

Интернет-журнал «Науковедение» ISSN 2223-5167 <http://naukovedenie.ru/>

Том 8, №5 (2016) <http://naukovedenie.ru/index.php?p=vol8-5>

URL статьи: <http://naukovedenie.ru/PDF/89TVN516.pdf>

Статья опубликована 24.11.2016.

Ссылка для цитирования этой статьи:

Матвеев Ю.Н., Карельская К.А., Стукалова Н.А., Нкурийимана Ж. Структуры математических моделей аварийных и чрезвычайных ситуаций на химически опасных объектах // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ» Том 8, №5 (2016) <http://naukovedenie.ru/PDF/89TVN516.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 15-29-07970 офи_м

УДК 519.711.3

Матвеев Юрий Николаевич

ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», Россия, Тверь¹
Доктор технических наук, профессор
E-mail: matveev4700@mail.ru

Карельская Катерина Александровна

ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», Россия, Тверь
Кандидат технических наук, доцент
E-mail: kak69@yandex.ru

Стукалова Наталия Александровна

ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», Россия, Тверь
Кандидат технических наук, доцент
E-mail: nast77@mail.ru

Жан Поль Нкурийимана

ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», Россия, Тверь
Аспирант
E-mail: jnkuriyimana2009@yandex.ru

Структуры математических моделей аварийных и чрезвычайных ситуаций на химически опасных объектах

Аннотация. При возникновении чрезвычайной ситуации, образовавшейся в результате аварии на химически-опасном объекте, основной целью управления ликвидацией чрезвычайной ситуации является локализация опасной зоны загрязнения.

Ликвидация чрезвычайной ситуации – задача сложная, требующая больших ресурсов, под которыми понимают свободу выбора значений некоторых параметров управляемого объекта. Объект управления должен обладать определенными степенями свободы. В данном случае это управляющие воздействия, которые позволяют изменять состояние объекта в соответствии с теми или иными требованиями. Для анализа основных групп параметров, определяющих динамику какого-либо процесса и характеризующих его состояние в любой момент времени, необходимо рассмотреть такой процесс как объект управления.

¹ 170023, г. Тверь, проспект Ленина, д. 25

Авторами поставлена задача оптимизации управления ликвидацией чрезвычайной ситуации и проведены аналитические исследования моделирования процесса образования первичного и вторичного облака зараженного воздуха.

В работе приводится дифференциальное уравнение переноса примеси в движущейся среде для задачи аварийного выброса загрязняющего вещества. Представлена структура модели образования облака зараженного воздуха при разрушении или полной разгерметизации емкости с аварийным химически-опасным веществом.

Предлагаемая структура модели позволяет прогнозировать процесс образования облака зараженного воздуха в случае взрывов емкостей хранилищ и технологического оборудования.

Ключевые слова: математическое моделирование; аварийная ситуация; чрезвычайная ситуация; химически-опасный объект; опасный выброс; облако зараженного воздуха; распространение вещества; дифференциальные уравнения; задача управления; прогнозирование

Чрезвычайная ситуация (ЧС) определяется как выход за пределы санитарной защитной зоны (СЗЗ) химически-опасных объектов (ХОО) облака зараженного воздуха (ОЗВ) аварийных химически-опасных веществ (АХОВ) с концентрацией на его границе, превышающей ПДКа (предельно допустимого уровня концентрации АХОВ в воздухе населенных пунктов) [1, 5]. Цель управления ликвидацией ЧС – это локализация опасной зоны загрязнения (ОЗЗ), образовавшейся в результате аварий на химически-опасных объектах (ХОО), с концентрацией АХОВ на ее границе, не превышающей ПДКа.

