

- торемедіації при очищенні інфільтрату полігонів твердих побутових відходів.//IX Міжнародна науково-практична конференція «Екологічна безпека: проблеми і шляхи вирішення» :Зб.наук.ст. у 2-х т. Т.2./УкрНДІЕП.-Х.;Райдер, 2013.-С.245-249.*
7. Кізєєв М. Д., Кухар А. М., Швороб С. В. Тех-

- ніко-економічна оптимізація проектних рішень для будівництва та реконструкції систем водовідведення. //Вісник СХУ ім. В. І. Даля. – 2007. – № 4 (110). Ч. 2. – С. 86-91.*
8. Gilcrease P. C., Shur G. W.. *Биогенный метан – энергоресурс будущего// Нефтегазовые технологии. -2008. -№3.-С.16-19.*

УДК 519.6:504.3.054

Беляев Н.Н., Затынайченко Д.О.

Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта им. академика В. Лазаряна

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАССЕЙВАНИЯ АЭРОИОНОВ В ПОМЕЩЕНИИ МЕТОДОМ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

Введение. В настоящее время повышенное внимание уделяется проблеме обеспечения нормального аэроионного режима (в первую очередь – обеспечение необходимой концентрации отрицательных аэроионов) на рабочих местах [1,2,4,5]. Для решения этой задачи в помещениях устанавливаются аэроионизаторы, генерирующие поток аэроионов. Но концентрация аэроионов, при работе аэроионизатора, в различных точках помещения будет различной. На рассеивание аэроионов будет оказывать влияние целый ряд факторов: мебель, наличие в помещении источников генерации положительных ионов и т.д. В этой связи становится крайне важным прогноз концентрации аэроионов различного знака, как во всем помещении, так и в конкретных зонах, с целью реального обеспечения требуемых параметров микроклимата там, где находятся люди. Решение данной задачи может быть найдено с помощью метода математического моделирования. Для практики важно иметь математические модели, позволяющие прогнозировать аэроионный режим (АР) в помещениях с учетом основных физических факторов, влияющих на процесс рассеивания аэроионов в помещении.

Анализ публикаций. Для теоретического решения рассматриваемой задачи в Украине используются аналитические модели. Данные модели построены на основе аналитического решения одномерного

уравнения переноса примеси [2,3] или на основе аналитических зависимостей и полуэмпирических формул, полученных для свободных турбулентных струй [4,5]. Данные модели дают возможность оперативно рассчитать концентрацию аэроионов в помещениях с учетом скорости воздушного потока, диффузии, интенсивности эмиссии аэроионов. Но данные модели не учитывают следующие факторы:

1. Наличие в помещениях различного рода препятствий - мебели, оборудования, влияющих на формирование поля скорости воздушного потока в помещении, а значит – на распределение аэроионов в нем.

2. Положение отверстий приточно-вытяжной вентиляции в помещении и режим вентилирования помещения.

3. Наличие в помещении источников эмиссии положительных ионов, что приводит к необходимости учета их влияния на концентрацию отрицательных аэроионов.

Целью работы является разработка CFD модели для прогноза аэроионного режима в помещениях, и позволяющей при моделировании учитывать: положение отверстий приточно-вытяжной вентиляции, режим воздухообмена, размещение оборудования в помещении, его форму, режим эмиссии аэроионов в помещении и пылевое загрязнение воздушной среды в помещении.

Моделирующие уравнения. Для моделирования процесса переноса аэроионов в помещении (как положительных ионов,

так и отрицательных - ОИ) будем использовать уравнение переноса [1,6]

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

$$- \alpha CB - \beta CD + \sum Q_c(t) \delta(x - x_c) \delta(y - y_c)$$

$$\frac{\partial B}{\partial t} + \frac{\partial uB}{\partial x} + \frac{\partial vB}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_x \frac{\partial B}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_y \frac{\partial B}{\partial y} \right) - \alpha CB - \beta BD + \sum Q_b(t) \delta(x - x_b) \delta(y - y_b) \quad (2)$$

$$- \alpha CB - \beta BD + \sum Q_b(t) \delta(x - x_b) \delta(y - y_b)$$

где C, B – концентрация отрицательных и положительных аэроионов 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}, Q_{Bi} , – интенсивность эмиссии отрицательных и положительных ионов в соответствующих точках с координатами x_c, y_c и т.д.; $\delta(x - x_i) \delta(y - y_i)$ и т.п. – дельта-функция Дирака. Ось Y направлена вертикально вверх.

