

Р. Р. Насибуллин, А. Д. Галеев, С. И. Поникаров

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ОГНЕВОЙ ЗАВЕСЫ КАК СРЕДСТВА ОГРАНИЧЕНИЯ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ОБЛАКА ХЛОРА ВСЛЕДСТВИЕ ЕГО АВАРИЙНОГО ВЫБРОСА

Ключевые слова: хлор, огневая завеса, распространение примеси, численное моделирование.

Проведено численное моделирование аварии с выбросом хлора. Показано влияние огневой завесы на распространение токсичного облака в атмосфере.

Keywords: chlorine, fire curtain, pollutant spread, numerical simulation.

The numerical simulation of accident with chlorine emission was conducted. The influence of fire curtain on pollutant spread cloud are shown.

Введение

В настоящее время основным способом обеззараживания воды на объектах централизованного водоснабжения населения является обработка ее жидким хлором. Достоинствами данного способа являются его хорошая изученность и проработанность, наличие широкого сортамента серийно выпускаемого оборудования, относительная простота аппаратного оформления процесса хлорирования. Данные объекты, на которых хранится, транспортируется и применяется сжиженный хлор, являются источниками повышенной опасности. Опасность таких объектов связана с интенсивным испарением сжиженного хлора при его выбросе из оборудования и образованием сильнодействующих токсичных облаков, способных перемещаться, под действием ветра, на значительные расстояния и создавать угрозу жизни и здоровью людей, находящихся в районе случившейся аварии.

Одним из средств, снижающих негативные последствия выброса и испарения сжиженных токсичных и пожаровзрывоопасных газов в атмосферу, является установка на пути их распространения специальных устройств, создающих завесы различных типов. Существует множество работ, посвященных исследованию водяных капельных завес. В работах [1, 2, 3] проводится оценка эффективности воздействия водяной завесы на распространяющееся в атмосфере облако примеси, возникающего в результате разлива сжиженного природного газа. Авторы статьи [4] провели исследование взаимодействия водяной завесы с облаком выброса аммиака (NH_3) в лабораторных и натурных масштабах, в работе [5] в качестве токсичных примесей выступают хлор (Cl_2) и углекислый газ (CO_2). Вопрос, связанный с исследованием испарения и распространения примесей из пролива также достаточно подробно освещен [6, 7].

В настоящее время, работ, связанных с исследованием влияния огневых завес на распространение токсичных облаков, крайне мало. Поэтому в данной статье была проведена оценка эффективности влияния огневой завесы на распространяющееся в атмосфере облако хлора, возникшего в результате

его аварийного пролива в жидком состоянии. Пламя, термически и механически воздействуя на облако примеси, снижает его плотность, создает благоприятные условия для смешения хлора с окружающим воздухом. Так как хлор является сильным окислителем, контакт с пламенем завесы не создаст опасности его возгорания. Указанные выше механизмы воздействия завесы на облако примеси могут служить причиной снижения размеров зон токсического поражения хлором, тем самым сокращая расходы, связанные со страхованием ответственности предприятия, использующего в своей деятельности сжиженный хлор, перед третьими лицами.

Проведение экспериментов по определению эффективности работы огневой завесы – процесс дорогостоящий и в то же время трудноосуществимый, так как используемое в исследовании вещество – хлор относится к сильнодействующим ядовитым веществам, что в свою очередь требует специально подготовленной площадки для проведения эксперимента. Поэтому изучение распространения примеси в атмосфере и оценку эффективности снижения огневой преградой данного распространения целесообразно проводить посредством математического моделирования вышеуказанных процессов. В данной работе численное решение дифференциальных уравнений, описывающих используемые модели, осуществлялось в CFD программе Fluent.

Описание модели

При разгерметизации емкости с перегретой жидкостью, в результате резкого снижения давления и нарушения термодинамического баланса, происходит мгновенное вскипание определенной части жидкой фазы за счет высвобождения внутренней энергии. При этом устанавливается новое состояние равновесия, а температура оставшейся жидкой фазы понижается до температуры кипения при атмосферном давлении. При мгновенном испарении жидкости формируется первичное облако пара.

Первичное облако в настоящей работе представлялось в виде цилиндра с радиусом, равным высоте.

