

УДК 614.878:539.212.1

ВЛИЯНИЕ ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТИ НА РАСПРОСТРАНЕНИЕ ПРИМЕСИ В АТМОСФЕРЕ

Котов Г.В., к.х.н, доцент, Булва А.Д.
Командно-инженерный институт МЧС Республики Беларусь

e-mail: Bulva@list.ru

Работа посвящена оценке влияния подстилающей поверхности на процесс распространения примеси с воздушным потоком от модельного источника (пролива) в условиях применения водяных завес. Представлены результаты использования модели влияния локальных преград на концентрацию примеси в приземном слое атмосферы. Сделанные в работе выводы по результатам теоретических исследований подтверждаются результатами натурных испытаний.

The research deals with the estimation of the influence of underlying surface on the propagation of impurity with an air flow from the simulated source (leakage) under conditions of water curtain use. The results are presented which show the using of simulated local barriers influence on the concentration of impurity in surface atmospheric layer. The obtained data are illustrated by the results of environmental tests.

(Поступила в редакцию 27 января 2012 г.)

ВЕДЕНИЕ

При возникновении чрезвычайных ситуаций, связанных с выбросом опасных химических веществ, основную опасность представляет формирующееся паровоздушное облако, распространение которого с воздушным потоком может привести к загрязнению окружающей среды, токсичному поражению людей, а также возникновению условий, при которых концентрация вещества достигнет пожаро- и взрывоопасных значений.

Средняя скорость переноса облака зараженного воздуха определяется скоростью ветра, вместе с тем распределение значений скорости потока примеси неоднородно по высоте. Определяющее влияние здесь оказывает не только высота над поверхностью земли, но и характер поверхности, над которой происходит перенос воздушных масс. Наличие естественных препятствий на пути распространения потока (неровности рельефа, растительный покров и т.п.) замедляют его движение, что, в свою очередь, приводит к росту вертикальных градиентов скорости и концентрации.

Для ограничения распространения образующегося паровоздушного облака применяются различные технические средства активной противохимической защиты, оценить эффективность которых зачастую достаточно сложно. На практике установлено, что искусственные препятствия, создаваемые на пути распространения воздушного потока, содержащего опасную примесь, такие как водяные завесы, можно рассматривать в качестве дополнительных преград на участке местности. С помощью расчета влияния завес как фактора, изменяющего шероховатость поверхности, можно оценить эффективность влияния завесы на распространение примеси в приземном слое атмосферы.

Следует отметить, что связь между характером подстилающей поверхности и особенностью поведения облака примеси в воздушном потоке учтена практически во всех существующих математических моделях прогнозирования обстановки в результате аварии на химически опасном объекте и выражается во введении в расчетные формулы значения коэффициента шероховатости. Искусственно меняя его, мы, в свою очередь, меняем условия распространения примеси в воздушном потоке.

Целью настоящего исследования является оценка влияния подстилающей поверхности на характер распространения воздушного потока, содержащего примесь, а также разработка модели влияния локальных преград на примере водяных завес, применяемых в ходе ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций, на изменение концентрации примеси в приземном слое атмосферы.

ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА РАССЕЙВАНИЕ ПРИМЕСИ В ПРИЗЕМНОМ СЛОЕ АТМОСФЕРЫ

Перемещение воздушных масс, увлекающих частицы примеси, поступающей из какого-либо источника (с поверхности жидкого пролива или при газообразном выбросе), в спутное движение, в значительной мере зависит от скорости ветра в приземном слое. Значения скорости ветра неоднородны по высоте z , и она может быть охарактеризована с использованием логарифмической зависимости [1]:

$$u(z) = \frac{u_*}{k} \cdot \ln A, \quad (1)$$

где u_* – динамическая скорость, м/с;

k – постоянная Кармана;

A – коэффициент, определяемый характером местности, над которой происходит распространение воздушных масс.

Коэффициент A может включать в себя, кроме высоты над поверхностью, значения высоты растительного покрова, уровня, на котором происходит вырождение величины скорости, и др. Иногда данный коэффициент напрямую связывается с параметром шероховатости, соответствующим высоте, на которой скорость ветра имеет нулевое значение.

Известно, что кроме непосредственного вовлечения примеси в переносимый ее воздушный поток, частицы примеси испытывают влияние еще целого ряда факторов, определяющих характер их распределения в объеме потока. Характер распределения примеси определяется диссипативными факторами, рассеивающими частицы примеси в вертикальном и горизонтальном направлениях. Рассеивание примеси подчиняется общим закономерностям, описанным в [2].

