

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАТЕКАНИЯ ТОКСИЧНОГО ГАЗА В ВАГОН

Розроблений метод прогнозу токсичного ураження людей у вагоні, що проходить через хмару отруйних речовин. Метод заснований на побудові чисельної моделі процесу. Міграція хмари отруйної речовини описується дво-вимірним рівнянням конвективно-дифузійного переносу суміші, динаміка зміни концентрації отруйної речовини в вагоні описується балансовим співвідношенням. Запропонований метод розрахунку процесу нейтралізації токсичної речовини у первинній хмарі за рахунок подачі нейтралізатора від рухомих наземних струйних установок.

Разработан метод прогноза токсичного поражения людей в вагоне, проходящем через облако отравляющих веществ. Метод основан на построении численной модели процесса. Миграция облака отравляющего вещества описывается двухмерным уравнением конвективно-диффузионного переноса примеси, динамика изменения концентрации отравляющего вещества в вагоне описывается балансовым соотношением. Предложен метод расчета процесса нейтрализации токсичного вещества в первичном облаке за счет подачи нейтрализатора от движущихся наземных струйных установок.

A method to predict people poisoning in a car moving through a toxic gas cloud has been developed. The method is based on a numerical model of the process. To describe the toxic gas cloud migration the 2D transfer model is used. A balance relationship is used to calculate toxic gas concentration in a car. A method of calculation of toxic gas neutralization in the cloud with moving jets has been proposed.

Введение

В последнее время значительный интерес представляют задачи, связанные с прогнозированием последствий аварий, терактов при перевозке токсичных веществ [1; 3; 4; 7]. Данная проблема включает в себя комплекс различных задач, среди которых можно выделить, в частности, задачи прогноза токсичного поражения людей при затекании газа в вагон в случае прохождения пассажирского поезда вблизи или через мигрирующее в атмосфере облако токсичного вещества (аммиак, сероводород и т. п.).

Как показал анализ литературных источников данная проблема практически не рассматривалась с точки зрения построения математических моделей, прогноза последствий и т. п. В этом направлении следует отметить работу [2], где рассматривается постановка данной задачи и приводится построение математической модели, позволяющей на базе балансовых соотношений выполнить расчет уровня загрязнения воздушной среды в вагоне при прохождении вагоном облака токсичного газа. Решение, представленное в работе [2], получено при следующем допущении: концентрация токсичного вещества в облаке постоянна в любой его точке. Однако миграция облака в атмосфере под действием ветра и атмосферной диффузии приводит к неравномерности распределения токсичного вещества в облаке. Для более точного прогноза процесса загрязнения воздушной среды в вагоне, а значит прогноза токсичного по-

ражения людей необходимо учитывать переменное значение концентрации в облаке. Следует отметить, что задача данного класса отличается, даже в самой общей постановке, большой сложностью, так как необходимо принимать во внимание следующие факторы: скорость, направление ветра, состояние атмосферы (атмосферная диффузия), скорость, маршрут движения поезда и самые различные сценарии аварий (одноразовый залповый выброс токсичного вещества на месте аварии, серия залповых выбросов, «полунепрерывный выброс» и т. п.).

Целью данной работы явилась разработка метода прогноза токсичного поражения людей в вагоне поезда, проходящего через облако отравляющего вещества, с учетом перечисленных факторов, а также создание метода расчета ликвидации первичного облака в атмосфере за счет подачи в него нейтрализующего раствора от наземных движущихся струйных установок. Предлагаемые методы прогноза базируются на построении численной модели рассматриваемого процесса.

Математическая модель

Ставится задача разработки метода экспресс прогноза токсичного поражения людей в вагоне поезда. В качестве исходной, базовой модели для описания миграции облака токсичного вещества в атмосфере используется уравнение конвективно-диффузионного переноса примеси, осредненное по высоте переноса [6]

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial uC}{\partial x} + \frac{\partial vC}{\partial y} + \sigma C =$$

$$= \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_y \frac{\partial C}{\partial y} \right), \quad (1)$$

где C – концентрация токсичного вещества; u , v – компоненты вектора скорости воздушной среды в декартовой системе координат X , Y , плоскость XOY соответствует земле; σ – коэффициент, учитывающий процессы химического разложения загрязнения, гравитационное осаждение, аккумуляцию загрязнения подстилающей поверхностью; μ_x , μ_y – коэффициенты турбулентной диффузии; t – время.

