

## ОЦЕНКА ЗАГРЯЗНЕНИЯ ВОЗДУШНОЙ СРЕДЫ ПОДВИЖНЫМ СОСТАВОМ

Розроблена математична модель прогнозу забруднення атмосфери та поверхні землі під час руху тепловоза. Модель базується на тривимірному рівнянні міграції домішки. Для чисельного розрахунку використовується неявна попеременно-трикутна різницева схема. Наведені результати моделювання.

Разработана математическая модель прогноза загрязнения атмосферы и поверхности земли при движении тепловоза. Модель базируется на трехмерном уравнении миграции примеси. Для численного расчета используется неявная попеременно-треугольная разностная схема. Приведены результаты моделирования.

A mathematical model to simulate atmosphere and land surface pollution in movement of a diesel locomotive has been developed. The model is based on a 3D equation of the impurity transfer. For numeric calculation the implicit difference alternatively-triangular scheme has been used. The results of simulation are presented.

### Введение

Железнодорожный подвижной состав оказывает влияние на загрязнения воздушной среды (ВС), в первую очередь; выбросами тепловозов и потерями груза [3]. Так, маневровые тепловозы являются достаточно интенсивными источниками выброса различных загрязняющих веществ в атмосферу. Примером другого подвижного источника загрязнения ВС может служить выход паров из разгерметизированных цистерн. Ранее при рассмотрении проблемы загрязнения ВС использовали модель линейного источника загрязнения [5] (отметим, что данная модель широко применялась для расчёта уровня загрязнения ВС возле автомагистралей). Использование модели линейного источника позволяет создать простую регуляторную модель прогноза качества ВС, однако, данная модель обладает рядом существенных недостатков:

- часть железнодорожного пути не всегда можно рассматривать как прямолинейный участок;
- не всегда участок железной дороги можно моделировать как постоянно действующий линейный источник.

Величина выбросов от тепловозов (а значит и достоверность оценки загрязнения воздушной среды) рассчитывается по количеству израсходованного топлива [4]. При этом в учёт не принимаются такие факторы, влияющие на загрязнение воздушной среды, как высота источника загрязнения, его техническое состояние, режим работы. Известно, что для каждого тепловоза – как источника загрязнения воздушной среды, имеется информация о сроке службы, пробеге,

т. е. при проведении стендовых испытаний для конкретного тепловоза можно получить достаточно достоверную информацию о количестве выброса  $q$  того или иного загрязняющего вещества. Данные такой инвентаризации могут быть положены в основу расчёта рассеивания вредных веществ от тепловозов в атмосфере. При этом оценка ущерба и плата за ущерб могут взиматься с учётом как условий рассеивания, так и в зависимости от места выброса и интенсивности загрязнения конкретных экологических объектов, расположенных вдоль маршрута движения.

Целью настоящей работы является разработка компьютерной модели и создание на ее основе методики экспресс-расчёта рассеивания вредных веществ от тепловоза. Предложенная модель может быть положена в основу разработки методики расчёта экологического ущерба и платы за ущерб.

### Постановка задачи, математическая модель

Рассматривается движение тепловоза на участке Приднепровской железной дороги. Требуется выполнить расчет процесса загрязнения примыкающих объектов загрязнителем, который выбрасывается тепловозом при его работе. В разработанной компьютерной модели движение тепловоза (источника выброса вредных веществ в атмосферу) моделируется движением точечного источника загрязнения интенсивности  $q = f(r, t)$ , где  $r = (x, y, z)$  – координаты расположения тепловоза;  $t$  – время.

Таким образом, при расчёте процесса рассеивания вредных веществ (ВВ) от тепловоза учитывается изменение интенсивности выброса

с течением времени на различных участках маршрута. Процесс рассеивания ВВ от теплового описывается следующим уравнением градиентного типа [1]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \varphi}{\partial t} + \frac{\partial u \varphi}{\partial x} + \frac{\partial v \varphi}{\partial y} + \frac{\partial (\omega - \omega_s)}{\partial z} + \sigma \varphi = \\ = \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu_x \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu_y \frac{\partial \varphi}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \mu_z \frac{\partial \varphi}{\partial z} \right) + \\ + \sum q_i(t) \delta(r - r_i), \quad (1) \end{aligned}$$

где  $\varphi$  – концентрация загрязняющего вещества;  $u, v, \omega$  – компоненты вектора скорости ветра;  $\mu_x, \mu_y, \mu_z$  – коэффициенты турбулентной диффузии;  $\sigma$  – коэффициент, учитывающий химический распад загрязняющего вещества;  $\omega_s$  – скорость гравитационного осаждения;  $\delta(r - r_i)$  – дельта-функция Дирака.

Постановка краевых условий для уравнения переноса примеси (1) рассматривается в работах [1; 2].

