

И. В. Юлкин, А. А. Салин, А. Д. Галеев,
С. И. Поникаров

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ИСПАРЕНИЯ С ПОВЕРХНОСТИ АВАРИЙНЫХ ПРОЛИВОВ БИНАРНЫХ РАСТВОРОВ

Ключевые слова: бинарный раствор, интенсивность испарения, аварийный пролив, численное моделирование.

Выполнен сравнительный анализ различных моделей испарения бинарных растворов. Проведено сопоставление результатов моделирования с экспериментальными данными.

Keywords: binary solution, evaporation rate, emergency pool, numerical modeling.

A comparative analysis of different mathematical models of evaporation from the surface of binary solution pool is performed. The comparison of the modeling results with experimental data is conducted.

Прогнозирование последствий возможных аварий требует использования надежных математических моделей, описывающих как поступление токсичных и взрывоопасных веществ, так и их распространение в атмосфере. Известные методики расчета интенсивности испарения с поверхности аварийных проливов весьма разноречивы и предназначены только для установившихся процессов испарения опасных веществ. При расчете последствий проливов многокомпонентных смесей и растворов необходимо также учитывать изменение состава пролива при испарении. Для многокомпонентных жидкостей потеря массы при испарении многокомпонентной жидкости не находится в прямо пропорциональной зависимости от времени из-за различной летучести компонентов.

В зарубежной практике расчет испарения с поверхности пролива базируется на использовании полуэмпирического соотношения [1].

$$\frac{dm_i}{dt} = - \frac{k \cdot M_i \cdot P_{g,s} (T_{liq}, \dot{O}_i)}{R_0 \cdot T_{liq}} \cdot K_{stef} \quad (1)$$

где t – время; k – коэффициент массоотдачи, м/с;
 m_i – масса испаряющегося компонента, отнесенная к единице поверхности жидкости, кг/м
 M – молекулярная масса i -го компонента, кг/моль;
 $P_{g,s}$ – давление насыщенных паров при начальной температуре;
 T_l – температура жидкой фазы, К;
 X_i – массовая доля испаряющегося компонента в жидкой фазе, кг/кг
 K_{stef} – коэффициент, учитывающий стефановский поток;
 R_0 – газовая постоянная;
Коэффициент массоотдачи k принимаем:

$$k = 0,0048 \cdot U_{10}^{0,78} \cdot D^{-0,11} \cdot S^{-0,11},$$

U_{10} – скорость ветра на высоте 10 м, м/с;

D – диаметр пролива, м;

В отечественных методиках [2, 3] для расчета интенсивности испарения используется выражение:

$$\frac{dm_i}{dt} = 10^{-6} \cdot (5,83 + 4,1 \cdot U_{10}) \cdot \sqrt{M_i} \cdot P_{g,s} (X_{li} \cdot T_{li}) \quad (2)$$

В работах [5, 6] массовый расход от поверхности пролива определялся с помощью стандартных функций с учетом поправки на стефановский поток.

$$J_{g,s} = K_{stef} \frac{(Y_{g,s} - Y_{g,p}) \rho C_{\mu}^{0,25} k_p^{0,5}}{Y^+} \quad (3)$$

$$Y^+ = \begin{cases} Sc \cdot y^+ & (y^+ < y_c^+) \\ Sc_i (u^+ + P_Y) & (y^+ > y_c^+) \end{cases} \quad (4)$$

$$y^+ = \frac{\rho C_{\mu}^{0,25} k_p^{0,5} y_p}{\mu} \quad (5)$$

$$u^+ = \frac{1}{\kappa} \ln(E y^+) - \Delta B \quad (6)$$

$$P_Y = 9,24 \left[\left(\frac{Sc}{Sc_i} \right)^{3/4} - 1 \right] \left[1 + 0,28 \exp(-0,007 Sc / Sc_i) \right] \quad (8)$$

$$K = \frac{\ln((1 - Y_{g,p}) / (1 - Y_{g,s}))}{Y_{g,s} - Y_{g,p}} \quad (9)$$

E – константа в логарифмическом законе стенки для скорости, равная 9,1; $J_{g,s}$ – массовый поток компонента с поверхности аварийного пролива, кг/(м²·с); k_p – турбулентная кинетическая энергия в пристеночном узле, м²/с²; P_Y – функция, учитывающая сопротивление массопереносу ламинарного подслоя; q – тепловой поток, Вт/м²; Sc и Sc_i – молекулярное и турбулентное числа Шмидта соответственно; Y – массовая доля компонента в газовой фазе, кг/кг; y_c^+ – безразмерная толщина диффузионного подслоя; y_p – расстояние по нормали от поверхности испарения (стенки) до соседнего узла расчетной сетки, м.

