

К. М. Кузнецов, А. Д. Галеев, С. И. Поникаров

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ВОДЯНОЙ ЗАВЕСЫ И ОБЛАКА ТОКСИЧНОГО ТЯЖЕЛОГО ГАЗА В УСЛОВИЯХ ОТКРЫТОЙ ПЛОЩАДКИ

Ключевые слова: водяная завеса, аварийный выброс хлора, численное моделирование, ограничение распространения токсичного выброса хлора.

Приведены результаты численного моделирования эксперимента на открытой площадке водяной завесы для ограничения распространения токсичного выброса хлора

Keywords: water curtain, an accidental release of chlorine, numerical simulation, limiting the spread of toxic chlorine release.

The results of numerical simulation of the experiment on the open ground water curtain to limit the spread of toxic chlorine release.

В настоящее время в связи с принятием новых нормативно-правовых актов в области промышленной безопасности пристальное внимание уделяется инженерным средствам по локализации и ликвидации возможных аварий на опасных производственных объектах, в том числе и водяным завесам для ограничения распространения токсичных выбросов [1]. Применение водяных завес при ограничении распространения токсичных облаков может позволить существенно уменьшить ущерб от возможных аварий и уменьшить число пострадавших и погибших от воздействия поражающих факторов [2, 3].

Одним из наиболее опасных сценариев аварии на предприятиях химической и нефтехимической промышленности является выброс токсичного вещества. Неблагоприятные последствия такого сценария аварии определяются, в основном, по расчетной величине концентрации опасного вещества в воздухе, а наиболее часто применяемым средством при ограничении выброса токсичного вещества является водяная завеса [1,4].

Из-за отсутствия рекомендательных документов по проектированию и применению эффективных водяных завес, главным образом, вследствие недостаточной изученности сложного взаимодействия завесы и распространяющегося паровоздушного облака, при реализации на практике задач по проектированию на предприятиях химической и нефтехимической промышленности водяных завес проектировщики сталкиваются с рядом проблем по оценки их эффективности.

Для решения поставленной задачи авторами были проанализированы публикации зарубежных исследователей [5, 6], в которых описаны поставленные эксперименты и предложены модели по оценке эффективности водяных завес. Но эти исследования имеют либо характерную специфику, как в работе [6] (исследование на примере СПГ), либо используют упрощенные балансовые соотношения [5]. В связи с этим, авторы статьи полагают, что для объективного решения поставленной задачи целесообразно использовать современные методы вычислительной гидродинамики.

Защитное действие водяной завесы включает комбинацию следующих механизмов [7]:

- разбавление парогазовой смеси воздухом, захватываемым водяными струями;
- тепловой эффект вследствие испарения капель воды;
- абсорбция опасного вещества каплями воды.

Предлагаемая авторами модель взаимодействия водяной завесы и токсичного облака состоит из двух частей:

- система уравнений несущей фазы (распространение газа в воздухе);
- система уравнений дисперсной фазы (водяная завеса).

Первая часть подробно описана в [8] и ввиду большого объема информации в настоящей статье не представлена.

При построении модели дисперсной фазы в атмосфере были сделаны следующие допущения:

- капли имеют сферическую форму;
- влиянием турбулентных пульсаций на рассеяние выброса пренебрегаем;
- при попадании капли на твердую поверхность происходит ее удаление;
- взаимодействие капель между собой не учитывается.

Для описания движения капель водяной завесы (дисперсной фазы) используется Эйлерово-Лагранжев подход. При данном подходе для несущей фазы решаются осредненные по Рейнольдсу уравнения Навье-Стокса. При этом вся дисперсная фаза разбивается на большое число групп капель, в пределах каждой из которых параметры всех физических капель считаются одинаковыми, и, следовательно, эволюция каждой группы может быть прослежена путем расчета движения лишь одной представительной капли [9].

Прогнозирование траектории движения капель осуществляется интегрированием уравнения баланса сил, которое записано в Лагранжевой системе координат.