Величина горизонтальной дисперсии примеси определяет ширину фронта распространения облака зараженного воздуха, а вертикальной – значения концентрации примеси по высоте слоя.

В пределах высоты до 3 м существенное влияние на распределение примеси в воздухе оказывают турбулентные пульсации, связанные с близостью к поверхности земли. Интенсивность турбулентных пульсаций вблизи поверхности земли в значительной мере зависит от разницы температур первоначального воздушного потока, поверхности почвы и собственной температуры паров примеси.

Исследование процесса формирования облака примеси непосредственно над поверхностью пролива и ее турбулентной диффузии осуществлялось ранее в работе [3]. Было установлено, что при некоторых условиях вклад коэффициента турбулентной диффузии в рассеивание примеси может оказаться решающим. Усиление рассеивания примеси в ветровом потоке связано с увеличением коэффициента турбулентной диффузии, который зависит, прежде всего, от трех факторов: природы вещества, скорости ветра, характера поверхности.

Коэффициент турбулентной диффузии в первом приближении, применяемом в стандартных методах расчета, может быть определен с использованием величины скорости ветра и количественной характеристики поверхности, такой как ее шероховатость:

$$D = \delta \cdot u(z), \quad (2)$$

где D – коэффициент турбулентной диффузии, м²/с;
 δ – коэффициент шероховатости, м;
 $u(z)$ – скорость ветра с учетом зависимости от высоты над уровнем поверхности, м/с.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

На распространение газообразной примеси над поверхностью земли оказывают влияние внешние и внутренние факторы. Внешними факторами являются перемещение воздушных масс и сопутствующие диссипативные силы, зависящие от условий внешней среды и относительных скоростей потоков. Определяющими внутренними факторами являются интенсивность поступления примеси от источника и, непосредственно, теплофизические и химические свойства примеси.

Для определения содержания в воздушном потоке на различном расстоянии от границы пролива концентрации примеси (числового значения плотности примеси), при двумерном моделировании [4], можно использовать соотношение

$$n(x, z) = A(x) \cdot \exp\left[-\frac{2 \cdot z^2}{h^2}\right], \quad (3)$$

где h – начальная высота фронта примеси на границе пролива, м;
 x, z – координаты точки, м.

Функцию $A(x)$ можно представить зависимостью вида:

$$A(x) = A_0 \cdot \exp\left[-\frac{k_1 \cdot x}{k_0}\right] = A_0 \cdot \exp\left[-\frac{D \cdot x}{h^2 \cdot u_0}\right], \quad (4)$$

где A_0, k_0, k_1 – величины, используемые в методе Галеркина [4];
 u_0 – усредненное значение скорости воздушного потока (как правило, принимается как скорость ветра на высоте 2 м).

Для трехмерного моделирования распространения примеси от трехмерного источника, учитывающего ширину формирующегося фронта, можно использовать приближенную зависимость вида [3]:

$$n(x, y, z) = n(x, z) \cdot \exp\left[-\frac{4 \cdot y^2}{W^2}\right], \quad (5)$$

где W – протяженность пролива в направлении, перпендикулярном направлению ветра, м.

Результаты численного моделирования, осуществленного ранее [3], показали, что на рассеивание примеси определяющее влияние оказывает поперечная к ветру турбулентная диффузия.

Зависимость турбулентной диффузии от скорости ветра и шероховатости поверхности носит сложный характер. Это обусловлено, как уже было показано в формуле (1), зависимостью скорости воздушного потока от характера подстилающей поверхности, до на-

стоящего времени остающейся малоизученной. Например, входящую в (1) величину A , можно определить так, как рекомендовано в [5], с использованием выражений:

$$A = \frac{z}{z_0}; \quad (6)$$

$$A = \frac{z + z_0}{z_0}; \quad (7)$$

$$A = \frac{z + z_0 - z^*}{z_0}, \quad (8)$$

где z_0 – значение высоты, соответствующее параметру шероховатости, м;

z^* – высота слоя вытеснения, м.

Представленные зависимости (6-8) указывают на то, что при определенных обстоятельствах могут быть созданы условия, при которых скорость ветра превращается в ноль, т. е. $z = z^*$.

