

ПРИМЕНЕНИЕ ВОЗДУШНЫХ СТРУЙ ДЛЯ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ПРОЦЕССА ИСПАРЕНИЯ ОТ ЗОНЫ РАЗЛИВА

На базі моделі потенціальної течії та моделі переносу домішки запропоновано 2D чисельна модель для прогнозування випарування від зони розливу при використанні струменя повітря. Наведено результати розрахунків на базі розробленої моделі.

На базе модели потенциального течения и модели переноса примеси предложена 2D численная модель для расчета процесса испарения от зоны разлива при подаче воздушной струи. Представлены результаты численного моделирования.

The 2D numerical model to simulate the pollutant dispersion and evaporation, when the air jet is used, was proposed. The results of numerical experiment are presented.

Введение

На практике имеют место ситуации, когда для ускорения процесса испарения жидкого груза, попавшего на грунт в результате аварии, применяются воздушные струи для интенсификации этого процесса. Для создания воздушных струй можно использовать, например, отработанные авиационные двигатели. Такой подход, в частности, рекомендуется при аварийных разливах аммиака [3]. При применении воздушных струй для интенсификации процесса испарения важно быстро получить количественную оценку эффективности этого процесса, а также прогнозировать размеры и интенсивность зоны загрязнения атмосферы для принятия обоснованного решения по организации защитных мероприятий. Поэтому для практики важно иметь методы расчета, которые позволяли бы быстро оценить эффективность применения воздушных струй в зависимости от конкретных условий (метеоусловия, размеры зоны разлива, скорость вдува и т.д.).

Целью данной работы является создание эффективной численной модели рассеивания паров загрязнителя в атмосфере от зоны разлива при подаче воздушной струи над этой зоной с целью интенсификации процесса испарения, учитывающей наиболее существенные физические факторы, влияющие на этот процесс.

Математическая модель

Рассматривается задача расчета рассеивания паров загрязнителя от зоны разлива при подаче струи воздуха с целью интенсификации процесса испарения. Т.к. ставится задача разработки регуляторной модели для повседневных ин-

женерных расчетов, позволяющей оценить интенсивность испарения и загрязнения атмосферы при тех или иных параметрах струи и атмосферы, то для расчета количества испарившегося вещества от зоны разлива используется широко применяемая на практике эмпирическая модель [3, 5]:

$$Q = (5,83 + 4,1 \cdot V) P_n \sqrt{M},$$

где V – скорость воздушной среды; P_n – давление насыщенных паров; M – молекулярная масса вещества.

Данная зависимость используется на практике для расчета как испарения от свободной поверхности жидкости, так и при разливе на грунт, при испарении с поверхности почвы [5]. В используемой ниже модели переноса примеси в атмосфере (уравнение 1) от зоны разлива, величина Q , определенная по данной зависимости, используется для расчета загрязнения атмосферы. Очевидно, что для рассматриваемой задачи, когда воздействие воздушного потока на процесс испарения и переноса паров определяется как ветром, так и вдуваемой струей необходимо рассчитать эту скорость потока V и ее изменение над зоной разлива.

Для расчета рассеивания паров испарившегося вещества в атмосфере и определения при этом размеров интенсивности зоны загрязнения атмосферы используется модель градиентного типа (профильная модель) [1, 2]

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial uC}{\partial x} + \frac{\partial vC}{\partial y} + \sigma C = \text{div}(\mu \text{grad}C) + \sum_{i=1}^N Q_i(t) \delta(x - x_i) \delta(y - y_i), \quad (1)$$

где C – концентрация загрязнителя в атмосфере; u, v – компоненты вектора скорости воздушной среды; $\mu = (\mu_x, \mu_y)$ – коэффициенты турбулентной диффузии; Q – интенсивность испарения загрязнителя; $\delta(x - x_i)\delta(y - y_i)$ – дельта-функция Дирака; x_i, y_i – координаты источника выделения паров загрязнителя; σ – коэффициент, учитывающий химический распад загрязнителя, вымывание осадками; t – время.

Постановка краевых условий для уравнения переноса примеси рассмотрена в работах [1, 2].

Для расчета поля скорости воздушного потока при вдуве струи используется модель потенциального течения. Если расчет переноса паров загрязнителя в атмосфере от зоны разлива происходит в условиях обваловки зоны разлива, т.е. когда есть препятствие (насыпь) на пути воздушного потока, то это препятствие будет влиять на воздушный поток и приведет к деформации поля скорости воздушного потока. Такое влияние тоже необходимо учесть в модели. Этот учет осуществляется при решении гидродинамической задачи. Процесс расчета переноса паров в атмосфере в таком случае разбивается на два этапа. На первом этапе вычислительного эксперимента решается задача гидродинамики и определяется поле скорости воздушного потока с учетом вдуваемой струи и его деформации при обтекании насыпи обваловки. В этом случае для расчета поля скорости воздушного потока необходимо найти решение уравнения для потенциала скорости

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

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) $\frac{\partial P}{\partial n} = V_n$, где V_n – известное значение скорости;
- на выходной границе $P = P^*(x = \text{const}, y) + \text{const}$ (условие Дирихле).