Массовая доля мгновенно испарившейся жидкости δ определяется по формуле [8]:

$$\delta = 1 - \exp\left(-\frac{C_p \cdot (T_a - T_b)}{L_g}\right), \quad (1)$$

где C_p - удельная теплоемкость хлора, Дж/(кг·К); T_a - температура окружающего воздуха, К; T_b - температура кипения хлора при атмосферном давлении, К; L_g - удельная теплота парообразования хлора, Дж/кг

Предполагалось, что пролив сжиженного хлора, оставшегося после мгновенного вскипания, имеет форму круга, поэтому значение радиуса поверхности пролива жидкости рассчитывалась по формуле:

$$r = \sqrt{\frac{m_l \cdot \rho_l}{\pi \cdot h}}, \quad (2)$$

где m_l и ρ_l - масса и плотность жидкого хлора, h - высота слоя жидкости пролива, принимаемая в данном расчёте 0,05 м.

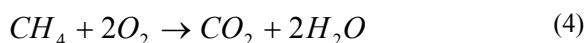
Интенсивность парообразования при кипении пролива определялась по формуле [8]:

$$W = \frac{(\lambda_s \cdot C_s \cdot \rho_s)^{0.5} \cdot (T_o - T_b)}{L_g \cdot (\pi \cdot t)^{0.5}}, \quad (3)$$

где λ_s - коэффициент теплопроводности материала, на поверхность которого разливается жидкость, Вт/(м·К); C_s - удельная теплоемкость материала, Дж/(кг·К); ρ_s - плотность материала, кг/м³; T_o - начальная температура материала, К; t - текущее время с момента начала испарения, с (но не менее 10 с); T_g - температура кипения сжиженного хлора при атмосферном давлении, К; L_g - удельная теплота парообразования хлора, Дж/кг.

Модель распространения примесей в атмосфере включала численное решение полной системы трехмерных нестационарных уравнений Рейнольдса, переноса массы и энергии, замыкаемых Realizable k-ε моделью турбулентности [9].

Пламя завесы в рассматриваемой задаче представляет собой реакцию окисления метана, уравнение которой имеет вид:



Данная реакция в модели описывается уравнением сохранения химической компоненты [9]:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_i) + \nabla \cdot (\rho \vec{g} Y_i) = -\nabla \cdot \vec{J}_i + R_i, \quad (5)$$

где Y_i - массовая концентрация химического компонента; $\vec{g}$ - поле скоростей потока; $\vec{J}_i$ - диффузионный поток; R_i - скорость образования (убывания) компонента в единице объема в результате реакции;

Скорость образования компонента в единице объема рассчитывается в данной задаче на основе модели вихревого рассеивания ("Eddy-dissipation"). Вихревая турбулентная модель рассчитывает степень реакции в предположении, что кинетика реакции значительно выше, чем скорость смешения реагентов [9]. Скорость образования вещества i в результате реакции g находится как меньшее значение, получаемое по нижеследующим уравнениям [9]:

$$R_{i,r} = v'_{i,r} M_{\omega,i} A \rho \frac{\varepsilon}{k} \min\left(\frac{Y_R}{v'_{R,r} M_{\omega,R}}\right) \quad (6)$$

$$R_{i,r} = v'_{i,r} M_{\omega,i} A B \rho \frac{\varepsilon}{k} \frac{\sum_p Y_p}{\sum_j v''_{j,r} M_{\omega,j}} \quad (7)$$

где $v'_{i,r}$, $v''_{j,r}$ - стехиометрические коэффициенты соответственно реагента и продукта реакции; ε , k - коэффициенты турбулентности; A и B - эмпирические коэффициенты, равные соответственно 4 и 0,5; Y_R и Y_p - массовая доля реагента и продукта соответственно; $M_{\omega,i}$ - молекулярная масса компонента i .

Основой для расчета распределения температуры было уравнение энергии:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho H) + \nabla \cdot (\rho \vec{g} H) = \nabla \cdot \left(\frac{k_t}{c_p} \nabla H\right) + S_h, \quad (8)$$

где H - полная энтальпия системы, является сложной зависимостью от температуры; S_h - источник тепла, формирующееся в результате реакции [9]:

$$S_h = -\sum_j \frac{h_j^0}{M_j} R_j, \quad (9)$$

где h_j^0 - энтальпия образования вещества j ; R_j - скорость образования вещества j в результате горения, определяется из уравнений (6), (7).

