

DOI: <https://doi.org/10.33408/2519-237X.2020.4-4.424>

УДК 614.878:519.6

ПОЛУЭМПИРИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ ФАКТИЧЕСКОЙ ЗОНЫ ЗАРАЖЕНИЯ ПРИ ПОСТАНОВКЕ ВОДЯНЫХ ЗАВЕС

Котов Г.В., Фисенко С.П.

Цель. Разработка полуэмпирической модели расчета влияния водяных завес на распространение паров опасного химического вещества с ветровым потоком от локального источника выброса (пролива).

Методы. Лабораторные исследования абсорбции газообразной примеси движущимися водяными каплями. Полигонные испытания по определению параметров фактической зоны заражения в условиях проливов аммиака и хлора при свободном распространении примеси и в условиях постановки водяных завес. Метод Фуллера. Метод Галеркина. Метод прямых. Математическое моделирование. Трехмерное решение уравнения турбулентной диффузии. Интер- и экстраполяционные оценки. Полуэмпирические расчеты с использованием результатов лабораторных исследований, полигонных испытаний и математического моделирования.

Результаты. При распространении аммиака и хлора с ветровым потоком от источника выброса (пролива) рассчитаны поглощательная способность и коэффициент пропускания водяных завес, создаваемых с применением рукавного распылителя. Предложено выражение для расчета числовой плотности примеси с учетом коэффициента пропускания и доли примеси, не абсорбируемой водяной завесой. Определены границы фактической зоны заражения при свободном распространении аммиака и хлора с поверхности пролива и в условиях постановки водяных завес. Предложен метод расчета глубины фактической зоны заражения с использованием коэффициента пропускания завесы. Разработана полуэмпирическая модель расчета влияния водяных завес на распространение паров опасного химического вещества с ветровым потоком от локального источника выброса (пролива).

Область применения исследований. Прогнозирование параметров фактической зоны заражения при выбросе (проливе) опасного химического вещества в ходе ведения аварийно-спасательных работ.

Ключевые слова: опасное химическое вещество, пролив, зона заражения, водяная завеса, полуэмпирическая модель расчета.

(Поступила в редакцию 27 октября 2020 г.)

Введение

Выброс (пролив) опасных химических веществ (ОХВ) при аварии на химически опасных объектах может привести к возникновению чрезвычайной ситуации. Принимая во внимание то обстоятельство, что объекты хозяйствования, на которых используются или хранятся ОХВ, нередко приближены к местам компактного проживания, поступление опасных химических веществ во внешнюю среду представляет серьезную угрозу здоровью и жизни людей. Наибольшая опасность возникает в случаях распространения от источника выброса газообразных опасных веществ под действием ветра.

В ходе аварийно-спасательных работ (АСР) при ликвидации чрезвычайных ситуаций (ЛЧС), связанных с выбросом (проливом) ОХВ, как правило, производится постановка водяных завес (ВЗ). Широкое применение ВЗ обусловлено рядом существенных преимуществ, важнейшими из которых являются мобильность, использование технических средств, имеющих на вооружении подразделений по ЛЧС, доступных расходных материалов и высокая эффективность. Вместе с тем существует определенная проблема, связанная с прогнозированием ситуации, определяемой эффективностью влияния завес на распространяющийся поток опасной примеси.

В настоящее время количественную оценку влияния ВЗ на концентрацию опасной примеси в ветровом потоке, распространяющемся от источника выброса, теоретически осуществить не представляется возможным. Имеющиеся в литературе данные о такой оценке опираются на результаты проведенных авторами натурных испытаний либо основываются на расчетах с помощью моделей прямого численного моделирования, реализованных в программных комплексах [1]. В последнем случае верификация, как правило, осуществляется с использованием уже известных результатов натурных испытаний.

Принимая во внимание сложность проведения полномасштабных полигонных испытаний, возникла необходимость в разработке полуэмпирической модели расчета параметров фактической зоны заражения в условиях применения водяных завес, опирающейся на результаты экспериментальных и натурных исследований, а также математического моделирования.

