

ЧИСЛЕННАЯ МОДЕЛЬ ВЕНТИЛЯЦИИ ПОМЕЩЕНИЙ ПРИ АВАРИЙНЫХ ВЫБРОСАХ ВРЕДНЫХ ВЕЩЕСТВ

Запропонована чисельна модель, на базі якої розроблений метод розрахунку процесу розповсюдження токсичного газу в приміщенні. Як математична модель використовуються двовимірні рівняння переносу домішки та потенціального руху повітря. Розрахунок здійснюється з використанням неявних різницьових схем. Надаються результати обчислювального експерименту по моделюванню забруднення повітря в приміщенні після аварійного викиду токсичної речовини.

Предложена численная модель, на базе которой разработан метод расчета процесса распространения токсичного газа в помещении. В качестве математической модели используются двухмерные уравнения переноса примеси и потенциального движения воздуха. Расчет производится с использованием неявных разностных схем. Предлагаются результаты вычислительного эксперимента по моделированию загрязнения воздуха в помещении после аварийного выброса токсичного вещества.

A numerical model to simulate the process of pollutant transfer in rooms was developed. The numerical simulation is carried out using 2D models of pollutant transfer and potential flow. The implicit finite difference schemes are used. The results of numerical simulation of air pollution in a confined space after blasts of toxic substances have presented.

Одной из важнейших проблем в области экологической безопасности на производстве является проблема защиты людей в производственных помещениях в случае аварийной утечки или выброса токсичных веществ [1]. Такие аварийные ситуации в производственных помещениях возникают по ряду причин: нарушение техники безопасности на производстве, нарушение технологических процессов, износ оборудования, террористический акт.

В случае аварии в воздушную среду производственного помещения в течение небольшого промежутка времени может поступить значительное количество токсичного вещества, в результате чего его концентрация в помещении может в десятки и даже сотни раз превысить ПДК.

Другой опасностью аварийных выбросов в помещении является опасность появления в различных местах помещения подзон, где концентрация токсичного вещества может превысить нижний предел воспламенения [2].

На производстве очень часто располагается оборудование, имеющее нагретые участки, и следствием аварийной утечки будет взрыв в помещении. Снижение концентрации токсичного вещества в помещении после аварии происходит за счет работы аварийной вентиляции. Поэтому при проектировании или реконструкции систем аварийной вентиляции очень важно знать не только как при выбранных параметрах системы будет происходить снижение концентрации токсичного вещества в помещении, но и как будет формироваться при этом зона за-

грязнения в помещении, чтобы избежать появления подзон, где может быть достигнут нижний концентрационный предел воспламенения. Ранее при расчете и проектировании аварийной вентиляции использовались аналитические модели [6]. Однако на базе этих моделей не представлялось возможным прогнозировать динамику развития зоны загрязнения в помещении при аварии и работе аварийной вентиляции.

Целью работы является разработка метода компьютерного прогнозирования динамики загрязнения воздушной среды помещения в случае аварийного выброса с учетом работы системы аварийной вентиляции. Разработанный метод основывается на создании численной модели процесса переноса примеси в помещении и вентиляции его. Представленный метод позволяет моделировать широкий спектр аварийных ситуаций в производственном помещении: залповый выброс, полунепрерывный, серия выбросов и т. п.

Математическая модель загрязнения воздушной среды в помещении. Для моделирования процесса переноса токсичного газа в помещении после аварии используется модель градиентного типа, осредненная по ширине помещения

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial uC}{\partial x} + \frac{\partial vC}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \sum Q_i(t) \delta(r - r_i), \quad (1)$$

где C – концентрация токсичного вещества в помещении; u, v – компоненты вектора скорости воздушной среды в декартовой системе координат X, Y ; $\mu = (\mu_x, \mu_y)$ – коэффициент турбулентной диффузии; Q – интенсивность выброса токсичного вещества в помещении; $\delta(r - r_i)$ – дельта-функция Дирака; $r_i = (x_i, y_{ii})$ – координаты источника выброса.

Делается предположение, что движение воздушной среды в помещении – потенциальное, тогда компоненты скорости воздушной среды определяются соотношениями:

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

где P – потенциал.

