

6. Бруяцкий Е.В. Теория атмосферной диффузии радиоактивных выбросов / Бруяцкий Е.В. – К.: Институт гидромеханики НАН Украины, 2000. – 443 с.
7. Марчук Г.И. Математическое моделирование в проблеме окружающей среды / Марчук Г.И. – М.: Наука, 1982. – 320 с.
8. Самарский А.А. Теория разностных схем / Самарский А.А. – М.: Наука, 1983. – 616с.
9. Соботович Е.В. Аварія з фосфором у Львівській області: факти, проблеми, екологічні наслідки / Е.В. Соботович, Г.В. Лисиченко, Ю.Л. Забулонов, В.В. Ковалевський, М.Г. Бондаренко, Б.В. Сліпченко // Вісник Інституту геохімії навколишнього середовища. – 2007. – Вип. 14. – С. 8–18.
10. 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.

УДК 519.6: 697.953: 004.94

**Беляев Н.Н.**

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

**Цыганкова С. Г.**

*Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры*

### ЧИСЛЕННЫЕ МОДЕЛИ ДЛЯ ЭКСПРЕСС РАСЧЕТА КОНЦЕНТРАЦИИ АЭРОИОНОВ В ПОМЕЩЕНИИ

**Постановка проблемы.** Обеспечение необходимого состава воздушной среды в помещениях является важной задачей в области экологической безопасности и охраны труда [4-6]. Как правило, для поддержания необходимой концентрации аэроионов в помещениях применяют искусственную ионизацию воздуха. При этом возникает необходимость прогноза концентрационных полей аэроионов в любой части помещения для обоснования места рационального расположения ионизаторов.

В данное время, для решения задач такого класса требуется разработка специальных методов расчета, позволяющих быстро определять рациональное расположение ионизаторов в помещениях и необходимую их интенсивность.

**Анализ публикаций.** На данный момент в Украине для расчета аэроионного режима в помещениях, в основном используются аналитические модели [4-6], дающие возможность рассчитывать концентрацию аэроионов, однако не учитывающие при расчете размещение в помещении оборудования, мебели, источников

выделения пыли, аэродинамики воздушных струй в помещении, комплекса факторов, оказывающего определяющее влияние на формирование концентрационного поля аэроионов. Более полное представление о уровнях концентрации аэроионов в помещениях можно получить с помощью CFD моделей [2, 3, 8, 9], учитывающих при моделировании геометрические характеристики помещений и физические факторы, влияющие на поведение ионов, либо балансовых моделей [7], дающих возможность проведения так называемых «пилотных» расчетов.

**Целью** данной работы является разработка численных моделей для расчета аэроионного режима в помещениях различного назначения, позволяющих с достаточной оперативностью определять концентрацию аэроионов в помещении с учетом наиболее существенных физических факторов, влияющих на формирование концентрационного поля аэроионов.

**Изложение основного материала исследования.** Для расчета аэроионного режима в помещениях были разработаны две численные модели. Первая – CFD модель, основанная на двухмерных уравнениях

аэродинамики, электростатики и массопереноса [2, 3, 8, 9]. Вторая – модель, основанная на балансовых соотношениях для аэроионов [7].

В разработанной CFD модели при моделировании рассеивания отрицательных аэроионов в помещении использовалось уравнение переноса [9]:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial(u + bE)C}{\partial x} + \frac{\partial(v + bE)C}{\partial y} =$$

$$= \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) - \alpha CB -$$

$$- \beta CD + \sum Q_c(t) \delta(x - x_c) \delta(y - y_c), \quad (1)$$

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.

Аналогично уравнению (1) записываются уравнения переноса для описания процессов рассеивания положительных ионов и пыли [9].

Для расчета электрического поля в офисном помещении используется уравнение Пуассона следующего вида [9]

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

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 расчета аэродинамики воздушных потоков в помещении применена модель потенциального течения. Моделирующим уравнением является

уравнение Лапласа для потенциала скорости

$$\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} = 0, \quad (3)$$

где  $P$  – потенциал скорости.

Компоненты вектора скорости воздушной среды связаны с потенциалом скорости следующими зависимостями

$$u = \frac{\partial P}{\partial x}, \quad v = \frac{\partial P}{\partial y}. \quad (4)$$

Постановка краевых условий для моделирующих уравнений рассмотрена в [1, 8, 9].

