

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

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОДЯНОЙ ЗАВЕСЫ ДЛЯ ОГРАНИЧЕНИЯ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ТОКСИЧНОГО ВЫБРОСА

Ключевые слова: водяная завеса, аварийный выброс, численное моделирование.

Приведены результаты численного моделирования водяной завесы для ограничения распространения токсичного выброса.

Keywords: water curtain, accidental release, numerical simulation.

The results of numerical modeling of the water curtain to limit the spread of toxic emissions.

За причинение вреда жизни или здоровью граждан в результате аварии или инцидента на опасном производственном объекте Федеральный закон №116-ФЗ [1] статьей 17.1 устанавливает сумму выплат в размере 2 000 000 рублей при возмещении вреда, понесенного в случае смерти потерпевшего (кормильца) в результате возможной аварии. Применение инженерных средств защиты при ограничении распространения токсичных облаков может позволить существенно снизить количество погибших, и, как следствие, сумму выплат в результате аварии или инцидента на опасном производственном объекте [2] [3].

Одним из наиболее распространенных и часто анализируемых событий (сценариев аварий) на предприятиях химической и нефтехимической промышленности является выброс токсичного вещества (хлор, аммиак и т.п.). Негативные последствия такого события определяются, в основном, по расчетной величине концентрации опасного вещества в воздухе, а наиболее часто применяемым средством при ограничении выброса токсичного вещества является водяная завеса.

Однако в настоящее время в нашей стране и за рубежом отсутствуют нормативные и рекомендательные документы по проектированию и применению эффективных водяных завес, главным образом, вследствие недостаточной изученности сложного взаимодействия завесы и распространяющегося паровоздушного облака.

Для решения поставленной задачи авторами были проанализированы публикации зарубежных исследователей [4,5], в которых описаны поставленные эксперименты и предложены модели по оценке эффективности водяных завес. Но эти исследования имеют либо характерную специфику, как в работе [5] (исследование на примере СПГ), либо используют упрощенные балансовые соотношения [4]. 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 [6]:

- 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 [7] 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 [8].

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

Для определения движения капель использовалось уравнение [8]:

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

где u_p — проекция скорости движения капли на ось x , м/с; u_1 — 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; $F_D(u_1 - u_p)$ — удельная сила сопротивления на движению капли, Н/кг [8];

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

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 [8]:

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

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 [8]:

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

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 [8]:

$$N_i = \beta(C_{i,s} - C_{i,\infty}). \quad (7)$$

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:

$$\beta = \frac{Sh \cdot D_{m,i}}{d_p}, \quad Sh = 2,0 + 0,6 Re_d^{1/2} Sc^{1/3}, \quad (8)$$

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 [8]:

$$m_p C_{p,p} \frac{dT_p}{dt} = \alpha_s A_p (T_\infty - T_p) + \sum_{i=1}^N \frac{dm_{p,i}}{dt} \cdot \Delta H_{g,i} \quad (9)$$

$C_{p,p}$ — 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 [8]:

$$Nu = \frac{\alpha_s \cdot d_p}{\lambda} = 2,0 + 0,6 Re_d^{1/2} Pr^{1/3}. \quad (10)$$

Обратное влияние дисперсной фазы на несущий поток, обусловленное межфазным обменом теплотой, импульсом и массой, учитывается вклю-

чением соответствующих источников членов в уравнения переноса энергии, импульса, примеси и в уравнение неразрывности для сплошной фазы [8].

Изменение импульса несущего потока F , Н/м³, обусловленное гидродинамическим сопротивлением капель, рассчитывается из следующего соотношения [8]:

$$F = \frac{1}{V} \sum_{j=1}^N \left(\frac{18\mu C_D Re_d}{\rho_p d_{pj}^2} (u_p - u_l) \right) m_j \Delta t. \quad (11)$$

N — число частиц-представителей, прошедших через контрольный объем V ; m_j — текущий массовый расход частиц данной фракции через грань контрольного объема, кг/с. (3.1)

Источник массы S , кг/(м³·с) в уравнении неразрывности и уравнении переноса примеси, возникающий в результате испарения капель, определяется через соотношение [8]:

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

Сток энергии в газовой фазе Q , Дж/(м³·с), обусловленной теплообменом с каплями, рассчитывается следующим образом [8]:

$$Q = -\frac{1}{V} \sum_{i=1}^N \frac{\Delta m_i}{m_{0j}} (-\Delta H_g + C_{p,p} \Delta T_j) m_{0j} \quad (13)$$

где Δm_i — изменение массы i -й капли в процессе испарения за время прохождения ею данного контрольного объема, кг; m_{0j} — начальная масса капли-представителя, кг; ΔT_{pj} — 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 [4].

