

*А.В. Вишняков, А.О. Осипчук, А.А. Рязанов, С.М. Мурзин,  
П.Л. Шишкин, И.Я. Удилова*  
(Уральский институт ГПС МЧС России; e-mail: alexvish63@mail.ru)

## **О ПРОГНОЗИРОВАНИИ ОБСТАНОВКИ ПРИ АВАРИИ НА ХИМИЧЕСКИ ОПАСНОМ ОБЪЕКТЕ**

*Проведён анализ математических моделей для прогнозирования возможной химической обстановки при аварии на химически опасном объекте.*

*Ключевые слова: авария, химически опасный объект.*

*A.V. Vishnyakov, A.O. Osipchuk, A.A. Ryazanov, S.M. Murzin,  
P.L. Shishkin, I.Y. Udilova*

## **ABOUT FORECASTING OF SITUATION DURING THE ACCIDENT ON CHEMICALLY HAZARDOUS OBJECT**

*Analysis of mathematical models for forecasting of possible chemical situation during the accident on chemically hazardous object*

*Key words: accident, hazardous chemical object.*

Статья поступила в редакцию Интернет-журнала 27 ноября 2014 г.

Несмотря на предпринимаемые меры в области промышленной безопасности (многие потенциально опасные производства спроектированы так, что вероятность крупной аварии на них оценивается величиной порядка  $10^{-4}$ ), полностью исключить вероятность возникновения аварий практически невозможно.

В большинстве случаев аварии вызываются нарушением технологии производства, правил эксплуатации оборудования, машин и механизмов, низкой трудовой и технологической дисциплиной, несоблюдением норм безопасности, отсутствием должного надзора за состоянием оборудования.

Одна из возможных причин аварий – стихийные бедствия. Характерными особенностями этих аварий являются внезапность возникновения выбросов (разливов) *аварийно химически опасных веществ (АХОВ)*, быстрое распространение поражающих факторов, опасность массового поражения людей и животных, попавших в зону заражения, необходимость проведения аварийно-спасательных и других неотложных работ в короткие сроки.

По последним данным, в России более чем в 400 городах и иных населённых пунктах имеется свыше 3000 *химически опасных объектов (ХОО)*, в случае возникновения аварийных ситуаций на которых в зонах возможного заражения может оказаться более 60 млн человек на площади примерно 300 тыс км<sup>2</sup>. Актуально данное обстоятельство и для Свердловской области, и для Уральского федерального округа.

Чрезвычайные ситуации техногенного характера на ХОО всегда ведут к гибели (тяжёлым поражениям) людей, нанесению колоссального ущерба экономике и крайне негативному влиянию на окружающую среду, резко повышая уровень загрязнения и уничтожая целый ряд различных форм жизни.

Одним из основных элементов обеспечения химической защиты (безопасности) населения, безусловно, является проведение аварийно-спасательных и других неотложных работ в зонах ЧС. В этом случае правильность тактики группировок сил и средств **Единой государственной системы предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций (РСЧС)** в районе ЧС во многом зависит от качества разработанных планов действий на случай химической аварии.

Мероприятия химической защиты выполняются, как правило, заблаговременно или в оперативном порядке в ходе ликвидации ЧС. Заблаговременно в обязательном порядке разрабатывается план действий в случае возникновения аварии (катастрофы). В плане даются возможные оценки очага поражения; состояния и возможностей своих подразделений, местных сил и материально-технических средств, которые будут использоваться для выполнения поставленной задачи; времени года, суток, состояния погоды, характеристик местности и т.д.

При оценке очага поражения анализируются: характер и масштабы основных поражающих факторов; состояние объектов и территории, где будут проводиться работы; состояние населения; наличие и характер факторов, препятствующих ведению работ; вид и объёмы аварийно-спасательных и других неотложных работ.

Таким образом, при планировании рассматриваются возможные сценарии возникновения опасных и вредных факторов химического характера, то есть план фактически приобретает характер описания многофакторного эксперимента.

Для эффективной работы группировок сил и средств РСЧС при аварии химического характера необходима своевременная и долгосрочная оценка, а также прогноз возможной химической обстановки. Понятно, что проведение натурных экспериментов на ХОО не представляется возможным, такие эксперименты неосуществимы в силу риска для человека и среды его обитания, а также значительных затрат денежных средств и материальных ресурсов. Решение этой задачи возможно с использованием специально разработанных математических моделей.

Однако во многих моделях не учитывался целый ряд факторов, присущих ЧС. Теория моделирования в современной литературе нередко излагается весьма поверхностно и бессистемно. Используемая терминология страдает нечёткостью и непоследовательностью.

В настоящее время как в России, так и за рубежом разработано достаточно математических моделей для оценки распространения вредных веществ (примесей), в том числе оценки последствий аварий на ХОО [1-6].

Количество и характер моделей определяют, с одной стороны, кругом задач, стоящих перед РСЧС, а с другой – требованиями к точности моделирования. Разнообразие требований к характеру оценки загрязнения и высокая специфичность распространения выбросов АХОВ в различных метеоусловиях приводят к необходимости использования целого ряда моделей.

Наибольшее применение находят модель, описанная в методике прогнозирования масштабов заражения сильнодействующими ядовитыми веществами при авариях (разрушениях) на химически опасных объектах и транспорте (РД 52.04.253-90); модель распространения загрязняющей примеси в атмосфере вследствие ветрового подъёма с площадного наземного источника Паскуилла-Гиффорда; Лагранжево-Эйлерова модель распространения опасных химических примесей в атмосфере LEDI; модель подъёма облака нагретого газа; модель Института экспериментальной метеорологии (НПО "Тайфун", г. Обнинск) и др.

