

DOI: <https://doi.org/10.33408/2519-237X.2021.5-2.216>

УДК 614.878:519.6

КОНЦЕПЦИЯ ПРИМЕНЕНИЯ ВОДЯНЫХ ЗАВЕС ПРИ ЛИКВИДАЦИИ ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЙ С ВЫБРОСОМ ОПАСНЫХ ХИМИЧЕСКИХ ВЕЩЕСТВ

Котов Г.В.

Цель. Разработка научных основ и технологии ликвидации чрезвычайных ситуаций с выбросом опасных химических веществ.

Методы. Лабораторные исследования, натурные и полигонные испытания, математическое моделирование.

Результаты. Определена поглощательная способность аммиака и хлора отдельными движущимися водяными каплями и их массивом в объеме завес. Определены параметры фактической зоны заражения при проливах аммиака и хлора в условиях свободного распространения примеси и при постановке водяных завес. Определен механизм влияния водяных завес на распространение газообразной примеси с ветровым потоком. Предложены оптимальные распылители для создания завес, описана тактика их применения и методика расчета требуемого количества сил и средств.

Область применения исследований. Планирование и проведение аварийно-спасательных работ при ликвидации чрезвычайных ситуаций с выбросом опасных химических веществ. Определение способов создания и тактики применения водяных завес. Оценка эффективности применения водяных завес. Расчет требуемого количества сил и средств.

Ключевые слова: опасное химическое вещество, выброс, ликвидация чрезвычайной ситуации, водяная завеса.

(Поступила в редакцию 24 марта 2021 г.)

Введение

В условиях чрезвычайной ситуации (ЧС) с выбросом опасного химического вещества (ОХВ) наибольшую угрозу здоровью и жизни людей представляет распространение от источника выброса газообразных опасных веществ под действием ветра. Основным способом ограничения распространения опасной примеси с ветровым потоком в ходе аварийно-спасательных работ при ЛЧС является постановка водяных завес (ВЗ).

Широкое применение ВЗ обусловлено рядом существенных преимуществ, важнейшими из которых являются мобильность, использование технических средств, имеющих на вооружении подразделений по ликвидации чрезвычайных ситуаций (ЛЧС), доступных расходных материалов и высокая эффективность.

Вместе с тем проблема разработки и внедрения научно обоснованных рекомендаций по способам создания и тактике использования завес остается актуальной. Для решения этой проблемы необходимы знание особенностей влияния ВЗ на распространение потока примеси, разработка технических средств для создания завес и тактики их применения.

В результате проведенных исследований разработана и проверена в условиях полигонных испытаний концепция применения водяных завес при ЛЧС с выбросом ОХВ. В рамках концепции разработаны научные основы применения водяных завес и технология ликвидации чрезвычайных ситуаций такого типа. Концепция включает:

прогнозирование параметров фактической зоны заражения (ФЗЗ) при свободном распространении ОХВ и в условиях применения ВЗ с учетом природы ОХВ, площади пролива жидкости (интенсивности газообразного выброса), скорости ветра, параметров ВЗ;

выбор распылителей для создания завес и определение оптимального режима их работы;

способы постановки завес и тактику их применения;

расчет требуемого количества сил и средств.

Основная часть

Разработка научно обоснованной концепции применения ВЗ при ЛЧС с выбросом ОХВ осуществлялась в ходе решение задач, связанных с получением экспериментальных данных об абсорбционной активности движущихся водяных капель; параметрах завес, создаваемых распылителями различного типа; формировании фактической зоны заражения при проливах аммиака и хлора в условиях свободного распространения примеси и при постановке ВЗ.

Принимая во внимание ограниченные возможности экспериментальных исследований, в частности при проведении полномасштабных полигонных испытаний, использовались методы математического моделирования процессов: абсорбции газообразной примеси движущимися водяными каплями; формирования потока примеси над поверхностью жидкого пролива; распространения примеси за пределами пролива с потоком воздуха; формирования фактической зоны заражения; влияния завес на распространение потока примеси.

В рамках концепции разработана технология ЛЧС с применением ВЗ, определяющая решение вопросов создания и применения устройств для постановки завес; разработки схем постановки завес с учетом особенностей выброса (пролива), учета метеоусловий и условий ведения аварийно-спасательных работ (АСР); разработки системы оценки эффективности применения завес; разработки методики расчета сил и средств, необходимых для постановки и обеспечения работы завес.

На первом этапе работ была дана принципиальная оценка обеззараживающего действия водяных завес. Существует два мнения по данному вопросу. Первое предполагает, что определяющее влияние на снижение концентрации примеси оказывают абсорбционные процессы. Второе – определяющее влияние оказывает механическое рассеивание примеси. При этом следует отметить, что, если решающим оказывается влияние абсорбционных процессов, концепция должна включать применение абсорбирующих растворов.

Для решения данного вопроса были разработаны методики и создана лабораторная установка для исследования процесса абсорбции газов движущимися водяными каплями. В качестве объектов исследований были выбраны аммиак и хлор – вещества, проявляющие противоположные свойства с учетом растворимости в воде и плотности паров [1; 2].

В ходе проведенных исследований установлено, что, несмотря на увеличение с ростом концентрации и расхода газовой-воздушного потока, омывающего движущиеся водяные капли, концентрации образующегося раствора, абсорбционная активность водяных капель падает. При этом для аммиака наблюдается прямо пропорциональная зависимость концентрации образующегося раствора от массы капель. Для хлора концентрация образующегося раствора от массы капель не зависит.

Для количественной оценки абсорбционной активности движущихся водяных капель использована величина поглотительной способности a , определяемая как отношение расхода примеси, переходящей в жидкую среду при движении капли в газовой-воздушной среде, к начальному значению расхода примеси на входе в активную зону [1]:

$$a = q_{im1} / q_{im0}, \quad (1)$$

где q_{im0} – расход примеси на входе в активную зону, мг/с; q_{im1} – расход примеси, переходящей в жидкую среду, мг/с.

На рисунке 1а представлен экспериментально установленный характер зависимости поглотительной способности аммиака движущимися водяными каплями (на примере капель массой $m_w = 0,0356$ г) от расхода аммиачно-воздушной смеси и концентрации в ней аммиака. Увеличение расхода и концентрации аммиачно-воздушной смеси сопровождается ростом содержания аммиака в водной фазе, в то же время происходит уменьшение доли абсорбированной примеси.