Верхняя граница расчетной области считается «твердой стенкой».

Решение данного уравнения гидродинамики позволяет рассчитать поле скорости воздушного потока. Компоненты вектора скорости пото-

ка определяются через величину потенциала скорости так:

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

На втором этапе моделирования осуществляется расчет распространения загрязнителя в атмосфере от зоны разлива на базе рассмотренного выше уравнения переноса примеси.

При численном решении задачи используется метод маркирования расчетной области [1]. Расчет выполняется на прямоугольной разностной сетке, а положение твердых границ (поверхность земли, форма насыпей, которые используются для обваловки зоны разлива) задается с помощью маркеров. На твердых границах выполняется условие непротекания, реализуемое в численной модели с помощью фиктивных ячеек. Маркеры определяют также зону вдува струи, зону разлива.

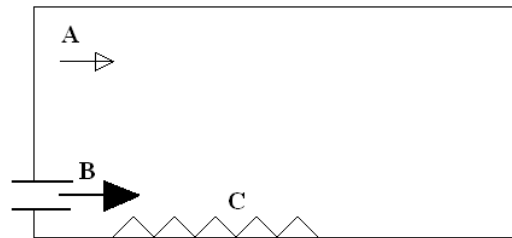


Рис. 1. Схема расчетной области: А – область ветрового потока; В – область вдува воздушной струи; С – зона разлива

Использование метода маркирования дает возможность пользователю формировать любую форму насыпи, что используется для обваловки зоны разлива.

Метод решения

Для численного интегрирования уравнения для потенциала скорости применяется метод установления решения по времени, поэтому численно интегрируется уравнение вида

$$\frac{\partial P}{\partial \eta} = \frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2}, \quad (3)$$

где η – фиктивное время. Как известно, при $\eta \rightarrow \infty$ решение уравнения (3) будет стремиться к «установлению», т.е. к решению уравнения (2).

Численное интегрирование уравнения (3) осуществляется с помощью попеременно-треугольного метода А. А. Самарского [4]. Разностные соотношения имеют вид

$$\frac{P_{i,j}^{n+1} - P_{i,j}^{n+1/2}}{0,5\Delta\eta} = \frac{P_{i+1,j}^{n+1} - P_{i,j}^{n+1}}{\Delta x^2} + \frac{-P_{i,j}^{n+1/2} + P_{i-1,j}^{n+1/2}}{\Delta x^2} + \frac{P_{i,j+1}^{n+1} - P_{i,j}^{n+1}}{\Delta y^2} + \frac{-P_{i,j}^{n+1/2} + P_{i,j-1}^{n+1/2}}{\Delta y^2};$$

$$\frac{P_{i,j}^{n+1} - P_{i,j}^{n+1/2}}{0,5\Delta\eta} = \frac{P_{i+1,j}^{n+1} - P_{i,j}^{n+1}}{\Delta x^2} + \frac{-P_{i,j}^{n+1/2} + P_{i-1,j}^{n+1/2}}{\Delta x^2} + \frac{P_{i,j+1}^{n+1} - P_{i,j}^{n+1}}{\Delta y^2} + \frac{-P_{i,j}^{n+1/2} + P_{i,j-1}^{n+1/2}}{\Delta y^2}.$$

На первом шаге расщепления находится «промежуточное» значение потенциала $P_{i,j}^{n+1/2}$ на временном слое « $n+1/2$ », а на втором шаге – определяется «окончательное» значение потенциала $P_{i,j}^{n+1}$ на временном слое « $n+1$ ». Незвестное значение $P_{i,j}$ на каждом шаге осуществляется по методу бегущего счета.

После определения поля потенциала скорости компоненты вектора скорости рассчитываются по соотношениям:

$$u_{ij} = \frac{P_{i,j} - P_{i-1,j}}{\Delta x};$$

$$v_{ij} = \frac{P_{i,j} - P_{i,j-1}}{\Delta y}.$$

Компоненты вектора скорости воздушной среды рассчитываются на гранях разностных ячеек, что позволяет построить консервативную разностную схему для уравнения переноса загрязняющего вещества. Для численного интегрирования уравнения переноса примеси используется попеременно-треугольная разностная схема [1].

Практическая реализация модели

Рассматривается применение рассмотренной численной модели и разработанного кода (язык программирования – FORTRAN) для решения следующей задачи. Произошел аварийный разлив нефти. В результате этого на месте аварии образовалась зона разлива длиной 8 м. Для интенсификации испарения бензиновой фракции применяют подачу струи воздуха над зоной разлива (рис. 1). Размеры расчетной области: длина – 25 м, высота – 6.3 м. Профиль ветра на входе в расчетную область – равномерный, скорость ветра 4 м/с. Коэффициент атмосферной диффузии по обоим координат-

ным направлениям равен $3 \text{ м}^2/\text{с}$. Скорость вдува струи равна 35 м/с, а во втором варианте – 50 м/с. Коэффициент σ равен нулю. Следуя работе [5], для бензиновой фракции принималось: $M = 100$, $P_{\text{н}} = 8 \text{ мм рт. ст.}$ (при температуре $36 \text{ }^\circ\text{C}$).