Постановка краевых условий для уравнения (1) рассмотрена в работах [6; 5].

Баланс количества токсичного вещества в вагоне описывается следующим уравнением:

$$Vdc_b = LCdt - Lc_b dt,$$

где V – объем вагона; L – воздухообмен; C – концентрация токсичного вещества во втекающем воздухе; c_b – концентрация токсичного вещества в вагоне.

Степень токсичного поражения людей на местности в вагоне может быть оценена по величине смертельной концентрации отравляющего вещества, а также на основании расчета токсодозы, например, по модели [1].

$$TD = \frac{V}{m} \int_0^{\eta} Cd\eta, \quad \eta = \sqrt{t}, \quad (2)$$

где V – вентилируемый объем легких $1,2 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$, $m = 70 \text{ кг}$ – средняя масса человека.

Прогнозируемое поражение (отравление) людей будет иметь место в том случае, когда концентрация токсичного вещества или токсодоза превышают некоторое пороговое значение, при котором наступает смерть. Смертельное поражение людей зависит от их возраста, пола, психологического настроя и т. д., что не позволяет учесть эти факторы при построении модели. Кроме того, смертельное поражение людей прогнозируется путем экстраполяции экспериментов, проведенных на животных, что также является весьма относительным.

Ввиду того, что для одних токсичных веществ известно значение летальной концентрации, а для других – величина токсодозы, то для разработки универсальной методики оценки и прогноза риска отравления людей необходимо иметь расчетные модели, позволяющие осуществить прогноз по обоим параметрам.

Метод решения

Численное интегрирование уравнения (1) осуществляется на прямоугольной разностной сетке. Рассмотрим неявную разностную схему расщепления [5], которая положена в основу разработанного алгоритма.

Произведем следующую аппроксимацию производных, входящих в уравнение (1):

$$\frac{\partial C}{\partial t} \approx \frac{C_{ij}^{n+1} - C_{ij}^n}{\Delta t},$$

$$\frac{\partial uC}{\partial x} = \frac{\partial u^+ C}{\partial x} + \frac{\partial u^- C}{\partial x};$$

$$\frac{\partial vC}{\partial y} = \frac{\partial v^+ C}{\partial y} + \frac{\partial v^- C}{\partial y},$$

$$\frac{\partial u^+ C}{\partial x} \approx \frac{u_{i+1,j}^+ C_{ij}^{n+1} - u_{ij}^+ C_{i-1,j}^{n+1}}{\Delta x} = L_x^+ C^{n+1};$$

$$\frac{\partial u^- C}{\partial x} \approx \frac{u_{i+1,j}^- C_{i+1,j}^{n+1} - u_{ij}^- C_{ij}^{n+1}}{\Delta x} = L_x^- C^{n+1};$$

$$\frac{\partial v^+ C}{\partial y} \approx \frac{v_{i,j+1}^+ C_{ij}^{n+1} - v_{ij}^+ C_{i,j-1}^{n+1}}{\Delta y} = L_y^+ C^{n+1};$$

$$\frac{\partial v^- C}{\partial y} \approx \frac{v_{i,j+1}^- C_{i,j+1}^{n+1} - v_{ij}^- C_{ij}^{n+1}}{\Delta y} = L_y^- C^{n+1},$$

где

$$u^+ = \frac{u + |u|}{2}; \quad u^- = \frac{u - |u|}{2};$$

$$v^+ = \frac{v + |v|}{2}; \quad v^- = \frac{v - |v|}{2}.$$

Следуя работе [5], компоненты скорости потока u будем задавать на вертикальных гранях разностной ячейки, а компоненты скорости v – на горизонтальных гранях. Вторые производные аппроксимируем так:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) \approx \tilde{\mu}_x \frac{C_{i+1,j}^{n+1} - C_{ij}^{n+1}}{\Delta x^2} -$$

$$- \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) \approx \tilde{\mu}_y \frac{C_{i,j+1}^{n+1} - C_{ij}^{n+1}}{\Delta y^2} -$$

$$- \tilde{\mu}_y \frac{C_{ij}^{n+1} - C_{i,j-1}^{n+1}}{\Delta y^2} = M_{xy}^- C^{n+1} + M_{yy}^+ C^{n+1}.$$

В используемых выражениях L_x^+ , L_x^- , L_y^+ , L_y^- , M_{xx}^+ , M_{xx}^- , M_{yy}^+ , M_{yy}^- – обозначения разностных операторов.