Уравнение для определения потенциала имеет вид

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

Постановка краевых условий для уравнения (1) рассмотрена в работах [3; 4]. Для уравнения (2) ставятся следующие граничные условия:

- на твердых стенках

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

где n – единичный вектор внешней нормали;

- на входной границе (границы втекания воздушного потока в помещение)

$$\frac{\partial P}{\partial n} = V_n,$$

где V_n – известное значение скорости;

- на выходной границе

$$P = P(x = \text{const}, y) + \text{const}$$

(условия Дирихле).

Метод решения

Для численного интегрирования уравнений (1) и (2) используется прямоугольная разностная сетка. Уравнение (1) интегрируется с использованием попеременно-треугольной неявной разностной схемы расщепления [3]. Используемая попеременно-треугольная разностная схема позволяет разработать эффективный алгоритм расчета переноса токсичного газа в областях сложной геометрической формы,

которыми являются производственные помещения, где размещено различное технологическое оборудование, представляющее препятствие на пути воздушного потока индуцированного работой системой вентиляции.

Для численного интегрирования уравнения (2) используется идея «установления решения по времени», т. е. интегрируется уравнение вида

$$\frac{\partial P}{\partial \eta} = \frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2},$$

где η – фиктивное время.

Численное интегрирование данного уравнения проводится с помощью неявного попеременно-треугольного метода А. А. Самарского [5].

Результаты численного моделирования

На базе разработанной численной модели создан пакет программ «ROOM-2D», (программы записаны на алгоритмическом языке FORTRAN-IV), который представляет собой инструмент прогноза динамики загрязнения помещения при аварийном выбросе в нем токсичного вещества. Применение данного пакета программ рассматривается на конкретной задаче.

Рассматривается следующий сценарий аварии. В помещении произошел залповый выброс аммиака, в результате которого образовалась зона загрязнения размером $3,5 \times 1,8$ м (рис. 1). Средняя концентрация аммиака в зоне загрязнения $C = 1$ (в безразмерном виде). Размеры помещения: длина – 10 м, ширина – 10 м, высота – 5 м.

Из рис. 1 видно, что облако имеет сложную Геометрическую форму, близкую к округлости. Подача чистого воздуха в помещение осуществляется через отверстие, расположенное на потолке помещения, ближе к его левой стенке. Высота входного отверстия – 1,6 м. Выходное отверстие расположено либо внизу на правой стенке (первый вариант расчета), либо на полу помещения (второй вариант расчета). Ширина выходного отверстия – 1,5 м. Скорость втекания воздушного потока – 1 м/с, коэффициент диффузии – $0,3 \text{ м}^2/\text{с}$. Задачей исследования является анализ влияния положения выходного вентиляционного отверстия на динамику развития зоны загрязнения в помещении после аварии.