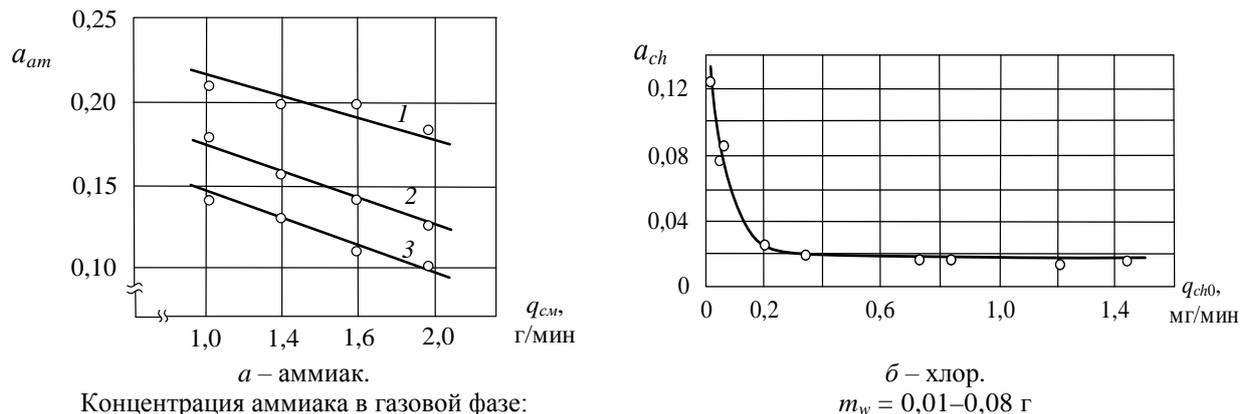


Рисунок 1. – Зависимость поглощательной способности водяных капель от расхода

Данные о поглощательной способности движущихся водяных капель по отношению к хлору α_{ch} в соответствии с выражением (1) отражены на рисунке 1б. Здесь проиллюстрирован характер изменения поглощательной способности от содержания хлора во встречном воздушном потоке (его расхода). Видно, что поглощательная способность водяных капель по отношению к хлору в области малых концентраций достаточно высока ($\alpha_{ch} \approx 0,03-0,12$) При увеличении расхода хлора во встречном потоке до 0,2 мг/мин (соответствует значению концентрации примеси 10 мг/м³) поглощательная способность капель снижается и, достигнув значения порядка 0,015, далее остается постоянной. Таким образом, в условиях эксперимента в достаточно устойчивый водный раствор может быть переведено порядка 1,5 % массы хлора, содержащегося в газозвудушном потоке.

Поглощательная способность движущихся водяных капель от их массы по отношению к хлору в условиях эксперимента практически не зависит.

Принимая во внимание неоднозначность полученных экспериментальных данных, было выполнено математическое моделирование абсорбции газов движущимися водяными каплями. Математическая модель представляет собой нелинейную систему обыкновенных дифференциальных уравнений с переменными коэффициентами. При математическом моделировании учтено испарительное охлаждение капель, изменение горизонтального и вертикального положений капли, изменение скорости движения сферических капель под действием силы сопротивления и силы тяжести, абсорбция и теплообмен с воздухом. В ходе математического моделирования подтвержден экспериментально установленный характер зависимости поглощательной способности движущихся капель от параметров газозвудушной смеси.

Для расчета максимального количества аммиака, которое может быть поглощено движущейся водяной каплей, использовано выражение (2), полученное на основе [3]:

$$m_{\max} = 10^{-5} \frac{4\pi R^3 \rho_w \rho_{am} H(T_d) k T_d}{3 \cdot 18 \text{ а.е.м.}}, \quad (2)$$

где R – радиус капли, м; ρ_w – плотность воды, кг/м³; ρ_{am} – плотность паров аммиака в воздушной смеси, кг/м³; H – постоянная Генри, 1/Па; k – постоянная Больцмана, Дж/К; а. е. м. – атомная единица массы, кг; T_d – температура капли, К.

С использованием полученных результатов рассчитана поглощательная способность массива движущихся водяных капель в условиях водяных завес. Для примеси, хорошо растворимой в воде, величина поглощательной способности завес достаточно высока и может достигать $A_w = 0,15$ [1].

Таким образом, на основе полученных данных можно сделать вывод, что при оценке влияния водяных завес на распространение потока примеси, плохо растворимой в воде, такой как хлор или пары углеводородных топлив, их абсорбционной активностью можно пренебречь. Высокая растворимость в воде газообразной примеси, такой как аммиак, оксиды азота и серы, летучие кислоты и пр., способствует абсорбционной активности водяных капель, но не будет иметь решающего значения.

Полученные результаты о сравнительно низкой поглощательной способности завес прямо указывают на то, что определяющее влияние в обеззараживающее действие ВЗ вносят процессы рассеивания примеси в атмосфере.

Процесс взаимодействия потока примеси и водяной завесы носит достаточно сложный характер. На рисунке 2 проиллюстрированы особенности такого взаимодействия.