С учетом этих обозначений разностный аналог уравнения (1) будет иметь вид

$$\begin{aligned} & \frac{C_{ij}^{n+1} - C_{ij}^n}{\Delta t} + L_x^+ C^{n+1} + L_x^- C^{n+1} + \\ & + L_y^+ C^{n+1} + L_y^- C^{n+1} + \sigma C_{ij}^{n+1} = \\ & = \left(M_{xx}^+ C^{n+1} + M_{xx}^- C^{n+1} + M_{yy}^+ C^{n+1} + M_{yy}^- C^{n+1} \right). \end{aligned}$$

Решение данного разностного уравнения расщепляется на 4 шага при интегрировании на временном интервале dt :

- на первом шаге $k = \frac{1}{4}$:

$$\begin{aligned} & \frac{C_{ij}^{n+k} - C_{ij}^n}{\Delta t} + \frac{1}{2} \left(L_x^+ C^k + L_y^+ C^k \right) + \frac{\sigma}{4} C_{ij}^k = \\ & = \frac{1}{4} \left(M_{xx}^+ C^k + M_{xx}^- C^k + M_{yy}^+ C^k + M_{yy}^- C^k \right); \end{aligned}$$

- на втором шаге $k = n + \frac{1}{2}$; $c = n + \frac{1}{4}$:

$$\begin{aligned} & \frac{C_{ij}^k - C_{ij}^c}{\Delta t} + \frac{1}{2} \left(L_x^- C^k + L_y^- C^k \right) + \frac{\sigma}{4} C_{ij}^k = \\ & = \frac{1}{4} \left(M_{xx}^- C^k + M_{xx}^+ C^c + M_{yy}^- C^k + M_{yy}^+ C^c \right); \end{aligned}$$

- на третьем шаге $k = n + \frac{3}{4}$; $c = n + \frac{1}{2}$:

$$\begin{aligned} & \frac{C_{ij}^k - C_{ij}^c}{\Delta t} + \frac{1}{2} \left(L_x^+ C^k + L_y^+ C^k \right) + \frac{\sigma}{4} C_{ij}^k = \\ & = \frac{1}{4} \left(M_{xx}^- C^c + M_{xx}^+ C^k + M_{yy}^- C^c + M_{yy}^+ C^k \right); \end{aligned}$$

- на четвертом шаге $k = n + 1$; $c = n + \frac{3}{4}$:

$$\begin{aligned} & \frac{C_{ij}^k - C_{ij}^c}{\Delta t} + \frac{1}{2} \left(L_x^- C^k + L_y^- C^k \right) + \frac{\sigma}{4} C_{ij}^k = \\ & = \frac{1}{4} \left(M_{xx}^- C^k + M_{xx}^+ C^c + M_{yy}^- C^c + M_{yy}^+ C^k \right). \end{aligned}$$

В данные разностные соотношения входит «возмущенный» коэффициент диффузии $\tilde{\mu}$ [5].

Преимуществом данной схемы расщепления является то, что на каждом дробном шаге неизвестное значение концентрации загрязняющего вещества определяется по методу бегущего счета. Разностная схема является абсолютно устойчивой на каждом дробном шаге и легко программируется.

Практическая реализация

На основе рассмотренной разностной схемы разработана программа, позволяющая проводить вычислительный эксперимент по моделированию процесса загрязнения токсичным веществом воздушной среды в вагоне движущегося поезда. Данная программа позволяет решать задачу из рассматриваемого класса с учетом маршрута движения поезда, его скорости, скорости ветра, величины воздухообмена в вагоне, метеоситуации. Возможности разработанной программы проиллюстрированы ниже на конкретном примере.

