УДК 614.8.084

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

ИССЛЕДОВАНИЕ ОГРАНИЧИВАЮЩЕГО ДЕЙСТВИЯ ОГНЕВОЙ ЗАВЕСЫ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К РАСПРОСТРАНЕНИЮ ОБЛАКА ХЛОРА В АТМОСФЕРЕ

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

Было проведено исследование воздействия огневой завесы на распространяющееся облако хлора в атмосфере. Посредством численного моделирования была оценена эффективность восходящей огневой завесы как средства, ограничивающего распространение примеси в воздухе.

Keywords: accidental release, chlorine, evaporation, fire curtain, pollutant spread, numerical simulation.

A study of the influence fire curtain on the spreading cloud of chlorine in the atmosphere was conducted. By means of numerical simulation was evaluated the effectiveness of the upward fire curtain as a mean of limiting the pollutant spread in the air.

Введение

Растет ассортимент применяемых в промышленности, сельском хозяйстве и быту химических веществ. Некоторые из них токсичны и вредны. При проливе, или выбросе в окружающую среду способны вызвать массовые поражения людей, животных, приводят к заражению воздуха, почвы, воды, растений. Их называют аварийно химически опасными веществами (АХОВ). Одним из наиболее распространенных из них является хлор.

Ежегодное потребление хлора в мире достигает 40 млн. т. Используется он в производстве хлорорганических соединений (винил хлорида, хлоропренового каучука, дихлорэтана, хлорбензола и др.). В большинстве случаев применяется для отбеливания тканей и бумажной массы, обеззараживания питьевой воды, как дезинфицирующее средство и в различных друг отраслях промышленности. Хранят и перевозят его в стальных баллонах и железнодорожных цистернах под давлением. При производстве, использовании, хранении и перевозке газообразный хлор, как правило, сжимают, приводя в жидкое состояние. Это резко сокращает занимаемый им объем. При аварии в атмосферу выбрасывается хлор, образуя зону заражения. Двигаясь по направлению приземного ветра, облако хлора может сформировать зону заражения глубиной до десятков километров, вызывая поражения людей в населенных пунктах.

Одним из средств, снижающих масштабы воздействия и распространения опасных веществ при авариях, являются завесы. Завесы бывают различных видов и природы. Наиболее полно на данный момент исследованы водяные капельные завесы. 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].

Особый интерес вызывают завесы, формирующиеся из пламени. Интерес этот вызван, прежде всего, малоизученностью данного вида средства защиты. В научных публикациях практически отсутствуют работы по анализу и исследованию огневой завесы как средства и метода ограничения распространения примесей токсичных веществ в атмосфере.

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. Осуществление экспериментов, моделирующих вышеуказанную ситуацию, трудноосуществимо, ввиду необходимости крупной (порядка десяти километров), специально подготовленной площади. Поэтому исследование проводилось путём численного моделирования процессов, образующих данную аварийную ситуацию. Численное решение математической модели выполнялось программой Fluent.

Описание модели

Предполагается наихудший сценарий аварийной ситуации - сценарий 3 [8]: разрушение оборудования (емкости) с жидким опасным веществом, выброс опасного вещества в окружающую среду, при наличии перегрева у жидкой фазы. В результате этого происходит резкое снижение давления и нарушение термодинамического баланса, 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[8].

Масса опасного вещества, переходящего в газовую фазу первичного облака при мгновенном вскипании перегретого опасного вещества:

$$Q^{Г} = Q^{Ж}\left(1 - \exp\left(-\frac{C_p\left(T - T_{кип} + \left|T - T_{кип}\right|\right)}{2\Delta H_{кип}}\right)\right), \qquad (2)$$

где $Q^{Г}$ - масса хлора, переходящего в газовую фазу в первичное облако при мгновенном вскипании сжиженного хлора, кг; $Q^{Ж}$ - масса жидкого опасного вещества в оборудовании, кг; C_P - удельная теплоемкость хлора, Дж/(кг·К); T - температура, при которой находится хлор внутри оборудования, К; $T_{кип}$- температура кипения жидкого хлора при атмосферном давлении, К; $\Delta H_{кип}$ - теплота испарения (кипения) жидкого хлора, Дж/кг;

Радиус первичного облака опасного вещества в начальный момент времени (на месте выброса) в 3-м сценарии рассчитывалась по формуле:

$$R = H = \sqrt[3]{\frac{Q^{Г}}{\pi\rho_{пер}}}, \qquad (3)$$

где $\rho_{пер}$ - плотность хлора в первичном облаке в начальный момент времени, H - высота первичного облака.

Образовавшийся пролив, согласно методике [8], представлялся в виде квадрата, площадь поверхности которого вычислялась по зависимости:

$$F = \frac{Q^{Ж} - Q^{Г} - Q_3^{Ж}}{0{,}005\rho_{Ж}}, \qquad (4)$$

где $Q_3^{Ж}$ - масса хлора, переходящая в аэрозоль в первичное облако; $\rho_{Ж}$- плотность жидкого хлора, кг/м^3;

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

$$W = \frac{\left(\lambda_S C_S \rho_S\right)^{0.5}\left(T_o - T_b\right)}{L_g\left(\pi t\right)^{0.5}}, \qquad (5)$$

где λ_S - коэффициент теплопроводности материала, на поверхность которого разливается жидкость, $Вт/(м \cdot К)$; C_S- удельная теплоемкость материала, $Дж/(кг \cdot К)$; ρ_S- плотность материала, $кг/м^3$; 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, $Дж/кг$.

Расход метана, формирующего пламя завесы, определялся по формуле [8]:

$$q = 0{,}8S\min\sqrt{2\frac{\gamma}{\gamma-1}P_2\rho_2\left(\left(\frac{P_0}{P_2}\right)^{\frac{2}{\gamma}} - \left(\frac{P_0}{P_2}\right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma}}\right)}, \qquad (6)$$

где S - суммарная площадь отверстий в трубопроводе, через которую происходит выход метана наружу, м^2; γ - показатель адиабаты метана; P_2 - давление в газопроводе, МПа; P_0 - давление окружающей среды, МПа; ρ_2 - плотность метана при температуре и давлении в газопроводе, кг/м^3;

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].

В рассматриваемой модели пламя завесы было представлено в виде одностадийной реакции окисления метана, уравнение которой имеет вид:

$$CH_4 + 2O_2 \rightarrow CO_2 + 2H_2O \qquad (7)$$

Образование продуктов реакции и распределение веществ описывается уравнением сохранения химической компоненты [9]:

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(\rho Y_i\right) + \nabla\cdot\left(\rho\vec{\vartheta}Y_i\right) = -\nabla\cdot\overrightarrow{J_i} + R_i, \qquad (8)$$

где Y_i - массовая концентрация химического компонента; $\vec{\vartheta}$ - поле скоростей потока; $\overrightarrow{J_i}$ - диффузионный поток; R_i- скорость образования (убывания) компонента в единице объёма 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. Скорость образования вещества i в результате реакции r находиться как меньшее значение, получаемое по нижеследующим уравнениям [9]:

$$R_{i,r} = \nu'_{i,r}M_{\omega,i}A\rho\frac{\varepsilon}{k}\min_R\left(\frac{Y_R}{\nu'_{R,r}M_{\omega,R}}\right) \qquad (9)$$

$$R_{i,r} = \nu'_{i,r}M_{\omega,i}AB\rho\frac{\varepsilon}{k}\frac{\sum_P Y_P}{\sum_j^N \nu''_{j,r}M_{\omega,j}} \qquad (10)$$

где $\nu'_{i,r}$, $\nu''_{j,r}$ - стехиометрические коэффициенты соответственно реактанта 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 реактанта и продукта соответственно; $M_{\omega,i}$ - молекулярная масса компонента i.

Основой для расчета распределения температуры было уравнение энергии:

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(\rho H\right) + \nabla\cdot\left(\rho\vec{\vartheta}H\right) = \nabla\left(\frac{k_t}{c_P}\nabla H\right) + S_h, \qquad (11)$$

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

$$S_h = -\sum_j \frac{h_j^0}{M_j}R_j \quad , \qquad (12)$$

где h_j^0 - энтальпия образования вещества j; R_j - скорость образования вещества j в результате горения, определяется из уравнений (7), (8).

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 60000 кг, коэффициент заполнения 80%. Температура хлора в емкости равна 300 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	15029,17
Площадь пролива, м^2	523,4
Радиус и высота первичного облака, м	17
Расход метана, формирующего завесу, кг/(м^{3}с)	0,72

Температура окружающей среды принималась равной 27°С, скорость ветра на высоте 10 м – 2,5 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. Источник выброса хлора расположен на расстоянии 1500 м от начала расчетной области. Завеса, длиною в 200 м, находится на расстоянии 200 м от пролива, с подветренной стороны.

Для оценки размеров зон токсического поражения пользовались показателем токсодозы, учитывающим изменение концентрации в точке пространства в зависимости от времени и определяемой как [8]:

$$D(x,y,z) = \int_0^{t_{эксп}} C(x,y,z,t)dt = \sum_{i=1}^{n} C_i(x,y,z,t)\cdot\Delta t \qquad (13)$$

где D - токсодоза; $t_{эксп}$ - 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 [8].

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

Результаты расчетов полей токсодоз в виде изолиний, соответствующих пороговому и летальному значениям на земной поверхности, приведены на рисунках 1, 2; в плоскости, перпендикулярной земной поверхности – на рисунках 3, 4. X, У, Z – обозначения направлений осей прямоугольной системы координат, обозначенное на рисунках в метрах. X – направление движения ветра, Z – координата, соответствующая направлению от земной поверхности вверх в атмосферные слои.

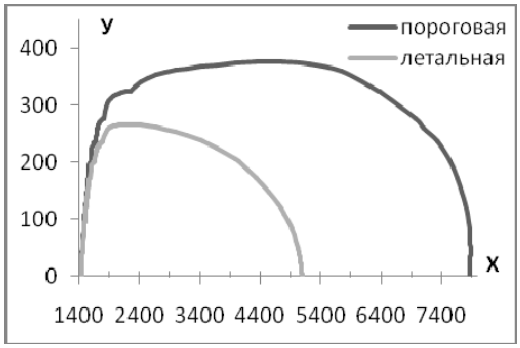

Рис. 1 - Профили летального и порогового значений токсодоз паров хлора на земной поверхности в отсутствии огневой завесы

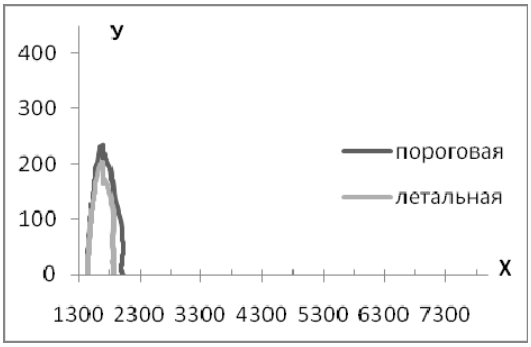

Рис. 2 - Профили летального и порогового значений токсодоз паров хлора на земной поверхности при включенной огневой завесе

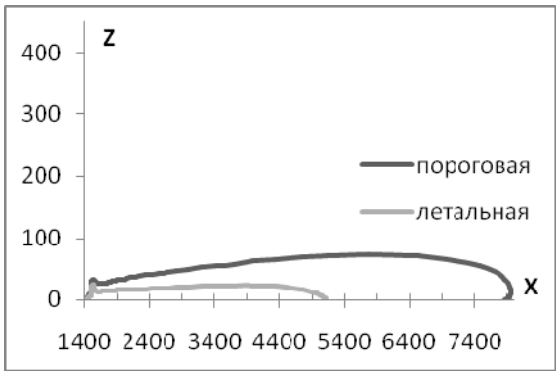

Рис. 3 - Профили летального и порогового значений токсодоз паров хлора в плоскости, перпендикулярной земной поверхности в отсутствии огневой завесы

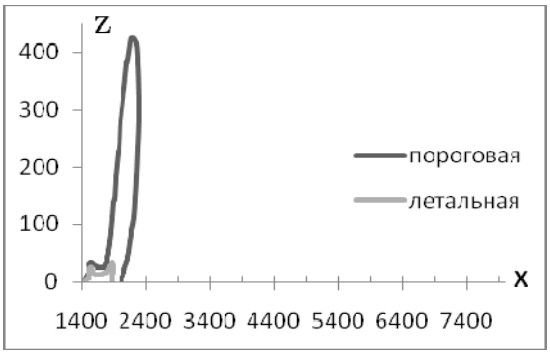

Рис. 4 - Профили летального и порогового значений токсодоз паров хлора в плоскости, перпендикулярной земной поверхности при включенной огневой завесе

Анализ профилей изолиний токсодоз, изображенных на рисунках 1, 2, свидетельствует резкое сокращение приземной зоны поражения опасным веществом при установлении на пути его распространения огневой завесы. Происходит это вследствие интенсивного разбавления паров хлора с воздухом на участке действия завесы. На рисунке 3, где завеса не работает, хлор распределен равномерно над поверхностью земли. При включенной завесе (рис. 4), на месте его установки, профиль токсодозы хлора, обладавший непрерывной и вытянутой вдоль земли формой, обрывается и, закручиваясь, вытягивается вертикально вверх.

Для более наглядного представления эффективности действия огневой завесы в таблице 2 приведены значения площадей зон токсического поражения S_{LCt} и S_{PCt}, соответствующие летальной и пороговой токсодозам на земной поверхности.

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

Параметр	Условие распространения примеси		Степень снижения зоны поражения, %
	Без завесы	*С включенной завесой*	
S_{LCt}, м^2	761806,1	62021,62	92
S_{PCt}, м^2	2086683	91907,52	95

Заключение

Результаты расчетов численного моделирования взаимодействия огневой завесы с распространяющимся в атмосфере хлором продемонстрировали высокую эффективность огневой завесы как средства ограничения распространения опасного токсичного вещества. Но следует заметить, что данный вид завесы возможно применять только против пожаровзрывобезопасных примесей. В нашем случае хлор - сильный окислитель, при взаимодействии с пламенем завесы не возгорается и не взрывается.

Уменьшение размеров зон поражения опасным веществом достигается за счет разбавления его с окружающим воздухом. Разбавление понижает концентрацию опасного вещества до безопасных значений. Огневая завеса, в данном случае, интенсифицирует процесс разбавления. Во-первых, высокая температура пламени создает большой градиент температур в приземных слоях атмосферы, а это вызывает высокую неустойчивость воздушных слоев, турбулизирует их, вызывая интенсивное перемешивание. Во-вторых, пламя нагревает тяжелый холодный газ, тем самым понижая его плотность, что в свою очередь усиливает его перемешивание с воздухом. В третьих, сжигаемый газ - метан, при выходе из сопел горелки, обладает существенной турбулентностью, которая вносит свой вклад в перемешивание и разбавление опасной примеси.

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. Véchot, 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. 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).
9. Fluent Inc. Fluent 6.1. User's Guide, Lebanon, 2003

© **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.