Основная часть

В соответствии с теорией диффузии примесей [2] для нейтральной плавучести атмосферы среднее значение числовой плотности примеси в первичном облаке n_{0im} выражается как [3]

$$n_{0im} = \frac{n_{im \max}(T)}{h} \int_0^h \exp(-x/l_{dif}) dx, \quad (1)$$

где n_{im} – числовая плотность примеси, m^{-3} ; h – высота слоя примеси, м; l_{dif} – характерная диффузионная длина рассеивания, м; x – направление распространения ветрового потока.

Для расчета концентрации инертной примеси над поверхностью жидкого пролива введено понятие характерной высоты облака примеси h . На высоте, превышающей значение h , числовая плотность примеси стремится к нулю. Таким образом, величина h соответствует расстоянию от поверхности, ограничивающему область основного содержания частиц примеси.

Для случая распространения примеси, испаряющейся с поверхности жидкого пролива, значение h может быть определено как [4]

$$h \approx \sqrt{D_t d / u_0}, \quad (2)$$

где D_t – коэффициент турбулентной диффузии примеси, m^2/c ; d – размер пролива в направлении ветра (длина), м; u_0 – скорость ветра на высоте 2 м, м/с.

Коэффициент турбулентной диффузии зависит от скорости ветра и характера поверхности, над которой происходит распространение ветрового потока:

$$D_t = u(z)\delta, \quad (3)$$

где u – скорость ветра, м/с; z – направление по вертикали; δ – размер шероховатости, м.

На основе предварительного расчета распределения значений концентрации примеси на границе пролива в пределах высоты слоя распространения h был произведен расчет распределения примеси в ветровом потоке за пределами пролива.

При получении аналитических результатов введено выражение характерной длины рассеивания примеси l вследствие турбулентной диффузии:

$$l = \frac{u_0 h^2}{D_t} = \frac{h^2}{\delta}. \quad (4)$$

Учитывая геометрические соображения о форме следа и закон сохранения числа молекул примеси, для расчета средней числовой плотности $\langle n(L) \rangle$ в приземном следе на расстоянии L от границы пролива могут быть использованы величины начальной числовой плотности n_0 , высоты слоя и площади поперечного сечения следа [5]:

$$\langle n(L) \rangle = n_0 \frac{dh}{S(L)}, \quad (5)$$

где $S(L)$ – площадь поперечного сечения следа на расстоянии L , м².

Справедливость данного выражения подтверждается результатами полигонных испытаний. Например, сделана качественная оценка средней числовой плотности аммиака и определено эмпирическое усредненное выражение, позволяющее осуществлять интерполяционные оценки на основе имеющихся данных [5], в соответствии с выражением

$$\langle n(L) \rangle \approx n_0 \frac{d^{1.5}}{S^2}. \quad (6)$$

В условиях постановки завесы на пути ветрового потока происходит снижение концентрации примеси прежде всего за счет турбулентной диффузии в вертикальном направлении. В этом случае средняя числовая плотность примеси с учетом выражения (2) может быть определена как

$$\langle n(L) \rangle = n_0 \frac{dh}{S(L)} K, \quad (7)$$

где K – коэффициент пропускания завесы.

Коэффициент пропускания завесы является ее важнейшей характеристикой, определяющей эффективность обеззараживающего действия. Коэффициент пропускания зависит от природы примеси, параметров ВЗ и скорости ветра. Величина K представляет собой отношение количества примеси, прошедшей сквозь объем завесы, к ее исходному количеству в ветровом потоке. Наиболее достоверным способом ее определения является расчет на основе данных полигонных испытаний. В таком случае коэффициент пропускания определяется как

$$K = q_1 / q_0, \quad (8)$$

где q_0 – расход примеси в отсутствие завесы, кг/с; q_1 – расход примеси, прошедшей сквозь объем завесы, кг/с.

