

УДК 614.878

ЛОКАЛЬНЫЙ КОЭФФИЦИЕНТ ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ПОСТАНОВКЕ ВОДЯНЫХ ЗАВЕС И РАССЕЙВАНИЕ ПРИМЕСИ

Котов Г.В.* , к.х.н., Фисенко С.П.** , д.ф.-м.н., Голуб О.В.*

*Командно-инженерный институт МЧС Республики Беларусь

**Институт тепло- и массообмена им. А.В. Лыкова НАН Беларуси

e-mail: kotovgv@mail.ru

Представлены результаты натурных исследований формирования фактической зоны заражения, являющейся следствием попадания опасных химических веществ в атмосферу в двух случаях: при свободном развитии чрезвычайной ситуации и при постановке водяных завес в ходе проведения аварийно-спасательных работ. Описаны количественные закономерности формирования и рассеивания облака токсичной примеси. Представлены данные расчета коэффициента регрессии и локального коэффициента шероховатости поверхности.

Results of natural researches of formation of an actual zone of the infection which are a consequence of hit of dangerous chemical substances in atmosphere in two cases are presented: at free development of an emergency situation and at statement of water veils during carrying out of a wrecking. Quantitative laws of formation and dispersion of a cloud of a toxic impurity are described. The data of calculation of factor of regress and local factor of a roughness of a surface is presented.

(Поступила в редакцию 21 января 2011 г.)

ВВЕДЕНИЕ

При возникновении чрезвычайной ситуации, связанной с поступлением химически опасных веществ во внешнюю среду, наибольшую угрозу представляют случаи газообразных выбросов и проливов легкокипящих веществ. Такие чрезвычайные ситуации являются наиболее динамичными, поскольку скорость распространения опасных веществ в воздухе соизмерима со скоростью ветра на небольшой высоте (~ 2 м). Другими словами, зона заражения формируется достаточно быстро и может существовать длительное время, определяемое продолжительностью существования источника выброса. Обстановка, складывающаяся при таких обстоятельствах, требует проведения неотложных аварийно-спасательных работ по ограничению и нейтрализации облака зараженного воздуха. В настоящее время основным способом ограничения распространения опасных химических веществ с ветровыми потоками воздуха является постановка водяных завес, но механизмы влияния завес на концентрацию токсичной примеси изучены недостаточно. Цель работы – предложить физическое объяснение эффективности водяной завесы.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Как известно, в условиях чрезвычайной ситуации важнейшими факторами, определяющими параметры формирующейся зоны заражения, являются интенсивность поступления токсичной примеси в атмосферу и условия ее распространения на местности, прилегающей к источнику выброса.

Для количественного описания поступления примеси в атмосферу используются ее расход при газообразном выбросе или интенсивность испарения в случае жидкого пролива на поверхность почвы. Интенсивность поступления примеси в атмосферу при газообразном выбросе зависит только от условий, в которых произошла авария, и определяется рядом тех-

нических параметров, единственной сложностью при этом является практический замер расхода выброса. При жидком проливе токсичного вещества картина значительно сложнее. Интенсивность поступления примеси в атмосферу зависит от целого ряда параметров. В числе основных факторов, оказывающих влияние, следует отметить размеры площади пролива, характер подстилающей поверхности, продолжительность существования пролива, температуру воздуха, скорость ветра и др.

На практике это выглядит так, что в первый момент пролива низкокипящие жидкости, такие как аммиак и хлор, вступая в контакт с поверхностью пролива, резко вскипают, образуя большой объем газа. Следствием этого становится формирование первичного облака над поверхностью пролива. В дальнейшем почва под проливом постепенно промерзает, интенсивность теплового потока к жидкости от почвы падает, на первый план выходит теплота, поступающая от атмосферных потоков. Результатом этого становится уменьшение парообразования.

Формирование первичного облака над поверхностью пролива происходит достаточно быстро, по прибытии аварийно-спасательных подразделений на место проведения работ боевые действия проводятся в условиях существования вторичного облака. В качестве фактора, количественно характеризующего формирование вторичного облака, может рассматриваться высота облака хлора на границе пролива жидкости с подветренной стороны. На срезе облака в данной точке наблюдается максимальная концентрация примеси. До линии среза происходит поступление паров в облако, повышающее концентрацию примеси, после – их рассеивание в атмосфере за счет турбулентной диффузии.

