

Н. Н. БЕЛЯЕВ, О. В. КОПИЛАЯ (ДИИТ)

## ЗАЩИТА АТМОСФЕРЫ ОТ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ПРИ РАЗЛИВАХ ТОКСИЧНЫХ ВЕЩЕСТВ

Розроблена методика розрахунку процесу вилучення забрудненого повітря з зони аварійного розливу токсичної речовини за допомогою вентиляторів. Методика розрахунку базується на численному інтегруванні тримірного рівняння переносу домішки. Наведені результати обчислювального експеримента.

Разработана методика расчета процесса удаления загрязненного воздуха из зоны аварийного разлива токсичного вещества – груза с помощью вентиляторов. Методика расчета основывается на численном интегрировании трехмерного уравнения переноса примеси. Приводятся результаты вычислительного эксперимента.

A method to calculate the process of contaminated air evacuation from the zone of toxic substance spillage with ventilators has been developed. The method is based on the numerical integration of 3D equation of pollutant transfer. Results of the calculative experiment have been provided.

Аварийные разливы жидкостей, пары которых являются токсичными, способны вызвать интенсивное загрязнение окружающей среды, и в первую очередь – атмосферы. Анализ научных публикаций, посвященных проблеме защиты атмосферы от загрязнения после аварийных разливов, показывает, что в настоящее время активно идет процесс совершенствования методов ликвидации аварий, с целью уменьшения загрязнения атмосферы. [1; 2; 4; 6] Одним из методов, направленных на снижение уровня загрязнения атмосферы парами токсичного вещества (аммиак, хлор и т. д.), является метод забора загрязненного воздуха над зоной разлива с помощью вентилятора и последующая его подача на нейтрализующую установку. Описание данного метода приведено в работе [4]. Целью настоящей работы является разработки математической модели и методики расчета по применению данного метода. Построение и практическое применение такой методики для оптимизации процесса забора загрязненного воздуха не рассматривалось ранее в научной литературе. Методика позволяет на основе метода вычислительного эксперимента и в режиме реального времени решать следующие актуальные задачи:

1. Прогнозировать динамику загрязнения атмосферы после аварийного разлива токсичного вещества.

2. Оценивать эффективность работы вытяжной системы по снижению концентрации паров токсичного вещества возле зоны разлива в зависимости от расположения воздухозаборников вентиляторов относительно зоны разлива и с учетом метеословий.

3. Определять концентрацию паров токсичного вещества в удаляемом из зоны разлива воздухе и подаваемом на нейтрализующую установку.

Перечисленные задачи, в целом, дают возможность оптимизировать процесс защиты атмосферы после разлива токсичных веществ путем удаления загрязненного воздуха из зоны разлива.

### 1. Математическая модель миграции загрязнения в атмосфере

Для описания миграции паров загрязняющего вещества (ЗВ) от зоны разлива будем использовать трехмерное уравнение переноса примеси

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

где  $\varphi$  – концентрация загрязняющего вещества в единице объема воздуха;  $u, v, \omega$  – компоненты вектора скорости воздушной среды;  $\mu = (\mu_x, \mu_y, \mu_z)$  – коэффициенты турбулентной диффузии;  $t$  – время;  $\sigma$  – коэффициент, учитывающий химический расход загрязняющего вещества, вымывание его осадками;  $r_i = (x_i, y_i, z_i)$  – координаты источника загрязнения;  $q_i$  – мощность выброса загрязняющего вещества в атмосферу от зоны разлива;  $\delta(r - r_i), \delta(r - r_j)$  – дельта функция Дирака.

Моделирование работы вентиляторов, воздушных удаляющих пары, осуществляется заданием их интенсивности –  $Q_j$  и расчетом поля скорости на базе модели потенциального трехмерного течения от точечного стока:

$$u = \sum -\frac{Q_j}{4\pi} \left[ \frac{(x-x_j)}{r^3} + \frac{(x-x_j)}{\bar{r}^3} \right];$$

$$v = \sum -\frac{Q_j}{4\pi} \left[ \frac{(y-y_j)}{r^3} + \frac{(y-y_j)}{\bar{r}^3} \right];$$

$$w = \sum -\frac{Q_j}{4\pi} \left[ \frac{(z-z_j)}{r^3} + \frac{(z+z_j)}{\bar{r}^3} \right],$$

где

$$r = \sqrt{(x-x_j)^2 + (y-y_j)^2 + (z-z_j)^2},$$

$$\bar{r} = \sqrt{(x-x_j)^2 + (y-y_j)^2 + (z+z_j)^2}.$$

В данных расчетных зависимостях используются фиктивные точечные стоки, расположенные симметрично плоскости  $z=0$  (поверхность земли), что обеспечивает выполнение условия непроницаемости на данной поверхности.