С учетом возможности абсорбции примеси завесой, коэффициент пропускания завесы рассматривается как произведение

$$K = K(u_0) A_f, \quad (9)$$

где $K(u_0)$ – коэффициент пропускания завесы, определенный в условиях инертной примеси, соответствующий скорости ветра u_0 ; A_f – доля примеси, не абсорбируемой водяной завесой.

Доля примеси, не абсорбированной водяной завесой, рассчитывается с использованием величины поглотительной способности: $A_f = 1 - A_w$. Поглотительная способность A_w может быть определена в условиях полигонных испытаний с учетом величин расходов примеси:

$$A_w = q_{abc} / q_0, \quad (10)$$

где q_{abc} – расход примеси, абсорбированной водяной завесой, кг/с.

Знание величин K_u и A_f позволяет прогнозировать значение коэффициента пропускания завес для случаев различных примесей, отличных по плотности паров (применяется интерполяционная оценка K_u) и по растворимости в воде (применяется интерполяционная оценка A_f).

С учетом сложности получения экспериментальных данных в отношении влияния завес на распространение потока примеси, особенно в части проведения полномасштабных полигонных испытаний, возникла необходимость применения методов математического моделирования с целью осуществления интер- и экстраполяционных оценок.

Были проведены лабораторные исследования процесса абсорбции газообразной примеси (аммиака и хлора) движущимися водяными каплями. По результатам исследований проведено математическое моделирование. При определении количества примеси, абсорбируемой движущейся каплей в условиях, соответствующих объему водяных завес, использовано выражение [6]:

$$\frac{dm_{im}}{d\tau} = 4\pi R^2 \gamma_{im}(\text{Re}) (\rho_{im} - \rho_{eq}(m_{im}, R, T_d)), \quad (11)$$

где m_{im} – масса примеси, абсорбированной каплей, кг; τ – время падения (контакта), с; R – радиус капли, м; $\gamma_{im}(\text{Re})$ – коэффициент массообмена примеси, м²/с; ρ_{im} – плотность паров примеси в воздушной смеси, кг/м³; ρ_{eq} – равновесная плотность паров примеси у поверхности капли, кг/м³; T_d – температура капли, К.

В отношении аммиака, отличающегося хорошей растворимостью в воде, приближенное аналитическое интегрирование уравнения (11) дает возможность расчета массы аммиака, поглощенного каплей за время падения (контакта):

$$m_{am}(\tau) \sim \frac{\rho_{am}}{p_1} (1 - \exp[-D_{am}(2 + 0,5 \text{Re}^{0,5})2\pi R p_1 \tau]), \quad (12)$$

$$p_1 = \frac{3}{4\pi R^3} \frac{18a.e.m. \cdot 10^5}{\rho_w H(T_d) k T_d},$$

где ρ_{am} – плотность паров аммиака, кг/м³; D_{am} – коэффициент диффузии молекул аммиака, м²/с; Re – число Рейнольдса; H – постоянная Генри, 1/Па; ρ_w – плотность воды, кг/м³; k – постоянная Больцмана, Дж/К.

Значение коэффициента диффузии молекул аммиака в воздухе D_{am} рассчитывалось по методу Фуллера [7].

В результате расчетов были определены значения массы примеси, поглощенной движущейся водяной каплей, в зависимости от концентрации аммиака и времени падения капли. Применительно к условиям водяных завес, создаваемых рукавными распылителями, показано, что величина их максимальной поглотительной способности не превышает 15 % даже в отношении такой хорошо растворимой в воде примеси, как аммиак.

Для расчета значений концентрации примеси в ветровом потоке использовано уравнение турбулентной диффузии. В трехмерной модели турбулентной диффузии уравнение для числовой плотности $n = n(x, y, z)$ имеет вид

$$u \frac{\partial n}{\partial x} = D_t \frac{\partial^2 n}{\partial y^2} + D_t \frac{\partial^2 n}{\partial z^2}. \quad (13)$$

Ищем частное решения (13) в виде $n(x, y, z) = n(x, z) \exp(-2y^2 W^2)$ и после применения метода Галеркина получаем двухмерное уравнение [8; 9]

$$u(z) \frac{\partial n(x, z)}{\partial x} = D_t \left(\frac{\partial^2 n(x, z)}{\partial z^2} - \frac{4n(x, z)}{W^2} \right), \quad (14)$$

где W – ширина пролива, м.

