

# Автоматизированное оперативное управление техногенными химико-технологическими объектами при возникновении запроектных аварийных ситуаций<sup>1</sup>

*Ю.Н. Матвеев* <matveev4700@mail.ru>

*Н.А. Стукалова* <nast77@mail.ru>

*Тверской государственный технический университет,  
170026, Россия, наб. А. Никитина, 22*

**Аннотация.** В статье обосновывается необходимость применения распределенных вычислительных систем для математического моделирования процесса образования облака зараженного воздуха при возникновении запроектных аварийных ситуаций на техногенных химико-технологических объектах. Проанализирована зависимость скорости изменения концентрации опасной примеси в произвольной точке пространства и приведены математические модели процессов образования облака зараженного воздуха при высокотемпературных выбросах (взрывах, пожарах) и проливах больших количеств токсичных химических веществ на различные поверхности с последующим их испарением. Доказана целесообразность декомпозиции задачи моделирования процесса образования облака зараженного воздуха.

**Ключевые слова:** аварийная ситуация; химико-технологический объект; облако зараженного воздуха; математическая модель; распределенные вычислительные системы.

**DOI:** 10.15514/ISPRAS-2015-27(6)-25

**Для цитирования:** Матвеев Ю.Н., Стукалова Н.А. Автоматизированное оперативное управление техногенными химико-технологическими объектами при возникновении запроектных аварийных ситуаций. Труды ИСП РАН, том 27, вып. 6, 2015 г., стр. 395-408. DOI: 10.15514/ISPRAS-2015-27(6)-25.

---

<sup>1</sup> Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ грант №15-29-07970

## **1. Введение**

Автоматизация работы объектов повышенной опасности, в частности, опасных химических производственных комплексов и технологических процессов, является сегодня неотъемлемой частью повышения их безопасности и снижения вероятности возникновения аварийных ситуаций. Цена аварии на подобных объектах, как правило, имеет катастрофический масштаб, поскольку последствия возникновения чрезвычайных ситуаций затрагивают не только и не столько сам объект, но и сопряженные с ним территории. В общем случае, авария для техногенных объектов определяется как несанкционированное высвобождение массы или энергии, которое причиняет или способно причинить ущерб реципиенту риска. При этом масса или энергия этого высвобождающегося опасного вещества образует источник аварийной опасности. Исследование особенностей вредоносных факторов и разработка эффективных мер по их ослаблению или ликвидации возможно только на основе использования математического моделирования таких объектов. Это объясняется тем, что аварийную ситуацию невозможно организовать с благими намерениями или повторить. Математическая модель аварийной ситуации должна адекватно описывать возникновение и развитие источника опасности. Исследование модели позволяет определить условия, при которых происходит эмиссия опасной субстанции, и рассчитать параметры процесса эмиссии.

## **2. Классификация аварийных ситуаций**

Сценарии возникновения и развития аварийных ситуаций представляют собой последовательность возможных характерных событий, ведущих к утечке токсичных, пожаро- и взрывоопасных веществ. Среди них можно выделить две основных группы инициаторов аварийных ситуаций – внутренние события и внешние. К внутренним относятся такие события, источником которых служат технологические операции и технологическое оборудование, например, скрытые дефекты оборудования, разрыв трубопроводов, разрушение емкостей с химически опасными веществами, ошибки операторов-технологов и т.д. К внешним относятся события, первопричина которых находится вне самого химико-технологического процесса, например, падение самолёта на объект при авиационной катастрофе.

Кроме этого, весь спектр возможных аварий можно разделить на две группы, которые принято называть «проектными» и «запроектными».

К «проектным авариям» относятся такие ситуации, которые в случае их возникновения не приводят к аварии т.к. заранее запланированы дополнительные организационные и технические мероприятия по их нейтрализации. Как правило, это аварийные ситуации, причиной которых являются различного рода отказы оборудования. Для снижения вероятности и возможных масштабов таких аварий в типовую проектную и технологическую

документацию вносят определённые дополнения, предусматривается установка различного рода блокирующих, сигнальных и других систем.