Сформулированная цель является основанием для постановки задачи оптимизации управления ликвидацией ЧС. Для решения этой задачи необходимо располагать ресурсами, под которыми понимают свободу выбора значений некоторых параметров управляемого объекта. Другими словами, объект управления должен обладать определенными степенями свободы – управляющими воздействиями, которые позволяют изменять его состояние в соответствии с теми или иными требованиями. Для анализа основных групп параметров, определяющих динамику какого-либо процесса и характеризующих его состояние в любой момент времени, необходимо рассмотреть такой процесс как объект управления. [2]

Количество той или иной примеси a , содержащейся в единице объема воздуха, называется объемной концентрацией примеси – Ca , а скорость поступления примеси в воздух от того или иного источника, т.е. количество примеси, выбрасываемой в воздух в единицу времени будем называть интенсивностью источника – F . Зависимость скорости изменения концентрации примеси в произвольной точке пространства – $\partial Ca / \partial t$ определяется расположением в пространстве источников примеси и рядом параметров, в число которых входят составляющие скорости ветра – u, v, w вдоль осей x, y, z , коэффициентов атмосферной турбулентности – k и др. [3]

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

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

Здесь w_a – собственная вертикальная скорость примеси, R и P – скорость образования и уничтожения примеси в результате химических реакций, W – скорость выпадения примеси на подстилающую поверхность.

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.

Для определения скорости изменения концентрации примеси в любой точке заданного пространства $\partial Ca/\partial t$ на основе уравнения (1) должны быть заданными параметры u, v, w – составляющие скорости ветра, которые определяются путем измерений, а также величины w_a, F, R, P, W . Кроме этого должны быть заданы условия на границах области расчета. Если область расчета ограничена сверху поверхностью $z = H$, а снизу земной поверхностью $z = 0$, то условия на этих границах обычно задаются в виде

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

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

При рассмотрении примеси в слое толщиной H порядка 2...5 км условия (2) определяют исчезновение примеси или ее вертикального потока на этой границе.[4] 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 βCa , где β – коэффициент аккомодации, зависящий от физических свойств подстилающей поверхности, наличия на ней растительности или застроек.

Уравнение (1) при граничных условиях (2), (3) решается численными методами для конкретного заданного географического района.

Любой процесс, в том числе и процесс образования облака зараженного воздуха, исходя из внешних признаков, может быть условно изображен так, как показано на рисунке 1, где выделены основные группы параметров, определяющих его течение и характеризующих состояние в любой момент времени.

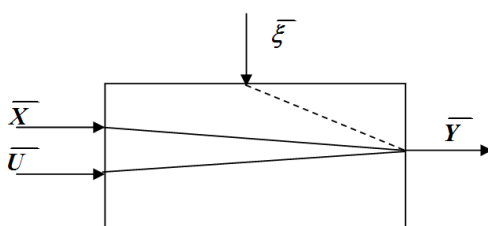


Рисунок 1. Схема процесса образования ОЗВ (составлено авторами)

Обычно выделяют следующие группы параметров.

1. Входные параметры x_i ($i=1, \dots, m$). Входными называют параметры, значения которых могут быть измерены, но возможность воздействия на них отсутствует. Значения указанных параметров не зависят от режима процесса.

2. Управляющие параметры u_i ($i=1, \dots, r$). Под управляющими понимают параметры, на которые можно оказывать прямое воздействие в соответствии с теми или иными требованиями, что позволяет управлять процессом.

3. Возмущающие параметры ξ_i ($i=1, \dots, l$). Возмущающими называют параметры, значение которых случайным образом изменяются с течением времени и которые не доступны для измерения.

4. Выходные параметры y_i ($i=1, \dots, n$). Под выходными понимают параметры, величины которых определяются режимом процесса и которые характеризуют его состояние, возникающее в результате суммарного воздействия входных, управляющих и возмущающих параметров. Иногда выходные параметры называют также параметрами или переменными состояния. Однако понятие «параметры состояния» является более широким, чем понятие «выходные параметры», поскольку к выходным обычно относят только описание непосредственно наблюдаемого поведения процесса. [6, 7]

Тогда задачу управления процессом образования ОЗВ в общем виде можно поставить как задачу минимизации объема ОЗВ

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

при связях и ограничениях:

$$\partial Ca / dt = f(u, v, w, k, w_a, F, R, P, W), \quad (5)$$

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

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

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

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

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

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

z_{ϕ} – высота флюгера;

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

В качестве основных вариантов выбросов АХОВ можно выделить:

- 1) высокотемпературные выбросы АХОВ в атмосферу, которые по времени протекания могут быть кратковременными или продолжительными (взрывы, пожары);
- 2) пролив больших количеств АХОВ на различные поверхности с последующим испарением.