С использованием данного выражения, с учетом вертикального профиля скорости ветра уравнение турбулентной диффузии решалось с помощью метода прямых [10] в среде Mathcad 14. Были получены значения концентрации примеси, распространяющейся с поверхности пролива в ветровом потоке за его пределами. Сравнение экспериментальных и расчетных данных показало, что область высоких концентраций лучше описывается при решении двухмерного уравнения турбулентной диффузии, а область низких концентраций – при приближенном решении трехмерного уравнения. Принимая во внимание данное обстоятельство, был произведен прогнозный расчет значений глубины фактической зоны

заражения при проливе аммиака и хлора при различных значениях площади пролива S_{st} и скорости ветра при решении трехмерного уравнения турбулентной диффузии (рис. 1).

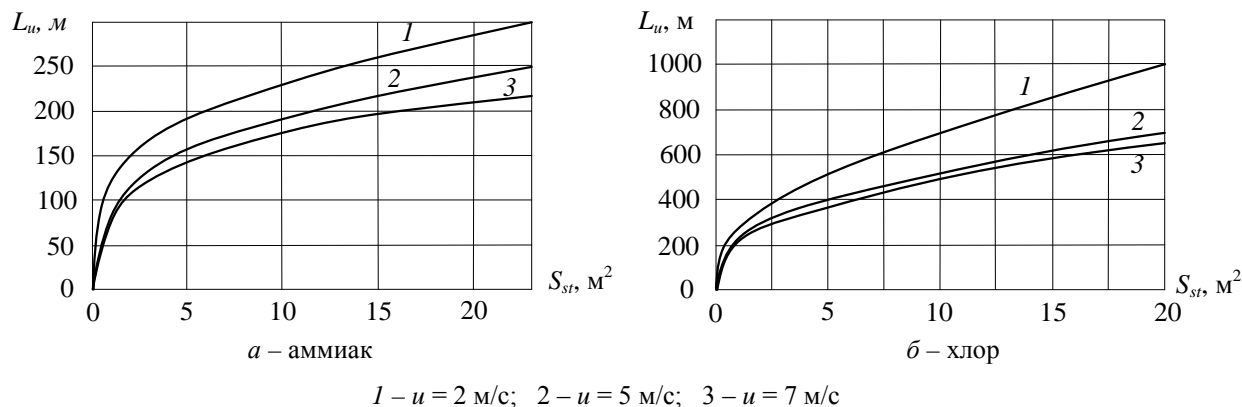


Рисунок 1. – Глубина фактической зоны заражения при свободном распространении примеси

Следующим этапом стало определение параметров фактической зоны заражения, в частности, ее глубины в условиях применения водяных завес. Используя значение ПДК опасной примеси и зная коэффициент пропускания завесы, можно рассчитать изменение величины глубины фактической зоны заражения. Ключевым моментом здесь становится определение коэффициента пропускания завесы.

Коэффициент пропускания зависит от природы примеси, параметров ВЗ и скорости ветра. Величины коэффициента пропускания были установлены в ходе полигонных испытаний [4]. Данные, интересующие нас в этой области, в литературных источниках отсутствуют. Принимая во внимание сложность проведения полномасштабных полигонных испытаний, были получены только данные для определения величины K для случаев проливов аммиака и хлора при значениях площади пролива 1–4 м², скорости ветра 2 и 5 м/с, давления в рукавной линии от 0,3 до 0,9 МПа. Вид экспериментально установленных зависимостей коэффициента пропускания от природы примеси и давления в рукавной линии представлен на рисунке 2. В данном случае использован рукавный распылитель РР (20x0,066x0,5x0,005), здесь: 20 – длина рукава; 0,066 – диаметр рукава; 0,5 – расстояние между соплами; 0,005 – диаметр сопел, м.