Рассмотрим результаты вычислительного эксперимента. На рис. 2 – 4 показана область загрязнения атмосферы возле зоны разлива для различных вариантов задачи.

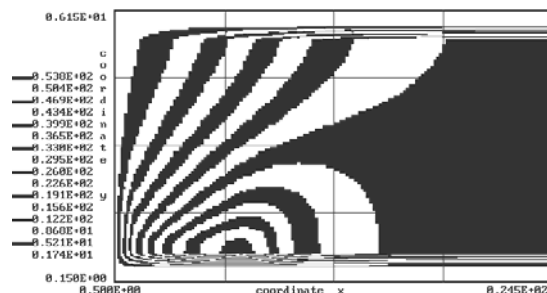


Рис. 2. Область загрязнения атмосферы над зоной испарения, скорость вдуваемой струи 35 м/с (нет обваловки зоны разлива), $t = 70 \text{ с}$

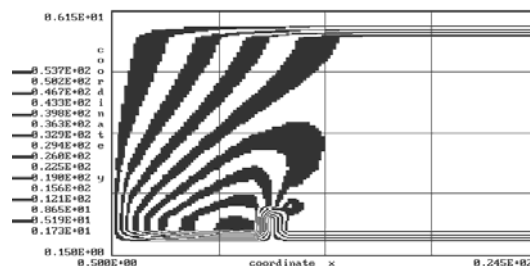


Рис. 3. Область загрязнения атмосферы над зоной испарения, скорость вдуваемой струи 35 м/с (есть обваловка зоны разлива), $t = 70 \text{ с}$

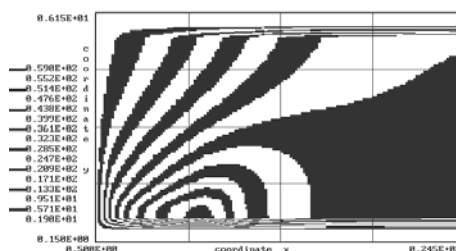


Рис. 4. Область загрязнения атмосферы над зоной испарения, скорость вдуваемой струи 50 м/с (нет обваловки зоны разлива), $t = 70 \text{ с}$

Видно, что применение обваловки зоны разлива (высота насыпи 0.6 м) приводит к изменению формы и размеров зоны загрязнения атмосферы. Из рис. 3 отчетливо виден «разворот», в этом случае, загрязненного потока воздуха возле насыпи наверх. Как видно из рис. 2 – 4, непосредственно над зоной разлива формируется область с большим градиентом концентрации примеси.

В табл. 1 представлена динамика процесса испарения для двух различных вариантов задачи: при отсутствии насыпи обваловки и при наличии насыпи (высота насыпи 0.6 м).

Таблица 1

Масса испарившегося вещества от зоны разлива

Время t , с	Масса испарившегося вещества, скорость вдува 35 м/с (нет обваловки зоны разлива), г	Масса испарившегося вещества, скорость вдува 50 м/с (нет обваловки зоны разлива), г	Масса испарившегося вещества, скорость вдува 35 м/с (есть обваловка зоны разлива), г
30	247	316	241
50	412	527	402
70	578	738	564

Как видно из табл. 1, при обваловке зоны разлива произошло незначительное уменьшение интенсификации процесса испарения, что вызвано влиянием насыпи на формирование поля скорости воздушного потока возле зоны разлива. При скорости вдува струи 50 м/с очевидна интенсификация процесса испарения.

В заключение отметим, что на расчет задачи требуется около 5 секунд компьютерного времени.

Выводы

Предложена эффективная численная модель процесса испарения вещества от зоны разлива

при обработке ее воздушной струей. Модель может быть реализована на компьютерах малой и средней мощности. Применяемый в модели метод маркирования расчетной области дает возможность формировать любую геометрическую форму насыпи обваловки. Дальнейшее совершенствование модели следует проводить в направлении ее адаптации к расчету трехмерного рассеивания газов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Численное моделирование распространения загрязнения в окружающей среде [Текст] / М. З. Згуровский и др. – К.: Наук. думка, 1997. – 368 с.
2. Марчук, Г. И. Математическое моделирование в проблеме окружающей среды [Текст] / Г. И. Марчук. – М.: Наука, 1982. – 316 с.
3. Заказнов, В. Ф. Методы ликвидации проливов жидкого аммиака [Текст] / В. Ф. Заказнов, Л. А. Куршева // Исследования и разработки по созданию магистральных аммиакопроводов и складов жидкого аммиака: Тр. ГИАП. – М., 1985. – С. 68-77.
4. Самарский, А. А. Теория разностных схем [Текст] / А. А. Самарский. – М.: Наука, 1983. – 616 с.
5. Мацак, В. Г. Гигиеническое значение скорости испарения и давления пара токсических веществ, применяемых в производстве [Текст] / В. Г. Мацак, Л. К. Хоцянов. – М.: Медгиз, 1959. – 231 с.

Поступила в редколлегию 18.03.2009.
Принята к печати 02.04.2009.