального призначення МНС України / І. О. Толкунов, І. І. Попов // Проблеми надзвичайних ситуацій : зб. наук. пр. / Нац. ун-т цивіл. захисту України. – Харків, 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 : зб. наук. пр. / Нац. ун-т цивіл. захисту України. – Харків, 2010. – Вип. 11. – С. 137–145.
13. Air ion behavior in ventilated rooms / L. A. Fletcher, C. J. Noakes, P. A. Sleigh [et al.] // Indoor and Built Environment. – 2008. – Vol. 17. – Iss. 2. – P. 173–182. doi: 10.1177/1420326X08089622.
14. Drexler, P. Numerical modeling of accuracy of air ion field measurement / P. Drexler, P. Fiala, K. Bartusek // J. of Electrical Engineering. – 2006. – Vol. 57, № 8/S. – P. 62–65.
15. Murakami, S. Computational wind engineering / S. Murakami // J. of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. – 1990. – Vol. 36, pt. 1. – P. 517–538. doi:10.1016/0167-6105(90)90335-A.

ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

16. Noakes, C. J. Modelling the air cleaning performance of negative air ionisers in ventilated rooms [Электронный ресурс] / C. J. Noakes, P. A. Sleight, C. Beggs // Pros. of the 10th Intern. Conf. on Air Distribution in Rooms – Roomvent 2007 (13.06–15.06.2007). – Helsinki, 2007. – Режим доступа: http://eprints.whiterose.ac.uk/77-00/1/Noakes_roomvent_07.pdf. – Загл. с экрана. – Проверено : 17.09.2015.
17. The impact of the air distribution method in ventilated rooms on the aerosol particle dispersion and removal: The experimental approach / A. Jurelionis, L. Gagytė, T. Prasauskas [et al.] // Energy and Buildings. – 2015. – Vol. 86. – P. 305–313. doi:10.1016/j.enbuild.2014.10.014.

М. М. БІЛЯЄВ^{1*}, С. Г. ЦИГАНКОВА^{2*}

^{1*}Каф. «Гідравліка та водопостачання», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпропетровськ, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 09, ел. пошта gidravlika2013@mail.ru, ORCID 0000-0002-1531-7882

^{2*}Каф. «Водопостачання, водовідведення та гідравліка», Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Чернишевського, 24-а, Дніпропетровськ, Україна, 49600, тел. +38 (0562) 47 02 79, ел. пошта s-tsygankova@mail.ru, ORCID 0000-0002-9837-3109

CFD МОДЕЛЮВАННЯ АЕРОІОННОГО РЕЖИМУ В РОБОЧИХ ЗОНАХ В УМОВАХ ШТУЧНОЇ ІОНІЗАЦІЇ ПОВІТРЯ

Мета. Робота передбачає створення CFD моделі розрахунку аероіонного режиму в приміщеннях і в робочих зонах при штучній іонізації повітря шляхом установки іонізатора всередині приміщення з урахуванням найбільш суттєвих фізичних факторів, що впливають на формування концентраційного поля аероіонів. **Методика.** Запропонована CFD модель розрахунку аероіонного режиму в робочих зонах при штучній іонізації повітря шляхом установки іонізатора всередині приміщення заснована на застосуванні рівнянь аеродинаміки, електростатики та масопереносу. Рівняння масопереносу враховує взаємодію іонів різної полярності один із одним та з частинками пилу. Розрахунок швидкості руху повітряних потоків у приміщенні здійснювався на основі моделі потенційної течії, для чого було використано рівняння Лапласа для функції току. Для розрахунку дрейфу заряджених частинок під дією електричного поля використовувалось рівняння Пуассона для електричного потенціалу. При моделюванні враховувались: 1) вплив геометричних характеристик робочої зони; 2) місце розташування отворів припливно-витяжної вентиляції; 3) розміщення меблів та устаткування; 4) режим повітрообміну в приміщенні; 5) наявність перешкод у процесі розсіювання аероіонів; 6) конкретне місце емісії частинок пилу та іонів різної полярності та їх взаємодія в приміщенні і в робочих зонах. **Результати.** Розроблена CFD модель дозволяє визначити концентрацію негативних іонів у приміщенні і в зоні розташування органів дихання людини. Розподіл концентрації негативних аероіонів представлено у вигляді ізоліній концентраційного поля. **Наукова новизна.** Авторами створена 2D CFD модель для розрахунку аероіонного режиму в робочих зонах, яка надає можливість визначити концентраційне поле аероіонів у заданому місці в приміщенні. Запропонована модель розроблена з урахуванням: розміщення меблів та обладнання в приміщенні; геометричних характеристик приміщення; місця розташування джерел емісії пилу та іонів різної полярності; фізичних процесів, що впливають на формування концентраційного поля аероіонів. **Практична значимість.** Отримана 2D CFD модель для розрахунку аероіонного режиму в робочих зонах дозволить розраховувати концентрацію аероіонів у місці розташування дихальних органів людини з урахуванням основних фізичних факторів, які визначають формування концентраційних полів аероіонів. Це дасть можливість раціонально розташувати іонізатори в робочих приміщеннях для створення комфортних умов роботи персоналу.