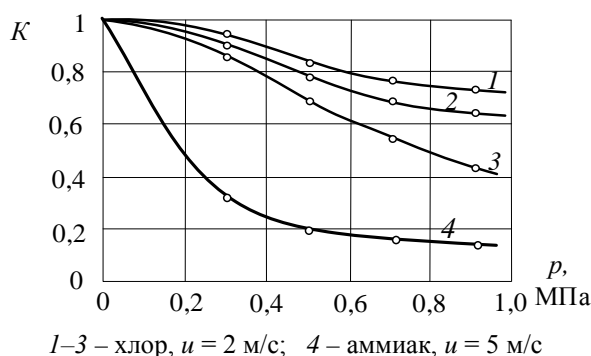


Рисунок 2. – Зависимость коэффициента пропускания от давления в рукавной линии РР (20x0,066x0,5x0,005)

На основе массива полученных экспериментальных данных был произведен расчет значений коэффициента пропускания в широком диапазоне значений скорости ветра, экспериментальные значения для которых получить не представляется возможным. Расчет был выполнен с учетом известной зависимости коэффициента турбулентной диффузии от скорости ветра (3).

На рисунке 3 представлена зависимость коэффициента пропускания завес для случаев аммиака и хлора от скорости ветра при использовании распылителя РР (20х0,066х0,5х0,005), при давлении в рукавной линии 0,5 МПа. Высота завесы 5 м. Расчетные данные соответствуют результатам натуральных испытаний, полученных при скорости ветра 2 и 5 м/с. Характер зависимостей указывает на то, что с увеличением скорости ветра значение коэффициента пропускания растет и, соответственно, снижается эффективность применения завес.

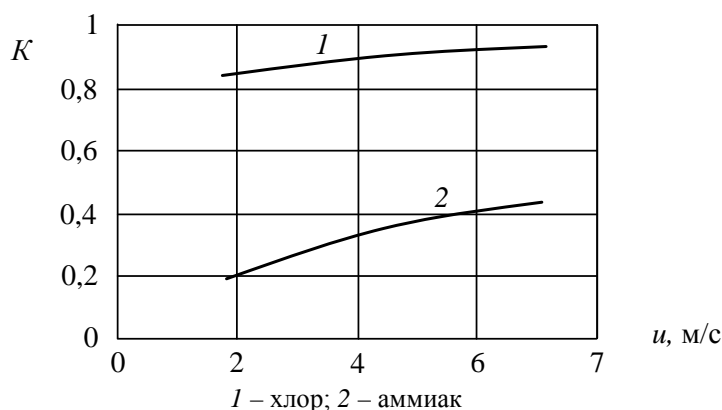


Рисунок 3. – Зависимость коэффициента пропускания завесы от скорости ветра. Распылитель РР (20х0,066х0,5х0,005), $h_{зав} = 5$ м

Коэффициент пропускания завесы используется для расчета глубины фактической зоны заражения в области низких значений концентраций примеси в соответствии с выражением

$$L = K L_0, \quad (15)$$

где L_0 – глубина фактической зоны заражения при свободном распространении примеси, м; L – глубина фактической зоны заражения после постановки водяных завес, м.

Разработанная модель при опоре на знания пропускательной способности завес и параметров фактической зоны заражения при проливах аммиака и хлора с использованием трехмерного уравнения турбулентной диффузии, а также интер- и экстраполяционных оценок позволяет рассчитывать изменения глубины фактической зоны заражения в результате постановки ВЗ с различными параметрами. На рисунке 4 представлены результаты расчета глубины фактической зоны заражения для проливов аммиака и хлора различной площади при скорости ветра 5 м/с, при свободном распространении примеси и использовании рукавного распылителя РР (20х0,066х0,5х0,005), при значении давления воды в распылителе 0,5, 0,7 и 0,9 МПа.

