

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАГАЗОВАННОСТИ ОБЩЕСТВЕННОГО ПОМЕЩЕНИЯ ТОКСИЧНЫМ ГАЗОМ

На базі моделі потенціальної течії та моделі переносу домішки запропоновано 2D чисельну модель для прогнозування забруднення в приміщеннях. Наведено результати розрахунків на базі розробленої моделі.

На базе модели потенциального течения и модели переноса примеси предложена 2D численная модель для прогноза уровня загрязнения в общественных помещениях. Представлены результаты численного моделирования.

The 2D numerical model to simulate the pollutant dispersion in public compartments is offered. The model is based on the equation of potential flow and the equation of admixture transfer. The results of numerical experiment are presented.

Введение

Одной из серьёзных опасностей является явление загазованности токсичным газом общественных помещений (вокзалы, кинотеатры, торговые центры, метро и т.д.). В этих местах часто находится большое скопление людей. Внезапное поступление в помещение токсичного газа вызывает панику и большую вероятность тяжелого поражения людей. Токсичный газ может поступать в помещение при горении и выделении в атмосферу помещения таких отравляющих веществ, как CO, HCN. Кроме этого, возможно поступление токсичного газа при теракте (примером является отравление пассажиров в Токийском метро при теракте, совершенном группой «Аум Сенрикё»). Поэтому чрезвычайно важно прогнозировать развитие такой нештатной ситуации и оценивать безопасность маршрутов эвакуации и эффективность работы аварийной вентиляции или других средств защиты. Одним из подходов к решению этой задачи является проведение физического эксперимента [6]. Однако проведение такого эксперимента требует больших временных и материальных затрат на постановку, проведение его и обработку данных измерений. Альтернативным путем решения рассматриваемой задачи является применение метода математического моделирования. Математическое моделирование позволяет быстро получить прогнозные данные как относительно динамики загрязнения помещения при поступлении в него токсичного газа, так и оценки эффективности различных средств защиты.

Целью данной работы является создание эффективной численной модели прогноза рассеивания токсичных газов в воздушной среде

общественных помещений с учетом их геометрической формы, маршрутов эвакуации, работы аварийной вентиляции.

Математическая модель

Будем рассматривать процесс распространения токсичного газа в общественном помещении в двухмерной постановке (профильная модель). Процесс расчета переноса токсичного газа в общественном помещении решается в два этапа. На первом этапе определяется поле скорости воздушного потока внутри помещения с учетом обтекания воздушным потоком препятствий, которые размещены в общественном помещении. В этом случае для расчета поля скорости воздушного потока используется уравнение для потенциала скорости [1]

$$\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} = 0. \quad (1)$$

Решение уравнения (1) проводится при таких граничных условиях [2]:

- на твердых стенках $\frac{\partial P}{\partial n} = 0$, где n – единичный вектор внешней нормали;
- на входной границе (границы втекания воздушного потока в общественное помещение) $\frac{\partial P}{\partial n} = V_n$, где V_n – известное значение скорости втекания потока;
- на выходной границе $P = P^*(x = \text{const}, y) + \text{const}$ (условие Дирихле).

Как известно, в рамках модели потенциального течения компоненты вектора скорости воздушного потока связаны с величиной потенциала скорости зависимостями [1]

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

Для расчета рассеивания токсичного газа в общественном помещении применяется уравнение переноса примеси, осреднённое по ширине помещения [4, 2]:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial uC}{\partial x} + \frac{\partial vC}{\partial y} + \sigma C = \text{div}(\mu \text{grad}C) + \sum_{i=1}^N Q_i(t) \delta(x-x_i) \delta(y-y_i),$$

где C – концентрация токсичного газа; u, v – компоненты вектора скорости воздушной среды в помещении; $\mu = (\mu_x, \mu_y)$ – коэффициент турбулентной диффузии; Q – интенсивность выброса токсичного газа; $\delta(x-x_i) \delta(y-y_i)$ – дельта-функция Дирака; x_i, y_i – координаты источника выброса; σ – коэффициент, учитывающий химический распад загрязнителя, взаимодействие с нейтрализатором; t – время.

В работах [2, 4] рассмотрена постановка краевых условий для уравнения переноса токсичного газа.