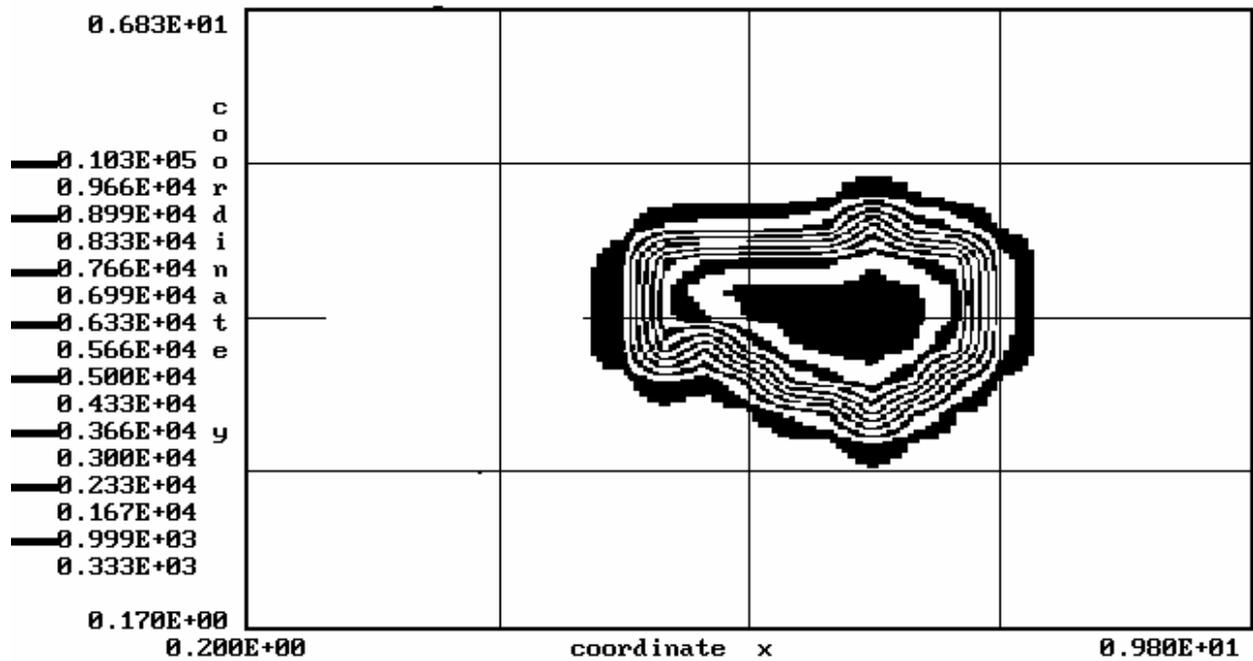


Рис. 1. Зона загрязнения помещения после аварийно выброса аммиака $t = 0$

На рис. 2, 3 показано как развивается зона загрязнения в помещении для первого варианта расчета. Хорошо видно, как зона загрязнения вытягивается в направлении нижнего выходного отверстия, расположенного на правой стене помещения. Через 15 с после начала работы аварийной вентиляции происходит значительное уменьшение зоны за-

грязнения, которая представляет собой «полоску», прижатую к полу и вытянутую в направлении выхода воздушного потока (рис. 3). На рис. 4, 5 показана динамика изменения зоны загрязнения в помещении, в сходственные моменты времени, но для второго варианта расчета, т. е. когда вытяжное отверстие расположено на полу.

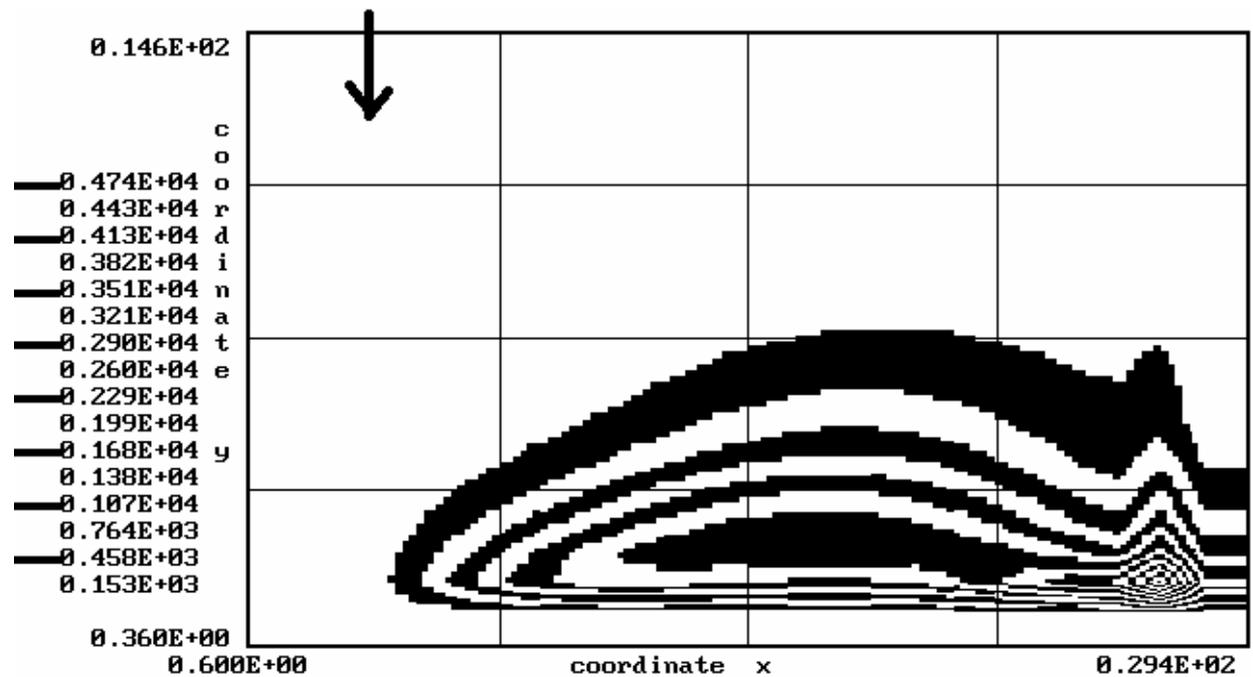


Рис. 2. Зона загрязнения помещения через $t = 5$ с после аварии (вентиляционное выходное отверстие расположено внизу правой стенки)