Интенсивность поступления паров $J_{g,s}$, определяемая из уравнений (3) – (9), использовалась в качестве граничного условия в области источника в задаче распространения примеси в атмосфере,

включающей численное решение полной системы трехмерных нестационарных уравнений Рейнольдса, переноса массы и энергии, замыкаемых Realizable $k-\epsilon$ моделью турбулентности

Для проверки корректности определения интенсивности испарения с поверхности пролива по представленным выше моделям, получены экспериментальные по испарению аммиачной воды на открытой площадке. В металлический поддон размерами 0.6 м × 0.4 м × 0.035 м, установленный на весах, наливался водный раствор аммиака (25% масс), после чего начинался отсчет времени и регистрация значений массы и температуры раствора. Эксперименты проводились при температуре воздуха 291 К и средней скорости ветра 2 м/с на высоте 2 м. Количество аммиачной воды, испарившейся за 30 минут, оставалось неизменным от одного эксперимента к другому.

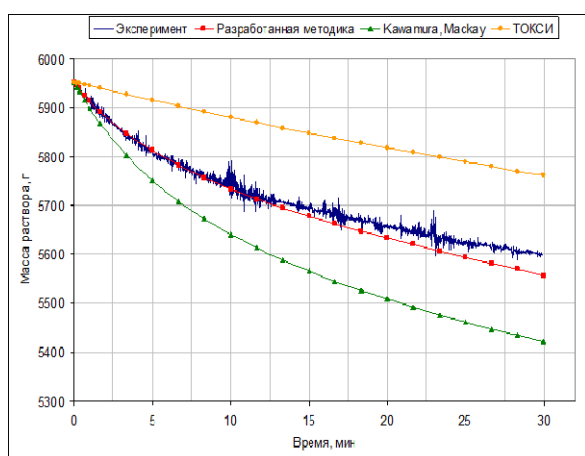


Рис. 1 - Динамика снижения массы водного раствора аммиака в процессе проведения натурального эксперимента и его моделирования

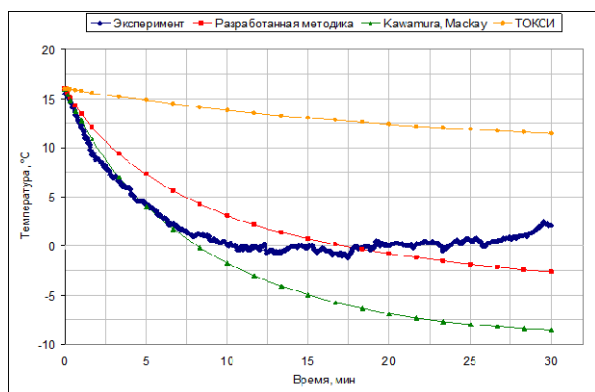


Рис. 2 - Динамика охлаждения водного раствора аммиака в процессе проведения натурального эксперимента и его моделирования

На рисунках (1-2) представлены опытные данные по изменению массы и температуры жидкости в сравнении с расчетными результатами, полученными на основе различных подходов к определению диффузионного потока с поверхности пролива

Дифференциальные уравнения (1) и (2) решались методом Рунге-Кутты в программном комплексе MathCad, причем парциальное давление компонентов задавалось в виде функции, зависящей от концентрации и температуры раствора. При моделировании натурального эксперимента с использованием разработанной методики расчет интенсивности испарения проводился методом контрольного объема с помощью пакета гидродинамического анализа.