Формирование вида расчетной области

Общественные помещения имеют сложную геометрическую форму, обусловленную тем, что внутри них располагается различные объекты (эскалаторы, лестницы, стеллажи и т.д.). Такие объекты являются препятствиями на пути воздушного потока, что ставит задачу обтекания их и формирования вида этих препятствий в численной модели. Это является особенностью задач данного класса, сильно усложняющей процесс моделирования. Для расчета динамики воздушного потока в областях сложной геометрической формы в настоящее время используется несколько подходов:

- применение неортогональных разностных сеток;
- применение процедуры коррекции граничных условий на границах;
- отображение сложной расчетной области на область более простой геометрической формы;
- применение метода МКЭ;
- применение метода маркирования.

В данной работе для решения задачи используется метод маркирования расчетной области [2]. Расчет выполняется на прямоугольной разностной сетке, а положение твердых

границ (стеллажи, лестницы и т.д.) задается с помощью маркеров (рис. 2). Такой подход позволяет очень быстро изменять форму расчетной области, что дает возможность применять разработанный код для моделирования загазованности различных общественных помещений, не внося в него изменений, а внося изменения только в файл исходных данных.

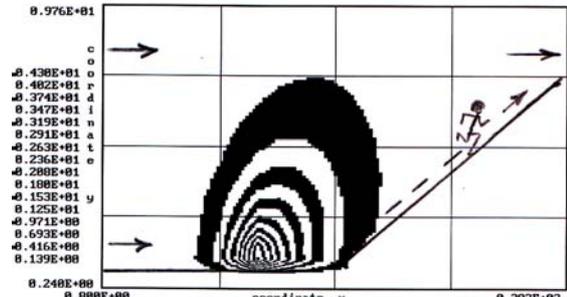


Рис. 1. Изолинии концентрации токсичного газа в торговом зале через 5 с после возникновения чрезвычайной ситуации

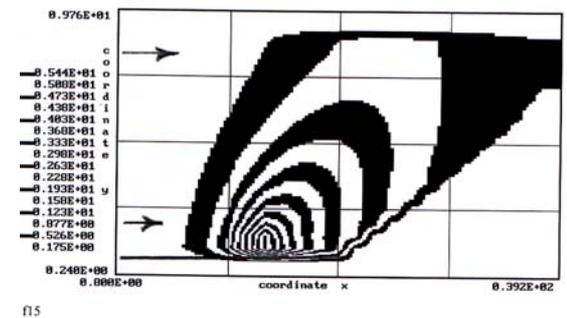


Рис. 2. Изолинии концентрации токсичного газа в торговом зале через 15 с после возникновения чрезвычайной ситуации

Применение метода маркирования позволяет формировать практически любую форму помещения.

Метод решения

Для численного интегрирования уравнения для потенциала скорости используется метод установления решения по времени. В этой связи необходимо численно интегрировать уравнение вида

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

где t – фиктивное время.

При $t \rightarrow \infty$ решение уравнения (2) будет стремиться к «установлению», т.е. к решению уравнения (1).

Для численного интегрирования уравнения (2) используется неявная схема условной аппроксимации [5]. В этом случае разностные уравнения на каждом дробном шаге имеют вид:

$$\frac{P_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} - P_{i,j}^n}{\Delta t} = \left[\frac{-P_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + P_{i-1,j}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta x^2} \right] + \left[\frac{-P_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + P_{i,j-1}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta y^2} \right];$$

$$\frac{P_{i,j}^{n+1} - P_{i,j}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta t} = \left[\frac{P_{i+1,j}^{n+1} - P_{i,j}^{n+1}}{\Delta x^2} \right] + \left[\frac{P_{i,j+1}^{n+1} - P_{i,j}^{n+1}}{\Delta y^2} \right].$$

В данной разностной схеме расчет значения потенциала скорости $P_{i,j}$ в каждой разностной ячейке на каждом шаге расщепления осуществляется по методу бегущего счета.