К «запроектным» относятся аварии, не вошедшие в первую группу. Причинами таких аварий служат в основном внешние непредсказуемые заранее события – различного рода стихийные бедствия (землетрясение, тайфуны, ураганы и т.д.) или непрогнозируемые последствия человеческой деятельности (взрывы, крупные пожары и пр.). Возможность снижения вероятности их возникновения учитывается в основном за счёт таких организационных мероприятий, как выбор площадки для размещения объекта, например, в сейсмически неактивной зоне. В проектной и технологической документации возможность возникновения таких аварий не находит своего отражения, поэтому такие аварии принято называть «запроектными».

Вероятность возникновения проектных аварий гораздо выше, чем аварий запроектных. Однако масштабы запроектных аварий в случае их возникновения гораздо больше, чем масштабы проектных, так как при малой частоте их появления они обладают гораздо большей разрушительной силой. Причём, по упомянутым выше причинам, на техногенных объектах не предусматривается введение элементов и систем, предназначенных для противостояния или ограничения этой разрушительной силы.

Анализ возможных сценариев аварийных ситуаций на техногенных объектах химических производств, приводящих к выбросам токсичных химических веществ (ТХВ) в атмосферу с образованием облака зараженного воздуха (ОЗВ), показывает, что основными вариантами сценариев таких аварий являются[1]:

- высокотемпературные выбросы ТХВ, которые по времени протекания могут быть кратковременными и продолжительными (взрывы, пожары);
- пролив больших количеств ТХВ на различные поверхности с последующим их испарением.

### **3. Процессы образования ОЗВ как объекты управления.**

Зависимость скорости изменения концентрации примеси в произвольной точке пространства –  $\partial C/\partial t$  определяется расположением в пространстве источников примеси и рядом параметров, в число которых входят составляющие скорости ветра –  $u$ ,  $v$ ,  $w$  вдоль осей  $Ox$ ,  $Oy$ ,  $Oz$  трехмерного пространства, коэффициенты атмосферной турбулентности –  $k$  и др. [2]

В общем виде эта зависимость определяется дифференциальным уравнением баланса примеси или уравнением переноса примеси:

$$\begin{aligned} \frac{\partial Ca}{\partial t} = & -u \frac{\partial Ca}{\partial x} - v \frac{\partial Ca}{\partial y} - w \frac{\partial Ca}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial Ca}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k \frac{\partial Ca}{\partial y} \right) + \\ & + \frac{\partial}{\partial z} \left( k \frac{\partial Ca}{\partial z} + WaCa \right) + F + R - P - W = f(u, v, w, k, w, F, R, P, W) \end{aligned} \quad (1)$$

где:

$Wa$  – собственная вертикальная скорость примеси,

$R$  и  $P$  – скорость образования и уничтожения примеси в результате химических реакций,

$W$  – скорость выпадения примеси на подстилающую поверхность;

$Ca$  - количество примеси  $a$ , содержащейся в единице объема воздуха (объемная концентрация примеси);

$F$  – скорость поступления примеси в воздух от того или иного источника (интенсивность источника).

Уравнение (1) показывает, что перенос примеси в движущейся среде обусловлен двумя различными физическими факторами: во-первых, при наличии разности концентраций идет процесс молекулярной диффузии; во-вторых, частицы примеси увлекаются движущейся средой и переносятся вместе с ней.

Кроме параметров, входящих в уравнение (1) должны быть заданы условия, ограничивающие область распространения ОЗВ. Если область распространения ОЗВ ограничена сверху поверхностью  $z=H$ , а снизу земной поверхностью  $z=0$ , то условия на этих границах обычно задаются в виде:

$$\text{при } z=H \quad Ca=0 \text{ или } k \frac{\partial Ca}{\partial z} = 0, \quad (2)$$

$$\text{при } z=0 \quad k \frac{\partial Ca}{\partial z} + w_a Ca = \beta Ca. \quad (3)$$

При рассмотрении примеси в слое толщиной  $H$  порядка 2-5 км условия (2) определяют исчезновение примеси или ее вертикального потока на этой границе. Условие (3) на земной поверхности имеет смысл равенства вертикального турбулентного потока и потока примеси при ее гравитационном оседании на поверхность со скоростью  $w_a$  количеству примеси, поглощаемой поверхностью -  $\beta Ca$ , где  $\beta$  - коэффициент аккомодации, зависящий от физических свойств подстилающей поверхности, наличия на ней растительности или застроек.