Уравнение (1) дополняется следующими граничными условиями: на поверхности земли  $\frac{\partial \varphi}{\partial n} = 0$  ( $n$  – вектор внешней нормали к поверхности); на боковых гранях расчетной области ставятся условия:  $\varphi = 0$  при  $(\vec{V} \cdot \vec{n}) \geq 0$ ;  $\frac{\partial \varphi}{\partial n} = 0$ ; при  $(\vec{V} \cdot \vec{n}) \leq 0$ .

Начальное условие имеет вид  $\varphi = 0$ .

## 2. Модель испарения токсичного вещества

Для расчета количества токсичного вещества, испаряющегося от зеркала – поверхности аварийного разлива используется формула

$$q = (5,38 + V4,1) P_n \sqrt{\mu_v},$$

где  $V$  – скорость воздушного потока;  $P_n$  – давление насыщенных паров;  $\mu_v$  – молекулярная масса загрязняющего вещества.

Наряду с данной эмпирической моделью в разработанном пакете программ используется

также другая модель, основанная на решении задачи конвективного массообмена [5]

$$q = h_m A (\varphi_S - \varphi_0),$$

где  $h_m$  – коэффициент конвективного массообмена

$$h_m = \frac{S_h \mu}{L}.$$

Здесь  $S_h$  – число Шервуда;  $L$  – характерный линейный размер;  $A$  – площадь зеркала испарения;  $\varphi_S$  – концентрация загрязняющего вещества возле зеркала разлива;  $\varphi$  – концентрация загрязняющего вещества в окружающей среде.

Заметим, что если испарение идет из грунта, т. е. от просочившейся в грунт жидкости, пользоваться приведенными зависимостями – нельзя, а величина параметра « $q$ » должна задаваться исходя из имеющихся опытных данных, результатов обработки предшествующей информации об аналогичных аварийных ситуациях. В качестве некоторого «нулевого» приближения, при отсутствии какой-либо возможной информации, можно воспользоваться в данной ситуации моделью [3]:

$$q = 43,8 \frac{V_B \mu_B}{T},$$

где

$$V_B = \frac{\mu * S}{H} \ln \frac{B - P_1}{B - P_n},$$

где  $S$  – площадь испарения;  $H$  – расстояние от зеркала до поверхности земли;  $B$  – атмосферное давление;  $P_1$  – давление пара вещества в атмосфере;  $T$  – температура.

## 3. Метод решения

Численное интегрирование уравнения переноса паров загрязняющего вещества от зоны разлива осуществляется с использованием неявной попеременно-треугольной разностной схемы расщепления [7]. На каждом дробном шаге расчет неизвестного значения концентрации загрязняющего вещества выполняется по схеме бегущего счета. Разностная схема является абсолютно устойчивой.

## 4. Алгоритм решения

На основе численного решения рассмотренной выше трехмерной модели переноса загрязняющих веществ в атмосфере и модели точечного стока создан пакет программ «Воздух-3»,

реализованный на алгоритмическом языке FORTRAN. Процесс расчета осуществляется в следующем порядке:

1. Задаются размеры расчетной области, где проводится исследование по удалению ЗВ из зоны разлива с помощью вентилятора.

2. Задается форма, размеры зоны разлива, метеорологическая информация, информация о физических параметрах разлитой жидкости (молекулярный вес и т. д.). Отметим, что в дискретной модели имеется возможность задавать любую геометрическую форму зоны разлива (в плане).

3. Задается интенсивность вытяжных устройств, время их работы и положение относительно зоны разлива.

4. Осуществляется расчет уравнения переноса ЗВ в атмосфере от зоны разлива и процесса удаления ЗВ вытяжной установкой.

В результате выполнения расчета с помощью пакета программ «Воздух-3» пользователь получает следующую информацию:

- поле концентраций ЗВ в расчетной области;
- информацию об уровне загрязненности воздуха, поступающего в вытяжное устройство вентилятора и идущего на нейтрализацию;
- информацию о количестве ЗВ, испарившегося от зоны разлива;
- количество ЗВ, удаленного вытяжными устройствами за время их работы.