В случае распространения потока примеси над поверхностью, обладающей выраженной шероховатостью, например, над высоким и достаточно плотным растительным покровом в пределах высоты z_0 меняется механизм переноса примеси. На высоте, превышающей z_0 , распространение примеси происходит в спутном воздушном потоке. Если же высота не превышает z_0 , то присутствие примеси в значительной мере будет обусловлено молекулярной диффузией и седиментационными процессами (если свойства примеси значительно отличаются от свойств воздуха).

Результатом вышеуказанного является то, что для решения задач распространения примеси от источника в приземном слое атмосферы, с учетом всех обстоятельств, необходимо привлечение экспериментальных данных. В настоящем исследовании попытаемся оценить влияние преград, находящихся на пути распространения потока, переносящего частицы примеси от модельного источника [6].

РЕЗУЛЬТАТЫ

В качестве модельного объекта, являющегося источником примеси, поступающей в атмосферу, выбран пролив жидкого хлора, характеризующийся интенсивностью поступления газообразной примеси в воздух, равной 0,006 кг/с. Модель выбрана с учетом имеющихся данных натурных испытаний [6]. Температура поверхности пролива на момент проведения испытаний составляла 238 К, температура почвы 273 К, температура набегающего воздуха 283 К, скорость ветра на высоте 2 м – 1,4 м/с.

Оценка влияния шероховатости поверхности на концентрацию хлора в приземном слое производилась в условиях безразличной стратификации атмосферы (по Паскуиллу). Расчет концентрационных полей выполнен для случая распространения хлора с поверхности пролива под действием ветра при наличии препятствий, расположенных на расстоянии 10 и 40 м от источника. Высота препятствий, использованная при расчете, составила 3 м. Оценка влияния водяных завес на распространение примеси в приземном слое производилась в приближении, в котором они рассматриваются как элемент шероховатости.

На рис. 1 представлены результаты расчета массовой доли хлора (ω_{ch}) на поверхности почвы. Источник выброса находится на расстоянии 10 м от начала координат в направлении

распространения воздушного потока. Расчетные значения концентрации хлора на поверхности почвы приведены для случаев значений шероховатости: $z_0 = 0; 0,02; 0,3; 0,1; 0,5$ (м).

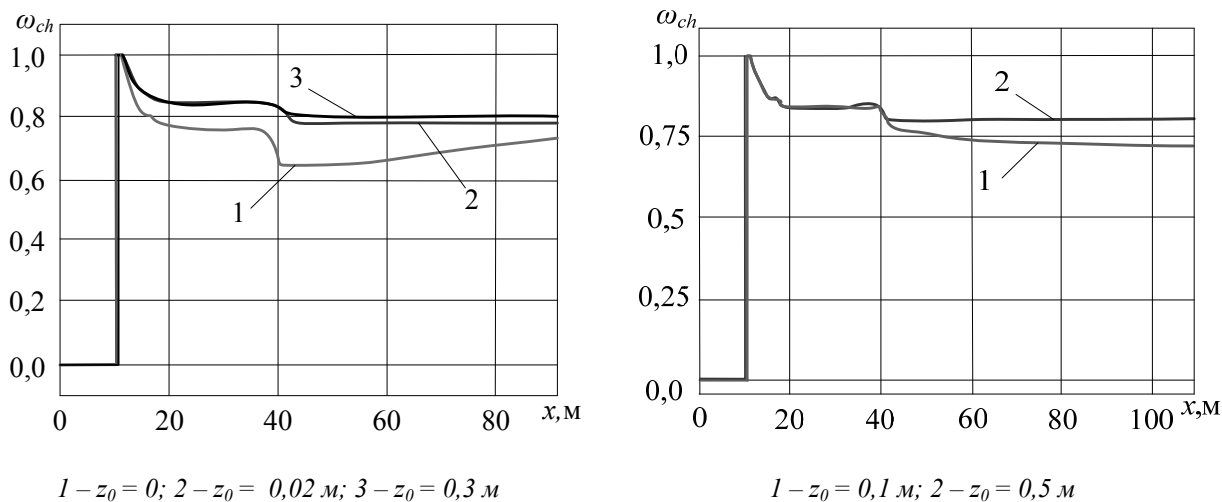


Рисунок 1 – Влияние шероховатости на концентрацию хлора на поверхности почвы

Хорошо видно, что увеличение шероховатости поверхности приводит к росту концентрации хлора на поверхности почвы. Очевидно, это объясняется тем, что шероховатость поверхности не только препятствует течению тяжелой примеси, но и способствует ее накоплению в приповерхностном слое. В результате этого влияния распространение тяжелой примеси (такой как хлор) над более шероховатой поверхностью происходит хуже.