После расчета величины потенциала скорости компоненты вектора скорости рассчитываются по соотношениям:

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

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

Для численного интегрирования уравнения переноса примеси используется попеременно-треугольная разностная схема [4]. При применении этой разностной схемы процесс решения уравнения переноса расщепляется на четыре шага. Разностные соотношения в операторном виде записываются так [2]:

на первом шаге расщепления $k = n + \frac{1}{4}$:

$$\frac{C_{ij}^k - C_{ij}^n}{\Delta t} + \frac{1}{2}(L_x^+ C^k + L_y^+ C^k) + \frac{\sigma}{4} C_{ij}^k =$$

$$= \frac{1}{4}(M_{xx}^+ C^k + M_{xx}^- C^k + M_{yy}^+ C^n + M_{yy}^- C^n) + \sum_{l=1}^N \frac{\bar{q}_l}{4} \delta_l;$$

на втором шаге расщепления $k = n + \frac{1}{2}$:

$$c = n + \frac{1}{4};$$

$$\frac{C_{ij}^k - C_{ij}^c}{\Delta t} + \frac{1}{2}(L_x^- C^k + L_y^- C^k) + \frac{\sigma}{4} C_{ij}^k =$$

$$= \frac{1}{4}(M_{xx}^- C^k + M_{xx}^+ C^c + M_{yy}^- C^k + M_{yy}^+ C^c) + \sum_{l=1}^N \frac{\bar{q}_l}{4} \delta_l;$$

на третьем шаге расщепления $k = n + \frac{3}{4}$:

$$c = n + \frac{1}{2};$$

$$\frac{C_{ij}^k - C_{ij}^c}{\Delta t} + \frac{1}{2}(L_x^+ C^k + L_y^- C^k) + \frac{\sigma}{4} C_{ij}^k =$$

$$= \frac{1}{4}(M_{xx}^- C^c + M_{xx}^+ C^k + M_{yy}^- C^k + M_{yy}^+ C^c) + \sum_{l=1}^N \frac{\bar{q}_l}{4} \delta_l;$$

на четвертом шаге расщепления $k = n + 1$:

$$c = n + \frac{3}{4};$$

$$\frac{C_{ij}^k - C_{ij}^c}{\Delta t} + \frac{1}{2}(L_x^- C^k + L_y^+ C^k) + \frac{\sigma}{4} C_{ij}^k =$$

$$= \frac{1}{4}(M_{xx}^- C^k + M_{xx}^+ C^c + M_{yy}^- C^c + M_{yy}^+ C^k) + \sum_{l=1}^N \frac{\bar{q}_l}{4} \delta_l.$$

Пояснение к данным разностным операторам приведено в работе [2]. Из данных выражений можно получить явные формулы для определения неизвестного значения концентрации токсичного газа на каждом шаге расщепления.

Практическая реализация модели

На основе рассмотренной численной модели разработан алгоритм расчета переноса токсичного газа в помещении. Он состоит в следующем:

- задаётся форма общественного помещения, положение препятствий (лестницы и т.п.) внутри помещения;
- задаётся положение места выброса токсичного газа, интенсивность выброса;
- задаётся маршрут эвакуации;
- задаётся воздухообмен в помещении, положение входных отверстий (откуда поступает воздух в помещение) и выходных отверстий;
- осуществляется расчет уравнения для потенциала скорости;
- рассчитывается поле скорости воздушного потока внутри помещения;
- рассчитывается процесс рассеивания токсичного газа;
- на печать выводится информация о развитии зоны загрязнения и информация о формировании опасных зон загрязнения, где возможно тяжелое поражение людей.

На основе построенной модели разработан код на алгоритмическом языке FORTRAN. Разработанный код был применен для решения

следующей задаче. Происходит утечка токсичного газа (цианистый водород) в торговом зале, (зал расположен ниже поверхности земли). Имеется лестница – эвакуационный выход (рис. 1). Интенсивность выделения токсичного газа составляет 90 г/с. Воздух в помещение поступает через два отверстия, со скоростью 2 м/с, а выходит – через одно (на рисунках направление воздушного потока показано стрелками). Размеры расчетной области: длина – 40 м, высота – 10 м, ширина – 10 м. Коэффициент диффузии по обоим координатным направлениям равен 0,7 м²/с. Коэффициент σ равен нулю.

Рассмотрим результаты вычислительного эксперимента. На рис. 1, 2 показана динамика загрязнения воздушной среды внутри помещения для различных моментов времени. Из данных рисунков видно, что формирующаяся зона загазованности увеличивается в размерах за счет диффузии и вытягивается в направлении выхода воздушного потока из помещения. Хорошо видно, что зона загрязнения формируется непосредственно над лестницей – эвакуационным выходом.

При моделировании была выявлена динамика формирования зоны смертельного поражения людей. За критерий смертельного поражения принималась концентрация 1 мг/л для цианистого водорода.