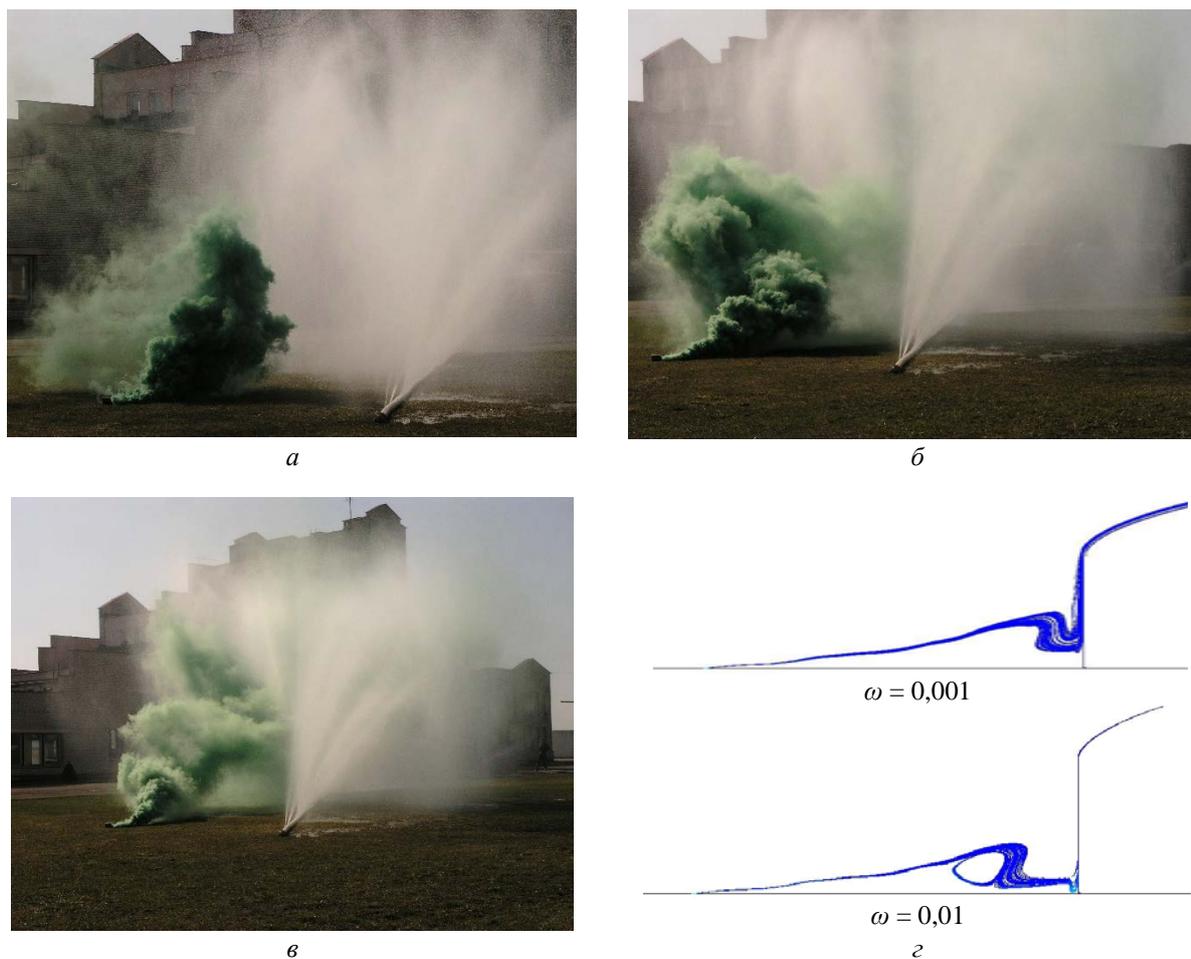
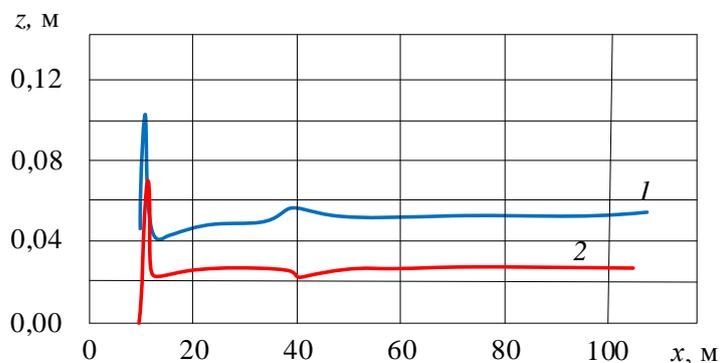


Рисунок 2. – Взаимодействие потока примеси с водяной завесой

Поток примеси, достигая области завесы, воспринимает ее как некое препятствие, поток тормозится перед завесой, и в этой области наблюдается скапливание примеси (рис. 2а). Далее происходит отрыв потока примеси от поверхности почвы и ее частичное проникновение сквозь объем завесы (рис. 2б). На рисунке 2в можно видеть вовлечение потока примеси в восходящее течение. Иллюстрации, представленные на рисунках 2б и 2в, указывают на проникновение потока примеси сквозь объем завесы.

Оценка механизма влияния ВЗ на распространение примеси в ветровом потоке от локального источника выброса (пролива) осуществлялась по результатам расчета с применением программного комплекса ANSYS 14.0 [4]. ВЗ моделировались как препятствия в виде твердой перегородки с определенной пористостью, перегородки с подвижной поверхностью, а также водяной струи.

На рисунке 3 представлены изолинии объемной концентрации ($\varphi = 0,01$) тяжелой примеси при ее свободном распространении (кривая 1) и при наличии препятствия на пути распространения в виде пористой перегородки (кривая 2). Величина пористости перегородки составляет 50 %. Мощность источника примеси $q = 0,006 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$, z – высота над поверхностью почвы, м [5].



1 – при свободном распространении примеси; 2 – при наличии пористой перегородки

Рисунок 3. – Изолинии концентрации примеси над поверхностью почвы

После прохождения потоком примеси пористой перегородки наблюдается значительное увеличение высоты слоя, в котором распространяется примесь. В данном случае происходит не просто затрудненное проникновение потока сквозь препятствие, а имеет место его рассеивание. Следствием такого рассеивания становится выравнивание значений концентрации примеси по высоте.

Наличие пористой перегородки на пути движения потока увеличивает высоту слоя примеси и способствует ее накоплению перед перегородкой. Имеет место пропорциональная зависимость пористости перегородки и концентрации примеси позади завесы, при значении пористости перегородки 50 % наблюдается снижение концентрации примеси в 2–3 раза.

Наблюдаемый эффект отрыва потока от поверхности почвы и вовлечения его в восходящее спутное течение подтвержден результатами расчета. На рисунке 2г представлены результаты расчета концентрации примеси в области влияния перегородки с поверхностью, движущейся в вертикальном направлении. Отчетливо прослеживаются области, соответствующие изменению траектории потока, его торможению, а также захвату примеси и вовлечению ее в спутное течение (изолинии с массовой долей примеси $\omega = 0,001$). Характер изолиний $\omega = 0,01$ четко указывает на вихреобразование в области перед перегородкой. Это также можно заметить на рисунках 2б и 2в по характерному закруглению потока перед завесой. Высота подъема примеси пропорциональна скорости движения поверхности перегородки.