Рассматривался следующий сценарий. Имеется участок железнодорожной магистрали, по которой движется состав с известной скоростью V . Для удобства рассматривается процесс загрязнения воздушной среды только в одном вагоне. На своем пути состав встречает облако аммиака (диаметр облака 200 м, средняя концентрация аммиака – 0,2 мг/м³, высота облака – 100 м [4]). Метеорологическая ситуация характеризуется следующими параметрами: стабильность атмосферы – класс D (по шкале Гиффорда), скорость ветра – 5 м/сек, азимут – 45°. Расчетная схема показана на рис.1 (стрелками указывается направление движения поезда; длина участка магистрали $AB = 440$ м, длина участка $BC = 720$ м, $CY = 360$ м). Исследуется влияние скорости движения поезда и величины воздухообмена в вагоне на интенсивность загрязнения воздушной среды в салоне, по величине которой можно судить о риске токсического поражения людей.

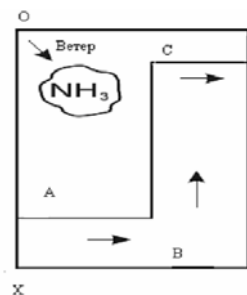


Рис. 1. Схема расчетной области

На рис. 2, 3 показано прогнозируемое значение концентрации аммиака на местности

(т. е. на маршруте движения поезда и вблизи магистрали). Как видно из этих рисунков динамика процесса миграции облака характеризуется

увеличением его диаметра и дальнейшим сносом облака в направлении движения ветрового потока.

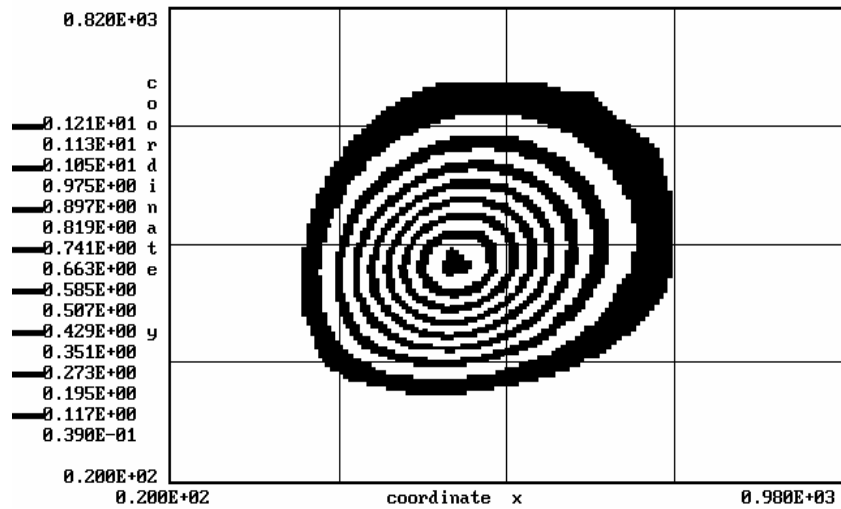


Рис. 2. Изолинии концентрации аммиака для момента времени $t = 43$ с

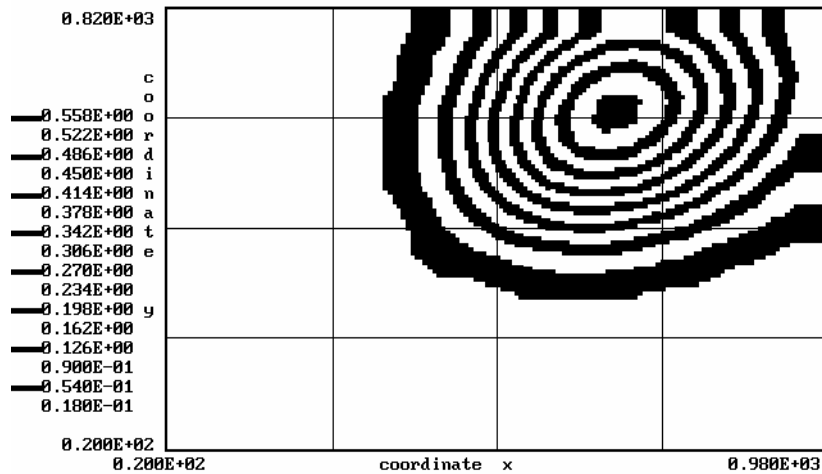


Рис. 3. Изолинии концентрации аммиака для момента времени $t = 115$ с

На рис. 4–9 показано значение концентрации аммиака в вагоне и токсодозы при прохождении вагона с различной скоростью через облако токсичного газа. Как видно из представленных результатов динамика изменения концентрации отравляющего вещества в вагоне характеризуется сначала стремительным увеличением, а затем плавным снижением. Если принять, что удушье людей может наступить при концентрации аммиака $0,2 \text{ г/м}^3$, то во всех рассматриваемых вариантах уже примерно через минуту концентрация токсичного газа в вагоне будет превышать это пороговое значение.