В первом случае причиной выброса может стать взрывное (за счет повышения внутреннего давления, воздействия избыточного внешнего давления и т.п.) разрушение оболочки, когда энергии достаточно для дробления всей или части массы АХОВ, находящейся в емкости. [8, 9] Это может привести к образованию первичного паро-аэрозольного облака, часть из которого сконденсируется и осядет, а часть будет распространяться в виде пара, тонкодисперсного и высокодисперсного аэрозоля. Оставшееся количество АХОВ, не перешедшее в первичное облако, разольется на поверхности и вместе с осевшими каплями и аэрозолем из первичного облака будет испаряться, образуя вторичное облако. Схему образования облака зараженного воздуха (ОЗВ) при взрывном разрушении оболочки с дроблением массы АХОВ (всей массы или части), находящейся в емкости, можно представить, как показано на рисунке 2.

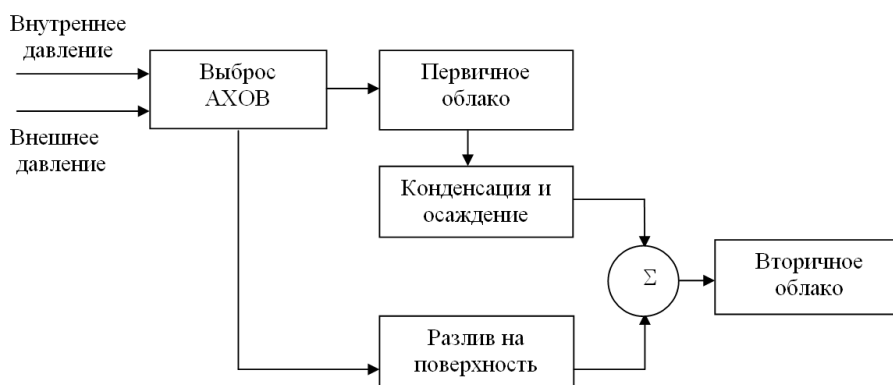


Рисунок 2. Схема образования облака зараженного воздуха при взрывном разрушении емкости АХОВ (составлено авторами)

Во втором случае будет происходить пролив АХОВ из полностью или частично разрушенной емкости (трубопровода) на огражденную или неограниченную поверхность с последующим испарением. При этом будет происходить образование только вторичного облака.

С точки зрения возможных последствий эти два случая различаются наличием или отсутствием первичного облака. Кроме того, в первом случае необходимо учитывать полидисперсный состав облака.

В соответствии с вышеизложенным, типовые варианты выбросов АХОВ и процессы образования при этом ОЗВ как объекта управления целесообразно анализировать с учетом связей между этими элементами. [10]

Рассмотрим процесс образования ОЗВ при взрывном разрушении оболочки. Как видно из схемы образования ОЗВ, приведенной на рисунке 2, при взрывном нарушении оболочки образуются первичное и вторичное ОЗВ. Поэтому необходимо рассматривать отдельно процесс образования первичного облака и процесс образования вторичного облака как элементы процесса образования общего ОЗВ с имеющимися связями между ними.

Модель процесса образования первичного облака состоит из двух стадий (рисунок 3):

1. Мгновенное испарение жидкости, переходящей в первичное облако.
2. Образование зеркала пролива.