Эксперимент, описанный в работе [4], был проведен на установке, показанной на рис.1, которая состоит из аэродинамической трубы из стекла, прямоугольного сечения (0,8 на 0,9 м) и длиной 5 метров. Выброс хлора произведен с наветренной стороны от водяной завесы на высоте 0,4 м и на расстоянии 0,9 м от нее. Высота установки завесы 0,67 м. Основные исходные данные, при которых был проведен эксперимент приведены ниже в табл.1.

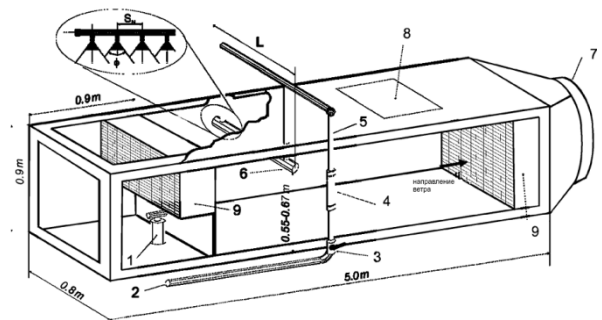


Рис. 1 — Экспериментальная установка [4]: 1. источник хлора; 2. подвод воды; 3. клапан; 4. расходомер; 5. трубы подачи воды; 6. насадки водяной завесы; 7. вентилятор; 8. люк; 9. соты выпрямители

Таблица 1 - Основные исходные данные, при которых был проведен эксперимент и результаты эксперимента [4]

Параметр	Значение	Размерность
Основные исходные данные		
Число насадок	19	шт.
Шаг между насадками	0,04	м
Угол распыления	110	град.
Расход завесы	0,22	кг/с
Расход выброса	$7,2 \cdot 10^{-6}$	кг/с
Размер капли	$2 \cdot 10^{-4}$	м
Продолжительность выброса	300	с
Скорость ветра	0,25	м/с
Температура воздуха	293	К
Результаты эксперимента [4]		
Концентрация непосредственно за завесой	$5 \cdot 10^{-5}$	кг/м ³
Эффективность водяной завесы (отношение концентрации газа без завесы и с завесой)	5	-

Численное моделирование проведено как для свободного выброса хлора, так и для выброса хлора при включенной водяной завесе. Основные результаты расчета представлены на рис. 2.

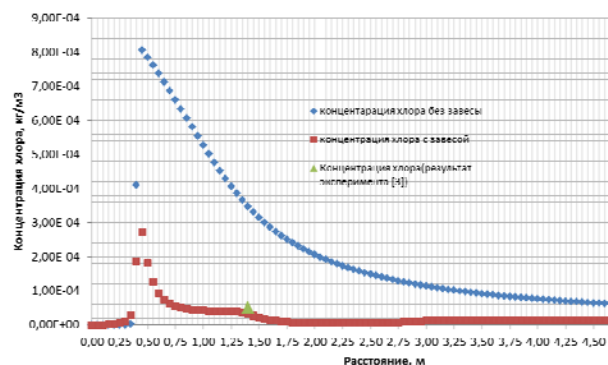


Рис. 2 – Распределение концентрации по центральной оси аэродинамической трубы (без завесы; с завесой; результат эксперимента [4])

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 [4]. Ввиду низкой растворимости хлора в воде (7,3 г/л) абсорбция хлора не учитывалась.

Как видно из рисунка 2, при включенной завесе концентрация хлора в воздухе достигает значения концентрации $4,2 \cdot 10^{-5}$ кг/м³ на расстоянии 1,4 метра от начала экспериментальной установки (непосредственно после самой водяной завесы). Основным параметром, характеризующим действие водяной завесы, является ее эффективность, которая определяется как отношение значения концентрации без применения завесы ($3,15 \cdot 10^{-4}$ кг/м³) к значению концентрации при наличии завесы ($4,2 \cdot 10^{-5}$ кг/м³). Таким образом, эффективность водяной завесы, полученная в результате численного моделирования равна 7,5. Полученные данные удовлетворительно согласуются с результатами, полученными в работе [3] и представленными в таблице 1.

Таким образом, численное моделирование позволяет определять оптимальные параметры и условия эффективного применения водяных завес для ограничения или предотвращения распространения токсичных облаков при различных видах аварийного выброса и применять полученные результаты при проектировании водяных завес на опасных производственных объектах.

Литература

1. Федеральный закон от 21 июля 1997 г. N 116-ФЗ "О промышленной безопасности опасных производственных объектов"
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. 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.
5. Byung Kyu Kim, Dedy Ng, Ray A. Mentzer, M. Sam Man-nan. 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.
6. G. Dusserre, A. Dandrieux, and O.Thomas, TheDVS model: A new concept for heavy gas dispersion by water curtain, Environ Model Software 18, 2003, p. 253–259.
7. 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.
8. Fluent Inc. Fluent 6.1 // User's Guide. – Lebanon, 2003.

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