Для определения движения капель использовалось уравнение [9]:

$$\frac{du_p}{dt} = F_D(u_1 - u_p) + \frac{g_1(\rho_p - \rho)}{\rho_p}, \quad (1)$$

где u_p — проекция скорости движения капли на ось x , м/с; u_l — проекция вектора скорости несущей фазы на ось x , м/с; ρ_p — плотность капли, кг/м³; ρ — плотность несущей фазы, кг/м³; dt — шаг по времени; $F_D(u_l - u_p)$ — удельная сила сопротивления на движению капли, Н/кг [9]:

$$F_D = \frac{18\mu}{\rho_p d_p^2} \frac{C_D Re_d}{24}, \quad (2)$$

где μ — коэффициент динамической молекулярной вязкости несущей фазы, кг/(м·с); Re_d — число Рейнольдса; d_p — диаметр капли, м; C_D — коэффициент сопротивления для частиц сферической формы определяется из соотношения [9]:

$$C_D = \begin{cases} \frac{24}{Re_d} \left(1 + \frac{Re_d^{2/3}}{6}\right), & Re_d < 1000 \\ 0,424, & Re_d \geq 1000 \end{cases} \quad (1)$$

Число Рейнольдса Re_d определено как:

$$Re_d = \frac{\rho d_p |u_p - u_l|}{\mu}, \quad (4)$$

Скорость капли, вычисленная интегрированием уравнения (1), используется для определения ее траектории:

$$\frac{dx}{dt} = u_p, \quad (5)$$

Уравнения, подобные (1), решены для каждого направления координат.

Уравнение, определяющее интенсивность испарения (конденсации) компонентов капель, имеет вид [9]:

$$\frac{dm_{p,i}}{dt} = -N_i \cdot A_p \cdot M_i, \quad (6)$$

где $m_{p,i}$ — масса компонента капли, кг; N_i — молярный поток компонента пара, моль/м²·с; A_p — площадь поверхности капли, м²; M_i — молекулярная масса компонента капли, кг/моль.

Молярный поток компонента пара от поверхности капли равен [9]:

$$N_i = \beta(C_{i,s} - C_{i,\infty}). \quad (2)$$

где β — коэффициент массоотдачи, м/с; $C_{i,s}$ — концентрация компонента у поверхности капли, моль/м³; $C_{i,\infty}$ — концентрация компонента в окружающем газе, моль/м³.

Коэффициент массоотдачи β рассчитывается из соотношения:

$$\beta = \frac{Sh \cdot D_{m,i}}{d_p}, \quad Sh = 2,0 + 0,6 Re_d^{1/2} Sc^{1/3}, \quad (3)$$

где $D_{m,i}$ — коэффициент молекулярной диффузии компонента в смеси, м²/с; Sc — молекулярное число Шмидта: $Sc = \mu/(\rho \cdot D_m)$.

Изменение температуры капли определяется уравнением [9]:

$$m_p C_{p,p} \frac{dT_p}{dt} = \alpha_s A_p (T_\infty - T_p) + \sum_{i=1}^N \frac{dm_{p,i}}{dt} \cdot \Delta H_{g,i} \quad (4)$$

где $C_{p,p}$ — теплоемкость капли, Дж/(кг·К); α_s — коэффициент конвективной теплопередачи, Вт/(м²·К); T_∞ — локальная температура несущей фазы, К.

Коэффициент конвективной теплоотдачи α_s определяется из корреляции Нуссельта [9]:

$$Nu = \frac{\alpha_s \cdot d_p}{\lambda} = 2,0 + 0,6 Re_d^{1/2} Pr^{1/3}. \quad (5)$$

Обратное влияние дисперсной фазы на несущий поток, обусловленное межфазным обменом теплотой, импульсом и массой, учитывается включением соответствующих источников членов в уравнения переноса энергии, импульса, примеси и в уравнение неразрывности для сплошной фазы [9].

Изменение импульса несущего потока F , Н/м³, обусловленное гидродинамическим сопротивлением капель, рассчитывается из следующего соотношения [9]:

$$F = \frac{1}{V} \sum_{j=1}^N \left(\frac{18\mu C_D Re_d}{\rho_p d_{pj}^2} 24 (u_p - u_l) \right) m_j \Delta t. \quad (6)$$

где N — число частиц-представителей, прошедших через контрольный объем V ; m_j — текущий массовый расход частиц данной фракции через грань контрольного объема, кг/с.