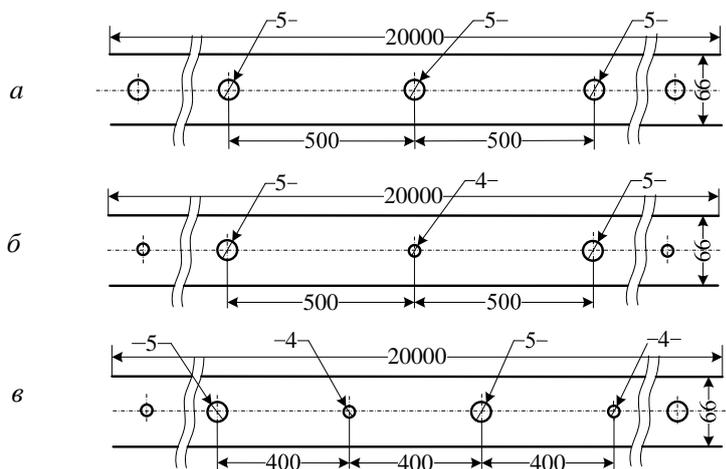
Наибольшую интенсивность влияния на распространяющийся поток примеси показали случаи применения вертикальной перегородки в виде водяной струи. Полученные результаты свидетельствуют о том, что водяная струя обеспечивает подъем примеси на высоту порядка 4–6 величин высоты струи [1].

По результатам проведенных исследований механизм влияния завес на распространяющийся поток примеси определен как совокупность проявлений их абсорбционной активности, ограниченной проницаемости и вовлечения примеси в спутное течение за завесой. Установлено, что абсорбционная активность ВЗ при условии хорошей растворимости примеси в воде может обеспечивать ее связывание до 15 %. Ограничение проницаемости при пористости перегородки не менее 50 % позволяет снизить концентрацию примеси в 2–3 раза за счет увеличения высоты слоя ее распространения. Вовлечение примеси в спутное течение сопровождается ее подъемом над поверхностью почвы на высоту, соответствующую 4–6

значениям высоты струи. Основным каналом рассеивания является подъем примеси над поверхностью почвы, что приводит к росту турбулентного перемешивания с воздухом, связанного с увеличением скорости ветра по высоте.

Распылитель, применяемый для постановки завесы, должен соответствовать ряду требований, важнейшими из которых являются надежность, простота применения и эффективность. Анализ использования различных устройств для постановки ВЗ с учетом особенностей их применения в условиях ЛЧС с выбросом ОХВ указывает на преимущественное использование рукавных распылителей (РР).

Применение рукавных распылителей позволяет обеспечить оптимальное соотношение между требуемым расходом воды и параметрами формируемой завесы и, как результат, эффективное влияние на распространяющееся зараженное облако. Данные, полученные в ходе натурных испытаний о параметрах водяных завес, создаваемых рукавными распылителями различной конструкции, позволили сделать вывод, что при ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций, связанных с выбросом опасных веществ низкой плотности, таких как аммиак, оксиды азота, циановодород и т.п., наиболее эффективно применение рукавного распылителя, соответствующего формуле $РР(20 \times 0,066 \times 0,5 \times 0,005)$ (20 – длина, 0,066 – диаметр рукава; 0,5 – расстояние между соплами; 0,005 – диаметр сопел, м) [6]. Схема такого распылителя представлена на рисунке 4а.



а – $РР(20 \times 0,066 \times 0,5 \times 0,005)$; б – $РР(20 \times 0,066 \times 0,5 \times 0,004(0,005))$; в – $РР(20 \times 0,066 \times 0,4 \times 0,004(0,005))$

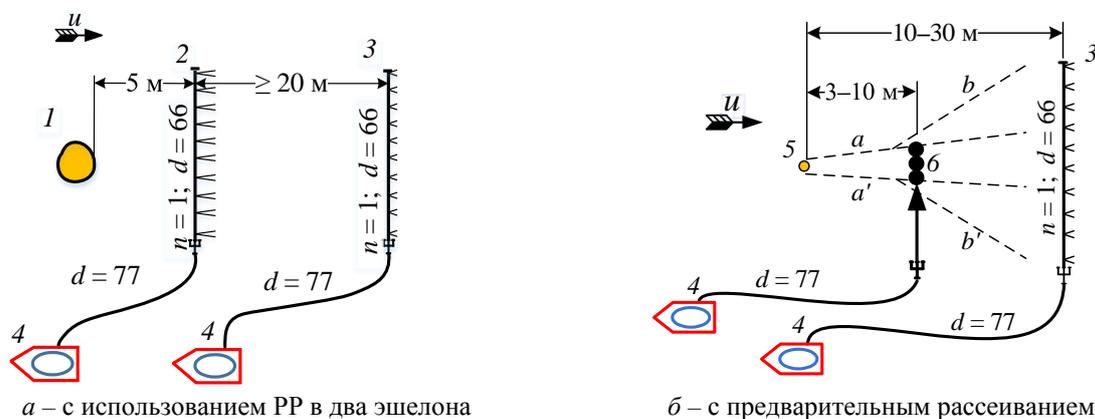
Рисунок 4. – Схемы конструкций рукавного распылителя (размеры в мм)

При выбросе паров ОХВ большой плотности, таких как хлор (пары углеводородного топлива и т.п.), водяная завеса, создаваемая этим РР, оказывает недостаточное воздействие на набегающий воздушный поток в своей нижней части, на высоте менее 1 м. В целях обеспечения большей однородности создаваемой завесы по высоте в конструкцию РР внесены изменения. Предложены комбинированные распылители, имеющие чередующиеся сопла диаметром 4 и 5 мм ($РР(20 \times 0,066 \times 0,5 \times 0,004(0,005))$) (рис. 4б), а также с уменьшенным расстоянием между ними $РР(20 \times 0,066 \times 0,4 \times 0,004(0,005))$ (рис. 4в), позволяющие создавать завесу с большей плотностью в нижней части ее объема.

Постановка завес может осуществляться по различным схемам: круговой, линейной, перпендикулярно и под углом к направлению потока примеси, с вертикальными и наклонными струями, с использованием точечных и рукавных распылителей, комбинированных, в один и несколько эшелонов, с использованием резервной линии [7–9].

Выбор схемы постановки ВЗ определяется природой опасного вещества и объемом выброса, расположением источника выброса, метеоусловиями, характером местности, наличием необходимых сил и средств.

Наибольшее распространение получили линейные схемы, применяемые при достаточно разреженных потоках примеси и скорости ветра 2–7 м/с. Такие завесы ставятся, как правило, с использованием рукавных распылителей, вертикально или наклонно, в один или несколько эшелонов. На рисунке 5а, представлена схема постановки ВЗ в два эшелона, при этом первая завеса установлена наклонно. Скорость ветра $u = 7$ м/с. Наклонная завеса создается при повороте РР по продольной оси на 30–40° по ветру.