Информация о зоне смертельного поражения людей внутри помещения показана на рис. 3, 4. Темная зона, представленная на этих рисунках, соответствует зоне, где концентрация токсичного газа равна или выше указанной смертельной концентрации – 1 мг/л. Отметим, что при движении вверх по лестнице скорость людского потока составляет порядка 11 м/мин [3]. Из приведенных рисунков видно, что уже примерно через 20 с после возникновения чрезвычайной ситуации зона смертельного поражения людей охватит практически всю нижнюю половину эвакуационного выхода – лестницы. Учитывая, что при чрезвычайной ситуации возможна паника, скопление людей и медленное их передвижение по лестнице наверх, то очевиден высокий риск смертельного поражения людей в торговом зале.

В табл. 1 представлена динамика изменения максимальной концентрации токсичного газа внутри помещения, позволяющая также оценить угрозу токсичного поражения людей.

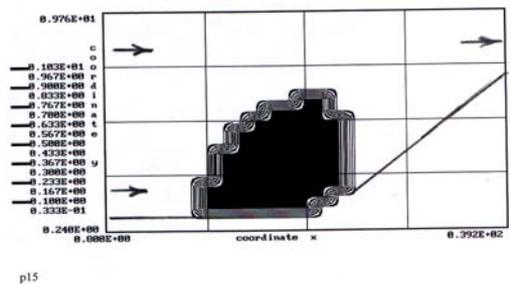


Рис. 3. Зона смертельного поражения людей (зона, где достигнута смертельная концентрация), $t = 15$ с

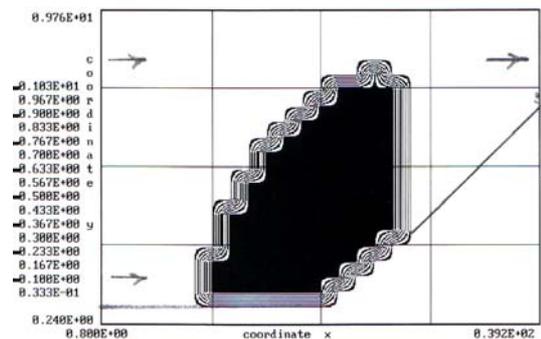


Рис. 4. Зона смертельного поражения людей (зона, где достигнута смертельная концентрация), $t = 20$ с

Таблица 1

Динамика изменения максимальной концентрации токсичного газа внутри помещения

Время, с	Максимальная концентрация, г/м ³
10	4,90
15	5,24
20	5,44
35	5,70
50	5,77

Как видно из таблицы, концентрация в помещении достаточно быстро растет и значительно превосходит величину смертельной концентрации. В заключение отметим, что для расчета задачи потребовалось около 5 секунд компьютерного времени.

Выводы

В работе рассмотрена эффективная модель и алгоритм прямого численного моделирования процесса загазованности общественного помещения токсичным газом. Применяемый в моде-

ли метод маркирования расчетной области дает возможность формировать любую геометрическую форму общественных помещений с учетом лестниц, стеллажей и других препятствий. Дальнейшее совершенствование модели следует проводить в направлении ее разработки для расчета рассеивания тяжелых газов внутри помещений.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бруцкий, Е. В. Теория атмосферной диффузии радиоактивных выбросов [Текст] / Е. В. Бруцкий. – К.: Институт гидромеханики НАН Украины, 2000. – 443 с.
2. Численное моделирование распространения загрязнения в окружающей среде [Текст] /

М. З. Згуровский и др. – К.: Наук. думка, 1997. – 368 с.

3. Пожежна безпека будівель та споруд [Текст] : навч. посібник / М. М. Кулешов та ін. – Х., 2004. – 271 с.
4. Марчук, Г. И. Математическое моделирование в проблеме окружающей среды [Текст] / Г. И. Марчук. – М.: Наука, 1982. – 316 с.
5. Самарский А. А. Теория разностных схем [Текст] / А. А. Самарский. – М.: Наука, 1983. – 616 с.
6. Gerhardt, H. I. Small scale experiments to simulate the smoke extraction from large scale [Текст] / H. I. Gerhardt, O. Krüger // Wind Engineering into 21 Century. – P. 1927-1931.

Поступила в редколлегию 23.03.2009.