Так как в уравнениях (1), (2) учитывается взаимодействие ионов различной полярности с частицами пыли, поэтому к данным уравнениям добавляется еще одно уравнение – уравнение рассеивания частиц пыли в помещении

$$\frac{\partial D}{\partial t} + \frac{\partial uD}{\partial x} + \frac{\partial vD}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_x \frac{\partial D}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_y \frac{\partial D}{\partial y} \right) + \sum Q_{Di}(t) \delta(x - x_{Di}) \delta(y - y_{Di}) \quad (3)$$

$$+ \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_y \frac{\partial D}{\partial y} \right) + \sum Q_{Di}(t) \delta(x - x_{Di}) \delta(y - y_{Di})$$

где D – концентрация пылевых частиц.

Обозначение остальных параметров в данном уравнении совпадает с аналогичными обозначениями, приведенными для уравнений (1), (2). Так как рассматривается распространение в помещении пылевых частиц малого размера, то в уравнение переноса (3) не включено слагаемое, отвечающее за гравитационное оседание пылевых частиц.

Постановку граничных условий для уравнений модели (1) – (3) рассмотрим на примере уравнения (1), т.к. постановка граничных условий для других уравнений модели – аналогична. Для уравнения (1), на стенах комнаты, потолке, полу, а также твердых стенках различных пре-

пятствий в помещении (шкафы, стулья и т.п.) ставится граничное условие вида [6]

$$\frac{\partial C}{\partial n} = 0,$$

где n – единичный вектор внешней нормали к твердой поверхности.

На границе входа воздушного потока в помещение ставится условие:

$$C|_{ent} = C,$$

где C – известное значение концентрации ионов.

На выходе воздушного потока из помещения в дискретной модели ставится «циклическое» граничное условие вида

$$C(i+1, j) = C(i, j),$$

где $i+1, j$ – номер разностной ячейки на выходе из расчетной области.

В начальный момент времени полагается $C=C_0$, где C_0 – заданное значение концентрации ионов в расчетной области (в рассматриваемой ниже задаче, для отрицательных аэроионов – данная величина равна нулю).

Работа системы вентиляции, приводит к формированию неравномерного поля скорости воздушной среды внутри помещения, что крайне усложняет теоретическое решение рассматриваемой задачи. Внутри помещений находятся различные препятствия, например – мебель, оборудование и т.п. Эти препятствия, а также положение приточных и вытяжных отверстий и определяют, в основном, аэродинамику воздушных потоков в помещениях. Поэтому, прежде чем решать задачу прогноза концентрации ионов в помещении, на базе приведенных уравнений, необходимо рассчитать компоненты вектора скорости воздушного потока в помещении с учетом нахождения в помещении препятствий. Эти компоненты вектора скорости должны удовлетворять уравнению неразрывности. Таким образом, необходимо решить гидродинамическую задачу. Для решения этой задачи используется модель потенциального течения. В этом случае для определения значений компонент вектора скорости воздушной среды в помещении следует, первоначально определить по-

тенциала скорости. С этой целью необходимо проинтегрировать уравнение [7]

$$\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} = 0, \quad (4)$$

где P – потенциал скорости.

Для уравнения (4) ставятся следующие граничные условия [6,7]:

- на твердых стенках: $\frac{\partial P}{\partial n} = 0$, где n – единичный вектор внешней нормали к твердой границе;
- на месте расположения приточного отверстия: $\frac{\partial P}{\partial n} = V_n$, где V_n – известное значение скорости входящего воздушного потока;
- на месте расположения вытяжного отверстия: $P = P^*(x = const, y) + const$.

Для определения компонент вектора скорости воздушной среды используются зависимости [6,7]:

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

Численное интегрирование уравнений модели. При численном интегрировании уравнений модели используется прямоугольная разностная сетка. Для численного интегрирования уравнения (4) используется идея установления решения по времени, поэтому численно интегрируется следующее уравнение

$$\frac{\partial P}{\partial \eta} = \frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2}, \quad (5)$$

здесь η – фиктивное время.

При $\eta \rightarrow \infty$ решение уравнения (5) будет стремиться к «установлению», т.е. к решению уравнения (4).

Для численного интегрирования уравнения (5) используется неявная схема суммарной аппроксимации [8].