Используемые в ходе ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций водяные завесы, устанавливаемые на пути распространения опасного химического вещества (хлора, аммиака и т. п.), могут рассматриваться как локальные элементы шероховатости, влияющие на характер распределения примеси в приповерхностном слое. Общий вид кривых, представленных на рис. 1, свидетельствует о том, что частицы примеси, достигающие такого препятствия, испытывают с его стороны интенсивное тормозящее действие. Как результат этого, на концентрационных кривых появляются участки «выполживания», наблюдающиеся позади препятствий.

Эта тенденция прослеживается на высотах до 0,5 м над размером шероховатости (рис. 2). На высоте порядка 0,5 м и более над размером шероховатости эти различия становятся незначительными (рис. 3).

При увеличении высоты над поверхностью почвы (рис. 2) характер распределения значений концентрации хлора меняется. Несмотря на то, что при удалении от поверхности почвы происходит общее снижение концентрации примеси, содержание хлора в воздухе постепенно растет под влиянием увеличения шероховатости поверхности. Позади завесы в слое, находящемся на некотором расстоянии от поверхности почвы (порядка 0,1-0,4 м выше размера шероховатости), наблюдается увеличение концентрации хлора. На практике это проявляется в отрыве потока примеси от поверхности почвы.

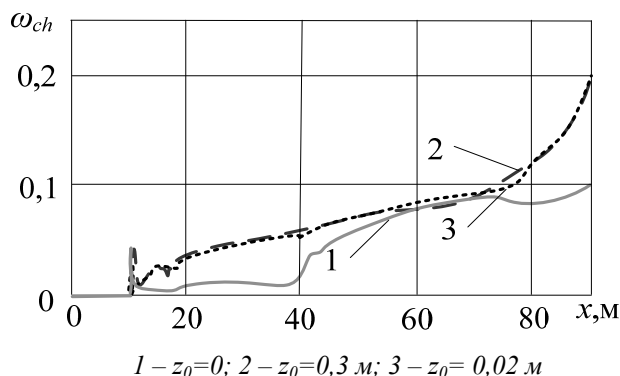


Рисунок 2 – Влияние шероховатости на концентрацию хлора на высоте выше размера шероховатости при $z = 0,1 \text{ м}$

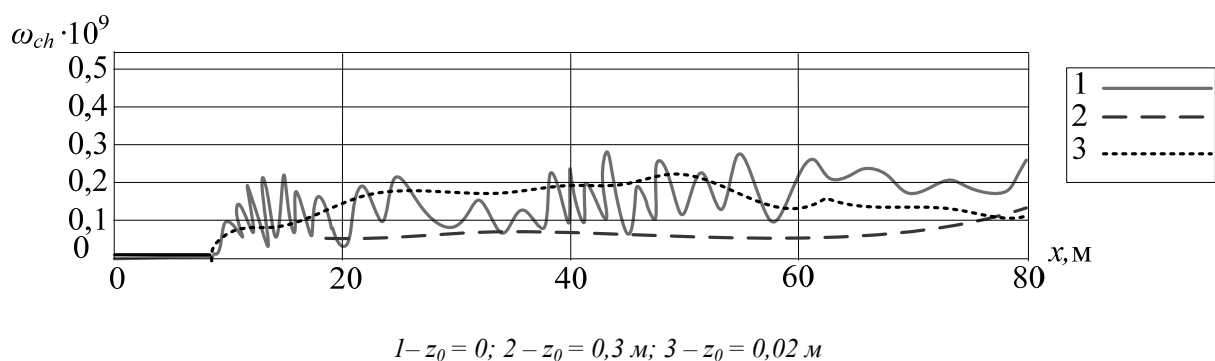


Рисунок 3 – Влияние шероховатости на концентрацию хлора на высоте выше размера шероховатости при $z = 0,5 \text{ м}$

Влияние шероховатости вносит свой вклад в распределение примеси над поверхностью почвы в присутствии механических преград. Так, на рис. 2, 3 хорошо видно, что присутствие препятствий оказывает возмущающее действие на распространение потока, наибольшее влияние которого проявляется при наименьших значениях шероховатости поверхности. При наличии достаточно большого значения собственной шероховатости поверхности влияние локальной шероховатости, определяемой наличием механических препятствий, нивелируется.