Источник массы S , кг/(м³·с) в уравнении неразрывности и уравнении переноса примеси, возникающий в результате испарения капель, определяется через соотношение [9]:

$$S = -\frac{1}{V} \sum_{j=1}^N \frac{\Delta m_j}{m_{0j}} m_{0j}. \quad (12)$$

Сток энергии в газовой фазе Q , Дж/(м³·с), обусловленной теплообменом с каплями, рассчитывается следующим образом [9]:

$$Q = -\frac{1}{V} \sum_{i=1}^N \frac{\Delta m_i}{m_{0i}} (-\Delta H_g + C_{p,p} \Delta T_i) m_{0i} \quad (7)$$

где Δm_i — изменение массы i -й капли в процессе испарения за время прохождения ею данного контрольного объема, кг; m_{0i} — начальная масса капли-представителя, кг; ΔT_{pi} — изменение температуры частицы в данном контрольном объеме V ; m_{0j} — начальный массовый расход частиц данной фракции через грань контрольного объема, кг/с.

Для проверки адекватности предложенной модели были использованы данные представленные в работе [10].

Эксперимент, описанный в работе [10], был проведен открытой площадке испытательного полигона "Camp des Garrigues" (France). Основные исходные данные, при которых был проведен эксперимент приведены ниже в табл.1.

Численное моделирование проведено как для свободного выброса хлора (без включения водяной завесы), так и для выброса хлора при включенной водяной завесе. Основные результаты расчета представлены на рис. 2-3.

Водяная завеса, главным образом, действует на выброс хлора путем захвата воздуха водяными струями и разбавления газа. Этот механизм является доминирующим при разбавлении нерастворимого в воде газа. Ввиду низкой растворимости хлора в воде (0,7 г/100 г при 20 °С)

[11] абсорбция хлора не учитывалась. Действие водяной завесы приводит к снижению концентрации токсичного газа на рассматриваемом расстоянии более чем в 5 раз.

Таблица 1 - Основные исходные данные, при которых был проведен эксперимент и результаты эксперимента [10]

Параметр	Значение	Размерность
Основные исходные данные		
Число насадок	25	шт.
Шаг между насадками водяной завесы	0,2	м
Высота постановки завесы	2	м
Длина завесы	5	м
Угол распыления	90	град.
Давление воды перед насадкой водяной завесы	500	кПа
Расход выброса	6,6	кг/мин
Продолжительность выброса	8	мин
Время свободного выброса	3,5	мин
Время работы водяной завесы	3,5	мин
Скорость ветра	2,1	м/с
Температура воздуха	307,4-308,5	К

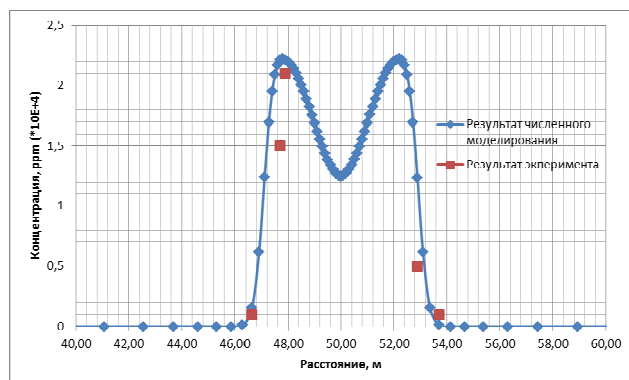


Рис. 2 – Распределение концентрации в поперечном направлении по направлению ветра на расстоянии 7,5 метра от источника выброса (без завесы [10])

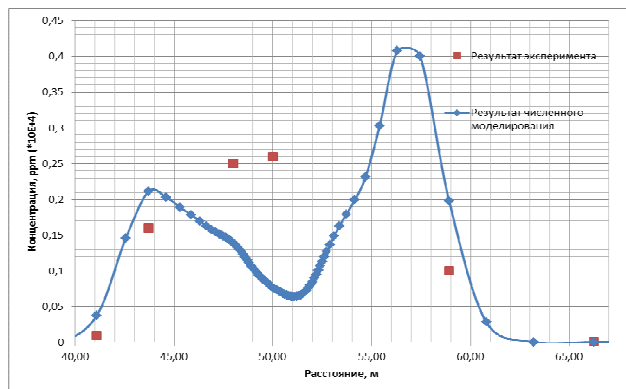


Рис. 3 – Распределение концентрации в поперечном направлении по направлению ветра на расстоянии 7,5 метра от источника выброса (с включенной завесой [10])