Из рис. 8 видно, что уменьшение интенсивности воздухообмена в вагоне приводит к значительно большему снижению уровня загряз-

нения воздушной среды в салоне по сравнению с вариантом, когда уменьшена скорость движения состава (рис. 6).

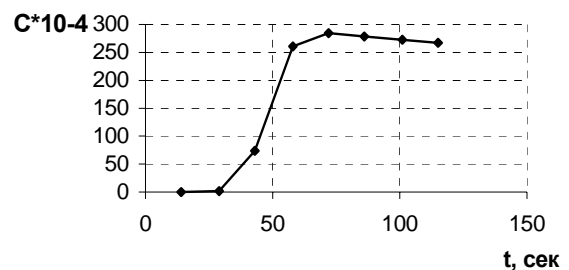


Рис. 4. Изменение концентрации аммиака $C \text{ г/м}^3$ в вагоне (скорость поезда 40 км/ч , воздухообмен $0,22 \text{ м}^3/\text{с}$)

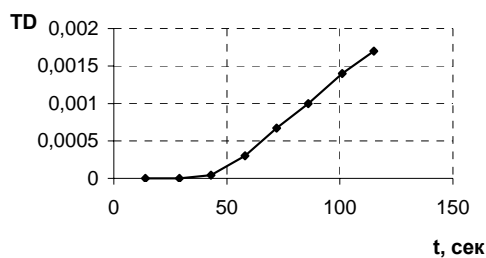


Рис. 5. Изменение величины токсодозы в вагоне (скорость поезда 40 км/ч, воздухообмен 0,22 м³/с)

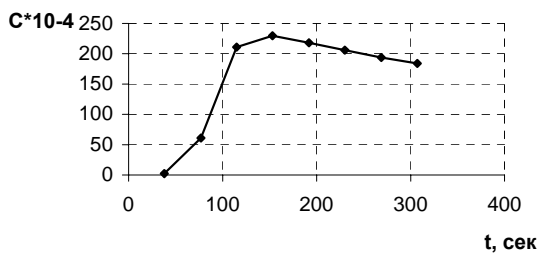


Рис. 6. Изменение концентрации аммиака C г/м³ в вагоне (скорость поезда 15 км/ч, воздухообмен 0,22 м³/с)

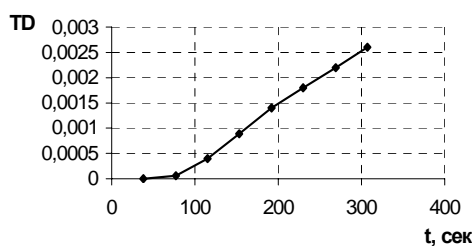


Рис. 7. Изменение величины токсодозы в вагоне (скорость поезда 15 км/ч, воздухообмен 0,22 м³/с)

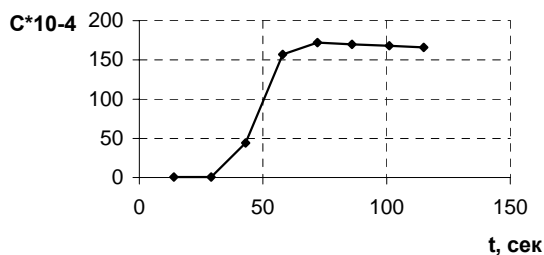


Рис. 8 Изменение концентрации аммиака C г/м³ в вагоне (скорость поезда 40 км/ч, воздухообмен 0,13 м³/с)

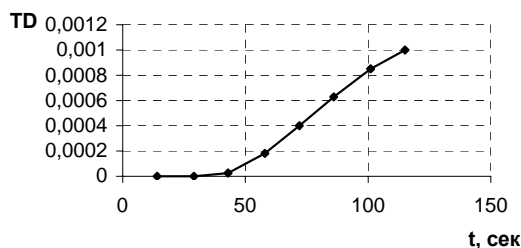


Рис. 9. Изменение величины токсодозы в вагоне (скорость поезда 40 км/ч, воздухообмен 0,13 м³/с)

Анализ изменения величины токсодозы в салоне вагона для рассматриваемых сценариев показывает, что токсодоза имеет достаточно маленькое значение, что объясняется прохождением вагона токсичного облака за достаточно малый временной интервал (как видно из графиков, иллюстрирующих изменение концентрации аммиака в вагоне – снижение этой концентрации наступает через 70...150 с, т. е. через этот промежуток времени вагон выходит из облака токсичного газа).

