

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]:

$$(1) \quad \frac{d\mathbf{u}}{dt} = \frac{\mathbf{F}}{m} - \frac{\mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u}}{2} - \frac{\mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u}}{2} - \frac{\mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u}}{2}$$

где u_x — проекция скорости движения капли на ось x , м/с; u_y — 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; $F(\mathbf{u})$ — удельная сила сопротивления на движению капли, Н/кг [8];

$$(2) \quad \mu = \frac{4}{3} \pi d^3 \rho \mu$$

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]:

$$(3) \quad Re_d = \frac{\rho u^2 d_p}{\mu}$$

Число Рейнольдса Re_d определено как:

$$(4) \quad u = \frac{4}{3} \pi d_p^3 \rho \frac{du}{dt}$$

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

$$(5) \quad \frac{d\mathbf{r}}{dt} = \mathbf{u}$$

Уравнения, подобные (1), решены для каждого направления координат. Уравнение, определяющее интенсивность испарения (конденсации) компонентов капель, имеет вид [8]:

$$(6) \quad \frac{dm_i}{dt} = A_p (C_{i,s} - C_{i,\infty})$$

где m_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]:

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

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:

$$(8) \quad \beta = \frac{D_{m,i}}{d_p} Sc$$

где $D_{m,i}$ — коэффициент молекулярной диффузии компонента в смеси, м²/с; Sc — молекулярное число Шмидта: $Sc = \frac{\rho u d_p}{\mu}$. Изменение температуры капли определяется уравнением [8]:

$$(9) \quad \frac{dT_d}{dt} = \frac{a_s (T_\infty - T_d)}{C_{p,p} m_p}$$

где $C_{p,p}$ — теплоемкость капли, Дж/(кг·К); a_s — коэффициент конвективной теплопередачи, Вт/(м²·К); T_∞ — локальная температура несущей фазы, К. Коэффициент конвективной теплоотдачи a_s определяется из корреляции Нуссельта [8]:

$$(10) \quad Nu_d = \frac{a_s d_p}{k_f} = 0.6 + 0.5 Re_d^{0.5} + 0.4 Pr_d^{0.4}$$

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 [8].

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

$$(11) \quad \frac{dF}{dt} = -N \frac{F}{V}$$

где N — число частиц-представителей, прошедших через контрольный объем V ; — 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 [8]:

$$(12) \quad S = \frac{1}{V} \frac{dM}{dt}$$

где M — масса капель в контрольном объеме, кг.

газовой фазе Q , Дж/(м³·с), обусловленной теплообменом с каплями, рассчитывается следующим образом [8]: (13) где Dm_j — изменение массы i -й капли в процессе испарения за время прохождения ею данного контрольного объема, кг; m_{0j} — начальная масса капли-представителя, кг; DT_{pj} — изменение температуры частицы в данном контрольном объеме V ; — начальный массовый расход частиц данной фракции через грань контрольного объема, кг/с. Для проверки адекватности предложенной модели были использовали 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.