В работе [1] показано, что при использовании ряда упрощений в стационарных условиях высота облака примеси h может быть рассчитана с использованием выражения

$$h = \sqrt{DW / u}, \quad (1)$$

где D – коэффициент диффузии примеси в воздухе, $\text{м}^2/\text{с}$;

W – размер пролива в направлении, совпадающем с направлением ветра, м;

u – скорость ветра на высоте 2 м, м/с.

В случае, если известна интенсивность испарения жидкости с поверхности пролива, эффективная высота облака примеси h_{ef} рассчитывается как

$$h_{ef} = FW / un, \quad (2)$$

где F – расход примеси с поверхности пролива, молекул/ $(\text{м}^2 \cdot \text{с})$;

n – числовая плотность молекул примеси, молекул/ м^3 .

Увеличение скорости воздушного потока способствует росту интенсивности испарения и в то же самое время сопровождается уменьшением толщины слоя примеси над поверхностью пролива. Результатом этого становится то, что при увеличении скорости ветра растет расход хлора с поверхности пролива, при больших скоростях ветра эта зависимость ослабевает.

Распространение примеси за пределами границ поверхности пролива происходит под влиянием ветра. Профиль скорости ветра и ландшафт местности определяют формирование фактической зоны заражения.

На рис. 1 представлена определенная в условиях полигонных испытаний зависимость концентрации хлора в воздухе в диапазоне от 0 до $200 \text{ мг}/\text{м}^3$ от расстояния до границы пролива в направлении распространения хлоро-воздушного облака на высоте 1,5 м. Данный концентрационный профиль распределения хлора получен при скорости ветра 2 м/с и значении площади пролива $0,3 \text{ м}^2$ в условиях установившейся интенсивности испарения после достаточно продолжительного времени существования пролива (более 1 ч). Обнаружено расширение потока с примесью в пределах сектора порядка 90° относительно среднего направле-

ния ветра. В результате пульсации направления ветра приводят к формированию достаточно обширной зоны фактического заражения. Область малых концентраций хлора (с концентрацией менее 1 мг/м^3) здесь не рассматривается.

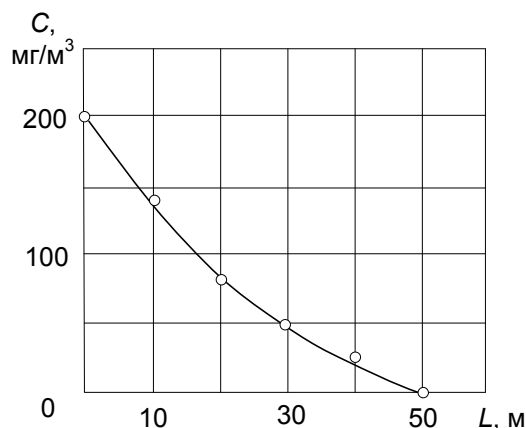


Рисунок 1 – Зависимость концентрации хлора в воздухе от расстояния до границы пролива

Полученные данные свидетельствуют об экспоненциальном характере концентрационной зависимости. Для дальнейшего анализа имеющихся результатов наиболее удобным представляется применение единой величины, отражающей изменение распределения хлора в приземном слое, такой как размер шероховатости. Размер шероховатости количественно отражает способность данной местности препятствовать распространению примеси в приземном слое воздуха. Справочные значения величин шероховатости поверхности достаточно условны, изменяясь в широком диапазоне, эти данные не учитывают локальных свойств местности. В реальных условиях распространение облака зараженного воздуха происходит не только под действием ветра, но и в условиях интенсивного влияния рельефа местности, где свою роль играют наличие естественных препятствий, растительного покрова, перепад высот и пр.

Рассеивание паров вещества осуществляется, прежде всего, за счет формирующихся турбулентных потоков на естественных препятствиях. Будем характеризовать этот процесс коэффициентом турбулентной диффузии D_t :

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

где δ – коэффициент шероховатости поверхности, м.

Коэффициент турбулентной диффузии зависит от характера подстилающей поверхности и скорости ветра.

Для количественного описания интенсивности рассеивания примеси вследствие турбулентной диффузии применяется величина характерной длины рассеивания l . Характерная длина рассеивания может быть определена из анализа уравнения диффузии и имеет вид

$$l = h^2 / \delta. \quad (4)$$

В ходе ранее проведенных исследований [1, 2] установлено, что характерная длина рассеивания, в конечном итоге, может рассматриваться как величина, не зависящая от скорости ветра. Сделанные выводы хорошо согласуются с данными натурных испытаний [3].