### 5. Пример расчета

Ниже приводятся результаты вычислительного эксперимента, выполненного на базе пакета программ «Воздух-3» по моделированию удаления ЗВ от зоны разлива аммиака с помощью вытяжных устройств.

Вычислительный эксперимент проведен при следующих параметрах:  $R_x = 22$  м;  $R_y = 24$  м;  $R_z = 20$  м – размеры расчетной области;  $L_x = 2,64$  м;  $L_y = 3,42$  м – размеры зоны разлива (рис. 1, 2);  $D$  – класс устойчивости атмосферы (по шкале Пасквила); азимут –  $45^\circ$ . При проведении эксперимента варьировалась высота «z» размещение воздухозаборника над зоной разлива, интенсивность вытяжных устройств, скорость ветра.

Перейдем к рассмотрению результатов моделирования. На рис. 3 и 4 показано как изменяется интенсивность и форма зоны загрязнения атмосферы при различной скорости ветра.

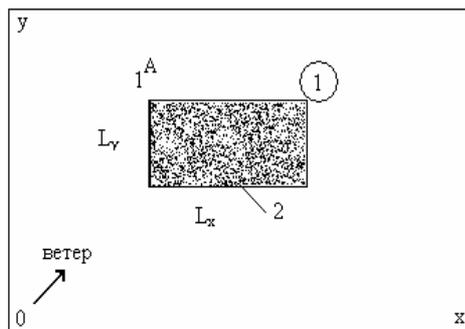


Рис. 1. Схема размещения вытяжной установки (1) и зоны разлива (2)

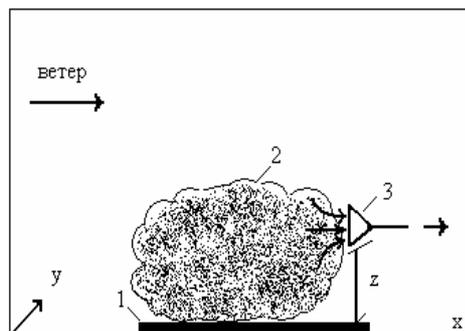


Рис. 2. Схема удаления ЗВ из зоны разлива: 1 – зона разлива; 2 – облако паров ЗВ; 3 – воздухозаборник вентиляторной установки

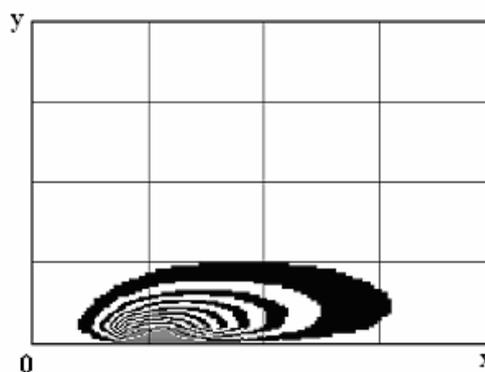


Рис. 3. Зона загрязнения атмосферы ( $y = 12$  м) при скорости ветра  $V = 10$  м/с

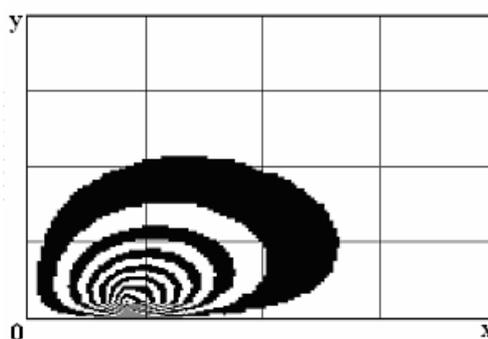


Рис. 4. Зона загрязнения атмосферы ( $y = 12$  м) при скорости ветра  $V = 0,5$  м/с

Видно, что увеличение скорости ветра (см. рис. 3) приводит к тому, что зона загрязнения больше «прижимается» к поверхности земли, чем при малой скорости ветра (см. рис. 4  $V = 0,5$  м/с).

В табл. 1–3 представлены данные по расчету эффективности работы установки по удалению ЗВ из зоны разлива при расположении воздухозаборника вблизи зоны разлива (см. рис. 2) и при различной его производительности (рассматривались осевые вентиляторы ЦАГИ серии МЦ). Высота установки воздухозаборника – 1 м над зоной разлива, скорость ветра – 2 м/с.