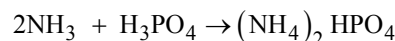
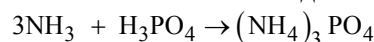
Метод расчета процесса нейтрализации токсичного облака

Поражение людей при миграции первичного облака отравляющего вещества требует применения технологий по ликвидации такого облака. Одним из методов, наиболее часто применяемым на практике, является подача в облако нейтрализующего раствора от наземной струйной установки. В этом случае обычно используются пожарные машины, в силу своей мобильности, позволяющие «перехватить» облако на пути его следования. Однако анализ литературных источников по данной проблеме показывает, что в литературе [1; 3; 7; 8] отсутствуют методы, позволяющие выполнить расчет токсичного облака, с учетом его движения, движения струйных установок. Поэтому создание таких методов представляет собой большую актуальность, т. к. даст возможность оптимизировать процесс ликвидации облака.

Применяемая выше модель (1) была положена в основу разработки метода решения задачи о нейтрализации токсичного облака с помощью движущихся пожарных машин, подающих в облако нейтрализующий раствор. Опишем структуру созданной модели и алгоритм решения на ее основе задачи.

Структура модели

Процесс миграции первичного облака в атмосфере и процесс движения нейтрализатора в атмосфере описывается уравнением градиентного типа (1) с добавлением в модель уравнения кинетики процесса взаимодействия «токсическое вещество + нейтрализатор». Ниже рассматривается процесс нейтрализации аммиака за счет подачи в облако раствора ортофосфорной кислоты, поэтому уравнение кинетики записывается в виде:



Численное интегрирование уравнений осуществляется по описанной выше разностной схеме.

Алгоритм решения задачи

1. Вводится информация о размерах первичного облака на рубеже перехвата его струйными установками, задается скорость, направление ветра, коэффициент турбулентной диффузии, количество движущихся наземных струйных установок (пожарных машин), их скорость, маршрут движения, интенсивность подачи нейтрализатора, задается значение концентрации токсичного вещества в облаке.

2. Осуществляется расчет процесса миграции облака и нейтрализатора путем численного интегрирования уравнения (1).

3. Выполняется расчет процесса взаимодействия нейтрализатора и токсичного вещества.

4. Осуществляется вывод на печать (дисплей) изолиний концентрации токсичного вещества, нейтрализатора на месте ликвидации облака через заданный промежуток времени и анализируется сокращение размеров первичного облака, его интенсивности при выбранном маршруте движения установок.

Пример расчета

Проиллюстрируем разработанный метод расчета ликвидации первичного облака аммиака на следующем примере. Рассмотрим облако аммиака (рис. 10), имеющее следующие параметры: длина – 160 м; ширина – 215 м; высота – 80 м. Средняя концентрация токсичного вещества в облаке составляет 10^{-5} г/м³. Облако мигрирует в атмосфере под действием ветра, скорость ветра 2,5 м/с. Коэффициент турбулентной диффузии – 2 м²/с; азимут ветра – 45°.

Для ликвидации облака применяют две движущихся установки, скорость движения составляет 2 м/с; маршрут движения вдоль боковых границ облака (рис. 11), интенсивность подачи нейтрализатора (ортофосфорной кислоты) – 50 кг/с; площадь «обработки» струей нейтрализатора – 25×25 м; высота струи – 80 м. Скорость оседания капель нейтрализатора – 0,005 м/с. Эффективность работы двух движущихся установок при выбранном маршруте хорошо видна из рис. 11, так через 45 с после начала подачи нейтрализатора примерно 40 % первичного облака уже нейтрализовано.