### Метод решения

Уравнение миграции примеси (1) расщепляется на три уравнения более простого вида при интегрировании на временном шаге  $\delta t$ :

$$\begin{aligned} \frac{\partial \varphi}{\partial t} + \frac{\partial u \varphi}{\partial x} + \frac{\partial v \varphi}{\partial y} + \frac{\partial (\omega - \omega_s)}{\partial z} + \sigma \varphi = 0; \\ \frac{\partial \varphi}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu_x \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu_y \frac{\partial \varphi}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \mu_z \frac{\partial \varphi}{\partial z} \right); \\ \frac{\partial \varphi}{\partial t} = \sum q_i(t) \delta(r - r_i). \end{aligned}$$

Первое уравнение из этой системы описывает перенос примесей по траекториям, второе уравнение описывает перенос примесей в атмосфере под действием диффузии, третье уравнение учитывает влияние источника выброса примесей. Численное интегрирование данных уравнений осуществляется по неявной попеременно-треугольной разностной схеме [2].

Особенностью используемой разностной схемы является то, что на каждом дробном шаге неизвестное значение концентрации примеси определяется по явной схеме (метод бегущего счета).

## Результаты

На основе модели (1) разработан пакет прикладных программ «TRAIN». Пакет реализован на алгоритмическом языке FORTRAN. Пакет программ может быть также использован для расчёта уровня загрязнения атмосферы, примыкающих объектов в случае разгерметизации движущихся цистерн, и выброса при этом в атмосферу вредных веществ. При решении этого класса задач весьма важно определить количество вредного вещества, выделяющегося из разгерметизированной цистерны в процессе её движения. Здесь возможно два подхода:

1. Оценка по «остатку» вещества в цистерне (необходимо отметить, что данный подход достаточно сложно реализовать на практике, т. к. заполнение цистерн осуществляется с определённой долей погрешности, которая может быть соизмерена по величине с испарившейся частью на коротком участке маршрута).

2. Расчётный – т. е. получение информации о количестве выброса в атмосферу  $q$  на основе либо использования эмпирических зависимостей, либо из решения газодинамической задачи.

Особый интерес представляет расчет уровня загрязнения примыкающих объектов от подвижного состава. Поскольку вблизи дороги могут находиться частные владения, то не исключены претензии этих владельцев к управлению железной дороги по выплате ущерба (как известно из зарубежного опыта, наиболее часто претензии предъявляют владельцы с/х угодий в случае снижения урожайности культур). Необходимо отметить, что определение интенсивности загрязнения конкретного примыкающего объекта – сложная задача. Ее решение может быть получено при условии, что известна динамика загрязнения атмосферы и подстилающей поверхности от движущегося источника. Количество примеси, попавшей на конкретный объект примыкающей территории при движении источника выброса загрязняющих веществ (тепловоз, цистерна), рассчитывается так:

$$G = \int_{t_1}^{t_2} \iint_{\Delta R} \bar{\sigma} \varphi dx dy dt,$$

где  $\bar{\sigma}$  – коэффициент, учитывающий аккумуляцию объектом загрязнения [2];  $\Delta R$  – площадь объекта.

Рассмотрим применение разработанного пакета программ для решения конкретной прикладной задачи: на участке железной дороги возле станции Днепропетровск–Грузовой (Днепропетровск) движется тепловоз со скоро-

стью  $V = 12$  м/с. Класс стабильности атмосферы –  $D$  (по Пасквили-Гиффорду). Высота приземного слоя – 100 м, скорость ветра – 2 м/с, азимут –  $156^\circ$  (рис. 1). Выброс  $CO$  от тепловоза составляет  $q = 10$  ед. (в безразмерном виде). Рядом с магистралью находится лесопосада и сельхозугодья. Требуется оценить динамику загрязнения атмосферы и примагистральных объектов при работе тепловоза на участке железной дороги длиной 500 м.

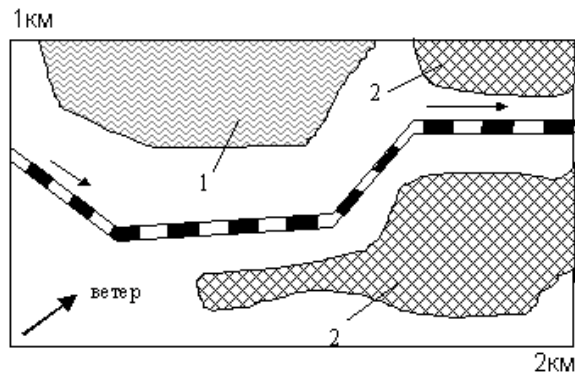


Рис. 1. Схема расчетной области:  
1 – с/х угодья; 2 – лесопосадка

Результаты расчета загрязнения атмосферы (на уровне  $z = 2$  м) при движении тепловоза показаны на рис. 2–4. Из них видно, что зона загрязнения атмосферы представляет собой шлейф, ориентированный по направлению движения ветра, расширяющийся под действием атмосферной диффузии. Значительному загрязнению при данных метеоусловиях подвергается лесопосадка. Это хорошо видно из табл. 1, где показано, как с течением времени увеличивается интенсивность загрязнения примагистральных объектов. Данная информация может служить основой для расчета экологического ущерба от подвижного состава.