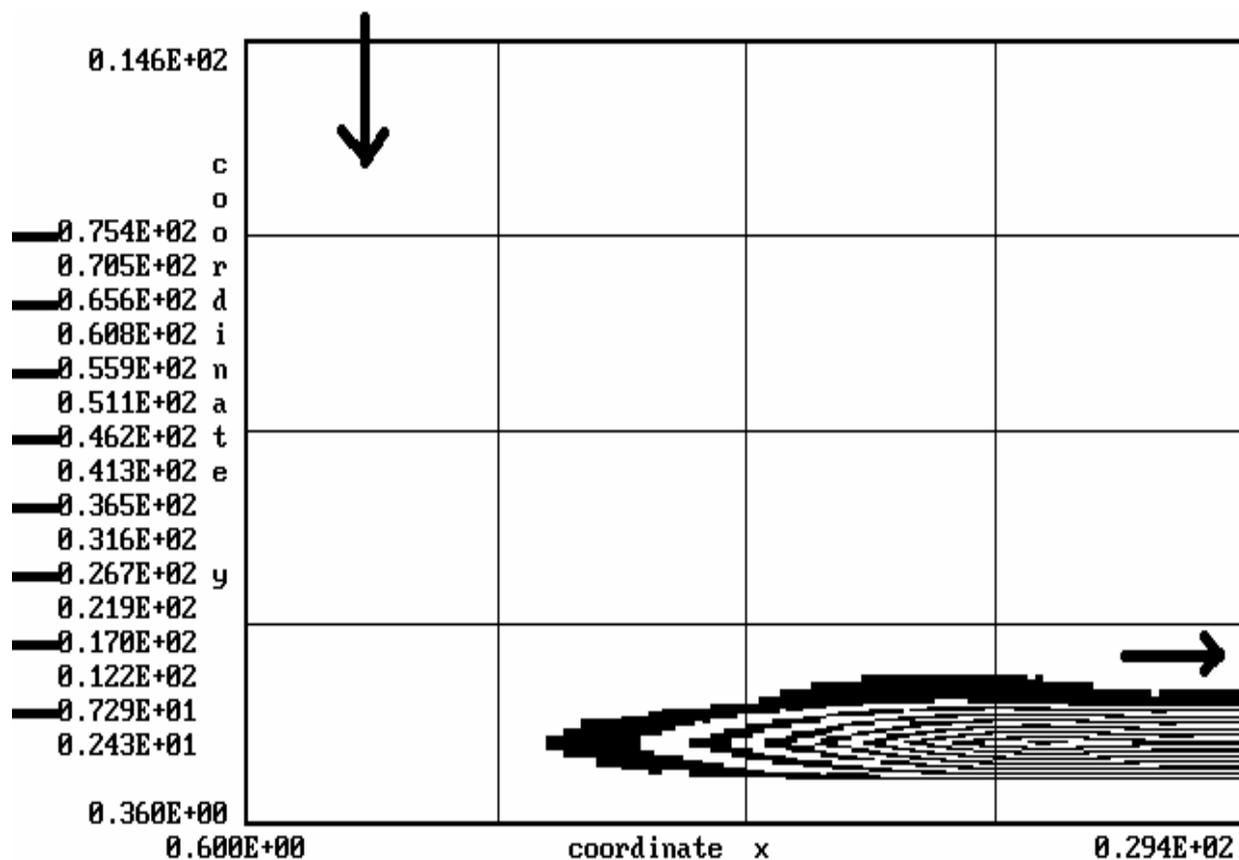


Рис. 3. Зона загрязнения помещения через $t = 15$ с после аварии (вентиляционное выходное отверстие расположено внизу правой стенки)