**Тогда задачу оптимизации управления процессом образования ОЗВ в общем виде можно записать:**

$$V_0 = F(\bar{X}, \bar{U}, Ca, t) \rightarrow \min \quad (4)$$

т. е. минимизировать объем ОЗВ при связях и ограничениях:

$$\partial Ca / \partial t = f(u, v, w, k, w_\omega, F, R, P, W) = f(\bar{X}, \bar{U}), \quad (5)$$

$$Ca(x, y, z, t; h_0) \leq \text{ПДК}, \quad (6)$$

$$x_{\min} \leq x \leq x_{\max}, \quad (7)$$

$$y_{\min} \leq y \leq y_{\max}, \quad (8)$$

$$0 \leq z \leq z_\phi, \quad (9)$$

$$0 \leq t \leq t_{\text{dur}}, \quad (10)$$

где

$Ca(x, y, z, t; h_0)$  – концентрация ТВХ в точке с координатами  $x, y, z$  в момент времени  $t$  от источника, расположенного на высоте  $h_0$ ;

$\bar{X}, \bar{U}$  – векторы входных и управляющих параметров;

$z_\phi$  – высота флюгера;

$t_{\text{dur}}$  – директивное время локализации аварии.

#### **4. Математические модели процессов образования облака зараженного воздуха**

Как уже было отмечено, процессы образования ОЗВ – это процессы перехода ТХВ из начального источника химического заражения в атмосферу в результате взрывного разрушения аппаратов, пожаров и проливов на различные поверхности с последующим испарением.

При взрыве процессом поступления ТХВ в атмосферу будет испарение жидких частиц и капель с поверхности образовавшегося парозерозольного облака. Поступление ТХВ в атмосферу определяется производительностью источника [3]:

$$q = \frac{\Delta_0}{m_0} E_0 \exp\left(-\frac{\alpha_k E_0 t}{m_0}\right), \quad (11)$$

где:

$q$  – производительность источника,  $кг/с$ ;

$\Delta_0$  – начальная плотность заражения;

$m_0$  – масса частицы среднemasсовым диаметром  $d_k$ ,  $кг$ ;

$E_0$  – начальная скорость испарения,  $кг/(м^2 \cdot с)$ ;

$$E_0 = K_p 2\pi \left(1 + 1,2^{-2} Re^{2/3}\right) C_0 D d_n \sqrt{\nu/D}, \quad (12)$$

где:

$K_p$  – коэффициент, зависящий от типа ТХВ и вида почвы ( $K_p = 0,9$  для большинства ТХВ);

$Re$  – число Рейнольдса:

$$Re = \frac{0,25 u_1 d_n}{\nu a}; \quad (13)$$

$C_0$  – максимальная концентрация насыщенного пара, % ;

$D$  – коэффициент диффузии вещества;

$d_n$  – диаметр пятна от частицы вещества,  $м$  :

$$d_n \approx 3\bar{d}_k \quad (14)$$

$\nu$  – коэффициент кинематической вязкости воздуха;

$a_k$  – параметр, зависящий от доли свободной или связанной жидкости;

$t$  – время, прошедшее от начала заражения,  $с$ .

При проливе процессом поступления ТХВ в атмосферу будет только испарение с поверхности образовавшейся «лужи»:

$$q = S_{np} E \quad (15)$$

где:

$q$  – производительность источника,  $кг/с$ ;

$E$  – скорость испарения,  $кг/(м^2 \cdot с)$ ;

$S_{np}$  – площадь зеркала пролива,  $м^2$ .

Испарение с гладкой поверхности пролитого вещества рассчитывается по методу Братсера [4].