Таблица 1

**Эффективность работы установки при подаче вентилятора  $Q = 36$  м<sup>3</sup>/с,  $z = 1$  м**

Время, с	3,6	4,5	8,1
Масса испарившегося ЗВ, кг	0,3800	0,4800	0,8600
Концентрация ЗВ в удаляемом воздухе, кг/м <sup>3</sup>	0,0004	0,0004	0,0004
Масса удаленного ЗВ, кг	0,0260	0,0390	0,0470

Таблица 2

**Эффективность работы установки при подаче вентилятора  $Q = 18$  м<sup>3</sup>/с,  $z = 1$  м**

Время, с	3,6	4,5	8,1
Масса испарившегося ЗВ, кг	0,3800	0,4800	0,8600
Концентрация ЗВ в удаляемом воздухе, кг/м <sup>3</sup>	0,0004	0,0004	0,0004
Масса удаленного ЗВ, кг	0,0149	0,0227	0,0283

Таблица 3

**Эффективность работы установки при подаче вентилятора  $Q = 5$  м<sup>3</sup>/с,  $z = 1$  м**

Время, с	3,6	4,5	8,1
Масса испарившегося ЗВ, кг	0,38	0,48	0,8600
Концентрация ЗВ в удаляемом воздухе, кг/м <sup>3</sup>	0,0004	0,0004	0,0004
Масса удаленного ЗВ, кг	0,0045	0,0071	0,0088

Анализ данных моделирования, представленных в табл. 1...8 позволяет сделать вывод о том, что на эффективность работы установки по удалению загрязненного воздуха оказывает влияние высота установки воздухозаборника и его положение относительно зоны разлива. Так, при подаче вентилятора  $Q = 5$  м<sup>3</sup>/с (вентилятор типа МЦ № 8) увеличение высоты установки воздухозаборника из положения  $z = 1$  м до положения  $z = 2$  м, привело к уменьшению массы удаленного ЗВ, примерно на 40 %. В целом количество удаляемого ЗВ через воздухозаборник значительно меньше испарившейся массы ЗВ. В табл. 7, 8 приведены данные по оценке эффективности работы вытяжной установки при различной скорости ветра (расчет выполнен для другого положения воздухозаборника – позиция 1<sup>A</sup> на рис. 1). Как следует из расчетных данных увеличение скорости ветра приводит к росту концентрации ЗВ в воздухе, попадающем в воздухозаборник, и увеличению массы удаляемого ЗВ. Это объясняется ростом массы испаряющегося ЗВ от зеркала зоны разлива.

В табл. 4...6 представлены данные об эффективности работы установки при другой высоте размещения воздухозаборника –  $z = 2$  м.

Таблица 4

**Эффективность работы установки при подаче вентилятора  $Q = 36$  м<sup>3</sup>/с,  $z = 2$  м**

Время, с	3,6	4,5	8,1
Масса испарившегося ЗВ, кг	0,3800	0,4800	0,8600
Концентрация ЗВ в удаляемом воздухе, кг/м <sup>3</sup>	0,0003	0,0003	0,0003
Масса удаленного ЗВ, кг	0,0219	0,0328	0,0411

Таблица 5

**Эффективность работы установки при подаче вентилятора  $Q = 18$  м<sup>3</sup>/с,  $z = 2$  м**

Время, с	3,6	4,5	8,1
Масса испарившегося ЗВ, кг	0,3800	0,4800	0,8600
Концентрация ЗВ в удаляемом воздухе, кг/м <sup>3</sup>	0,0003	0,0003	0,0003
Масса удаленного ЗВ, кг	0,0109	0,0167	0,0205

Таблица 6

**Эффективность работы установки  
при подаче вентилятора  $Q = 5 \text{ м}^3/\text{с}$ ,  $z = 2 \text{ м}$**

Время, с	3,6	4,5	8,1
Масса испарившегося ЗВ, кг	0,38000	0,48000	0,86000
Концентрация ЗВ в удаляемом воздухе, кг/м <sup>3</sup>	0,00030	0,00030	0,00030
Масса удаленного ЗВ, кг	0,00280	0,00448	0,00556

Таблица 7

**Эффективность работы установки при подаче  
вентилятора  $Q = 5 \text{ м}^3/\text{с}$ ,  $V = 0,5 \text{ м/с}$   $z = 1 \text{ м}$   
(новое положение воздухозаборника)**