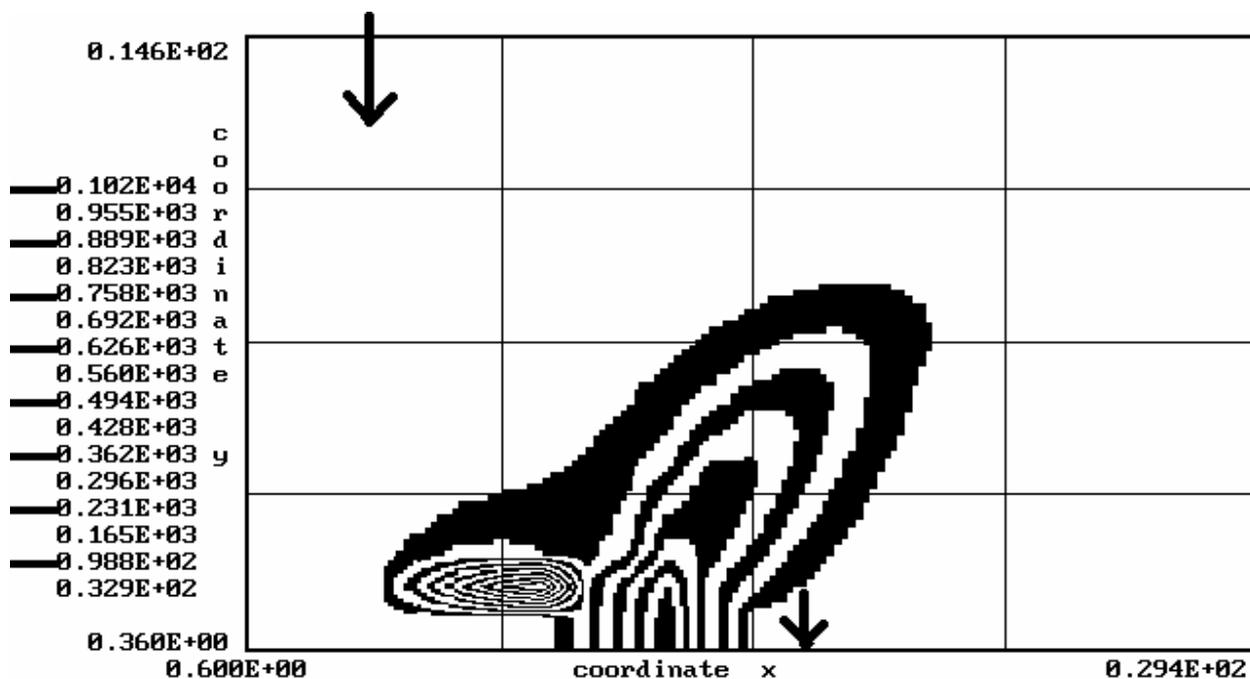


Рис. 4. Зона загрязнения помещения через $t = 5$ с после аварии (вентиляционное выходное отверстие расположено на полу помещения)