Постановка водяной завесы оказывает влияние на условия распространения примеси, которые могут быть охарактеризованы как формирование повышенной турбулизации ветрового потока, или увеличение локальной шероховатости. На рис. 2 представлена зависимость концентрации хлора (C , мг/м^3) в воздухе от расстояния до границы пролива при постановке

водяной завесы. Имеющиеся данные свидетельствуют о том, что плотность токсичной примеси экспоненциально убывает на расстояниях, сравнимых с характерной длиной рассеивания.

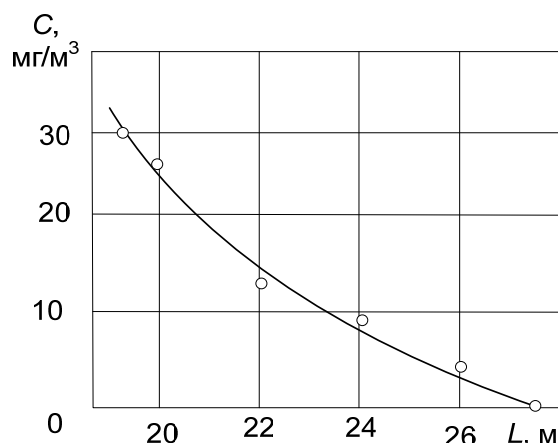


Рисунок 2 – Зависимость концентрации хлора в воздухе от расстояния до границы пролива при постановке водяной завесы

Таким образом, следствием постановки завесы на пути распространения хлоро-воздушного облака является изменение значения характерной длины рассеивания. Принимая во внимание то, что изменение параметров облака происходит в области действия завесы, постановка водяной завесы может рассматриваться как действие, направленное на резкое увеличение коэффициента турбулентной диффузии. Наличие водяной завесы на пути распространения хлоро-воздушного облака может быть охарактеризовано как увеличение локального коэффициента шероховатости.

Соотношение между начальной и установившейся характерными длинами рассеивания примеси может быть выражено как

$$l/l^* = \delta^*/\delta, \quad (5)$$

где l^* – характерная длина рассеивания примеси после постановки завесы, м;

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

Применительно к условиям реальной чрезвычайной ситуации, при описании фактической зоны заражения важнейшим параметром является ее глубина. Величина глубины фактической зоны заражения пропорциональна эффективной длине рассеивания: $L \sim l$.

Количественно совпадение определяется величинами концентраций хлора, используемых для регистрации границ фактической зоны заражения и рассеивания хлора. Это позволяет сделать вывод о том, что для описания параметров фактической зоны заражения могут быть использованы выражения вида

$$l^* = Kl; \quad (6)$$

$$L^* = KL, \quad (7)$$

где K – коэффициент регрессии.

С использованием выражений (5) и (6) получим:

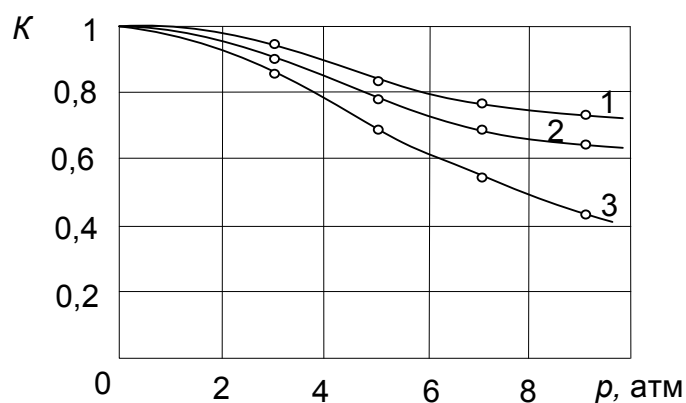
$$K = \delta/\delta^*, \quad (8)$$

следовательно, падению числового значения коэффициента регрессии способствует повышение локального коэффициента шероховатости. Уменьшению значения коэффициента регрессии и рассеиванию хлора будет способствовать любое препятствие, оказывающее противодействие распространению хлоро-воздушного облака.

Коэффициент регрессии зависит от местных условий, в которых происходит распространение облака. При свободном распространении хлоро-воздушного облака фактическая зона заражения формируется под воздействием целого ряда факторов, а результирующими становятся параметры, определяемые как соответствующие $K = 1$. Постановка водяной завесы вызывает изменение местных условий, что может быть охарактеризовано как трансформация коэффициента шероховатости поверхности от δ к δ^* . Результатом становится установление новых границ фактической зоны заражения, соответствующих значению ее глубины L^* .