а – с использованием РР в два эшелона

б – с предварительным рассеиванием

1 – пролив; 2 – наклонная завеса; 3 – вертикальная завеса; 4 – пожарный автомобиль;

5 – компактный источник выброса; 6 – распылительный ствол

Рисунок 5. – Схема постановки водяной завесы (размеры в мм)

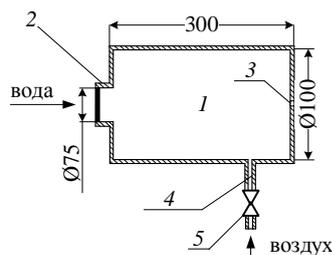
В случаях, когда от источника выброса распространяется достаточно компактный поток с высокой плотностью примеси, используется предварительное рассеивание. Для предварительного рассеивания используются различные пожарные стволы (щелевые распылители, распылительные стволы, а также различные насадки на ручные и лафетные стволы и пр.), установленные в ветровом потоке вблизи источника выброса на расстоянии от 3 до 10 м (рис. 5б). Распылительный ствол устанавливается таким образом, чтобы обеспечить формирование восходящих и горизонтальных струй.

Поток зараженного воздуха с высокой концентрацией примеси, ограниченный на схеме пунктирными линиями a и a' , достигая области завесы, создаваемой распылительным стволом b (точечным распылителем), испытывает интенсивное турбулентное воздействие. В результате происходит расширение потока (на схеме ограничено пунктирами b и b'). Предварительно расширенный сектор распространения потока примеси более эффективно может быть перекрыт завесой, создаваемой рукавным распылителем 3. Расстояние до места прокладки рукавного распылителя в этом случае может составлять от 10 до 30 м.

Для предварительного рассеивания рекомендуется использовать распылители нового класса – гетерофазные распылители импульсного действия (РИД). Распылитель данного класса не имеет движущихся частей и совмещает рабочий объем с ресиверной частью (рис. 6а). Работает РИД при одновременной подаче в объем распылителя 1 жидкости и сжатого воздуха. Импульсное истечение струй происходит при неравномерном выпуске водовоздушной смеси через сопла 3 в результате периодического перекрывания сопла потоком воды. При этом увеличивается энергия истекающих струй и интенсивность турбулентного воздействия.

На рисунках 6б и 6в проиллюстрирована работа РИД, установленного на лафетный ствол П-20 [10]. Подача воздуха в объем распылителя сопровождается значительным увеличением степени дисперсности капель и длины струи.

Гетерофазные распылители импульсного действия могут включаться в состав мобильных и стационарных устройств для создания плоских, объемных, горизонтальных, вертикальных и наклонных ВЗ.



а – схема распылителя:
 1 – корпус; 2 – резьбовая часть;
 3 – сопла; 4 – штуцер;
 5 – предохранительный клапан



б – работа распылителя
 без подачи воздуха



в – работа распылителя
 с подачей воздуха,
 $p_a = 0,9 \text{ МПа}$

Рисунок 6. – Гетерофазный распылитель импульсного действия

Оценка эффективности применения завес производится на основе изменения параметров ФЗЗ. Для этого используются значения концентрации опасной примеси либо глубины фактической зоны заражения (ГФЗЗ), в частности отношение этих величин, достигнутых в результате применения ВЗ, к исходным значениям:

$$C/C_0 = K, \quad (3)$$

$$L/L_0 = K, \quad (4)$$

где C_0 – концентрация примеси при ее свободном распространении, мг/м^3 ; C – концентрация примеси после постановки завесы, мг/м^3 ; L_0 – ГФЗЗ при свободном распространении примеси, м; L – ГФЗЗ после постановки завесы, м; K – коэффициент пропускания завесы.

Выражение (4) используется в области низких значений концентрации примеси для оценки изменения величины ГФЗЗ. Выражение (3) используется в области высоких и средних значений концентрации примеси для оценки изменения концентрации опасного вещества.

При постановке ВЗ в несколько эшелонов прогнозируемые значения ГФЗЗ и концентрации опасной примеси определяются как:

$$L = K^N L_0, \quad (5)$$

$$C = K^N C_0, \quad (6)$$

где N – количество эшелонов водяных завес.

Значение коэффициента пропускания завесы определяется по результатам полигонных испытаний. Принимая во внимание сложность проведения полномасштабных полигонных испытаний, определение коэффициента пропускания в широком интервале значений скорости ветра осуществлено расчетным методом в рамках разработанной полуэмпирической модели расчета параметров зоны заражения в условиях применения завес [11].

Коэффициент пропускания завесы является важнейшей характеристикой завесы и зависит от природы примеси, скорости ветра и параметров ВЗ. Значения параметров завесы, создаваемой рукавным распылителем РР(20×0,066×0,5×0,005), определенные в ходе полигонных испытаний, и соответствующие им коэффициенты пропускания, определенные экспериментально и с применением полуэмпирической модели расчета, представлены в таблице 1.

Полуэмпирическая модель расчета параметров ФЗЗ является ключевым моментом концепции применения ВЗ. Решить проблему оценки влияния ВЗ на концентрацию опасной примеси в ветровом потоке, распространяющемся от источника выброса, теоретически не представляется возможным. Результаты расчетов, полученные с применением распределения Гаусса, программного комплекса ANSYS 14.0, а также решений двух- и трехмерного

уравнений турбулентной диффузии согласуются с экспериментальными данными только в определенных областях значений концентрации примеси.

Таблица 1. – Параметры завесы, создаваемой РР(20×0,066×0,5×0,005), и значения коэффициента пропускания

Высота завесы, м	Давление на насосе, МПа	Расход воды, дм ³ /с	ОХВ	Коэффициент пропускания при скорости ветра		
				2 м/с	5 м/с	7 м/с
4,5	0,3	7	Аммиак	0,32	0,59	0,67
5	0,5	9		0,20	0,38	0,43
5,5	0,7	11		0,15	0,28	0,32
6	0,9	12,5		0,13	0,25	0,28
4,5	0,3	7	Хлор	0,93	0,96	0,97
5	0,5	9		0,85	0,91	0,93
5,5	0,7	11		0,78	0,87	0,90
6	0,9	12,5		0,74	0,84	0,88

В основе разработанной полуэмпирической модели расчета параметров ФЗЗ лежат результаты проведенных полигонных испытаний по определению параметров зоны заражения при проливах аммиака и хлора при свободном распространении примеси с ветровым потоком и в условиях применения ВЗ. В ходе испытаний были определены параметры ФЗЗ при различных режимах работы распылителей при значениях площади пролива 0,3–4 м², скорости ветра 2 и 5 м/с, в условиях различных схем постановки завес.