После расчета поля потенциала скорости осуществляется расчет компонент вектора скорости потока на сторонах разностных ячеек:

$$u_{ij} = \frac{P_{i,j} - P_{i-1,j}}{\Delta x}; \quad v_{ij} = \frac{P_{i,j} - P_{i,j-1}}{\Delta y}.$$

Перед началом численного интегрирования уравнения (5) задается поле по-

тенциала скорости для «начального» момента фиктивного времени. Для численного интегрирования уравнений переноса (1-3) применяется их физическое расщепление на три шага. На первом шаге расщепления учитывается процесс переноса примеси под действием направленного движения воздушного потока, на втором шаге учитывается перенос под действием диффузии, а третье уравнение учитывает изменение концентрации примеси под действием источников (стоков). Для интегрирования полученных уравнений используется неявная попеременно-треугольная разностная схема [6,8]. В разработанном коде расчет каждого шага расщепления реализован в виде отдельной подпрограммы.

Формирование вида расчетной области. Для формирования вида расчетной области (рис. 1) используется метод фиктивных областей [6].

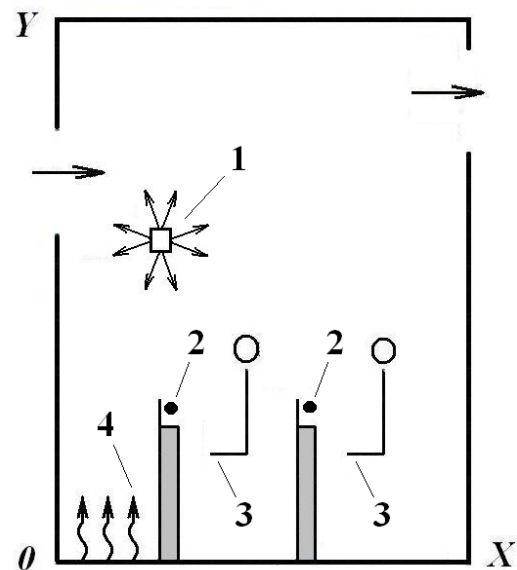


Рис. 1 - Схема расчетной области: 1 – положение аэроионизатора (источник эмиссии ОИ); 2 – источник эмиссии положительных ионов; 3 – рабочее место (стул); 4 – место эмиссии пыли.

Для задания в численной модели положения отверстий приточно-вытяжной вентиляции, места эмиссии ионов или пыли используется метод маркирования [6]. Формирование вида расчетной области пользователь осуществляет в файле исходных данных. Изменение вида рас-

четной области не требует внесения изменения в разработанный код.

Исходные данные для проведения CFD моделирования. При практической реализации построенной CFD модели необходимо задать:

1. Форму помещения.
2. Размещение мебели, оборудования (или других объектов) в помещении.
3. Положение приточных и вытяжных отверстий вентиляции.
4. Скорость воздушного потока на выходе из приточного отверстия.
5. Значение коэффициентов диффузии.
6. Место и интенсивность эмиссии отрицательных ионов в помещении.
7. Положение и интенсивность источников эмиссии положительных ионов, пыли в помещении.

Задание исходных данных осуществляется в файле исходных данных типа «DAT».

Результаты вычислительного эксперимента. Разработанная численная модель была применена для решения задачи о прогнозе АР рабочем помещении, где находятся два рабочих места. Схема расчетной области – помещения, в котором моделируется аэроионный режим, показана на рис.1. В каждой рабочей зоне (рис.1, позиция 3) происходит эмиссия положительных ионов с интенсивностью $3 \cdot 10^4$ частиц /с. Приточное отверстие вентиляции размещено на середине левой стены, выход воздуха из помещения происходит через отверстие на правой стене. Полагается, что на полу, возле левой стены помещения имеет место постоянный выброс пыли в количестве $3 \cdot 10^6$ частиц/с (данная зона условно показана волнистыми стрелками на рис.1). Остальные параметры задачи таковы: размеры расчетной области 6.25м·4.2м; ширина комнаты 6м; $\alpha = 1,5 \cdot 10^{-12} \text{ м}^3/\text{с}$, $\beta = 1 \cdot 10^{-12} \text{ м}^3/\text{с}$ [1]; коэффициенты турбулентной диффузии по всем направлениям приняты равными $0.4 \text{ м}^2/\text{с}$; скорость входа воздушного потока через приточное отверстие вентиляции равна 1 м/с. В помещении размещается источник (ионизатор) эмиссии отрицательных ионов, его ин-

тенсивность $Q_c = 10^{11}$ частиц/с. Рассматриваются два варианта размещения источника в помещении: в первом варианте его координаты равны $x=1.87\text{м}$, $y=2.3\text{м}$; во втором варианте - $x=1.37\text{м}$, $y=2.3\text{м}$. Таким образом, во втором варианте ионизатор располагается ближе к левой стене помещения, а первом варианте – ближе к его середине.