Скорость стационарного испарения жидкого ТХВ со свободной поверхности пролива, когда необходимо оценивать общую массу испарившегося вещества, можно определить из выражения [5]:

$$E = 0,0735 \cdot C_m \cdot U_* \cdot \left( \frac{D_M}{\nu_B} \right)^{2/3}, \frac{\text{кг}}{\text{м}^2 \cdot \text{с}} \quad (16)$$

где:

$C_m$  – максимальная концентрация паров ТХВ при данной температуре испарения,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;

$U_*$  – динамическая скорость воздуха над поверхностью испарения,  $\text{м}/\text{с}$ ;

$D_M$  – коэффициент молекулярной диффузии паров ТХВ в воздухе,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;

$\nu_B$  – кинематическая вязкость воздуха,  $\text{м}^2/\text{с}$ .

Основное уравнение для расчета  $C_m$  применительно к ТХВ имеет вид:

$$C_m = 16 \cdot 10^9 \frac{M_{OB} \cdot P_m}{T}, \text{кг}/\text{м}^3 \quad (17)$$

где:

$M_{OB}$  – молекулярная масса ТХВ,  $\text{кг}/\text{моль}$ ;

$P_m$  – давление насыщенного пара, мм рт.ст. при температуре  $T$ .

Давление насыщенного пара ТХВ при температурах, характерных для процессов испарения ТХВ при авариях, может быть рассчитано по уравнению

$$Lq_{10}(P_m) = A - \frac{B}{T}, \quad (18)$$

где:

$A$ ,  $B$  – коэффициенты уравнения Антуана, рассчитываемые по экспериментальным данным для каждого типа ОБ в определенном интервале температур;

$T$  – температура жидкого ТХВ,  $град.К$ .

Динамическая скорость воздуха у поверхности земли может быть рассчитана по формулам:

$$u./u_1 = \begin{cases} (0,55 - 0,52B^{0,38535}) \exp(0,52 + 0,283B^{0,269}) \ln Z_0, & B > 0; \\ 0,55 \cdot Z_0^{0,52}, & B = 0 \\ \left[ (0,55 + 0,52(-B)^{0,38535}) \right] \exp \left[ (0,52 + 0,0313(-B)^{0,155}) \right] \ln Z_0, & B < 0, \end{cases} \quad (19)$$

где:

$B$  – значение параметра Бызово́й (табл.1);

$Z_0$  – шероховатость подстилающей поверхности, м (табл.2)

$u_1$  – скорость ветра на высоте 1м над слоем шероховатости, рассчитываемая по формуле:

$$u_1 = u_\phi \left[ (1 + Z_0) / Z_\phi \right]^m, \quad (20)$$

где:

$Z_0$  – высота флюгера, м;

$u_\phi$  – скорость ветра на высоте флюгера, м/с;

$m$  – показатель профиля скорости ветра в приземном слое атмосферы, который рассчитывается по формулам:

$$m = \begin{cases} \frac{(z_0/z_\phi - 1)}{\ln(z_0/z_\phi)}, & B = 0; \\ \frac{B(1 - z_0/z_\phi)}{(1 - z_0/z_\phi)^B}, & B \neq 0. \end{cases} \quad (21)$$

Табл. 1 Значения коэффициента Бызово́й

Характеристики устойчивости атмосферы	Очень неустойчивая	Умеренно неустойчивая	Слабо неустойчивая	Безразличная	Слабо неустойчивая	Умеренно неустойчивая	Очень неустойчивая
---------------------------------------	--------------------	-----------------------	--------------------	--------------	--------------------	-----------------------	--------------------

Класс устойчивости по Паскуилу-Тернеру	1	2	3	4	5	6	7
<i>B</i>	-0,1	-0,01	-0,001	0,0	0,001	0,01	0,05

Табл. 2 Шероховатость подстилающей поверхности  $Z_0$  в зависимости от типа местности, где происходит рассеяние паров ТХВ