Коэффициент регрессии является многофакторной величиной, определение которой может быть осуществлено эмпирически в условиях реальной чрезвычайной ситуации или при проведении натурных испытаний. Значения K , например, могут быть рассчитаны по данным, проиллюстрированным на рис. 1 и 2, полученным при использовании для постановки водяной завесы рукавного распылителя диаметром 66 мм, конструкция которого соответствует формуле $PP(20 \times 0,5 \times 0,006)$, где 20 – длина рукава, 0,5 – расстояние между соплами, 0,006 – диаметр сопел, м.

Коэффициент регрессии также зависит от параметров завесы: геометрических размеров и плотности массива водяных капель. Эти параметры, в свою очередь, определяются конструкцией распылителя и давлением в магистральной линии. На рис. 3 представлены данные о коэффициенте регрессии при различном давлении воды в рукавной линии для распылителей, отличающихся диаметром сопел (5, 6 и 10 мм).



1 – $PP(20 \times 0,5 \times 0,005)$; 2 – $PP(20 \times 0,5 \times 0,006)$; 3 – $PP(20 \times 0,5 \times 0,01)$

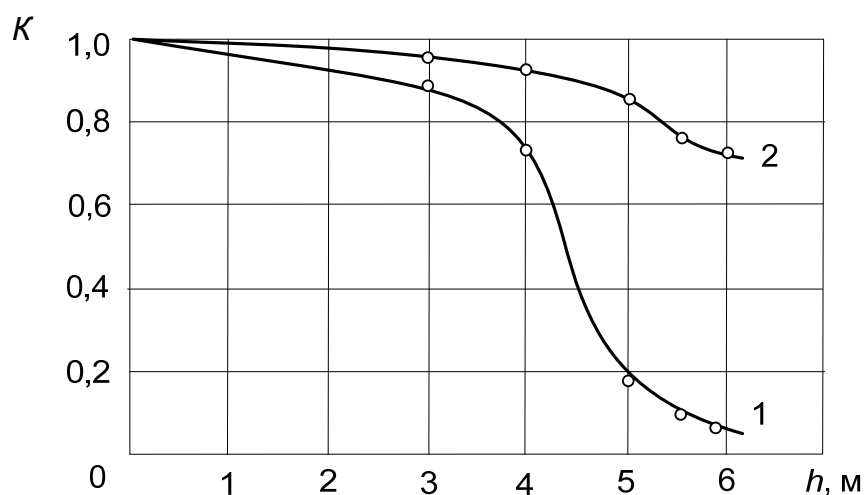
Рисунок 3 – Зависимость коэффициента регрессии от давления в рукавной линии для распылителя

Характер изменения коэффициента регрессии при повышении давления в рукавной линии свидетельствует о том, что наиболее эффективным оказывается повышение давления в диапазоне от 4 до 8 атм. При низком значении давления завесы как таковой создать не удастся, а при высоком неэффективно используется водный ресурс. Оптимальный диапазон давлений определяется характеристиками распылителя, конструкция которого выбирается с учетом возможностей применяемых технических средств.

Коэффициент регрессии имеет частное значение для каждого конкретного случая. Важнейшую роль при этом играет характер примеси, на которую оказывается воздействие. Водяные завесы оказывают влияние на достаточно большой участок фронта набегающего зараженного воздуха, размерами превышающий размеры завесы. На первый взгляд, коэффициент регрессии не должен зависеть от природы примеси, но здесь определяющую роль играет предыстория системы. Набегающий поток уже обладает характерным распределением приме-

си по высоте, а водяная завеса по своей высоте неоднородна. Как правило, при использовании рукавных распылителей завеса обладает сравнительно высокой пропускной способностью в своей нижней части, что связано с большой скоростью восходящих струй и падающих вниз капель в этой области. Следствием этого становится то, что примесь, распространяющаяся преимущественно в приземном слое, легче проникает сквозь объем завесы.