На рисунке 6 представлены установленные зависимости концентрации примеси при ее свободном распространении (кривая 1) и в условиях постановки ВЗ (кривая 2). Рисунок 6а иллюстрирует изменение концентрации примеси в условиях пролива аммиака площадью 4 м², скорости ветра 5 м/с, на высоте 1,5 м при использовании распылителя РР(20×0,066×0,5×0,005). Давление в рукавной линии 0,5 МПа. Рисунок 6б иллюстрирует изменение концентрации примеси в условиях пролива хлора площадью 0,3 м², скорости ветра 2 м/с, на высоте 0,5 м, при использовании распылителя РР(20×0,066×0,5×0,006), при давлении в рукавной линии 0,8 МПа.

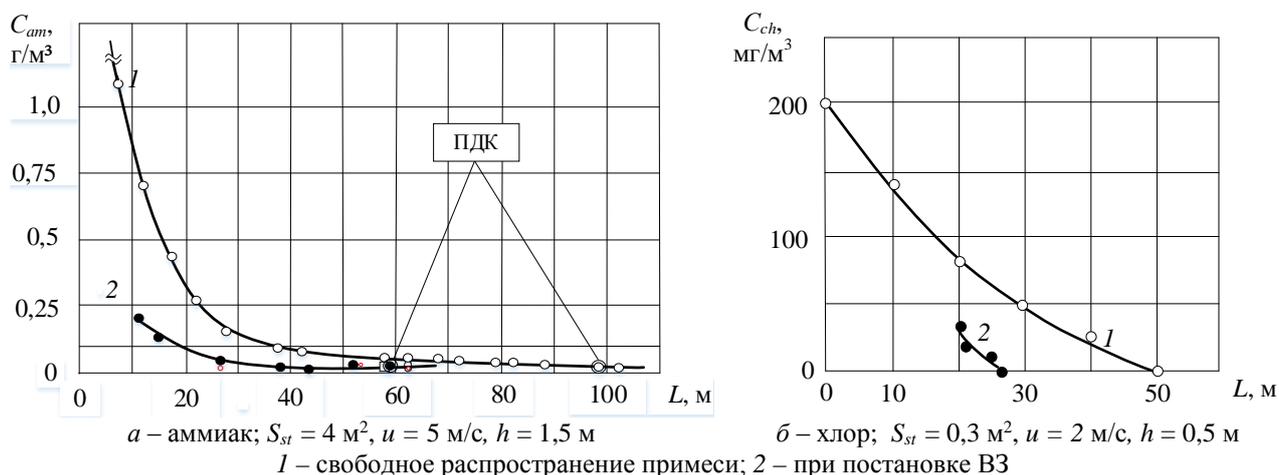


Рисунок 6. – Концентрация примеси на расстоянии L от границы пролива

Полученные в условиях полигонных испытаний данные свидетельствуют о высокой эффективности применения ВЗ. Установлено, что решающее влияние на эффективность воздействия ВЗ на распространение потока примеси оказывают параметры завесы, связанные с расходом воды. Полученные данные были использованы при верификации различных методов расчета параметров зоны заражения, а также интер- и экстраполяционных оценок в рамках разработанной полуэмпирической модели расчета.

В основе расчета концентрации примеси, распространяющейся от источника выброса, лежит определение ее концентрации как функции длины пролива низкокипящей жидкости, высоты слоя примеси над поверхностью почвы, геометрических размеров затопленного следа и коэффициента пропускания [11–14]:

$$n = f(d, h, S_L, K), \quad (7)$$

где n – концентрация примеси (числовая плотность), м^{-3} ; d – длина пролива, м; h – высота слоя примеси, м; S_L – площадь поперечного сечения следа на расстоянии L , м^2 .

Данный метод расчета опирается на результаты, полученные в ходе полигонных испытаний [1].

Полуэмпирическая модель может применяться в отношении большого количества газообразных опасных химических веществ, отличающихся как по плотности паров, так и по растворимости в воде. Кроме того, для расчета параметров ФЗЗ в условиях постановки ВЗ могут применяться различные современные программы экспресс-расчета. Как правило, в них учитывается характер поверхности, над которой происходит распространение потока примеси. С применением полуэмпирической модели может быть определена величина так называемого локального коэффициента шероховатости поверхности:

$$\delta^* = \delta/K, \quad (8)$$

где δ – коэффициент шероховатости поверхности, м; δ^* – коэффициент шероховатости поверхности в области действия завесы, м.

Дело в том, что существует определенная связь между коэффициентом шероховатости поверхности и его изменением в условиях применения ВЗ. При постановке ВЗ происходит изменение местных условий, что может быть охарактеризовано как трансформация значений коэффициента шероховатости δ к локальному значению δ^* . Исходные и локальные значения коэффициента связаны между собой посредством величины K .

Знание величины K , соответствующей определенным значениям плотности и растворимости газообразного опасного вещества, скорости ветра и параметрам завесы, позволит использовать большинство известных методик расчета параметров зоны заражения в отношении широкого круга веществ в условиях ведения аварийно-спасательных работ с постановкой ВЗ.

В основе расчета количества сил и средств, необходимых для постановки ВЗ, лежит величина расхода воды Q_w для обеспечения работы завес. Величина Q_w определяется с учетом расхода воды используемыми распылителями:

$$Q_w = \sum_{i=1}^n q_{wi}, \quad (9)$$

где Q_w – общий расход воды, $\text{дм}^3/\text{с}$; q_{wi} – расход воды отдельных распылителей, $\text{дм}^3/\text{с}$.

Требуемое количество распылителей с учетом длины завесы, создаваемой каждым из них, и выбранной схемы постановки завес определяется на основе величины эффективной длины завесы l_{eff} . Например, в случае РР эффективная длина завесы определяется как

$$l_{eff} = N_p l_p + h_{зав}, \quad (10)$$

где N_p – количество рукавных распылителей в линии; l_p – длина РР, м; $h_{зав}$ – высота завесы, м. При этом ширина фронта распространения примеси должна быть меньше величины l_{eff} .