Тип поверхности	$Z_0$ , м
Ровная местность, покрытая снегом	0,001
Ровная местность с высотой травы до 0,1	0,001
Ровная местность с высотой травы до 0,15 м	0,01
Ровная местность с высотой травы до 0,6 м	0,05
Неровная местность, покрытая кустарником	0,1
Лес высотой до 10 м	0,4
Городская застройка	1,0

Коэффициент молекулярной диффузии  $D_M$  может быть получен из уравнения Андрусова [4]:

$$D_{OM} = \frac{17,2(1 + \sqrt{M_B + M_T})}{Pa(3,08 + v_K^{1/3})^2 \cdot \sqrt{M_B \cdot M_T}} \quad (22)$$

где:

$D_{OM}$  – коэффициент диффузии при 0 °С, м<sup>2</sup>/с;

$M_B, M_T$  – молекулярная масса воздуха и ТХВ соответственно, г/моль;

$P_a$  – давление, атм.

Для температур, отличающихся от 0°С, используется уравнение вида [4]:

$$D_M(T) \approx D_{OM} \left( \frac{T}{273} \right)^{2,5}, \quad (23)$$

где  $T$  – температура.

Расчетное уравнение для оценки величины кинематической вязкости воздуха при атмосферном давлении имеет вид [4]:

$$\nu_B = 2,84 \cdot 10^{-6} \cdot T \cdot \exp(4,36 + 2,844 \cdot 10^{-3} \cdot T) \quad (24)$$

При пожаре образование ОЗВ будет осуществляется следующими процессами:

- выброс паров ТХВ в атмосферу в результате взрывного разрушения емкостей при термическом воздействии (через 20 минут после возникновения пожара) и конвективный подъем в очаге пожара;
- поступление паров ТХВ в атмосферу в результате конвективного подъема в очаге пожара и испарения с поверхности пролива при повышенной температуре.

Методика количественной оценки выброса паров ТХВ при взрывном разрушении емкости под воздействием тепловой нагрузки в [4] отсутствует. Поэтому можно ориентировочно принять массу ТХВ, поступившего в ОЗВ, равной 10 ... 20% от общего количества ТХВ в емкости.

$$M_B = (0,1 \dots 0,2) M_E, \quad (25)$$

где:

$M_B$  – масса паров ТХВ, поступивших в ОЗВ при термическом взрыве в момент времени  $t_b$ , кг;

$M_E$  – масса ТХВ в емкости, кг.

Производительность источника поступления ТХВ в ОЗВ рассчитывается по формулам (15)-(22).

Высота подъема конвективной колонки может быть определена из соотношения [6]:

$$h_k = \frac{K_r R_n}{U} \left[ \frac{2,5 + 3,3 \cdot g \cdot R_n \cdot (T_n - T_B)}{T_B \cdot U^2} \right], \quad (26)$$

где:

$h_k$  – высота источника относительно поверхности земли, м;

$K_r$  – размерный коэффициент (равный 1,5 м/с);

$R_n$  – радиус площади зоны пожара, м;

$U$  – скорость ветра на высоте 10 метров, м/с;

$g$  – ускорение силы тяжести;

$T^n$  – температура горения в абсолютной шкале, °К;

$T_B$  – температура окружающего воздуха в абсолютной шкале, °К.

Интенсивность выделения  $i$ -го продукта горения находится по формуле

$$Q_i = m_i \cdot \alpha_i \quad (27)$$

где

$Q_i$  – интенсивность выделения  $i$ -го продукта горения,  $к\text{г}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ ;

$m_i$  – массовая скорость выгорания,  $к\text{г}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ ;

$\alpha_i$  – весовая доля  $i$ -го компонента продукта горения, выделяющегося

при горении единицы массы горючей нагрузки (справочные данные).

Таким образом, при пожаре с разрушением емкостей общее количество ТХВ, поступающего в атмосферу, будет складываться из массы  $M_B$  мгновенного выброса и массы  $M_k$  конвективного подъема; при пожаре по всей площади разлива общее количество ТХВ, поступающего в атмосферу, будет складываться из массы  $M_k$  конвективного подъема и массы испаряющегося ТХВ.