На рис. 4 приведены экспериментально найденные зависимости коэффициента регрессии хлора и аммиака при скорости ветра 2 м/с. Установленные значения K свидетельствуют о резких различиях интенсивности влияния завесы на содержание разнородной примеси в распространяющемся облаке. Завеса, создаваемая распылителем РР(20×0,5×0,005), формирует массив движущихся капель с повышенной плотностью в своей верхней половине. В нижней части завеса относительно «прозрачна», поэтому пары вещества, отличающиеся большей плотностью и склонные к распространению непосредственно над поверхностью земли, испытывают со стороны такой завесы меньшее влияние. Пары более легкого вещества (аммиака) распространяются в приземном слое значительно большей высоты и, кроме этого, частично абсорбируются водой, что тоже вносит свой вклад в снижение коэффициента регрессии. Сравнительно высокие значения коэффициента регрессии ($K > 0,9$) для завес малой высоты связаны с тем, что в таких случаях недостаточен расход воды (определяемый значениям давления $p < 2$ атм), необходимый для поддержания требуемых параметров.



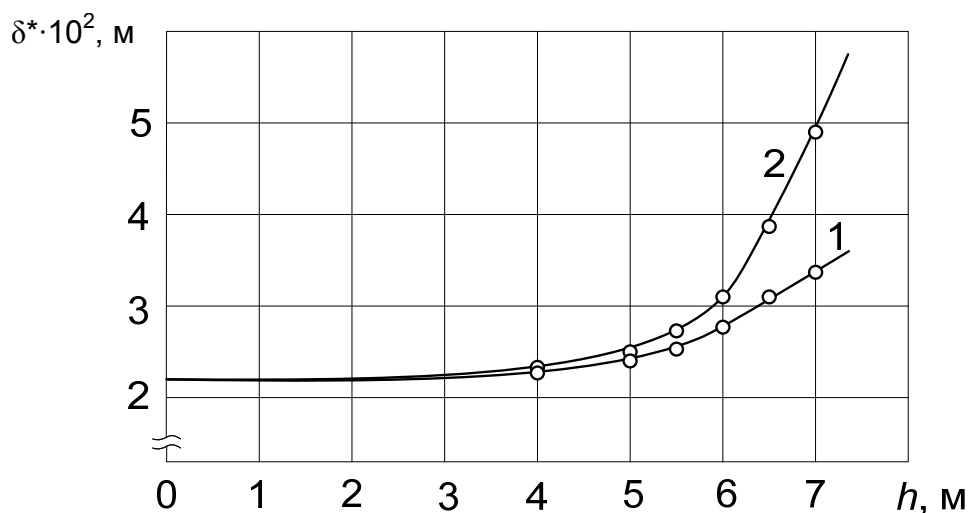
1 – для аммиака; 2 – для хлора

Рисунок 4 – Зависимость коэффициента регрессии от высоты завесы

Полученные данные позволили произвести расчет локальных коэффициентов шероховатости, являющихся следствием постановки водяных завес на пути распространения облака токсичной примеси. На рис. 5 представлены найденные зависимости локального коэффициента шероховатости от высоты завесы для случаев использования распылителей с диаметром сопел 6 и 10 мм. Хорошо видно, что увеличение высоты завесы приводит к росту локального коэффициента шероховатости. Нелинейный характер зависимости объясняется способностью распылителей создавать массив движущихся водяных капель. При малых давлениях в рукавной линии (до 3 атм) высота завесы легко достигает значений порядка 4–4,5 м, но в то же время восходящие струи достаточно компактны, распыление воды происходит плохо, что не позволяет создать массив движущихся водяных капель, способный эффективно препятствовать распространению примеси.

При использовании распылителя с большим диаметром сопел (кривая 2) при тех же значениях высоты завесы расходуется значительно большее количество воды. В ходе практических испытаний рукавов было установлено, что для создания завесы с такими же гео-

метрическими параметрами при использовании сопел диаметром 10 мм требуется воды на 50–80 % больше, чем при использовании сопел диаметром 6 мм. Это свидетельствует о том, что не только геометрические размеры завесы влияют на изменение локального коэффициента шероховатости, но и плотность водяного массива, создаваемого струями и движущимися каплями. Этот вывод вполне согласуется с физическими представлениями об увеличении турбулизации ветрового потока.



1 – PP(20×0,5×0,006); 2 – PP(20×0,5×0,01)

Рисунок 5 – Зависимость локального коэффициента шероховатости от высоты завесы при использовании распылителя

Для оценки влияния природы распространяющейся примеси на значение устанавливающего локального коэффициента шероховатости рассмотрим случаи применения одноструйных распылителей, создающих завесы с одинаковыми параметрами для ограничения распространения хлоро- и аммиачно-воздушного облаков. На рисунке 6 представлены данные, полученные по результатам натурных испытаний по определению влияния водяных завес на концентрацию хлора и аммиака в приземном слое воздуха. Оценка влияния завес на локальный коэффициент шероховатости сделана с использованием величины, представляющей собой отношение локальных коэффициентов шероховатости поверхности для случаев распространения аммиака и хлора:

$$\alpha = \delta_{Am}^* / \delta_{Cl}^* \quad (9)$$

где δ_{Am}^* – коэффициент шероховатости поверхности при распространении аммиака, м;

δ_{Cl}^* – коэффициент шероховатости поверхности при распространении хлора, м.