Для численного интегрирования уравнений переноса 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.

При разработке балансовой модели для расчета концентрации аэроионов в помещении использовались следующие уравнения [7]:

$$\frac{dn}{dt} = q_n(t) - \alpha np - \beta nA +$$

$$+ n_0(t) \frac{Q(t)}{V} - n \frac{Q(t)}{V} - \lambda_i n \quad (5)$$

$$\frac{dp}{dt} = q_p(t) - \alpha np - \beta pA +$$

$$+ p_0(t) \frac{Q(t)}{V} - p \frac{Q(t)}{V} - \lambda_i n \quad (6)$$

где  $q_n$ ,  $q_p$  – скорость генерации соответственно отрицательных и положительных ионов в помещении;  $n_0$ ,  $p_0$  – внешние по отношению к комнате концентрации отрицательных и положительных ионов;  $\alpha$  – скорость рекомбинации ионов с ионами противоположной полярности;  $\beta$  –

скорость комбинации ионов с частицами пыли;  $A$  – концентрация частиц;  $V$  – объем;  $Q$  – скорость вентиляции;  $\lambda_i$  – электростатическое осаждение ионов.  $t$  – время,  $n$ ,  $p$ ,  $A$  – текущие концентрации отрицательных, положительных аэроионов и пыли соответственно.

Для описания массопереноса пыли использовалось уравнение вида [7]:

$$\frac{dA}{dt} = q_A(t) + A_0(t) \frac{Q(t)}{V} - A \frac{Q(t)}{V} - \lambda_p n \quad (7)$$

где  $q_A$  – скорость генерации частиц в пространстве;  $A_0$  – внешняя концентрация частиц;  $\lambda_p$  – электростатическое осаждение частиц.

Здесь отметим, что в отличие от классической модели Мауау  $Y$ . [7] в уравнениях (5) – (7) учитывается зависимость эмиссии отрицательных, положительных аэроионов и пыли в помещении от времени и зависимость от времени кратности воздухообмена. Система приведенных уравнений замыкается заданием начальных условий вида:

$$A(t=0) = A_0, \quad n(t=0) = n_0, \\ p(t=0) = p_0.$$

Данные условия определяют начальные значения величин концентрации пыли, отрицательных и положительных ионов соответственно перед началом ионизации воздуха в помещении. Следует отметить, что уравнения (5) – (7) определяют концентрацию отрицательных, положительных аэроионов и пыли не в самом помещении, а на выходе из него, что определено условием вывода этих балансовых соотношений.

Балансовые уравнения (5) – (7) численно решаются с помощью метода Эйлера. Для численного расчета уравнений (5) – (7) разработана программа BALANC-1, реализованная на языке FORTRAN. Для практического использования данной программы необходимо задать: объем помещения, вентиляционный расход, концентрацию отрицательных, положительных аэроионов и пыли, втекающих в помещение, интенсивность

эмиссии отрицательных, положительных аэроионов и пыли в помещении.

**Результаты.** Ниже приведены результаты практического применения разработанной CFD модели. На рис. 1 представлена схема расчетной области – помещения, в котором установлено устройство для генерирования отрицательных ионов (рис. 1, позиция 5). Рабочая зона представлена одним рабочим местом. Кроме этого, в помещении у левой его стены установлен стеллаж, перед рабочим столом – тумба, на которой расположен ионизатор. На рис. 1, б рассмотрен также вариант с установленным перед ионизатором экраном (рис. 1, б, позиция 8). В помещении происходит выброс пыли, при этом зона пылевыведения условно показана волнистыми стрелками на рис. 1. Положения отверстий вентиляции показаны на рис. 1 «стрелками».