На основании проведенного анализа процессов перехода ТХВ из начального источника химического заражения в ОЗВ можно сделать вывод, что переход ТХВ осуществляется в результате следующих процессов:

1. мгновенный выброс паров ТХВ в атмосферный воздух;
2. непрерывное поступление ТХВ в атмосферу – испарение из образовавшейся на поверхности (на неограниченной поверхности, в обваловке, в поддоне) «лужи» с ТХВ и испарение с поверхности выседания жидких частиц и капель;
3. поступление паров ТХВ в результате конвективного подъема из очага горения, а также взаимодействия указанных процессов.

Дифференциация основных вариантов процессов образования ОЗВ позволяет при идентификации процесса образования и распространения ОЗВ провести декомпозицию сложной модели на более простые, что упрощает разработку математического и программного обеспечения для решения задач оперативного управления в условиях чрезвычайной ситуации.

Для принятия решений в условиях чрезвычайных ситуаций необходимо исследовать сам объект как сложный динамический объект, его характеристики и свойства как объекта управления, процесс организации управления в условиях чрезвычайных ситуаций, а также разработать основы

создания систем информационной поддержки при принятии решений в условиях чрезвычайных ситуаций на основе математического моделирования.

## **5. Заключение**

Рассмотренный в статье подход к моделированию процесса образования ОЗВ предполагает введение существенных допущений и ограничений. Например, величины компонент вектора скорости ветра по координатным осям ОХ, ОУ приняты постоянными и независимыми от высоты.

Однако хорошо известно, что на разных высотах направление и скорость ветра значительно различаются. Это обстоятельство приводит к многократному повышению размерности задачи моделирования процесса образования ОЗВ, которая, к тому же, становится динамической.

Очевидно, что решение этой задачи потребует выделения больших объемов вычислительных ресурсов, которыми обладают распределенные вычислительные системы.

## **Список литературы**

- [1]. Методика выявления и оценки химической обстановки при разрушении (аварии) объектов, содержащих СДЯВ.-М: ГШВС.1989-116с.
- [2]. Батырев В.В., Минько С.М. и др. Обоснование размеров зоны защитных мероприятий вокруг объектов по хранению и уничтожению химического оружия. Отчет по НИР «Вагоетка-О», этап 2.- Новогорск: АГЗ, 1998.-184с.
- [3]. Белов П.Н. Теория расчета распространения атмосферных примесей и ее применение для оценки загрязнения природной среды // Географическое прогнозирование и охрана природы: Сб. науч. тр./ Под ред. Звонковой Т.В., Касимова Н.С. – М.:Изд-во МГУ, 1990. – 176с.
- [4]. Братсерт У.Х. Испарение в атмосферу. Теория, история, приложения./ Пер. с англ. Под ред. А.С. Дубова. – Л.: ГИМЗ, 1985. – 350 с.
- [5]. Методика прогнозирования развития и последствий аварийных ситуаций на объектах уничтожения химического оружия. Шифр «Система» (первая редакция). М.: ГУП ГосНИИОХТ, 2001. – 123 с.
- [6]. Разработка и обоснование перечня мероприятий, осуществляемых при ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций, применительно к возможным сценариям их развития. Промежуточный отчет по НИР «Конда», этап 2, № 715 – Редкино: ОАО «РОКБА», 2001 – 142 с.

# Computer-Aided Operational Management Technogenic Chemical-Technological Objects at Occurrence of Beyond Design Basis Emergency Situations