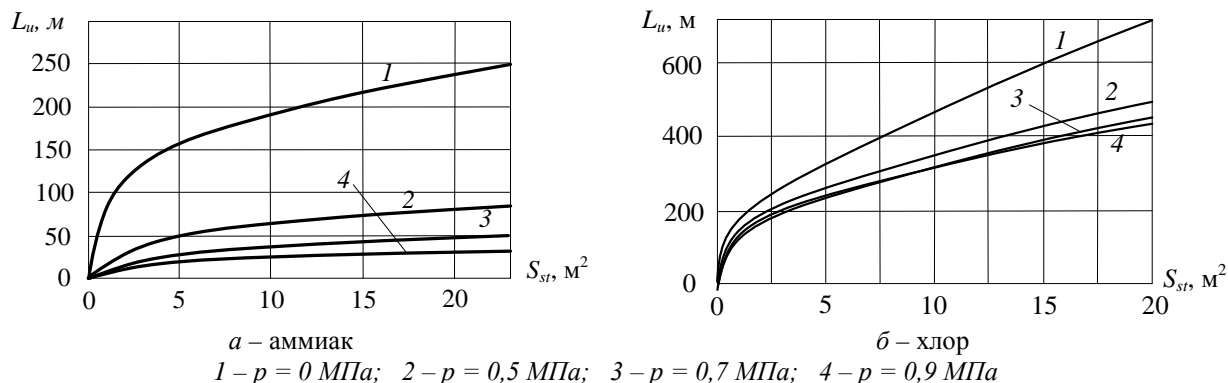


Рисунок 4. – Изменение глубины фактической зоны заражения при постановке завес. Распылитель РР (20х0,066х0,5х0,005), $u = 5$ м/с

Заключение

Разработана полуэмпирическая модель расчета параметров фактической зоны заражения в условиях применения водяных завес, которая базируется на результатах лабораторных исследований, полигонных испытаний и математического моделирования. Моделирование абсорбции газообразной примеси каплями воды и решение трехмерного уравнения турбулентной диффузии позволило осуществить интер- и экстраполяционные оценки процесса распространения примеси для условий, которые не могли быть достигнуты в ходе лабораторных исследований и полигонных испытаний. Полуэмпирическое выражение для расчета числовой плотности примеси дает возможность рассчитывать изменение концентрации примеси в ветровом потоке в результате постановки водяных завес.

Полуэмпирическая модель была применена при разработке нормативных документов в отношении случаев пролива аммиака до 600 м^2 , хлора – до 100 м^2 ; скорости ветра 2, 5, 7 м/с и выше; коэффициента пропускания завес 0,13–0,97.

С учетом интерполяционных оценок полуэмпирическая модель может применяться в отношении большого количества газообразных опасных химических веществ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кузнецов, К.М. Влияние водяной завесы на последствия залпового выброса аммиака / К.М. Кузнецов, А.Д. Галеев, С.И. Поникаров // Вестн. технол. ун-та. – 2015. – Т. 18, № 8. – С. 224–227.
2. Теория турбулентных струй / Г.Н. Абрамович [и др.]; под ред. Г.Н. Абрамовича. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Наука, 1984. – 716 с.
3. Котов, Г.В. Изучение влияния водяных завес на распространение аммиачно-воздушного облака при возникновении чрезвычайных ситуаций / Г.В. Котов, С.П. Фисенко, А.П. Еремин // Обработка информации и управление в чрезвычайных и экстремальных ситуациях: материалы V Междунар. конф., Минск, 24–26 окт. 2006 г. / Нац. акад. наук Беларуси. Объединенный ин-т проблем информатики; ред. А.В. Тузиков. – Минск, 2006. – Т. 1. – С. 68–71.
4. Крайнов, В.П. Качественные методы в физической кинетике и гидрогазодинамике / В.П. Крайнов. – М.: Высш. шк., 1989. – 224 с.
5. Котов, Г.В. Чрезвычайные ситуации с выбросом (проливом) опасных химических веществ: использование завес при ликвидации последствий: монография / Г.В. Котов. – Минск: КИИ, 2015. – 232 с.
6. Fisenko, S.P. Evaporative cooling of water in a mechanical draft cooling tower / S.P. Fisenko, A.A. Brin, A.I. Petruchik // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2004. – Vol. 47, № 1. – P. 165–177.
7. Reid, R.C. The properties of gases and liquids / R.C. Reid, J.M. Prausnitz, B.E. Poling. – New York: McGraw-Hill, 1987. – 741 p.
8. Флетчер, К. Численные методы на основе метода Галеркина / К. Флетчер. – М.: Мир, 1988. – 352 с.
9. Котов, Г.В. Моделирование распространения облака примеси под действием ветра в приземном слое / Г.В. Котов, С.П. Фисенко // Инженер.-физ. журн. – 2011. – Т. 84, № 3. – С. 535–539.
10. Вержбицкий, В.М. Основы численных методов: учеб. пособие / В.М. Вержбицкий. – М.: Высш. шк., 2002. – 840 с.