Расход воды определяет количество пожарных аварийно-спасательных автомобилей (пожарных насосов) для постановки водяных завес: $N_A = Q_w/Q_{wA}$. Здесь: N_A – количество пожарных аварийно-спасательных автомобилей; Q_{wA} – расход воды одного пожарного автомобиля (пожарного насоса), $\text{дм}^3/\text{с}$.

На основании количества необходимых технических средств определяется численность личного состава формирований, участвующих в постановке завес: $N_{лс} = N_A \times N_{лс1}$.

Здесь: $N_{лс}$ – численность личного состава формирований, чел.; $N_{лс1}$ – численность личного состава для обеспечения работы одного автомобиля (пожарного насоса), чел.

Время работы завес определяется как продолжительность времени выброса или испарения пролива в соответствии с методикой [15].

Заключение

Концепция базируется на научных основах применения водяных завес и определяет технологию ликвидации чрезвычайных ситуаций с выбросом опасных химических веществ. При разработке концепции использованы результаты лабораторных исследований абсорбционной активности движущихся водяных капель, натурных и полигонных испытаний по определению параметров ВЗ и ФЗЗ в условиях выброса (пролива) аммиака и хлора, а также методы математического моделирования.

Установлено, что определяющее влияние на снижение концентрации примеси ветровом потоке в условиях применения ВЗ оказывает ее рассеивание.

Влияние завес на распространяющийся поток примеси определяется совокупностью их абсорбционной активности, проницаемости и вовлечения примеси в спутное течение за завесой. Основным каналом рассеивания является подъем примеси над поверхностью почвы, что приводит к росту турбулентного перемешивания с воздухом, связанного с увеличением скорости ветра по высоте.

Расчет ГФЗЗ осуществляется с использованием полуэмпирической модели, которая позволяет прогнозировать параметры фактической зоны заражения как при свободном распространении опасной примеси, так и в условиях применения водяных завес.

Оценка эффективности применения водяных завес в ходе ведения аварийно-спасательных работ на основе прогноза изменения концентрации опасной примеси и глубины фактической зоны заражения может осуществляться с использованием коэффициента пропускания, определяемого либо в условиях полномасштабных полигонных испытаний, либо с применением разработанной полуэмпирической модели.

Оптимальным при постановке ВЗ признано применение РР. В случаях компактных потоков примеси при высокой интенсивности выброса рекомендуется предварительное рассеивание потока.

В основе расчета сил и средств, необходимых для постановки ВЗ, лежит величина требуемого расхода воды для обеспечения их работы.

Планирование и проведение аварийно-спасательных работ на основе концепции применения водяных завес при ликвидации чрезвычайных ситуаций с выбросом опасных химических веществ дает возможность снижения социально-экономических потерь, связанных с гибелью людей, на 27–99 %.

ЛИТЕРАТУРА

1. 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.
2. Еремин, А.П. Абсорбция аммиака движущимися каплями воды / А.П. Еремин [и др.] // Инженерно-физический журнал. – 2007. – Т. 80, № 3. – С. 36–42.
3. Fisenko, S.P. Evaporative cooling of water in a mechanical draft cooling tower / S.P. Fisenko, A.A. Brin, A.I. Petrushik // Intern. J. of Heat and Mass Transfer. – 2004. – Vol. 47, No. 1. – P. 165–177.
4. ANSYS 14.0. FLUENT UDF Manual [Electronic resource]. – Mode of access: <https://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/html/udf/node93.htm>. – Date of access: 22.03.2021.
5. Котов, Г.В. Закономерности распространения примеси вблизи источника загрязнения / Г.В. Котов, Т.В. Сидорович // Вестник Командно-инженерного института МЧС Республики Беларусь. – 2013. – № 1 (17). – С. 13–23.

6. Котов, Г.В. Создание водяных завес с использованием рукавных распылителей / Г.В. Котов, А.П. Еремин, В.Г. Тищенко // Вестник Командно-инженерного института МЧС Республики Беларусь. – 2007. – № 2 (6). – С. 33–39.
7. Kotov, G.V. Efficiency of Contaminated Air-Flow Dispersion by Water Curtains / G.V. Kotov, S.P. Fisenko // Development in Earth Science. – 2013. – Vol. 1, No. 2. – P. 23–28.
8. Котов, Г.В. Тактика применения водяных завес при ликвидации чрезвычайных ситуаций с выбросом (проливом) опасных химических веществ. Часть 1. Схемы постановки завес / Г.В. Котов // Чрезвычайные ситуации: предупреждение и ликвидация. – 2017. – № 2 (42). – С. 65–73.
9. Котов, Г.В. Тактика применения водяных завес при ликвидации чрезвычайных ситуаций с выбросом (проливом) опасных химических веществ. Часть 2. Прокладка перфорированных линий / Г.В. Котов // Чрезвычайные ситуации: предупреждение и ликвидация. – 2017. – № 2 (42). – С. 74–83.
10. Устройство импульсного действия для создания наклонной водяной завесы: полез. модель ВУ 8650 / Г.В. Котов, А.Д. Булва. – Опубл. 30.10.12.
11. Котов, Г.В. Полуэмпирическая модель расчета параметров фактической зоны заражения при постановке водяных завес / Г.В. Котов, С.П. Фисенко // Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси. – 2020. – Т. 4, № 4. – С. 424–432. DOI: 10.33408/2519-237X.2020.4-4.424.
12. Крайнов, В.П. Качественные методы в физической кинетике и гидрогазодинамике / В.П. Крайнов. – М.: Высш. шк., 1989. – 224 с.
13. Nordin, J. Rapid prediction of chemical cloud dispersion from chemical spill accident / J. Nordin [et al.] // Energy Sources. – 1998. – Vol. 20, No 6. – P. 541–567.
14. Кутателадзе, С.С. Гидродинамика газожидкостных систем / С.С. Кутателадзе, М.А. Стырикович. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергия, 1976. – 296 с.
15. Методика прогнозирования масштабов заражения сильнодействующими ядовитыми веществами при авариях (разрушениях) на химически опасных объектах и транспорте: РД 52.04.253–90: введ. 01.07.90. – Л.: Гидрометеоздат, 1991. – 23 с.

