

УДК 614.8

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

ОСНОВНЫЕ ПОДХОДЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ИСПАРЕНИЯ С ПОВЕРХНОСТИ АВАРИЙНОГО ПРОЛИВА

Ключевые слова: аварийный пролив, испарение, численное моделирование, взрывоопасное облако.

Рассмотрены модели для расчета интенсивности испарения с поверхности аварийного пролива. Разработка модели нестационарного испарения многокомпонентного пролива представляет собой актуальную задачу.

Keywords: emergency pool, evaporation, numerical simulation, explosive cloud.

The models for calculating the evaporation rate from the surface of the emergency pool are considered. The development of a multi-component model of pool unsteady evaporation of great interest.

Моделирование и оценка гипотетических сценариев аварий - ценный инструмент для развития и реализации соответствующих защитных мероприятий и планов локализации и ликвидации аварийных ситуаций. Это требует использования надежных математических моделей, описывающих как поступление токсичных и взрывоопасных веществ, так и их распространение в атмосфере. Для нефтехимических производств одним из наиболее вероятных и опасных вариантов развития аварийных ситуаций, связанных с разгерметизацией оборудования, является горячий пролив легковоспламеняющихся жидкостей (ЛВЖ) и токсичных веществ (ТВ) на подстилающую поверхность с последующими их нестационарным испарением и формированием взрывоопасного или токсичного облака.

Известные методики расчета массы токсичного или взрывоопасного облака, определяющей силу взрывного или токсичного воздействия, весьма разноречивы и предназначены только для установившихся процессов испарения опасных веществ. Комплексная модель для описания неблагоприятного события (аварии) может быть грубо разделена на три части: моделирование источника, моделирование распространения и моделирование воздействия на людей. Многие исследователи [1,2,3,4] уделяли внимание моделированию дисперсии облака газа или пара, при этом параметры источника заранее известны и не меняются со временем. Однако, есть недостаток точных моделей, описывающих источник облака пара, который оказывает влияние на предсказанную опасную зону. При аварийных проливах стабильных жидкостей поступление опасного вещества в окружающую среду связано с процессом испарения с поверхности пролива. Модели для определения массового потока с поверхности аварийного пролива при испарении делятся на две категории: упрощенные алгебраические формулы и подход вычислительной гидродинамики. Прямое численное моделирование испарения с использованием многофазной модели, такой как VOF модель [13],

требует значительных вычислительных ресурсов из-за разномаштабности задач. Для моделирования поверхностных волн и конвективных структур в слое жидкости размеры вычислительной сетки должны быть порядка нескольких миллиметров, тогда как для расчета последующего распространения газа необходима расчетная область с размерами порядка нескольких километров.

В зарубежной практике расчет испарения с поверхности пролива базируется на использовании полуэмпирического соотношения [5].

$$\frac{dm_i}{dt} = - \frac{k \cdot M \cdot P_{g,s} \cdot (T_l)}{(R_0 \cdot T_l)} \quad (1)$$

где t – время; k – коэффициент массоотдачи, м/с; M – молекулярная масса i -го компонента, кг/моль; T_l – температура жидкой фазы, К; R_0 – газовая постоянная; $P_{g,s}$ – давление насыщенных паров при начальной температуре.

Коэффициент массоотдачи k принимаем:

$$k = 0,0048 \cdot U_{10}^{0.78} \cdot D^{-0.11} \cdot S^{-0.11}$$

$U_{10}^{0.78}$ – скорость ветра на высоте 10м, м/с;

$D^{-0.11}$ – диаметр пролива, м;

В модели [6] расчет массового потока от поверхности пролива в турбулентный пограничный слой осуществляется на основе корреляций Рейнольдса и Шмидта.

В отечественных методиках [7, 8] для расчета интенсивности испарения используется выражение:

$$J_{g,s} = 10^{-6} (5,83 + 4,1 \cdot U) \cdot P_{g,s} \cdot \sqrt{M} \quad (2)$$

где $J_{g,s}$ — интенсивность испарения жидкости, кг/(м²с); M — молекулярный вес вещества, кг/моль; U — скорость движения воздуха, м/с; $P_{g,s}$ — давление насыщенных паров при начальной температуре, мм.рт.ст;

Приведенные эмпирические зависимости не учитывают влияние на процесс испарения следующих факторов и явлений:

- нестационарность поступления вещества из пролива вследствие изменения температуры и состава жидкой фазы;

- изменение движущей силы процесса испарения, связанное с нестационарностью поступления вещества или аккумулярованием испаряющегося компонента над проливом;

- изменение турбулентной структуры потока над зеркалом разлива в случае, когда испаряющийся компонент имеет молекулярную массу M_g , отличающуюся от молекулярной массы окружающего воздуха M_a . При $M_g < M_a$ в некоторый момент времени может возникнуть плотностная конвекция, ускоряющая процесс испарения [9,10], а при $M_g > M_a$ может наблюдаться явление устойчивой стратификации, сопровождающееся подавлением турбулентности и снижением скорости потока паровоздушной смеси над зеркалом разлива [11];

- степень устойчивости атмосферы (распределение температуры воздуха по высоте);

- локальные особенности местонахождения пролива, связанные с наличием застройки, сооружений, перепада высот подстилающей поверхности.