**Полуэмпирическая модель расчета параметров фактической
зоны заражения при постановке водяных завес**
**Semi-empirical model of calculating the parameters of the actual zone
of contamination when setting up water curtains**

Котов Геннадий Викторович

кандидат химических наук, доцент

Государственное учреждение образования
«Университет гражданской защиты
Министерства по чрезвычайным ситуациям
Республики Беларусь», кафедра
процессов горения и взрыва, доцент

Адрес: ул. Машиностроителей, 25,
220118, г. Минск, Беларусь

e-mail: kotovgv@mail.ru

ORCID: 0000-0001-7364-4403

Gennadiy V. Kotov

PhD in Chemical Sciences, Associate Professor

State Educational Establishment «University
of Civil Protection of the Ministry for Emergency
Situations of the Republic of Belarus»,
Chair of Combustion and Explosion Processes,
Associate Professor

Address: Mashinostroiteley str., 25,
220118, Minsk, Belarus

e-mail: kotovgv@mail.ru

ORCID: 0000-0001-7364-4403

Фисенко Сергей Павлович

доктор физико-математических наук

Институт тепло- и массообмена
имени А.В. Лыкова Национальной академии
наук Беларуси, лаборатория теории переноса,
главный научный сотрудник

Адрес: ул. П. Бровки, 15,
220072, г. Минск, Беларусь

e-mail: fsp@hmti.ac.by

ORCID: 0000-0001-5935-0628

Sergey P. Fisenko

Grand PhD in Physical and Mathematical Sciences

A.V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute
of the National Academy of Sciences of Belarus,
Transfer Theory Laboratory, Chief Researcher

Address: P. Brovki str., 15,
220072, Minsk, Belarus

e-mail: fsp@hmti.ac.by

ORCID: 0000-0001-5935-0628

DOI: <https://doi.org/10.33408/2519-237X.2020.4-4.424>

SEMI-EMPIRICAL MODEL OF CALCULATING THE PARAMETERS OF THE ACTUAL ZONE OF CONTAMINATION WHEN SETTING UP WATER CURTAINS

Kotov G.V., Fisenko S.P.

Purpose. The development of a semi-empirical model of calculating the effect of water curtains on the propagation of hazardous chemical vapors with wind flow from a local source of release (spillage).

Methods. Laboratory studies of the absorption of gaseous impurities by moving water drops. Field tests to determine the parameters of the actual contamination zone in the conditions of ammonia and chlorine spills with free spread of impurities and in the conditions of setting up water curtains. Fuller's method. Galerkin's method. Method of straight lines. Mathematical modeling. Three-dimensional solution of the turbulent diffusion equation. Inter- and extrapolation estimates. Semi-empirical calculations using the results of laboratory research, field tests and mathematical modeling.