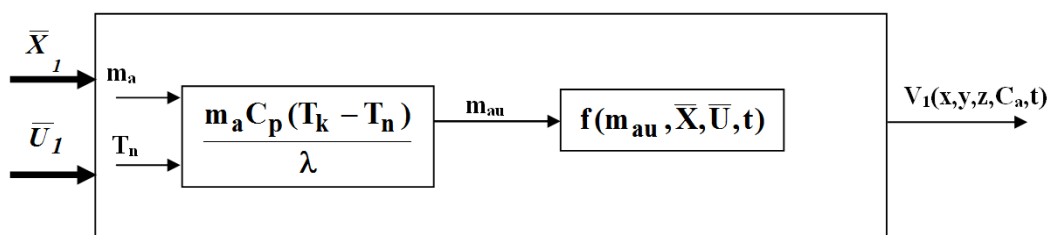


Рисунок 3. Структура модели процесса образования первичного ОЗВ (составлено авторами)

Входные параметры \bar{X}_I :

m_a - масса АХОВ в аварийном объеме;

T_n - начальная температура АХОВ при аварии;

X, Y, Z - компоненты вектора скорости ветра;

T_n - температура подстилающей поверхности;

T_v - температура окружающего (набегающего) воздуха;

ϕ - относительная влажность воздуха;
 β - градиент температур (атмосферная турбулентность);
 P_a - атмосферное давление;
 m_{au} – масса мгновенно испарившегося АХОВ.

Выходные параметры:

$V_1(x,y,z,Ca,t)$ - объем первичного ОЗВ с ПДКа на границе ОЗЗ, x,y,z – координаты;
 Ca - концентрация АХОВ;
 t - время.

Управляющие параметры \bar{U}_1 :

m_c - масса сорбента для экстренного накрытия АХОВ;

Q_d - расход дегазирующих веществ для постановки завесы на пути распространения ОЗВ;

Q_o - расход дегазирующих или других веществ (например, воды) для осаждения АХОВ из ОЗВ.

Как показано на схеме модели процесса образования вторичного облака ОЗВ (рисунок 4), входные параметры $m_{п}$ (масса пролива) и $m_{кo}$ (масса сконденсированного из первичного ОЗВ и осевшего АХОВ) – компоненты вектора входных параметров (переменных). \bar{X}_2 ($m_{п}, m_{кo}$) – уравнение связи между моделями процессов образования первичного и вторичного облаков зараженного воздуха.

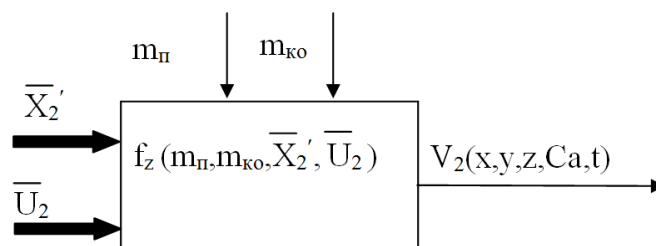


Рисунок 4. Структура модели процесса образования вторичного ОЗВ (составлено авторами)

Входные параметры X_2' :

$m_{п}$ - масса пролива;

$m_{кo}$ - масса сконденсированного из первичного ОЗВ и осевшего АХОВ;

$T_{п}$ - начальная температура АХОВ при аварии;

u_v - скорость ветра по направлению X ;

v_v - скорость ветра по направлению Y ;

w_v - скорость ветра по направлению Z ;

$T_{п}$ - температура подстилающей поверхности;

T_v - температура окружающего (набегающего) воздуха;

ϕ - относительная влажность воздуха;

β - градиент температур (атмосферная турбулентность);

P_a - атмосферное давление;

$S_{п}$ - размеры зеркала пролива по осям X, Y, Z (площадь зеркала пролива);

Z_o - характеристика подстилающей поверхности в месте разлива.

Выходные параметры $V_2(x,y,z,Ca,t)$ – объем вторичного ОЗВ с ПДКа на границе, где x,y,z – координаты, Ca – концентрация АХОВ, t – время.

Управляющие параметры \bar{U}_2 :

m_c - масса сорбента для экстренного накрытия АХОВ;

Q_d - расход дегазирующих веществ на дегазацию разлившегося, сконденсировавшегося и осевшего АХОВ;

Q_o - расход дегазирующих или других веществ (например, воды) для осаждения АХОВ из ОЗВ.