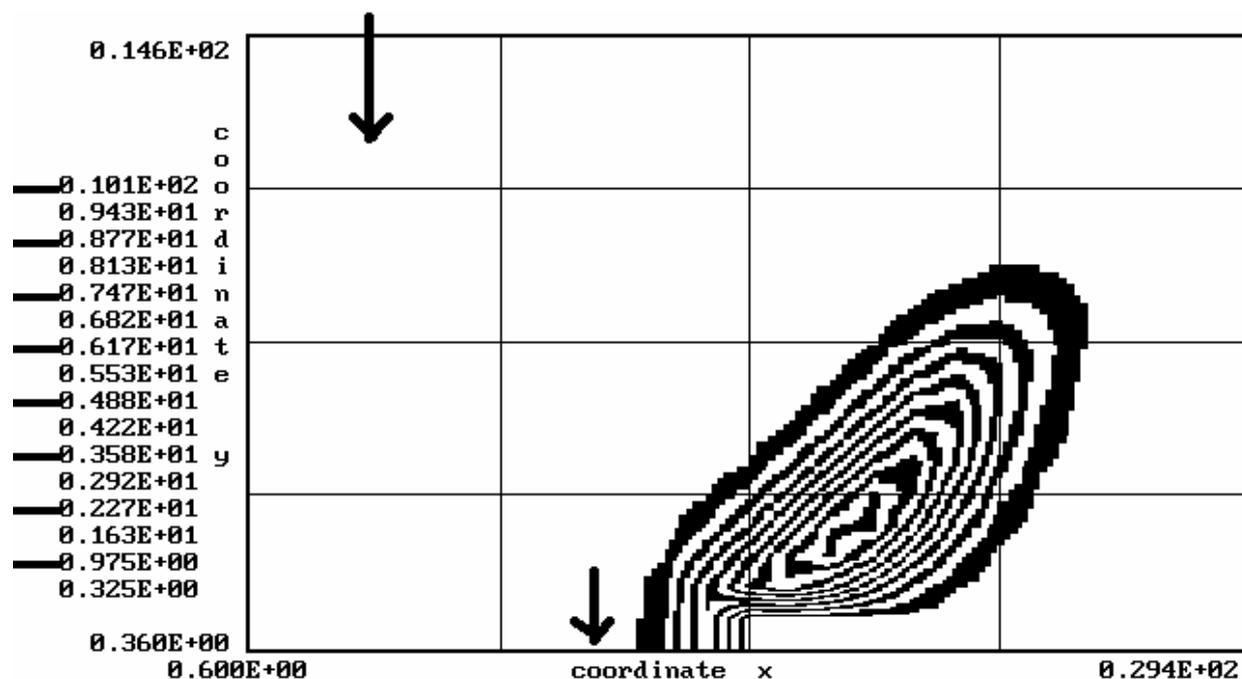


Рис. 5. Зона загрязнения помещения через $t = 15$ с после аварии (вентиляционное выходное отверстие расположено на полу помещения)

При сравнении рис. 2–5 хорошо видно, как изменение положения выходного вентиляционного отверстия привело к изменению формы и размеров образовавшейся зоны загрязнения токсичным газом. Так для второго варианта расчета форма зоны загрязнения больше напоминает эллипс, вытянутый в сторону вытяжного отверстия, а, как отмечалось выше, для первого варианта расчета форма зоны загрязнения имеет вид вытянутой «полоски». Отчетливо видно, что для второго варианта расчета размеры зоны загрязнения больше, чем для первого. Таким образом, с помощью разработанного метода появляется возможность оптимизировать процесс проветривания за счет организации такого направления движения загрязненного потока, при котором можно уменьшить развитие начальной зоны загрязнения и защитить отдельные места в помещении от загрязнения и возможного взрыва.

Выводы

В данной работе предложен эффективный метод расчета вентиляции помещения после аварийных выбросов токсичных газов. Метод основан на создании численной модели процесса вентиляции помещения. Данный метод позволяет рассматривать решение задачи вентиляции помещения в новой постановке – с учетом размеров и положения приточно-вытяжных отверстий вентиляции. Проведенный вычислительный эксперимент показал, что положение приточно-вытяжных отверстий оказывает самое существенное влияние на динамику разви-

тия зоны загрязнения при работе аварийной вентиляции.

Расчет задачи на ПК типа PENTIUM-II с помощью разработанного метода требует 2 секунды машинного времени, что позволяет проектиранту в течение одной рабочей смены выполнить расчет десятков вариантов аварийной вентиляции. Дальнейшее совершенствование предложенного метода необходимо вести в направлении создания пространственной модели переноса примеси в помещении.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Аварии и катастрофы. Предупреждение и ликвидация последствий: Учебное пособие в 5-ти книгах / Под ред. В. А. Котляревского и А. В. Забегаева. – М.: Из-во АСВ, 2001. – 200 с.
2. Демидов П. Г. Горение и свойства горючих веществ. – М.: Изд-во министерства коммунального хозяйства РСФСР, 1962. – 254 с.
3. Згуровский М. З. 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.
4. Марчук Г. И. Математическое моделирование в проблеме окружающей среды. – М.: Наука. – 1982. – 320 с.
5. Самарский А. А. Теория разностных схем / 2-е изд., испр. – М.: Наука, 1983. – 616с.
6. Эльтерман В. М. Вентиляция химических производств / 3-е изд., перераб. – М.: Химия. – 1980. – 288 с.

Поступила в редколлегию 15.06.2005.