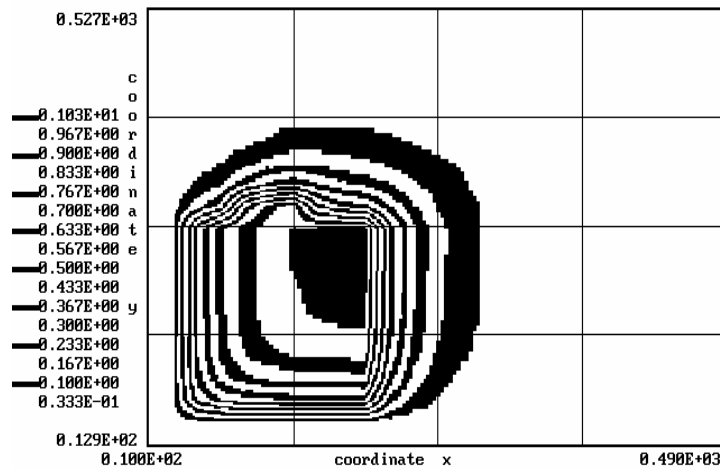


Рис. 10. Форма первичного облака аммиака перед началом его нейтрализации

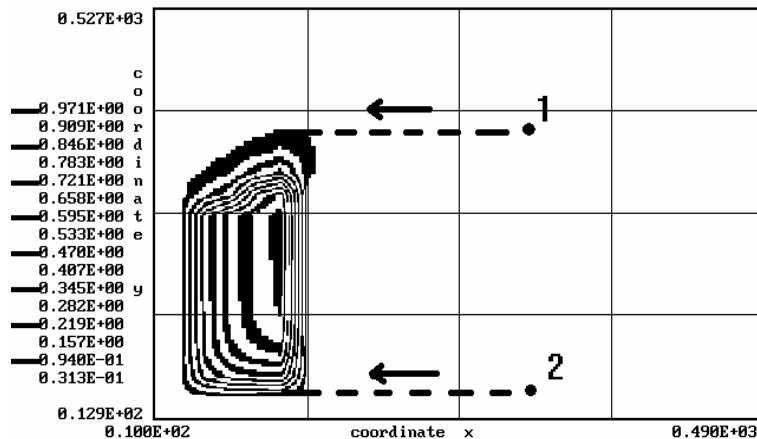


Рис. 11. Форма первичного облака аммиака после начала его нейтрализации:
1, 2 – наземные движущиеся установки, подающие нейтрализатор

Выводы

В работе рассмотрено построение эффективного экспресс метода прогноза токсичного поражения людей в вагоне, проходящем через облако отравляющего вещества. Модель позволяет выполнить прогноз возможного поражения людей (отравления) с учетом основных физических факторов, влияющих на данный процесс и на основании этого прогноза вырабатывать стратегию по снижению риска поражения людей.

Прогноз выполняется в режиме реального времени (расчет задачи требует около 1 с на ПК Pentium 2). Предложенный в работе метод расчета взаимодействия нейтрализатора и токсичного вещества при ликвидации первичного облака с помощью движущихся струйных установок даёт возможность методом вычислительно-го эксперимента «проигрывать» различные сценарии аварийных ситуаций и таким образом отработать на модели стратегию проведения защитных мероприятий.

Дальнейшее совершенствование разрабатываемого метода следует осуществлять в направлении создания трехмерной модели изучаемого процесса.

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. Алейникова Г. М. Оценка степени заражения салона вагона, находящегося в зоне распространения токсичных газов // Залізничний транспорт України, 2001. – № 5 – С. 32–34.
3. Гринин А. С. Экологическая безопасность. Защита территории и населения при чрезвычайных ситуациях / Под ред. А. С. Гринин, В. Н. Новиков. – М.: ФАИР-ПРЕСС, 2000. – 336 с.
4. Иванов Ю. А. Хранение и транспортировка жидкого аммиака / Ю. А. Иванов, И. И. Стижевский. – М.: Химия, 1991. – 80 с.
5. 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.
6. Марчук Г. И. Математическое моделирование в проблеме окружающей среды. – М.: Наука, 1982. – 320 с.
7. Плахотник В. Н. Природоохранная деятельность на железнодорожном транспорте Украины: проблемы и решения / В. Н. Плахотник, Л. А. Ярышкина, В. И. Сираков и др. – К.: Транспорт, 2001. – 244 с.
8. Магистральные аммиакопроводы // Труды ГИАП, 1978. – № 51. – М.

Поступила в редколлегию 11.09.2005.