Результаты расчетов

В целях оценки применимости изложенной модели рассматривалась аварийная ситуация, связанная с полным разрушением емкости, содержащей сжиженный хлор. Масса жидкости в емкости принималась равной 1000 кг. Температура хлора в емкости принималась равной 303 К.

Расчетные характеристики источников первичного и вторичного облаков в начальный момент времени представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Характеристики источников выбросов

Параметр выброса	Значение
Масса хлора в первичном облаке, кг	200
Площадь пролива, м ²	12,5
Радиус и высота первичного облака, м	4

Температура окружающей среды принималась равной 30°C, скорость ветра на высоте 10 м – 1 м/с. Состояние атмосферы – изотермия. Материал подстилающей поверхности – бетон. Время экспозиции принималось равным 1800 с. Предполагалось, что в течение этого времени будет осуществлен вывод технического персонала из опасной зоны, либо будут осуществлены мероприятия, направленные на снижение интенсивности источника паров. В исследовании были приняты три значения расхода метана, формирующего пламя завесы: 1; 2,15 и 4,3 кг/м²·с. Источник выброса хлора расположен на расстоянии 550 м от начала расчетной области. Завеса, длиной в 12 м, находится на расстоянии 20 м от подветренной стороны пролива.

Для оценки размеров зон токсического поражения пользовались показателем токсодозы, учитывающим изменение концентрации в точке пространства в зависимости от времени и определяемой как [10]:

$$D(x, y, z) = \int_0^{t_{\text{экп}}} C(x, y, z, t) dt = \sum_{i=1}^n C_i(x, y, z, t) \cdot \Delta t \quad (11)$$

где D - токсодоза; $t_{\text{экп}}$ - время экспозиции; Δt - шаг по времени; C - концентрация примеси. Для хлора значения летальной и пороговой токсодоз равны соответственно $S_{LCt} = 6$ и $S_{PCt} = 0,6$ мг·мин/л [10].

Функция вычисления токсодозы была реализована на языке программирования Си и интегрирована в пакет FLUENT.

Результаты расчета полей токсодоз в виде изолиний, соответствующих пороговому и летальному значениям в зависимости от расхода метана в завесе, приведены на рисунках 1-4. Так как поле расчета симметричное, показаны только половины изображений изолиний.

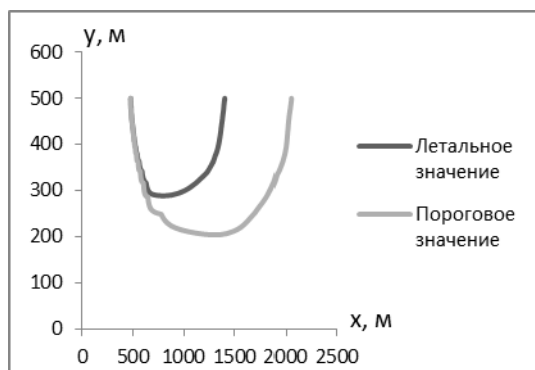


Рис. 1 - Профили летального и порогового значений токсодоз паров хлора в отсутствии огневой завесы

Анализ вышеуказанных рисунков ясно указывает на то, что огневая завеса снижает размеры зон токсического поражения хлором, при этом, чем выше расход сжигаемого в завесе газа, тем завеса действует эффективнее. Количественно это подтверждается оценкой площадей зон токсического поражения S_{LCt} и S_{PCt} , соответствующие летальной и пороговой токсодозам. Результаты представлены в таблице 2.