Результаты CFD моделирования на базе разработанной численной модели представлены ниже. На рис. 2 и 3 показано распределение концентрации отрицательных ионов внутри помещения. Результаты расчета представлены в виде матриц значения концентрации. Здесь, на матрицах, значение концентрации представлено в безразмерном виде: каждое число – это величина концентрации в процентах от величины максимальной ($C_{\text{max}} = 0.18 \cdot 10^{11}$ частиц/м³) концентрации. Вывод на печать чисел осуществлен по формату «целое число».

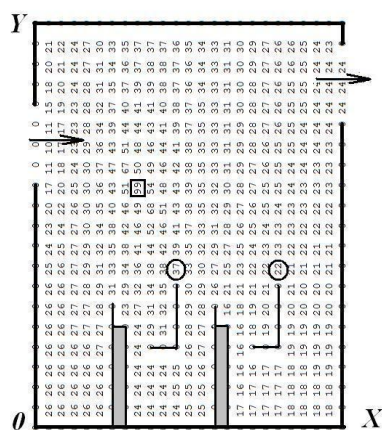


Рис. 2 - Распределение концентрации отрицательных аэроионов в помещении (первый вариант).

На данных рисунках положению ионизатора соответствует число «99», на рисунках эта позиция условно показана «квадратом». Представление результатов прогноза в виде матриц позволяет быстро выявить зоны с повышенной или пониженной концентрацией отрицательных аэроионов в помещении. Как известно, основной практический интерес представляет прогноз аэроионного режима в помещении в тех зонах, где находится персонал и органы дыхания работников.

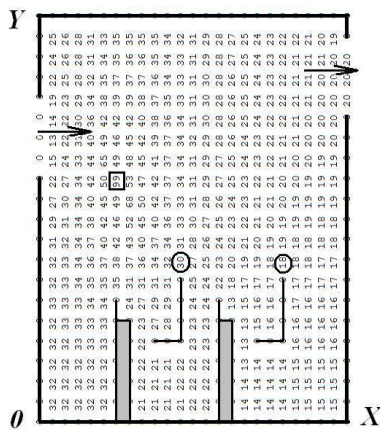


Рис. 3 - Распределение концентрации отрицательных аэроионов в помещении (второй вариант).

Для оценки аэроионного режима выбрана позиция над спинками стульев, т.е. там, где находится голова работника. Эта зона на рисунках условно представлена в виде «кружка». Результаты расчета концентрации отрицательных ионов для каждой такой зоны представлены в табл. 1 и табл. 2. В таблицах также приведены значения скорости воздушного потока для каждой зоны, поскольку известно, что в рабочей зоне данная величина должна быть ограничена по величине для создания комфортных условий для работника.

Таблица 1 - Концентрация отрицательных аэроионов в зоне дыхания работника и скорость воздушного потока в этой зоне при наличии экрана (первый вариант задачи).

Рабочее место	Концентрация отрицательных аэроионов, частиц/м ³	Скорость воздушного потока, м/с
Первое рабочее место	70 · 10 ⁸	0.27
Второе рабочее место	42 · 10 ⁸	0.20

Если принять во внимание, что минимальная концентрация отрицательных аэроионов должна составлять величину порядка 6 · 10⁸ частиц/м³, а граница оптимальной зоны 30 · 10⁸ – 500 · 10⁸ частиц/м³,

то видно, что на обоих рабочих местах, в зоне дыхания работников имеет место достаточная концентрация отрицательных аэроионов. Скорость воздушного потока для первого рабочего места несколько больше рекомендуемой величины – 15 – 20 см/с.

Таблица 2 - Концентрация отрицательных аэроионов в зоне дыхания работника и скорость воздушного потока в этой зоне (второй вариант задачи).