Изменение температуры жидкости определялось из уравнения теплового баланса:

$$\frac{\partial T_{liq}}{\partial t} = \frac{q_a + q_{grd} - J_{g,s} \cdot \Delta H_g}{C_{p,liq} \cdot (m_i + m_{aq})}, \quad (10)$$

где m_{aq} – масса воды в растворе, отнесенная к единице поверхности пролива, кг/м².

При расчете по разработанной модели, тепловой поток из атмосферы q_a вычислялся с помощью пристеночных функций:

$$q_a = \frac{(T_{liq} - T_p) C_p \rho u_*}{T^+}; \quad (11)$$

$$T^+ = \begin{cases} Pr \cdot y^+ & \text{if } y^+ < y_T^+ \\ Pr_t(u^+ + P_T) & \text{if } y^+ > y_T^+ \end{cases}; \quad (12)$$

$$P_T = 9.24 \left[\left(\frac{Pr}{Pr_t} \right)^{3/4} - 1 \right] \left[1 + 0.28 \exp(-0.007 Pr / Pr_t) \right] \quad (13)$$

где Pr и Pr_t – молекулярное и турбулентное числа Прандтля соответственно;

P_T – функция, учитывающая сопротивление теплопереносу ламинарного подслоя; y_T^+ – безразмерная толщина теплового подслоя.

При расчете интенсивности испарения с помощью уравнений (1) и (2), коэффициент теплоотдачи от атмосферы h определялся из известного критериального уравнения (7):

$$Nu = \frac{h \cdot D}{\lambda} = 0.0366 Re^{4/5} Pr^{1/3}, \quad (14)$$

где Nu – число Нуссельта; Re – число Рейнольдса; λ – коэффициент молекулярной теплопроводности, Вт/(м·К).

Расчетные значения количества испарившегося вещества, полученные с помощью пристеночных функций, лучше согласуются с экспериментальными данными по сравнению с соотношениями (1) и (2). Различие экспериментальных значений температуры и результатов численного моделирования (рисунок 2) может объясняться переменной облачностью в ходе эксперимента, тогда как при численном моделировании тепловой поток от солнца задавался постоянным (303,6 Вт/м²) [1].

Литература

1. Kawamura, P. I., Mackay, D., 1987. The evaporation of volatile liquids. Journal of Hazardous Materials 15, 343-364.

2. РД-03-26-2007. Методические указания по оценке последствий аварийных выбросов опасных веществ / Сер. 27. – Вып. 6 / Кол. авт. – М.: НТЦ «Промышленная безопасность», 2008.
3. Методика оценки последствий химических аварий (Методика «Токси-2.2»): сб. док-тов // Методики оценки последствий аварий на опасных производственных объектах. Сер. 27. Вып. 2 / Кол. авт. – 3-е изд., испр. и доп. – М.: ГУП НТЦ «Промышленная безопасность», 2006. – 208 с.
4. Mackay, D. Evaporation rates of liquid hydrocarbon spills on land and water / D.Mackay, R.S. Matsugu // Canadian Journal of Chemical Engineering. – 1973. – Vol. 51 (4). – P.434-439.
5. Старовойтова Е.В., Галеев А.Д., Поникаров С.И. Моделирование парообразования с поверхности аварийного пролива сжиженного газа. Вестник Казанского технологического университета, 2012, №4, с. 110-112.
6. Салин А.А., Галеев А.Д., Поникаров С.И. Сравнение результатов численного моделирования испарения водного раствора аммиака с экспериментальными данными. Вестник Казанского технологического университета, 2012, №12, с. 225-227
7. TNO Yellow Book. Methods for the calculation of physical effects due to releases of hazardous materials (liquids and gases). — Committee for the Prevention of Disasters, CRP 14E, The Hague, The Netherlands, 1997. – p.870.

© **И. В. Юлкин** – магистрант каф. машин и аппаратов химических производств КНИТУ, igoryulkin@mail.ru **А. А. Салин** – асп. той же кафедры; **А. Д. Галеев** – канд. техн. наук, доц. той же кафедры, galeev_ainur@mail.ru; **С. И. Поникаров** – д-р техн. наук, проф., зав. каф. машин и аппаратов химических производств КНИТУ, mahp_kstu@mail.ru.