Аналитическая модель испарения, разработанная в FFI, представлена в [12]. Эта модель была реализована в пакете FLUENT. Модель учитывает только тепловые эффекты. При этом предполагается, что пар, образующийся в результате процесса испарения, является нейтральным, то есть не влияет на окружающий поток воздуха. Как уже упоминалось выше, предположение о пассивном поведении примеси, может быть несправедливо, если гравитационные эффекты (например, естественная конвекция) становятся значительными. Использование вычислительной гидродинамики и пристеночных функций для описания процесса испарения позволяет решить проблему учета сложной взаимосвязи распространения пара с испарением пролива. В работах [13, 14] массовый расход от поверхности пролива определялся с помощью стандартных функций с учетом поправки на стефановский поток. Для дискретизации дифференциальных уравнений был использован метод контрольного объема, реализованный в программном комплексе FLUENT. Для учета изменения температуры жидкости при испарении с помощью пользовательских функций введено уравнение теплового баланса для пролива.

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. Фингас [15,16] определил эмпирически, что большинство типов

сырой нефти и нефтепродуктов испаряются в логарифмической зависимости от времени, и представил простую модель для прогнозирования доли потери веса при различных температурах. Однако, данные модели не обладают достаточной универсальностью, потому что они получены для ограниченных условий. В работе [17] также представлена эмпирическая модель испарения многокомпонентной смеси с плоской поверхностью. Согласно данной модели, количество образующегося пара выражается логарифмом времени, при этом результаты получены при условии неподвижности воздуха над поверхностью испарения. В настоящее время мало моделей, позволяющих учитывать, как изменение состава жидкости, так и взаимодействие между процессами распространения газа и испарения пролива. В связи с этим, разработка модели нестационарного испарения многокомпонентного пролива представляет большой интерес.

Литература

1. B. Blocken, T. Stathopoulos, P. Saathoff, X. Wang, Numerical evaluation of pollutant dispersion in the built environment: Comparisons between models and experiments, *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.* 96 (2008) 1817-1831.
2. J. M. Santos, N. C. Reis Jr., E. V. Goulart, I. Mavroidis, Numerical simulation of flow and dispersion around an isolated cubical building: The effect of the atmospheric stratification, *Atmos. Environ.* 43 (2009) 5484-5492.
3. B. Zhang, G. Chen. Quantitative risk analysis of toxic gas release caused poisoning—A CFD and dose-response model combined approach. *Process Saf. Environ. Prot.* 88 (2010) 253-262.
4. E. Papanikolaou, M. Heitsch, D. Baraldi Validation of a numerical code for the simulation of a short-term CO₂ release in an open environment: Effect of wind conditions and obstacles. *J. Hazard. Mater.* 190 (2011) 268-275.
5. Kawamura, P. I., Mackay, D., 1987. The evaporation of volatile liquids. *Journal of Hazardous Materials* 15, 343-364.
6. T. Kapias, R. F. Griffiths. Modelling the behaviour of spillages of sulfur trioxide and oleum. Health and Safety Executive, Contract Research Report 217/1999
7. РД-03-26—2007. Методические указания по оценке последствий аварийных выбросов опасных веществ / Сер. 27. — Вып. 6 / Кол. авт. — М.: НТИЦ «Промышленная безопасность», 2008.
8. Методика оценки последствий химических аварий (Методика «Токсик-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 НТИЦ «Промышленная безопасность», 2006. — 208 с.
9. Dil'man, V. V., Lotkhov, V. A., Kulov, N. N., & Naidenov, V. I. (2000). Evaporation dynamics. *Theor. Found. Chem. Eng.*, 34, 201-210.
10. G.D. McBain, H. Suehrcke, J.A. Harris, Evaporation from an open cylinder, *Int. J. Heat Mass Transf.* 43 (2000) 2117-2128.
11. Desoutter, G., Habchi, C., Cuenot, B., & Poinot, T. (2009). DNS and modeling of the turbulent boundary layer over an evaporating liquid film. *Int. J. Heat and Mass Transfer*, 52, 6028-6041.

12. T. Vik, B.A. Pettersson Reif. Implementation of a new and improved evaporation model in Fluent. FFI-rapport 2011/00116, Norwegian Defence Research Establishment (FFI), 2011.
13. 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.
14. 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.
15. M.F. Fingas, Studies on the evaporation of crude oil and petroleum products: I. The relationship between evaporation rate and time, J. Hazard. Mater. 56 (1997) 227-236.
16. M.F. Fingas, Studies on the evaporation of crude oil and petroleum products: II. Boundary layer regulation, J. Hazard. Mater. 57 (1998) 41-58.
17. K. Okamoto, M. Hiramatsu, H. Miyamoto, T. Hino, M. Honma, N. Watanabe, Y. Hagimoto, K. Miwa, H. Ohtahi, Evaporation and diffusion behavior of fuel mixtures of gasoline and kerosene, Fire Saf. J. 49 (2012) 47-61.

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