Y. Matveev <matveev4700@mail.ru>

N. Stukalova <nast77@mail.ru>

Tver state technical University, 170026, Russia, Tver, A. Nikitin emb., 22

**Abstract.** Scales of consequences of accidents depend on the sizes of the cloud of the infected air and quality of resource management which arose when corruptings and spreaded in the atmosphere on mitigation of consequences. The purpose of operational management of resources on mitigation of consequences in alert conditions in case of release of ecologically dangerous substances are a minimization of spatial boundaries of manifestation of the striking action of a cloud of the infected air. In environmental monitoring of a status of dangerous chemical production the possibility of tracing in real time of consequences of burst of toxic agent is of great importance. Therefore an opportunity to trace a path of relocation of an aerosol cloud in real time is represented important. In article need of use of the distributed computing systems for mathematical process modeling of formation of a cloud of the infected air in case of origin of beyond design basis alert conditions on technogenic chemical and technological objects is justified. Classification of the considered alert conditions depending on the factors generating them is given. Processes of formation of a cloud of the infected air as control objects are considered. Dependence of speed of change of concentration of dangerous impurity in arbitrary point of space is analyzed and mathematical models of processes of formation of a cloud of the infected air in case of high-temperature bursts (explosions, the fires) and passages of large amounts of toxic chemicals on different surfaces with their subsequent evaporation are given. Feasibility of decomposition of the task of process modeling of formation of a cloud of the infected air is proved.

**Keywords:** emergency; chemical engineering; cloud contaminated air; mathematical model; distributed computing system.

**DOI:** 10.15514/ISPRAS-2015-27(6)-25

**For citation:** Matveev Y., Stukalova N. Computer-Aided Operational Management Technogenic Chemical-Technological Objects at Occurrence of Beyond Design Basis Emergency Situations. *Trudy ISP RAN/Proc. ISP RAS*, vol. 27, issue 6, 2015, pp. 395-408 (in Russian). DOI: 10.15514/ISPRAS-2015-27(6)-25

## References

- [1]. Metodika vyjavlenija i ocenki himicheskoj obstanovki pri razrushenii (avarii) obektov, soderzhashhih SDJaV [Methods of identification, M: General Staff of the Armed Forces.1989-116 p (in Russian)

- [2]. Batyrev V.V., Minko S.M. i dr. Obosnovanie razmerov zony zashhitnyh meroprijatij vokrug obektov po hraneniju i unichtozheniju himicheskogo oruzhija [Rationale for the size of the zone of protective actions around objects on storage and destruction of chemical weapons]. Otchet po NIR «Vagonetka-O», jetap 2. [Scientific research reports "Trolley-On", step 2.] - Novogorsk: AGZ, 1998.-184 p. (in Russian)
- [3]. Belov P.N. Teorija rascheta rasprostraneniya atmosferynyh primesej i ee primenenie dlja ocenki zagryaznenija prirodnoj sredy [The theory for calculating the distribution of atmospheric constituents and its application to evaluation of environmental pollution], Geograficheskoe prognozirovanie i ohrana prirody: Sb.nauch.tr. Pod red. Zvonkovej T.V., Kasimova N.S. – M.:Izd-vo MGU[MSU Publishing house], 1990. – 176 p. (in Russian)
- [4]. Bratsert U.H. Isparenije v atmosferu. Teorija, istorija, prilozhenija [ Evaporation into the atmosphere. Theory, history, applications]. Per. s angl. Pod red. A.S. Dubova. – L.: GIMZ [GIS], 1985. – 350 p. (in Russian)
- [5]. Metodika prognozirovanija razvitija i posledstvij avarijnyh situacij na ob#ektah unichtozhenija himicheskogo oruzhija. Shifr «Sistema» (pervaja redakcija) [Methods for prediction of development and consequences of emergency situations on objects of chemical weapons destruction. The code "System" (first edition)]. M.: GUP GosNIIOHT [sue GosNIIOKhT], 2001. – 123 p. (in Russian)
- [6]. Razrabotka i obosnovanie perechnja meroprijatij, osushhestvljaemyh pri likvidacii posledstvij chrezvychajnyh situacij, primenitel'no k vozmozhnym scenarijam ih razvitija. Promezhutochnyj otchet po NIR «Konda», jetap 2 [Development and validation of the list of activities undertaken during the liquidation of consequences of emergency situations, with respect to possible scenarios of their development. Interim report on research "Condat", phase 2], № 715 – Redkino: OAO «ROKBA» [JSC "ROKBA"], 2001 – 142 p. (in Russian)