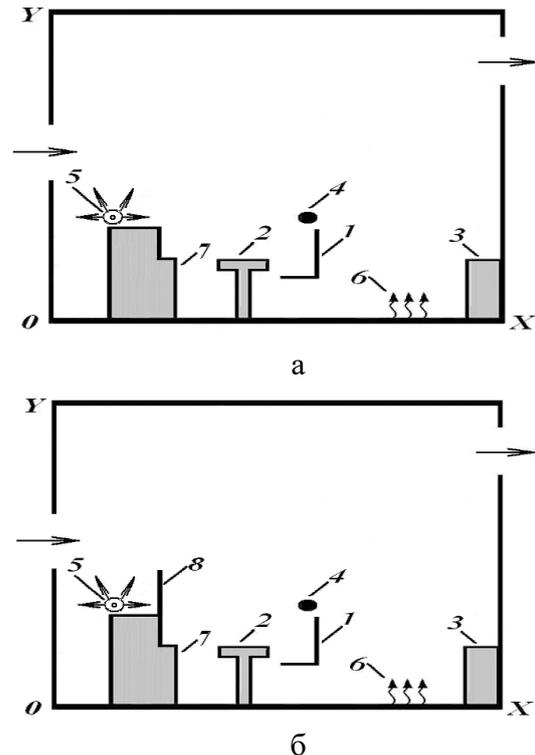


Рис. 1. Схема расчетной области: 1 – стул; 2 – рабочий стол; 3 – стеллаж; 4 – место эмиссии положительных ионов (положение органов дыхания); 5 – ионизатор воздуха; 6 – место эмиссии пыли; 7 – тумба; 8 – экран

Расчет выполнен при следующих исходных данных: размеры расчетной области 6,25×4,20м, интенсивность отрица-

тельных ионов составляет  $1,7 \times 10^{11}$  частиц/с, интенсивность положительных ионов  $6 \times 10^4$  частиц/с, интенсивность выброса пыли  $2 \times 10^6$  частиц/с. Расчет выполнен для двух вариантов – без экрана (рис. 1, а), и с экраном, установленном на тумбе (рис. 1, б). Распределение концентрации отрицательных аэроионов для каждого варианта задачи показано на рис. 2, 3.

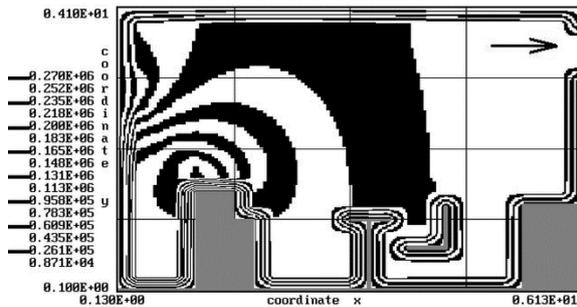


Рис. 2. Распределение концентрации отрицательных аэроионов в помещении (вариант, соответствующий рис. 1, а)

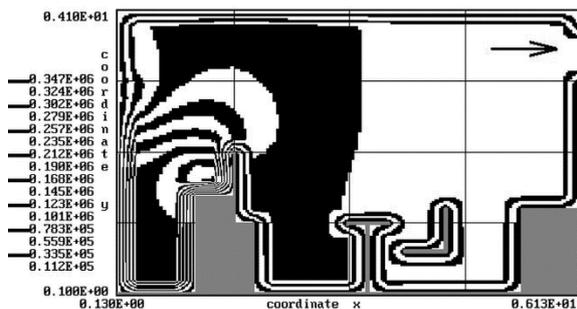


Рис. 3. Распределение концентрации отрицательных аэроионов в помещении (вариант, соответствующий рис. 1, б)

Как видно из представленных рисунков, экран существенно влияет на форму и интенсивность концентрационного поля ионов. Так, при отсутствии экрана, (рис. 2), четко виден направленный поток аэроионов в сторону рабочего места. При наличии экрана (рис. 3) картина распределения концентрационного поля аэроионов изменяется и видна тенденция направленного движения ионов от ионизатора к потолку. Экран позволяет изменить величину концентрации ионов в помещении и, в частности, на рабочем месте. Так, при отсутствии экрана, концентрация отрицательных ионов на месте расположения органов дыхания работника составляет  $0,011 \times 10^{12}$  частиц/м<sup>3</sup>, а при наличии экрана,  $0,0089 \times 10^{12}$  частиц/м<sup>3</sup>. Таким образом, варьируя размерами и положением

экрана, можно регулировать концентрацию аэроионов как в помещении, так и самой рабочей зоне.

Для решения задачи на базе разработанной CFD модели требуется порядка 10 секунд компьютерного времени.