Время, с	3,6	4,5	8,1
Масса испарившегося ЗВ, кг	0,21100	0,26300	0,47400
Концентрация ЗВ в удаляемом воздухе, кг/м <sup>3</sup>	0,00160	0,00016	0,00016
Масса удаленного ЗВ, кг	0,00140	0,00220	0,00270

Таблица 8

**Эффективность работы установки при подаче  
вентилятора  $Q = 5 \text{ м}^3/\text{с}$ ,  $V = 10 \text{ м/с}$   $z = 1 \text{ м}$   
(новое положение воздухозаборника)**

Время, с	3,6	4,5	8,1
Масса испарившегося ЗВ, кг	1,31500	1,64400	2,95900
Концентрация ЗВ в удаляемом воздухе, кг/м <sup>3</sup>	0,00043	0,00043	0,00043
Масса удаленного ЗВ, кг	0,00360	0,00570	0,00710

### Выводы

Разработанная компьютерная модель и созданная на ее базе методика позволяют выполнять расчет в режиме реального времени (решение одного варианта задачи составляет 2 с на ПК типа PENTIUM-II) процесса удаления ЗВ из зоны разлива при использовании вентиляторов, отсасывающих загрязненный воздух.

На основе результатов проведенного вычислительного эксперимента, с использования построенной модели, можно сформулировать следующие рекомендации:

1. Эффективность работы установки по забору загрязненного воздуха из зоны разлива зависит от высоты установки воздухозаборника над поверхностью разлива и «степени» приближения ее к зоне разлива. Поэтому при разработке установок, предназначенных для решения данной задачи, следует предусмотреть конструктивные решения, позволяющие размещать воздухозаборник как можно ниже к зоне разлива, а также предусмотреть возможность выдвижения воздухозаборника «вглубь», зоны разлива, для обеспечения «равномерности» всасывания.

2. Поскольку скорость всасывания при «работе» пространственного точечного стока (моделирующего работу воздухозаборника) обратно пропорциональна квадрату расстояния  $R$  от стока (воздухозаборника)  $V = \frac{Q}{4\pi R^2}$ , а значит –

резко падает при удалении от воздухозаборника, то использование вентиляторов, воздуходувок с расходом  $Q < 30 \text{ м}^3/\text{с}$  – нецелесообразно в случае больших по площади зон разлива.

3. Ввиду того, что при авариях площадь разлива может быть большой, при комплектации оборудования для ликвидации аварийных разливов следует приобрести несколько вентиляторных установок, которые можно было бы разместить в различных точках зоны разлива.

4. Учитывая, что скорость всасывания резко падает при удалении от отверстия воздухозаборника при ограниченной интенсивности вентилятора  $Q$ , данный метод защиты атмосферы от загрязнения следует рекомендовать при небольшой по величине площади разлива. Разработанная методика позволяет определить для имеющихся в наличии вентиляторов величину наиболее эффективно обработанной зоны разлива. То есть для вентиляторных установок, уже находящихся в эксплуатации, имеется возможность рассчитать по разработанной методике, их возможности по защите атмосферы.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Аварии и катастрофы. Предупреждение и ликвидация последствий: Учебное пособие в 5 т. / Под ред. В. А. Котляревского и А. В. Забегаева. – М.: Из-во АСВ, 2001. – 164 с.
2. Иванов Ю. А. Хранение и транспортировка жидкого аммиака / Ю. А. Иванов, И. И. Стижевский. – М.: Химия, 1991. – 80 с.
3. Мацак В. Г. Гигиеническое значение скорости испарения и давления пара токсических веществ, применяемых в производстве / В. Г. Мацак, Л. К. Хоцянов. – М.: Медгиз, 1959. – 231 с.

4. 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 Украины, 2001. – 244 с.
5. Крейт Ф. Основы теплопередачи / Ф. Крейт, У. Блэйк. – М.: Мир, 1983. – 512 с.
6. Купаев В. И. Методы локализации очага аварий и ликвидации ее последствий на химически опасных объектах железнодорожного транспорта / В. И. Купаев, С. В. Рассказов // Транспорт. наука, техника, управление № 4, 2003. – С. 28–34.
7. Беляев Н. Н. Моделирование загрязнения атмосферы и подсыпавшей поверхности при авариях на железнодорожном транспорте / Н. Н. Беляев, О. В. Коптилая. // Методы розв'язування прикладних задач механіки деформованого твердого тіла. Збірник наук. пр. / Дніпропетр. нац. ун-т. – Д. 2003. – Вип. 5 – С. 3–12.

Поступила в редколлегию 12.10.2004.