Findings. The absorption capacity and transmittance index of water curtains created with the use of a hose spray are calculated in case of the propagation of ammonia and chlorine with a wind flow from the source of emission (spillage). A formula is proposed for calculating the numerical density of the impurity taking into account the transmittance index and fractional impurities not absorbed by the water curtain. The boundaries of the actual contamination zone were determined with the free spread of ammonia and chlorine from the surface of the strait and under the conditions of setting up water curtains. A method is proposed for calculating the depth of the actual contamination zone using the curtain transmittance. A semi-empirical model has been developed for calculating the effect of water curtains on the propagation of hazardous chemical vapors with a wind flow from a local source of release (spillage).

Application field of research. Prediction of the parameters of the actual contamination zone during the release (spillage) of a hazardous chemical during the rescue operations.

Keywords: hazardous chemical substance, spillage, contamination zone, water curtain, semi-empirical calculation model.

(The date of submitting: October 27, 2020)

REFERENCES

1. Kuznetsov K.M., Galeev A.D., Ponikarov S.I. Vliyanie vodyanoy zavesy na posledstviya zalpovogo vybrosa ammiaka [Influence of a water curtain on the consequences of a bulk emission of ammonia]. *Vestnik tekhnologicheskogo universiteta*, 2015. Vol. 18, No. 8. Pp. 224–227. (rus)
2. Abramovich G.N. [et al.] *Teoriya turbulentnykh struy* [The theory of turbulent jets]. 2-nd ed. Moscow: Nauka, 1984. 716 p. (rus)
3. Kotov G.V., Fisenko S.P., Eremin A.P. Izuchenie vliyaniya vodyanykh zaves na rasprostranenie ammiachno-vozdushnogo oblaka pri vozniknovenii chrezvychaynykh situatsiy [Study of the effect of water curtains on the spread of an ammonia-air cloud in case of emergency]. *Proc. V Intern. scientific-practical conf. «Obrabotka informatsii i upravlenie v chrezvychaynykh i ekstremal'nykh situatsiyakh»*, Minsk, October 24–26, 2006. Joint Institute for Informatics Problems of the National Academy of Sciences of Belarus. Minsk, 2006. Vol. 1. Pp. 68–71. (rus)
4. Krainov V.P. *Kachestvennye metody v fizicheskoy kinetike i gidrogazodinamike* [Qualitative methods in physical kinetics and fluid dynamics]. Moscow: Vysshaya shkola, 1989. 224 p. (rus)
5. Kotov G.V. *Chrezvychaynye situatsii s vybrosom (prolivom) opasnykh khimicheskikh veshchestv: ispol'zovanie zaves pri likvidatsii posledstviy* [Emergency situations with the release (spillage) of hazardous chemicals: the use of curtains in the elimination of consequences]: monograph. – Minsk: Institute for Command Engineers of the MES of the Republic of Belarus, 2015. 232 p. (rus)
6. Fisenko S.P., Brin A.A., Petrushik A.I. Evaporative cooling of water in a mechanical draft cooling tower. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2004. Vol. 47, No. 1. Pp. 165–177.
7. Reid R.C., Prausnitz J.M., Poling B.E. *The properties of gases and liquids*. New York: McGraw-Hill, 1987. 741 p.
8. Fletcher K. *Chislennyye metody na osnove metoda Galerkina* [Numerical methods based on the Galerkin method]. Moscow: Mir, 1988. 352 p. (rus)
9. Kotov G.V., Fisenko S.P. Modelirovanie rasprostraneniya oblaka primesi pod deystviem vetra v prizemnom sloe [Modeling of impurity cloud propagation under the action of wind in the ground layer]. *J. Eng. Ph. end Thermophys*, 2011. Vol. 84, No. 3. Pp. 579–584. (rus)
10. Verzhbitskiy V.M. *Osnovy chislennykh metodov* [Basics Numerical Method]: tutorial. Moscow: Vysshaya shkola, 2002. 840 p. (rus)