**Выводы.** Разработаны численные модели для экспресс расчета аэроионного режима в помещениях с искусственной ионизацией воздуха, осуществляемой путем установки ионизатора воздуха внутри помещения. Полученные результаты дают 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. В дальнейшем развитие модели следует проводить в направлении создания 3D CFD модели расчета аэроионного режима в помещениях.

ЛИТЕРАТУРА:

1. 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.
2. Беляев, Н. Н. Оценка аэроионного режима в рабочих зонах на базе CFD модели / Н. Н. Беляев, С. Г. Цыганкова // Збірник наукових праць Національного гірничого університету. – 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 // Збірник наукових праць Національного гірничого університету. – Дніпропетровськ, 2015. - №47. – С. 137–143.
4. 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.
5. 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.
6. Толкунов И. А. Теоретическое исследование процессов переноса аэроионов в по-

- токах воздуха в помещениях специального назначения МЧС Украины / И. А. Толкунов, И. И. Попов, В. В. Барбашин // Проблемы надзвичайних ситуацій. – 2010. – Випуск 11. – С.137-145.
7. Aerosol removal by unipolar ionization in indoor environments. / Mayya Y. S, Sapra B. K., Khan A., Sunny F. Journal of Aerosol Science. Vol 35, 2004. – pp. 923-941.
8. Fletcher L. A. 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. – USA, 2008. – Vol. 17, no. 2, pp. 173-182.
9. Noakes C. J. Modelling the air cleaning performance of negative air ionisers in ventilated rooms / C. J. Noakes, P. A. Sleight, C. B. Beggs // Proceedings of the 10th International Conference on Air Distribution in Rooms – Roomvent 2007, 13-15 June 2007, Helsinki.

УДК 621.311

**Юрченко В.А., Скочко С.А., Нестеренко Е.В.***Харківський національний технічний університет будівництва та архітектури***ВОЗМОЖНОСТИ ПОЛУЧЕНИЯ И УТИЛИЗАЦИИ БИОГАЗА НА ПОЛИГОНАХ ТБО (твердых бытовых отходов)**

В Украине существуют полигоны и свалки твердых бытовых отходов (ТБО), которые занимают тысячи гектаров пригодных для использования земель, и это – без учета многих крупных несанкционированных свалок. [1 – 3].

Большую опасность представляют собой старые полигоны, включая несанкционированные свалки, не имеющие соответствующего инженерного оборудования, санитарных защитных зон и нередко, находящихся в непосредственной близости от заселенных территорий. Это объясняется разными причинами. Во – первых, это негативное влияние на окружающую среду связано с тем, что, занимая значительную площадь, они действуют как активные искусственные биореакторы, внутри которых в процессе многолетнего гниения отходов образуется биогаз, содержащий метан, углекислый газ и воду. Биологическое разложение и химическое окисление тела свалки может сопровождаться образованием очагов выделения тепла с повышением температуры до 75 – 85 °С, что вызывает угрозу самовозгорания отходов. Гниение тела свалки сопровождается распространением удушающего запаха на расстояние более 1 км. Во – вторых, в местах захоронения ТБО отмечается не только сильное поверхностное загрязнение

почв на больших территориях, но и подземных вод и грунтов до глубины более 20 м. При этом, установлено, что фильтрационные воды также являются источником загрязнения поверхностных вод Fe, Ba, Cr, P, Ti, Ni, нитратами, аммонием, концентрации которых составляют от 2 до 100 ПДК. Фильтрационные воды токсичны для живых организмов. Особая опасность возникает в том случае, если вблизи захоронений ТБО располагаются и эксплуатируются артезианские водонапорные скважины. В – третьих, в районе свалок создаются новые искусственные экосистемы с обилием насекомых, птиц, грызунов – переносчиков возбудителей многих тяжелых заболеваний. В – четвертых, большую опасность для окружающей среды представляют собой постоянно растущее количество несанкционированных свалок, куда нелегально сбрасывают многие опасные ядовитые и токсичные отходы, запрещенные для приема в официальных местах захоронения ТБО.

**Цель статьи** – проанализировать способы получения, сбора, утилизации биогаза на полигонах ТБО.

**Основное содержание статьи.** Наибольшее распространение приобрели такие методы обезвреживания и переработки биогаза из ТБО: