

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ МАССОПЕРЕНОСА ОТ СЛОЯ ЖИДКОСТИ, ПРОЛИТОЙ НА ПОВЕРХНОСТЬ ЗЕМЛИ

к.т.н. В.В. Падгурскис, Л.Л. Михальская, Ю.Н. Попов  
(представил д.т.н., проф. Э.Е. Прохач)

Приведена система уравнений массопереноса в грунт и в атмосферный воздух и процесса рассеяния паров в атмосфере. Совместное решение уравнений позволяет определить соотношение масс испарившейся и проникшей в грунт жидкости за время существования пролива и размеры зон распространения паров в приземном слое воздуха.

В процессе испытаний ракетно - космической техники при отсутствии аварийных ситуаций на землю падают ступени ракет с топливными баками либо их фрагменты. Компоненты топлив могут сгорать в воздухе или на земле при падении баков с остатками топлив и могут разливаться по поверхности земли. Аварийные ситуации сопровождающиеся проливами компонентов топлив могут возникать и в процессе эксплуатации ракетной техники на земле.

Разлитый по поверхности земли жидкий компонент частично проникает в грунт, частично испаряется и рассеивается в атмосфере. Концентрация паров в атмосфере и в грунте может значительно превышать предельно допустимую, что приводит к негативным последствиям для окружающей среды. Как показывают исследования района падения ракет космодрома Байконур [1], обнаружены места с содержанием несимметричного диметилгидразина (НДМГ) в почве от 0,07 до 18,01 мг/кг при предельно допустимой концентрации 0,1 мг/кг.

Целью настоящей работы является разработка математической модели трансформации токсичных веществ в грунт при проливе их на землю.

На рис. 1 представлена схема процесса массопереноса разлитой по поверхности земли жидкости в грунт и в атмосферу. Масса жидкости  $j_{гр}$ , проникающей в грунт с единицы поверхности в единицу времени для одномерного случая определяется из уравнения [2]:

$$j_{гр} = D_{гр} \rho_0 \frac{\partial u}{\partial z}, \quad (1)$$

где  $D_{гр}$  - коэффициент диффузии жидкости в грунт;

$\rho_0$  - плотность сухой части грунта;

$u$  - влагосодержание грунта.

Градиент влагосодержания грунта определяется из решения дифференциального уравнения влагопереноса

$$\frac{\partial u}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial z} (D_{гр}(u) \frac{\partial u}{\partial z}), \quad (2)$$

где  $\tau$  - время процесса массообмена.

Масса жидкости  $j_{исп}$ , испарившейся с единицы поверхности разлитой жидкости в единицу времени рассчитывается из выражения

$$j_{исп} = \beta(p_{нас} - p_n), \quad (3)$$

где  $\beta$  - коэффициент массоотдачи;

$p_{нас}$  - давление насыщенного пара в пограничном слое над поверхностью жидкости;

$p_n$  - парциальное давление пара данного вещества в воздухе.

Коэффициент массоотдачи может быть найден из решения критериального уравнения, описывающего массоперенос от данной жидкости к атмосферному воздуху. Критериальное уравнение имеет вид [3]:

$$Nu' = A \cdot (Re')^m \cdot (Pr')^n, \quad (4)$$

где  $Nu' = \beta l / D_{исп}$ ;  $Re' = WL / \nu_n$ ;  $Pr' = \nu_n / D_{исп}$  - диффузионные критерии Нуссельта Рейнольдса и Прандтля, выраженные через коэффициенты диффузии от данной жидкости к воздуху;

$L$  - характерный размер пролива;

$\nu_n$  - кинематическая вязкость пара;

$A, m, n$  - постоянные коэффициенты;

$W$  - скорость воздуха.

Процесс рассеяния паров в атмосфере описывается по методикам, приведенным в работе [4]. Приземная концентрация пара в атмосфере может быть определена по уравнению

$$q = \frac{j_{исп} F}{2\pi w \sigma_y \sigma_z} \exp \left[ -\frac{y^2}{2\sigma_y^2} \right] \left[ \exp \left[ -\frac{(z-H)^2}{2\sigma_z^2} \right] + \exp \left[ -\frac{(z+H)^2}{2\sigma_z^2} \right] \right], \quad (5)$$

где  $q(x, y, z, H)$  - концентрация пара в воздухе;

$\sigma_y^2, \sigma_z^2$  - дисперсии координат с заданной концентрацией пара;

$H$  - высота подъема паров над поверхностью земли.

Время существования слоя жидкости толщиной  $l_{ж}$  определяется из совместного решения уравнений (1) - (3) и равно

$$\tau = l_{ж} \rho_{ж} / (j_{гр} + j_{исп}), \quad (6)$$

где  $\rho_{ж}$  - плотность испаряющейся жидкости.

Решение системы уравнений (1) - (5) для характерных расчетных

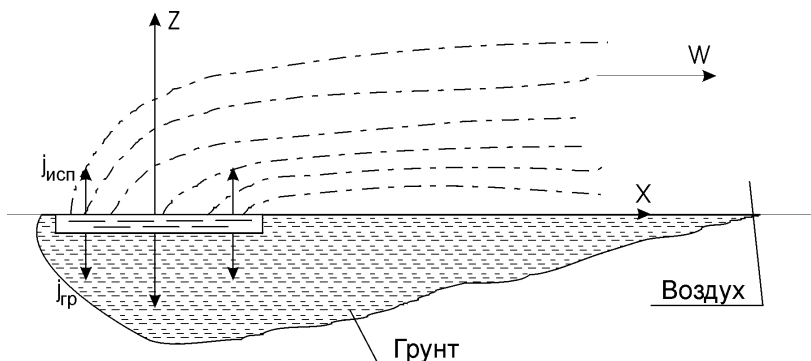


Рис. 1. Схема массопереноса от жидкости, разлитой по поверхности земли

случаев позволяет оценить трансформацию жидкости при ее проливе на землю:

- массу жидкости, проникшей в грунт;
- массу жидкости, испарившейся и рассеянной в атмосфере;
- размеры зоны загрязнений токсичными веществами.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Касимов Н.С., Гребенюк В.Б., Королева Т.В., Проскуряков Ю.В. Поведение компонентов ракетного топлива в почвах, водах и растениях. – М.: Почвоведение, 1994. – С.110 - 120.
2. Лыков А.В. Тепломассообмен: Справочник. – М.: Энергия, 1978. – 480 с.
3. Щукин А.А., Сушкин И.Н. и др. Теплотехника (курс общей теплотехники). Изд. 2-е, перераб. / Под ред. И.Н. Сушкина. – М: Металлургия, 1973. – 480 с.
4. Бызова Н.Л., Гаргер Е.К., Иванов В.Н. Экспериментальные исследования атмосферной диффузии и расчета рассеяния примесей. – М: Гидрометеиздат, 1991. – 278 с.

*Поступила в редколлегию 30.01.2001*