Структура модели образования суммарного ОЗВ при взрывном разрушении оболочки представлена на рисунке 5.

Элемент 1 – это модель процесса мгновенного испарения жидкости – массы АХОВ, перешедшей в первичное облако в соответствии с уравнением

$$m_{ан} = \frac{m_a \bar{C}_p (T_k - T_n)}{\lambda}, \quad (11)$$

где: $m_{ан}$ – масса мгновенно испарившегося АХОВ;

m_a – масса АХОВ в аварийном объеме;

C_p – средняя удельная теплоемкость АХОВ при постоянном давлении;

T_k – температура кипения АХОВ при атмосферном давлении (конечная температура вещества);

T_n – начальная температура АХОВ при аварии;

λ – удельная теплота парообразования в точке кипения АХОВ при атмосферном давлении.

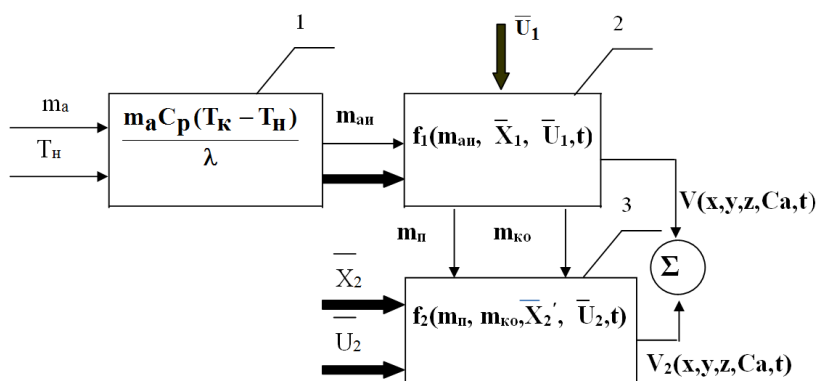


Рисунок 5. Структура модели образования ОЗВ при разрушении или полной разгерметизации емкости с АХОВ (составлено авторами)

Элемент 2 – модель, отражающая процесс образования и распространения первичного облака от пролива $m_{ан}$, конденсации из первичного облака и осаждения АХОВ $m_{ко}$, при прямом воздействии (управляющее воздействие) \bar{U}_1 и случайных воздействий на процесс:

$$V_1(x,y,z,Ca,t) = f_1(m_{ан}, \bar{X}_1, \bar{U}_1, t), \quad (12)$$

Элемент 3 – модель, отражающая процесс образования и распространения вторичного облака из разлившегося на поверхности $m_{п}$ и испаряющегося АХОВ вместе с осевшими каплями и аэрозолем из первичного облака $m_{ко}$ при прямом воздействии (управляющее воздействие) \bar{U}_2 и случайных воздействиях (возмущающие воздействия) на процесс:

$$V_2(x,y,z,Ca,t) = f_2(m_{п}, m_{ко}, \bar{X}'_2, \bar{U}_2, t), \quad (13)$$

Результирующее ОЗВ $V(x,y,z,Ca,t)$ – это результат взаимодействия (суммирования) первичного и вторичного облаков.

Предлагаемая структура модели (рисунок 5) также позволяет прогнозировать процесс образования ОЗВ в случае взрывов емкостей хранилищ и технологического оборудования. При этом принимается, что все количество АХОВ переводится в атмосферу в виде пара, высоко- и тонкодисперсного аэрозоля. Данное количество вещества и является исходным при последующем моделировании его рассеяния в атмосфере.