На высоте порядка 0,5 м выше размера шероховатости (рис. 3) на фоне низких значений концентрации примеси, тенденции влияния шероховатости и присутствия завес не просматриваются, что связано со значением мощности выбранного источника.

Установленные закономерности свидетельствуют о том, что наличие препятствий, характеризующихся пористостью и собственной динамикой, на пути распространения облака примеси приводит к изменению ее распределения. Происходит перераспределение значений концентрации, связанное с отрывом потока и увеличением общей толщины слоя примеси над поверхностью почвы. Данный вывод проиллюстрирован на рис. 4, где представлена фотография потока примеси, проходящего сквозь водяную завесу. Видно, что завеса интенсивно рассеивает достаточно компактный слой примеси, и при этом происходит подъем рассеянного потока на высоту, превышающую собственную высоту завесы.



Рисунок 4 – Влияние водяной завесы на распределение потока примеси

Следующим этапом работ было исследование распределения примеси в потоке, на пути движения которого установлены водяные завесы в два эшелона.

Имеющиеся экспериментальные данные свидетельствуют о том, что водяная завеса оказывает двойственное влияние на распространяющийся поток примеси: во-первых, происходит рассеивание частиц примеси, приводящее к увеличению высоты слоя примеси; во-вторых, как следствие подъема части потока, формируется достаточно компактный верхний слой. Это является следствием одновременного проявления ограниченной пропускательной способности завесы и захвата частиц примеси. Оба эффекта могут быть отслежены при рассмотрении влияния на распространяющийся поток примеси пористых и движущихся в вертикальном направлении перегородок.

На рис. 5 представлены изолинии хлора, соответствующие его концентрации с массовой долей 0,001. Пористая перегородка, находящаяся на пути распространения облака, приводит к заметному рассеиванию примеси (рис. 5, *a*), распределяющейся в слое достаточно большой высоты. Движущаяся перегородка, захватывающая частицы примеси, поднимает поток над поверхностью почвы (рис. 5, *б*). В результате этого частицы примеси вовлекаются в восходящее движение и далее преодолевают преграду. Водяная завеса обладает признаками обеих перегородок.



a – пористая перегородка; *б* – движущаяся перегородка

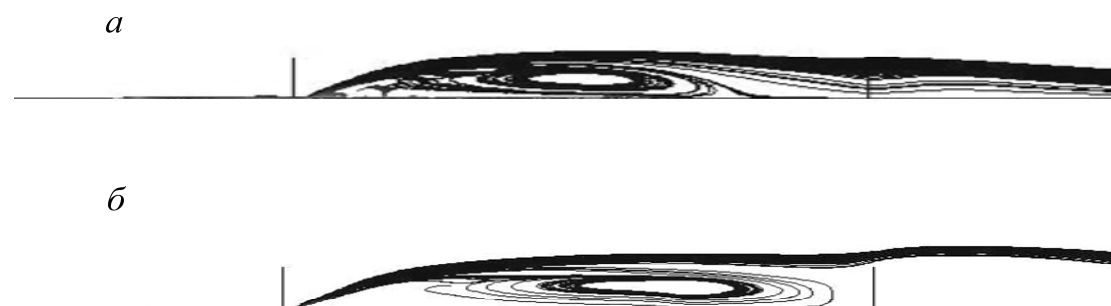
Рисунок 5 – Изолинии хлора ($\omega_{chl} = 0,001$) при распределении потока примеси под влиянием перегородки

При наличии двух перегородок на пути распространения хлоровоздушного облака характер распределения примеси также зависит от их свойств. На рис. 6 представлены изолинии хлора с массовой долей 0,001 для случаев: а) двух пористых перегородок; б) первой пористой и второй движущейся перегородки. Наличие двух твердых перегородок на расстоянии 30 м друг от друга приводит к образованию между ними устойчивого вихря.

В случае, когда обе перегородки пористые (рис. 6, *a*), рассеивание потока происходит достаточно равномерно, при этом наблюдается небольшое торможение потока перед пре-

пятствием и дальнейшее распределение примеси по толщине слоя, соизмеримого с высотой препятствия. Вторая пористая перегородка не изменят механизма распределения примеси, оказывая лишь влияние на распределение значений концентрации хлора.

Распределение примеси существенно меняется в случае наличия движущейся перегородки (рис. 6, б). Здесь происходит заметный подъем потока примеси, являющийся следствием захвата частиц движущейся перегородкой. Движущаяся перегородка интенсивно перераспределяет набегающий поток, значительно увеличивая толщину слоя, в котором происходит рассеивание примеси.



а – две пористые перегородки; б – первая пористая и вторая движущаяся перегородка

Рисунок 6 – Изолинии хлора ($\omega_{chl} = 0,001$) при распределении потока примеси под влиянием перегородок

Сделанные выводы нашли подтверждение в данных натурных испытаний по определению характера распределения примеси в результате прохождения ее потоком водяных завес, поставленных в два эшелона. На рис. 7 представлены фотографии, иллюстрирующие влияние водяных завес на распределение примеси. Хорошо видно, как достаточно плотный, объемный поток примеси, достигнув первой завесы, проникает сквозь нее. При этом одновременное проникновение частиц примеси сквозь объем завесы и их захват восходящими водяными струями приводят к значительному увеличению толщины слоя. Образовавшийся слой рассеянной примеси, достигнув зоны действия второй завесы, в большей мере подвержен захвату примеси. В результате происходит подъем потока примеси на значительную высоту, превышающую собственную высоту завесы на 5-10 м.



а – под влиянием первого эшелона; б – под влиянием двух эшелонов

Рисунок 7 – Распределение потока примеси при постановке завес в два эшелона

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования и полученные результаты позволяют сделать ряд выводов:

- интенсивность рассеивания примеси растет с увеличением шероховатости поверхности, над которой происходит ее распространение;
- влияние шероховатости поверхности на интенсивность рассеивания примеси во многом схоже с температурным влиянием, т. е. находится в прямо пропорциональной зависимости;
- влияние шероховатости ослабевает на высотах, превышающих два характерных размера шероховатости;
- водяную завесу, влияющую на процесс распространения примеси в приземном слое атмосферы, можно рассматривать, как локальный элемент шероховатости;
- влияние водяных завес на распространение потока примеси характеризуется одновременным протеканием процессов проникновения частиц сквозь объем завесы и их захватом восходящими струями;
- наиболее эффективным использование водяных завес будет в случае соответствия высоты слоя набегающего потока примеси, и высоты завесы.

Полученные результаты позволяют сделать некоторые практические рекомендации по предупреждению и ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций, связанных с выбросом (проливом) опасных химических веществ.

При планировании и проведении аварийно-спасательных работ, в частности, выборе технических средств и способа их применения необходимо учитывать химические и теплофизические свойства опасных веществ. При локализации чрезвычайных ситуаций, связанных с выбросом опасных химических веществ, целесообразно использование технических средств, которые оказывают наибольшее возмущающее действие на распространяющийся поток, содержащий опасную примесь. Среди защитных мероприятий на химически опасных объектах может применяться изменение условий ландшафта, направленное на повышение общей шероховатости местности. К таким мероприятиям, например, можно отнести использование различных лесокустарниковых насаждений. Для повышения эффективности водяных завес необходимо учитывать условия местности, относительные размеры завесы и набегающего потока, а также степень турбулентного воздействия завесы на поток примеси.

ЛИТЕРАТУРА

1. Монин, А.С. Статистическая гидромеханика / А.С. Монин, А.М. Яглом. Москва : Наука, 1965. Ч. 1. – 640 с.
2. Матвеев, Л.Т. Основы общей метеорологии. Физика атмосферы. Ленинград : Гидрометеорологическое изд., 1965. – 876 с.
3. Котов, Г.В. Моделирование распространения облака примеси под действием ветра в приземном слое / Г.В. Котов, С.П. Фисенко // Инженерно-физический журнал. – 2011. Т. 84, № 3 – С. 535–539.
4. Fletcher, C.A.J. Computational Galerkin Methods. New York : Springer – Verlag, 1984. – 309 p.
5. Белов, И.В. Сравнение моделей распространения загрязнений в атмосфере / И.В. Белов, М.С. Беспалов, Л.В. и др. // Математическое моделирование. – 1999. Т. 11, № 8. – С. 52–64.
6. Котов, Г.В. Натурные испытания по определению эффективности влияния водяных завес на распространение хлора в приземном слое воздуха / Г.В. Котов, О.В. Голуб // Чрезвычайные ситуации: предупреждение и ликвидация. – 2011. № 1 (29) – С. 23–31.