Ключові слова: CFD модель; аероіонний режим; концентраційне поле аероіонів; штучна іонізація

М. М. BILIAIEV^{1*}, S. G. TSYGANKOVA^{2*}

^{1*}Dep. «Hydraulics and Water Supply», National University of Railway Transport Named after Academician V. Lazaryan, Lazarian St., 2, Dnipropetrovsk, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 09, e-mail gidravlika2013@mail.ru, ORCID 0000-0002-1531-7882

²*Dep. «Water Supply, Drainage and Hydraulic», State Higher Educational Establishment «Pridneprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture», Chernyshevskiy St., 24-a, Dnipropetrovsk, Ukraine, 49600, tel. +38 (0562) 47 02 79, e-mail s-tsygankova@mail.ru, ORCID 0000-0002-9837-3109

CFD SIMULATION OF AIR ION REGIME IN WORK AREAS AT CONDITION OF ARTIFICIAL AIR IONIZATION

Purpose. The paper supposes creation of a CFD model for calculating the air ion regime in the premises and in work areas at artificial ionization of the air by the ionizer installation indoors with considering the most important physical factors that influence the formation of ions concentration field. **Methodology.** The proposed CFD model for calculation of the air ion regime in work areas at artificial ionization of the air by installing ionizer indoors is based on the application of aerodynamics, electrostatics and mass transfer equations. The mass transfer equation takes into account the interaction of different polarities of ions with each other and with the dust particles. The calculation of air flow rate in the room is realized on the basis of the potential flow model by using the Laplace equation for the stream function. Poisson equation for the electric potential is used for calculation of the charged particles drift in an electric field. At the simulation to take into account: 1) influence of the working area geometric characteristics; 2) location of the ventilation holes; 3) placement of furniture and equipment; 4) ventilation regime in the room; 5) presence of obstacles on the ions dispersion process; 6) specific location of dust particles emission and ions of different polarity, and their interaction in the room and in the working zones. **Findings.** The developed CFD model allows determining the concentration of negative ions in the room and in the area of the human respiratory organs. The distribution of the negative ions concentration is presented in the form of concentration field isolines. **Originality.** The 2D CFD model for calculating the air ion regime in working areas, providing the ability to determine the ions concentration in a given place in the room was created. The proposed model is developed taking into account: placement of furniture and equipment in the room; geometric characteristics of the room; location of dust emissions sources and ions of different polarity; physical processes affecting the formation of ions concentration field. **Practical value.** The obtained 2D CFD model for calculating the air ions regime in working areas allow to calculate the concentration of ions at the location of the respiratory organs, taking into account the basic physical factors determining the formation of ions concentration fields. It will allow rationally arranged the ionizers in the working premises to create the comfortable working conditions for staff.

Keywords: CFD model; air ions regime; concentration field of air ions; artificial ionization

REFERENCES

1. Beliaev N.N., Hunko E.Yu, Rostochilo N.V. *Zashchita zdaniy ot proniknoveniya v nikh opasnykh veshchestv* [Protection of building from hazardous substances penetration in them]. Dnipropetrovsk, Aktsent Publ., 2014. 136 p.
2. Beliaev N.N., Tsygankova S.G. Otsenka aeroionnogo rezhima v rabochikh zonakh na baze CFD modeli [Evaluation of air ion regime in work areas on the basis of CFD models]. *Zbirnyk naukovykh prats NGU* [Proc. of NMU], 2015, no. 46, pp. 168-173.
3. Beliaev N.N., Tsygankova S.G. Raschet aeroionnogo rezhima v pomeshchenii i v rabochey zone na baze chislennoy modeli [Calculation of air ion regime in the premises and work area on the basis of a numerical model]. *Zbirnyk naukovykh prats NGU* [Proc. of NMU], 2015, no. 47, pp. 137-143.
4. Hlyva V.A., Klapchenko V.I., Ponomarenko S.M. Vyznachennia ta prohnozuvannia dynamiky zminy aeriionnoho skladu povitria vyrobnychkykh prymishchen [Determination and prediction of the ionic air composition change dynamics in industrial premises]. *Visnyk natsionalnoho tekhnichnogo universitetu Ukrainy «Kyivskii politechnicheskii institut»* [Bulletin of National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute»], 2010, issue 19, pp. 161-168.
5. Tolkunov I.A., Mariniukh V.V., Popov I. I., Ponomar V.V. Deiaki aspekty zabezpechennia normatyvnoho aeroionnoho rezhymu robochoho seredovyscha primishchen spetsialnoho pryznachennia MNS Ukrainy [Some aspects of the regulatory ionic regime in working environment of the special purpose premises of the Ukrainian Ministry of Emergencies]. *Problemy nadzvychainykh situatsii* [Problems of Emergencies], 2008, no. 8, pp. 198-206.
6. Zaporozhets O.I., Hlyva V.A., Sidorov O.V. Normuvannia aeroionnoho skladu povitria robochykh prymishchen ta osnovni napriamy yogo vdoskonalennia [The standardization of the ionic air composition in work

ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

- premises and main directions of its improvement]. *Visnyk natsionalnoho aviatsiinoho universitetu* [Bulletin of National Aviation University], 2011, no 1, pp. 139-143.
7. Zaporozhets O.I., Hlyva V.A., Sidorov O.V. Printsypy modeliuvannia aeroionnoho skladu povitria u pry-mishchenniakh [The principles of modeling the ionic air composition in premises]. *Visnyk natsionalnoho aviatsiinoho universitetu* [Bulletin of National Aviation University], 2011, no. 2, pp. 12-124.
 8. Levchenko L.O., Hlyva V.A., Sidorov O.V. Tryvymirne modeliuvannia prostoro-vykh rozpodiliv kontsentratsii aeroioniv u povitri [Three-dimensional modeling of ions concentrations spatial distributions in indoor air]. *Upravlinnia rozvytkom skladnykh system* [Managing the development of complex systems], 2012, no. 11, pp. 198-206.
 9. Bahrushyn V.E., Ignakhina M.A., Vertinskii D.V., Yeevsiukov A.Yu. Modelirovaniye raspredeleniya kontsen-tratsii ionov vblizi ionizatora [Simulation of distributing concentration of ions nearly ionizator]. *Skladni sys-temy ta procesy – Complex systems and processes*, 2002, no. 1, pp. 30-36.
 10. Tolkunov I.A. Bipoliarnaia ionizatsia povitriano-go seredovyshcha primishchen funktsionalnykh pidrozdiliv mobilnogo hospitaliu MNS [Bipolaris ionization air environment of premises functional units mobile hospital of the Ministry of Emergencies]. *Problemy nadzvychainykh situatsii* [Problems of Emergencies], 2014, issue 14, pp. 161-170.
 11. Tolkunov I.A., Popov I.I. Modeliuvannia protsesiv formuvannia poliv kontsetrtsii aeroioniv u povitriano-mu seredovyshchi prymishchen spetsialnoho pryznachennia MNS Ukrainy [Simulation of the ions concentration fields formation in the air space of the special purpose premises of the Ukrainian Ministry of Emergencies]. *Problemy nadzvychainykh situatsii* [Problems of Emergencies], 2010, issue 12, pp. 175-184.
 12. Tolkunov I.A., Popov I.I., Barbasin V.V. Teoreticheskho-ye issledovaniye protsessov perenosa ionov v potokakh vozdukh v pomeshchenniakh spetsialnogo naznachenia MCHS Ukrainy [Theoretical study of the ions transport processes in the air flows in the special purpose premises of the Ukrainian Ministry of Emergencies]. *Problemy nadzvychainykh situatsii* [Problems of Emergencies], 2010, issue 12, pp. 137-145.
 13. Fletcher L.A., Noakes C.J., Sleigh P.A., Beggs C.B., Shepherd S.J. Air ion behavior in ventilated rooms. *Indoor and Built Environment*, 2008, vol.17, issue 2, pp. 173-182.
 14. Drexler P., Fiala P., Bartusek K. Numerical modeling of accuracy of air ion field measurement. *Journal of Electrical Engineering*, 2006, vol. 57, no. 8/S, pp. 62-65.
 15. Murakami S. Computational wind engineering. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1990, vol. 36, part 1, pp. 517-538.
 16. Noakes C.J., Sleight C.J., Beggs C. Modelling the air cleaning performance of negative air ionisers in ventilated rooms. Proc. of the 10th Intern. Conf. on Air Distribution in Rooms. Roomvent 2007, (13 -15 June 2007), Helsinki, 2007. Available at:http://eprints.whiterose.ac.uk/7700/1/Noakes_roomvent_07.pdf (Accessed 17 September 2015).
 17. Jurelionis A., Gagytė L., Prasauskas T., Čiužas D., Krugly E., Šeduikytė L., Martuzevičius D. The impact of the air distribution method in ventilated rooms on the aerosol particle dispersion and removal: The experimental approach. *Energy and Buildings*, 2015, vol. 86, pp. 305-313.

Статья рекомендована к публикации д.т.н., проф. Б. В. Виноградовым (Украина); д.т.н., проф. П. П. Ермаковым (Украина)

Поступила в редколлегию<12.11.2015

Принята к печати<14.01.2016