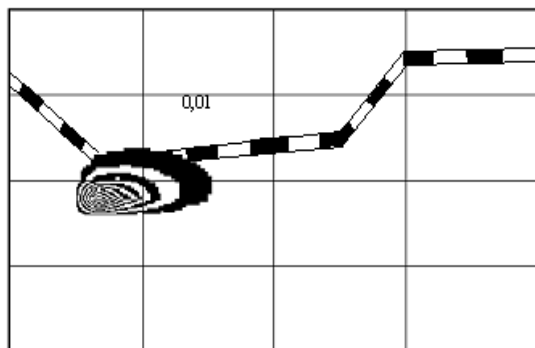


Рис. 2. Распределение концентрации примеси, выбрасываемой движущимся тепловозом ( $t = 346$  с)

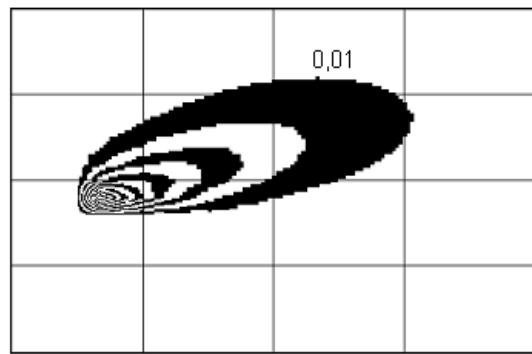


Рис. 3. Распределение концентрации примеси, выбрасываемой движущимся тепловозом ( $t = 613$  с)

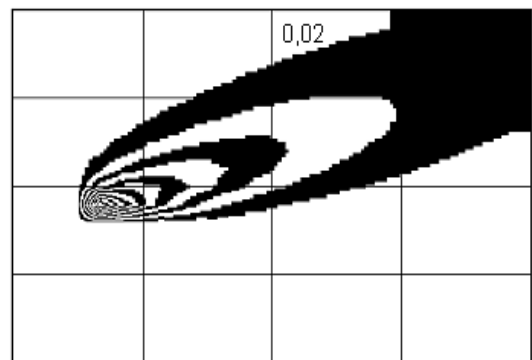


Рис. 4. Распределение концентрации примеси, выбрасываемой движущимся тепловозом ( $t = 1280$  с)

Таблица 1  
Количество  $CO$ , попавшее на объект при движении тепловоза

Район загрязнения	Концентрация $CO$ ( $G$ ) по времени $t$ , с			
	1280	1273	1180	1013
С/х угодья	378	374	313	219
Лесопосадка	2998	2961	2465	1693

## Выводы

Разработанная модель и пакет прикладных программ представляют собой эффективный инструмент анализа и прогноза уровня загрязнения атмосферы, подстилающей поверхности от подвижных источников. Решение задачи требует около 5 с при реализации модели на ПК типа PENTIUM. Результаты моделирования выдаются на печать или дисплей в виде изолиний концентрации примеси и таблиц.

Модель носит универсальный характер и может быть распространена на решение аналогичного класса задач при разгерметизации цистерн, уноса пыли с транспортируемого угля.

Совершенствование модели необходимо осуществлять в направлении разработки базы данных о величине выбросов по движущимся источникам на железной дороге.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Беляев Н. Н., Коренюк Е. Д., Хрущ В. К. Прогнозирование качества воздушной среды методом вычислительного эксперимента. – Д.: Наука и образование, 2000. – 208 с.
2. Згуровский М. З., Скопецкий В. В., Хрущ В. К., Беляев Н. Н. Численное моделирование распространения загрязнения в окружающей среде. – К.: Наукова думка, 1997. – 368 с.
3. Плахотник В. Н., Ярышкина Л. А., Сираков В. И. и др. Природоохранная деятельность на железнодорожном транспорте Украины: проблемы и решения. – К.: Транспорт Украины, 2001. – 244 с.
4. Тищенко А. А. Охрана атмосферного воздуха. Расчет содержания вредных веществ и их распределение в воздухе: Справочное издание. – М.: Химия, 1991. – 368 с.
5. Уорк К., Уорнер С. Загрязнение воздуха. Источники и контроль. – М.: Мир, 1980. – 539 с.

Поступила в редколлегию 28.05.03.