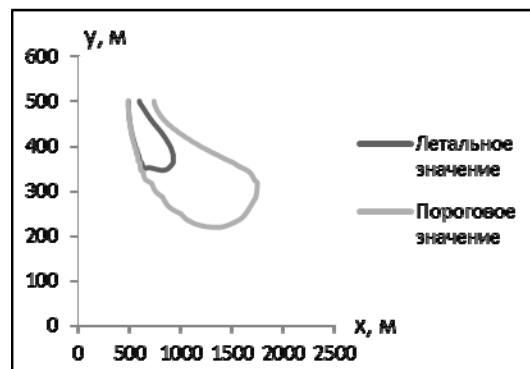


Рис. 2 - Профили летального и порогового значений токсодоз паров хлора при значении расхода сжигаемого метана в завесе 1 кг/м²·с

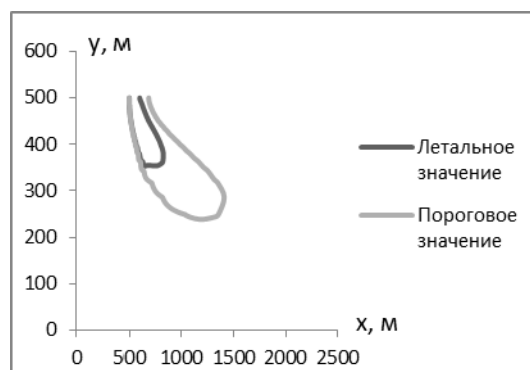


Рис. 3 - Профили летального и порогового значений токсодоз паров хлора при значении расхода сжигаемого метана в завесе 2,15 кг/м²·с

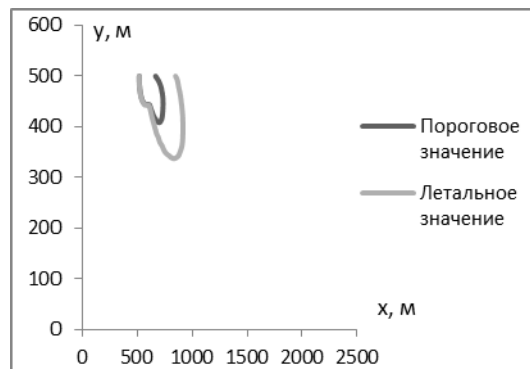


Рис. 4 - Профили летального и порогового значений токсодоз паров хлора при значении расхода сжигаемого метана в завесе 4,3 кг/м²·с

Таблица 2 - Площади зон поражения хлором (время экспозиции 1800с)

Параметр	Расход сжигаемого газа в завесе, кг/м ² ·с			
	Без завесы	1	2,15	4,3
$S_{LCt}, \text{м}^2$	147627	36775	27058	13321
$S_{PCt}, \text{м}^2$	368243	186135	115032	43727

Заключение

Воздействие конвективных течений, возникающих вследствие нагрева воздуха в области заве-

сы, на облако хлора, приводит к интенсивному перемешиванию примеси с воздухом. Это приводит к снижению концентрации распространяющегося выброса, и, тем самым, уменьшению размеров зон токсического поражения.

Литература

1. F. Gavelli, E. Bullister, H. Kytomaa, Journal of Hazardous Materials, **159**, 158–168, (2008).
2. Morshed A. Rana, M. Sam Mannan, Journal of Loss Prevention in the Process Industries, **23**, 768-772 , (2010).
3. T. Olewski, S. Nayak, O. Basha, S. Waldrama, L. Véhot, Journal of Loss Prevention in the Process Industries, **24**, 798-804, (2011).
4. A. Dandrieux, G. Dusserre, J. Ollivier, H. Fournet, Journal of Loss Prevention in the Process Industries, **14**, 349–355, (2001).
5. K. Hald, J. Buchlin, A. Dandrieux, G. Dusserre, Journal of Loss Prevention in the Process Industries, **18**, 5, 506-511, (2005).
6. А. Д. Галеев, Е. В. Старовойтова, С. И. Поникаров, Вестник Казан.технол. ун-та, **14**, 3, 130-135, (2011).
7. Е. В. Старовойтова, А. Д. Галеев, С. И. Поникаров, Вестник Казан.технол. ун-та, 13, 175-179, (2011).
8. Методика определения расчетных величин пожарного риска на производственных объектах (утв. приказом МЧС РФ от 10 июля 2009 г. № 404).
9. Fluent Inc. Fluent 6.1. User's Guide, Lebanon, 2003.
10. РД-03-26-2007. Методические указания по оценке последствий аварийных выбросов опасных веществ (утв. Приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 14 декабря 2007 г. №859).

© **Р. Р. Насибуллин** - асп. каф. машин и аппаратов химических производств КНИТУ, rail90ongp@yandex.ru; **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, ponikarov_si@kstu.ru.