Как видно из рисунков 2 и 3 расчетные результаты, полученные путем численного моделирования, удовлетворительно согласуются с данными, полученными в работе [10].

Таким образом, численное моделирование позволяет определять оптимальные параметры и условия эффективного применения водяных завес для ограничения или предотвращения распространения токсичных облаков не только в условиях лабораторных экспериментов, как, например в [12], но и при экспериментах на открытой местности при различных видах аварийного выброса. Применение предложенной математической модели при проектировании водяных завес на опасных производственных объектах позволит не только сэкономить на проведении дорогостоящих экспериментов, но и быть уверенным в том, что подобранная конфигурация завесы будет наилучшим вариантом в условиях конкретного производства.

Литература

1. Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности "Правила безопасности производств хлора и хлорсодержащих сред" (утв. приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 20 ноября 2013 г. N 554)
2. Шильникова Н.В. Использование нестандартной абсорбционной колонны при аварийных выбросах хлора в водоподготовке. / Шильникова Н.В., Чепегин И.В. // Вестн. Казан. технол. ун.-та. – 2012. –№.7. - С.158-162.
3. Насыбуллин Р.Р. Методы и средства ограничения опасных веществ при аварийных выбросах и проливах. / Насыбуллин Р.Р., Галеев А.Д., Поникаров С.И. // Вестн. Казан. технол. ун.-та. – 2013. –№.4. - С.221-213.
4. Правила безопасности для наземных складов жидкого аммиака (утв. постановлением Госгортехнадзора РФ от 5 июня 2003 г. N 62)
5. Emilio Palazzi , Fabio Currò& Bruno Fabiano. MATHEMATICAL MODELING OF FLUID SPRAY CURTAINS FOR MITIGATION OF ACCIDENTAL RELEASES, Chemical Engineering Communications, № 194:4, p.446-463.
6. Byung Kyu Kim, Dedy Ng, Ray A. Mentzer, M. Sam Mannan. Key Parametric Analysis on Designing an Effective Forced Mitigation System for LNG Spill

- Emergency. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, № XXX, 2013, p. 1-9.
7. G. Dusserre, A. Dandrieux, and O.Thomas, TheDVS model: A new concept for heavy gas dispersionby water curtain, Environ Model Software 18, 2003, p. 253–259.
8. А.Д. Галеев. «Моделирование аварийного пролива бинарного раствора с использованием программы FLUENT». / А.Д. Галеев, С.И. Поникаров, А.А. Салин // Математическое моделирование.– 2011.–№ 23:7. - С.129–144.
9. Fluent Inc. Fluent 6.1 // User’s Guide. – Lebanon, 2003.
10. THESE présentée devantL’ECOLE DOCTORALE DE SAINT-ETIENNE par Karin HALD «Dispersion Forcée de Nuages de Gaz Lourds par Rideau d’Eau-Approches Expérimentales et Numériques» (Soutenue le 11 juillet 2005 devant la commission d’examen)
11. Н.В. Лазарев, Вредные вещества в промышленности. Справочник. Том 3. Химия, Л., 1977. 594 с.
12. Кузнецов К.М. Численное моделирование завесы для ограничения распространения токсичного выброса. / Кузнецов К.М., Галеев А.Д., Поникаров С.И. // Вестн. Казан. технол. ун.-та. – 2013. –№.20. - С.303-305.

© **К. М. Кузнецов** - асп. каф. машин и аппаратов химических производств КНИТУ, kuznetsovkm@yandex.ru; **А. Д. Галеев** – канд. техн. наук. доц. той же кафедры; **С. И. Поникаров** – д-р техн. наук. проф., зав. каф. машин и аппаратов химических производств КНИТУ.