Найденные значения α указывают на различие устанавливающихся локальных коэффициентов. Характер зависимости свидетельствует о том, что изменение параметров завесы оказывает неоднозначное влияние на распространение примесей в приземном слое. Значение локального коэффициента шероховатости поверхности при постановке водяной завесы в случае распространения аммиака может на порядок превышать соответствующий коэффициент в случае распространения хлора. Имеющиеся сведения об абсорбционной активности в отношении аммиака и хлора движущихся водяных капель не объясняют подобных различий, следовательно, основной причиной возникновения наблюдающихся эффектов являются различия при формировании структуры облака зараженного воздуха.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные данные о распределении значений концентрации примеси в направлении распространения облака зараженного воздуха позволяют сделать вывод о существующих количественных закономерностях. Интенсивность рассеивания примеси вследствие турбулентной диффузии может быть описана с использованием величины характерной длины рассеивания. Характерная длина рассеивания может быть выражена как величина, не зависящая от скорости ветра, но при этом необходимо знать коэффициент шероховатости поверхности.

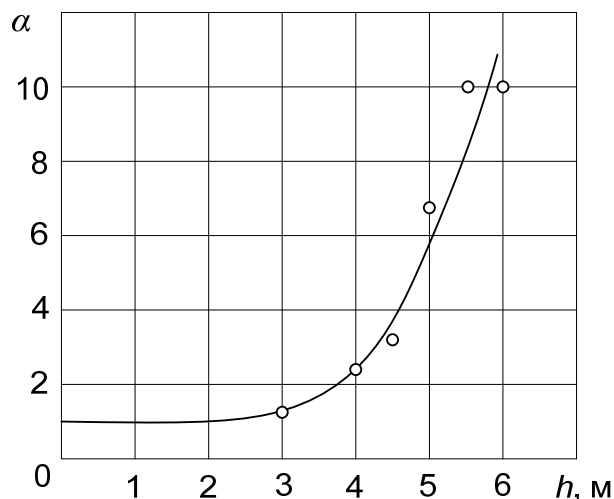


Рисунок 6 – Зависимость отношения локальных коэффициентов шероховатости поверхности в случаях распространения аммиака и хлора от высоты завесы

Размер шероховатости отражает способность данной местности турбулизовать ветровые потоки в приземном слое атмосферы. Как было выяснено, постановка водяной завесы приводит к изменению шероховатости поверхности, которое может быть охарактеризовано как установление нового, повышенного значения (локального) коэффициента шероховатости. Следствием этого становятся изменение характерной длины рассеивания и уменьшение размеров фактической зоны заражения.

С использованием коэффициента регрессии, определяемого как частное коэффициентов шероховатости, могут быть рассчитаны значения глубины фактической зоны заражения, устанавливающиеся после постановки водяной завесы. Коэффициент регрессии зависит от параметров завесы (геометрических размеров и плотности массива капель) и имеет частное значение для каждого конкретного случая, свидетельствующее об интенсивности влияния завесы на содержание примеси в распространяющемся облаке.

Расчет локальных коэффициентов шероховатости, являющихся следствием постановки водяных завес на пути распространения облака токсичной примеси, позволил установить, что определяющее влияние на изменение их значений оказывают природа распространяющейся примеси и параметры завесы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Голуб, О.В. Моделирование формирования облака пара в ветровом потоке при интенсивном испарении / О.В. Голуб, Г.В. Котов, С.П. Фисенко // Инженерно-физический журнал. – 2010. – Т. 83, № 4. – С. 757–762.
2. Котов, Г.В. Рассеивание и абсорбция опасных химических веществ с помощью водяных завес / Г.В. Котов, С.П. Фисенко, А.П. Еремин // Чрезвычайные ситуации: предупреждение и ликвидация. – 2008– № 2(24). – С. 31–38.
3. Котов, Г.В. Расчет сил и средств для ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций, связанных с выбросом (проливом) аммиака / Г.В. Котов, А.П. Еремин // Чрезвычайные ситуации: предупреждение и ликвидация. – 2009. – № 2(26). – С. 95–104.