ЛИТЕРАТУРА

1. Стукалова Н.А., Матвеев Ю.Н., Долженко А.Б. Автоматизированная система управления технологическими процессами уничтожения химического оружия // Интернет-журнал «Науковедение». 2014, №4(23) [Идентификационный номер статьи в журнале 54TVN414] М.2014. Режим доступа:[http // naukovedenie.ru/PDF/54TVN414.pdf](http://naukovedenie.ru/PDF/54TVN414.pdf).
2. Палюх Б.В., Матвеев Ю.Н., Стукалова Н.А. Некоторые подходы к решению задачи локализации чрезвычайных ситуаций на химико-технологических объектах. Логистика и экономика ресурсоэнергосбережения в промышленности (МНПК «ЛЭРЭП-9-2015»): сб. статей IX Международной научно-технической конференции. – Смоленск, 2015. – С. 226-230.
3. Матвеев Ю.Н., Стукалова Н.А. Автоматизированное оперативное управление техногенными химико-технологическими объектами при возникновении запроектных аварийных ситуаций. Труды Института системного программирования РАН. 2015. Т. 27. №6. С. 395-408.
4. Капашин В.П., Мухидов В.У., Матвеев Ю.Н. Минимизация ущерба от аварий на техногенных объектах: монография, Тверь: Полипресс, 2010. – 218 с.: ил.
5. Surmava A.A., Kukhalashvili V.G., Kacharava G.G. Numerical 3D Model of Soil Pollution by Oil // J. Georgian Geophys. Soc., v.9b, 2005, pp. 18-22.
6. Равшанов Н., Шарипов Д.К., Хамдамова Р. Модель и численный алгоритм для исследования процесса распространения вредных веществ в атмосфере [Текст] // Актуальные вопросы технических наук: материалы междунар. науч. конф. (г. Пермь, июль 2011 г.). - Пермь: Меркурий, 2011. - С. 20-26.
7. Белихов А.Б., Леготин Д.Л., Сухов А.К. Современные компьютерные модели распространения загрязняющих веществ в атмосфере. Вестник КГУ им. Некрасова, №1 – 2013.
8. Бызова Н.Л., Гаргер Е.Г., Иванов В.Н., Экспериментальные исследования атмосферной диффузии и расчеты рассеяния примесей. – Л.: Гидрометеоздат, 1991. – 273 с.
9. Семенчин Е.А., Кузякина М.В. Стохастические методы решения обратных задач в математической модели атмосферной диффузии – М.: Физматлит, 2012. – 176 с.
10. Матвеев Ю.Н., Стукалова Н.А. Аспекты уничтожения химического оружия. «Актуальные проблемы безопасности жизнедеятельности и экологии»: сборник научных трудов I Международной научно-практической конференции. – Тверь, 2015. С. 509-512.

Matveev Yuriy Nikolaevich

Tver state technical university, Russia, Tver
E-mail: matveev4700@mail.ru

Karelskaya Katerina Aleksandrovna

Tver state technical university, Russia, Tver
E-mail: kak69@yandex.ru

Stukalova Nataliya Aleksandrovna

Tver state technical university, Russia, Tver
E-mail: nast77@mail.ru

Nkuriyimana Jean-Paul

Tver state technical university, Russia, Tver
E-mail: jnkuriyimana2009@yandex.ru

Structures of mathematical models of contingency and emergency situations on chemically dangerous objects

Abstract. In the event of an emergency, resulting in an accident on chemically dangerous objects, the main goal of management Incident is the localization of dangerous contamination zone.

Liquidation of emergency is the complex task, requiring large resources, which refers to freedom of choice of the values of certain parameters of the controlled object. The control object must have certain degrees of freedom. In this case, it is control actions that let you change the state of the object in accordance with certain requirements. For the analysis of the main groups of parameters that determine the dynamics of a process and is characterized by its state at any point in time, it is necessary to consider this process as a control object.

Authors set the task of optimization of management of elimination of emergency situation and analytical researches of model operation of process of formation of primary and secondary contaminated air cloud.

In work the differential equation of transfer of impurity is given in the moving environment for a problem of the emergency emission of a contaminant. The structure of model of formation of the contaminated air cloud at destruction or the complete depressurization of container with the emergency chemical and dangerous substance is presented.

The offered structure of model allows to predict process of formation of the contaminated air cloud in case of explosions of capacities of storages and processing equipment.

Keywords: math modeling; contingency situation; emergency situation; chemically dangerous object; dangerous emission; contaminated air cloud; substances spread; differential equations; control problem; prediction