**Концепция применения водяных завес при ликвидации чрезвычайных ситуаций
с выбросом опасных химических веществ**

**The concept of using water curtains at the elimination of emergency situations
with the release of hazardous chemicals**

Котов Геннадий Викторович

кандидат химических наук, доцент

Адрес: ул. Коржа, 10-45,
220036, г. Минск, Беларусь

e-mail: kotovgv@mail.ru

ORCID: 0000-0001-7364-4403

Gennadiy V. Kotov

PhD in Chemical Sciences, Associate Professor

Address: Korzha str., 10-45,
220036, Minsk, Belarus

e-mail: kotovgv@mail.ru

ORCID: 0000-0001-7364-4403

DOI: <https://doi.org/10.33408/2519-237X.2021.5-2.216>

THE CONCEPT OF USING WATER CURTAINS AT THE ELIMINATION OF EMERGENCY SITUATIONS WITH THE RELEASE OF HAZARDOUS CHEMICALS

Kotov G.V.

Purpose. Development of scientific foundations and technologies for liquidation of emergency situations with the release of hazardous chemicals.

Methods. Laboratory research, full-scale and field tests, mathematical modeling.

Findings. The absorption capacity of ammonia and chlorine by separate moving water drops and their mass in the volume of curtains is determined. The parameters of the actual contamination zone during the spills of ammonia and chlorine in the conditions of free spread of impurities and during the installation of water curtains have been determined. The mechanism of the effect of water curtains on the spread of gaseous impurities with the wind flow has been determined. Optimal sprayers for creating curtains are proposed, the tactics of their use and the method of calculating the required number of forces and means are described.

Application field of research. Planning and carrying out emergency rescue operations in response to emergencies with the release of hazardous chemicals. Determination of ways of creating and tactics of using water curtains. Evaluation of the effectiveness of the use of water curtains. Calculation of the required number of forces and means.

Keywords: hazardous chemical, release, emergency response, water curtain.

(The date of submitting: March 24, 2021)

REFERENCES

1. 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: KII, 2015. 232 p. (rus)
2. Eremin A.P., Kotov G.V., Sidorovich T.V., Fisenko S.P. Absorption of ammonia by moving drops of water. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2007. Voll. 80, Iss. 3. Pp. 461–468. (rus). DOI: 10.1007/s10891-007-0061-5.
3. Fisenko S.P., Brin A.A., Petrushik A.I. Evaporative cooling of water in a mechanical draft cooling tower. *Intern. J. of Heat and Mass Transfer*, 2004. Vol. 47, No. 1. Pp. 165–177.
4. *ANSYS 14.0. FLUENT UDF Manual*, available at: <https://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/html/udf/node93.htm> (accessed: March 22, 2021).
5. Kotov G.V., Sidorovich T.V. Zakonomernosti rasprostraneniya primesi vblizi istochnika zagryazneniya [Patterns of impurity propagation near the source of contamination]. *Vestnik Komandno-inzhenernogo instituta MChS Respubliki Belarus'*, 2013. No. 1 (17) Pp. 13–23. (rus)
6. Kotov G.V., Eremin A.P., Tishchenko V.G. Sozdanie vodyanykh zaves s ispol'zovaniem rukavnykh raspyliteley [Creating water curtains using bag sprayers]. *Vestnik Komandno-inzhenernogo instituta MChS Respubliki Belarus'*, 2007. No. 2 (6). Pp. 33–39. (rus)
7. Kotov G.V., Fisenko S.P. Efficiency of Contaminated Air-Flow Dispersion by Water Curtains. *Development in Earth Science*, 2013. Vol. 1, No. 2. Pp. 23–28.
8. Kotov G.V. Taktika primeneniya vodyanykh zaves pri likvidatsii chrezvychaynykh situatsiy s vybrosom (prolivom) opasnykh khimicheskikh veshchestv. Chast' 1. Skhemy postanovki zaves [Tactics of the use of water curtains in the elimination of emergency situations with the release (strait) of dangerous chemicals. Part 1. Schemes of setting curtains]. *Chrezvychaynye situatsii: preduprezhdenie i likvidatsiya*, 2017. No. 2 (42). Pp. 65–73. (rus)
9. Kotov G.V. Taktika primeneniya vodyanykh zaves pri likvidatsii chrezvychaynykh situatsiy s vybrosom (prolivom) opasnykh khimicheskikh veshchestv. Chast' 2. Prokladka perforirovannykh liniy [Tactics of the use of water curtains in emergency situations with the release (strait) of dangerous chemicals. Part 2. Laying of perforated lines]. *Chrezvychaynye situatsii: preduprezhdenie i likvidatsiya*, 2017. No. 2 (42). Pp. 74–83. (rus)

10. Kotov G.V., Bulva A.D. *Ustroystvo impul'snogo deystviya dlya sozdaniya naklonnoy vodyanoy zavesy* [Pulse action device for creating an inclined water curtain]: utility model BY 8650 Published October 30, 2012. (rus)
11. Kotov G.V., Fisenko S.P. Poluempiricheskaya model' rascheta parametrov fakticheskoy zony zarazheniya pri postanovke vodyanykh zaves [Semi-empirical model of calculating the parameters of the actual zone of contamination when setting up water curtains]. *Journal of Civil Protection*, 2020. Vol. 4, No. 4. Pp. 424–432. (rus). DOI: 10.33408/2519-237X.2020.4-4.424.
12. Kraynov V.P. *Kachestvennye metody v fizicheskoy kinetike i gidrogazodinamike* [Qualitative methods in physical kinetics and hydro-gas dynamics]. Moscow: Vysshaya shkola, 1989. 224 p. (rus)
13. Nordin J. [et al.] Rapid prediction of chemical cloud dispersion from chemical spill accident. *Energy Sources*, 1998. Vol. 20, No. 6. Pp. 541–567.
14. Kutateladze S.S., Styrikovich M.A. *Gidrodinamika gazozhidkostnykh system* [Hydrodynamics of gas-liquid systems]. Moscow: Energiya, 1976. 296 p. (rus)
15. *Metodika prognozirovaniya masshtabov zarazheniya sil'nodeystvuyushchimi yadovitymi veshchestvami pri avariyaх (razrusheniyakh) na khimicheski opasnykh ob"ektakh i transporte: RD 52.04.253–90* [Methodology for predicting the extent of contamination with highly toxic substances in accidents (destruction) at chemically hazardous facilities and transport: RD 52.04.253–90], entered July 1, 1990. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1991. 23 p. (rus)