Рабочее место	Концентрация отрицательных аэроионов, частиц/м ³	Скорость воздушного потока, м/с
Первое рабочее место	57 · 10 ⁸	0.27
Второе рабочее место	35 · 10 ⁸	0.20

В заключение отметим, что расчет одного варианта задачи на базе разработанной CFD модели составляет порядка 5с компьютерного времени.

Выводы. В работе разработана CFD модель для расчета аэроионного режима в помещениях. Расчет рассеивания аэроионов в помещении основывается на решении двух задач: первая задача – гидродинамическая (расчет поля скорости воздушного потока в помещении при выбранном режиме вентиляции), вторая задача – расчет транспорта аэроионов в помещении. Основной особенностью построенной CFD модели является то, что она позволяет быстро проводить расчет с учетом таких важных факторов как наличие мебели в помещении, положения приточных и вытяжных отверстий вентиляции и т.п. Построенная численная модель может служить инструментом решения задач по определению оптимального аэроионного режима в производственных, жилых и общественных помещениях. Дальнейшее развитие модели следует проводить в направлении создания пространственной численной модели прогноза аэроионного режима в помещениях.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРЫ:

1. Fletcher L.A., Noakes C.J., Sleigh P.A., Beggs C.B., Shepherd S.J. (2008) Air ion behavior in ventilated rooms. *Indoor and 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. Вертинский, А.Ю. Евсюков // Складні системи та процеси. №1, 2002. – 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 // Проблемы надзвичайних ситуацій. Випуск 11, 2010.- С.137-145.
5. Толкунов И.А. Біполярна іонізація повітряного середовища приміщень функціональних підрозділів мобільного госпіталю МЧС / Проблемы надзвичайних ситуацій. Випуск 14, 2011. – С. 161-170.
6. Згуровский М. З. Численное моделирование распространения загрязнения в окружающей среде / М. З. Згуровский, В. В. Скопецкий, В. К. Хрущ, Н. Н. Беляев. – К.: Наукова думка, 1997. – 368 с.
7. Лойцянский Л. Г. Механика жидкости и газа. - М.: Наука, 1978. 735 с.
8. Самарский А. А. Теория разностных схем. - М.: Наука, 1983. 616 с.

УДК 697.34

**Тарадай А.М., д-р. техн. наук, Стоянов Ф.А., д-р. техн. наук,
Кириленко И.Г., аспирант**

Харьковский национальный университет строительства и архитектуры

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВИДА ТОПЛИВА НА ОПТИМАЛЬНОЕ
РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛОВОЙ НАГРУЗКИ МЕЖДУ
ТЕПЛОФИКАЦИОННЫМИ ТУРБИНЫМИ УСТАНОВКАМИ
И ПИКОВЫМИ ВОДОГРЕЙНЫМИ КОТЛАМИ ТЭЦ**

Одним из наиболее действенных способов повышения экономической эффективности систем централизованного и децентрализованного теплоснабжения является применение компьютерных технологий для оптимального управления ними.

Такая задача решалась в работах [1-3], но только для газового топлива. В настоящее время, в условиях постоянного роста цен на топливо (в особенности природный газ) возникла необходимость разработки алгоритма и программного комплекса для оптимального управления системой теплоснабжения, работающей на альтернативных видах топлива (уголь, дрова и др.). Именно такая задача решается в настоящей статье.

В качестве примера рассматривается ТЭЦ, состоящая из трех теплофикационных турбин и четырех пиковых водогрейных котлов, схема которой приведе-

на на рис. 1. Формальная постановка задачи оптимального управления ТЭЦ выглядит следующим образом.

При заданной температуре наружного воздуха $t_{нв}$, $^{\circ}\text{C}$, найти величины тепловых нагрузок на три теплофикационные турбины $Q_{т,1,опт}$, $Q_{т,2,опт}$ и $Q_{т,3,опт}$, МВт; и четыре водогрейных котла $Q_{к,j,опт}$; $j = \overline{1,4}$ (первый из которых имеет ухудшенные экономические характеристики из-за большого срока эксплуатации), обеспечивающие минимум m – суммарных потерь в системе ТЭЦ. Структурная схема решения общей оптимизационной задачи приведена на рис. 2.

На первом этапе для заданных $t_{нв}$, $^{\circ}\text{C}$ (блок 2) выбираются суммарная нагрузка $Q = Q_k + Q_t$ (на пиковые водогрейные котлы Q_k и на турбины Q_t , МВт) таким образом, чтобы выполнялся заданный универсальный температурный график.