Проблемной стороной математического моделирования распространения АХОВ является вопрос распространения вредных примесей на расстояния, превышающие 100 км, так как по мере увеличения расстояния масштабы распространения выброса в вертикальном направлении становятся сравнимыми с толщиной планетарного пограничного слоя и обычные предположения об однородности не позволяют использовать упрощённые математические модели.

В этой статье авторы поставили цель – проанализировать отдельные модели для определения их перспектив в использовании при оценке химической обстановки и, как следствие, применении в решении тактических вопросов действий группировок сил и средств РСЧС.

В настоящее время для использования МЧС России регламентирована математическая модель, содержащаяся в методике прогнозирования масштабов заражения сильнодействующими ядовитыми веществами при авариях (разрушениях) на химически опасных объектах и транспорте (РД 52.04.253-90). В данном документе используется термин "сильнодействующие ядовитые вещества", в настоящее время для этой группы веществ принято название "аварийно химически опасные вещества", являющееся более точным, так как отражает условия их применения, хранения и производства (ГОСТ Р 22.9.05-95) (далее по тексту авторы пользуются термином – АХОВ).

При разработке методики использовались теоретические и опытные модели распространения примесей в атмосфере. Главным требованием, имевшим место при разработке документа, являлась простота методов, достаточная, чтобы их можно было реализовать без применения вычислительной техники, которая в то время не имела достаточного быстрого действия, была громоздкой и не устойчивой к механическим и температурным воздействиям.

При работе над моделью учтён ряд условий, допущений и ограничений.

Среди допущений, принятых в рассматриваемом руководящем документе, например, следует обратить на следующие:

Толщина слоя жидкости АХОВ ( $h$ ), разлившейся свободно на подстилающей поверхности, принимается  $h = 0,05$  м по всей площади разлива.

Для АХОВ, разлившихся в поддон или обваловку,  $h$  определяется из соотношений:

- при разливах из ёмкостей, имеющих самостоятельный поддон (обвалование):

$$h = H - 0,2,$$

где  $H$  – высота поддона (обвалования), м;

- при разливах из ёмкостей, расположенных группой, имеющих общий поддон (обвалование):

$$h = \frac{Q_0}{F \cdot d},$$

где  $Q_0$  – количество выброшенного (разлившегося) при аварии вещества, тонн;

$d$  – плотность АХОВ, тонн/м<sup>3</sup>;

$F$  – реальная площадь разлива в поддон (обвалования), м<sup>2</sup>.

Однако, в ряде случаев ни одно из допущений не отвечало фактическим обстоятельствам реальных событий. Такие допущения не характерны, например, для большинства сжиженных газов, в частности для аммиака. Также здесь не отражается специфика крупных производств химической отрасли с одновременным наличием на предприятии тысяч тонн продукции.

Так, например, в случае катастрофы на ПО "Азот" (Ионава, Литва) в 1989 году с разовым выбросом в окружающую среду 7000 тонн жидкого аммиака. Показатель  $h$  на всех стадиях разлива соединения значительно перекрыл принятые методикой расчётные значения.

В начале аварии мощные струи аммиака под давлением сорвали предохранительные клапаны, и в первые секунды аварии высота слоя жидкого аммиака, разлившегося по территории завода, доходила до 30, а в отдельных местах до 50 см [7, 8], то есть в 6-10 раз превысив значение, предусмотренное рассматриваемой методикой. В последующем оторванный от днища многотонный бак отлетел на 25 м в сторону, полностью разрушив специальный поддон и эстакаду с трубопроводами. Железобетонный заградительный стакан, в котором стоял резервуар, также не выполнил свою защитную функцию, которая в обязательном порядке учитывается анализируемой моделью.

Как в последующем выяснилось, имели место определённые нарушения, допущенные при возведении специального поддона (частичная замена перлита на кварцевый песок, применение некачественного металла и т.д.). Можно говорить, что рассматриваемая методика прогнозирования масштабов заражения АХОВ при авариях (разрушениях) на ХОО и транспорте учитывает типовые решения, заложенные при проектировании и строительстве химических объектов, однако никто не даст гарантии, что различного рода нарушения не будут допущены при строительстве или уже имеют место на предприятиях, введённых в эксплуатацию ранее [8, 9].

Также следует отметить такое немаловажное обстоятельство, что для тактических вопросов, решаемых группировками сил и средств РСЧС в районе ЧС химического характера, часто нужна подробная информация по распределению концентраций АХОВ на всей или большей части опасной зоны. Но использование для этой цели математической модели, предложенной рассматриваемой методикой, не представляется возможным. В этом случае мы можем только описать границы опасной зоны [10].

Следует отметить то, что ранее считалось достоинством рассматриваемой модели – простота методов, позволяющая исключить применение вычислительной техники, в настоящее время стало её недостатком. Проработка задач, стоящих в современных условиях перед силами РСЧС, выполнение расчётов и прогнозирование развития событий на территориях, находящихся на большом (более 100 км) удалении от источника ЧС, невозможны без применения современных ЭВМ.

Таким образом, при использовании математической модели прогнозирования масштабов заражения АХОВ при авариях (разрушениях) на химически опасных объектах и транспорте имеются "узкие" места, требующие её комплексного пересмотра.

Вторая модель, рассматриваемая авторами, являющаяся моделью распространения загрязняющей примеси в атмосфере вследствие ветрового подъёма с площадного наземного источника Паскуилла-Гиффорда, нашла применения на малых расстояниях (до 10 км).

Данная модель является эмпирической, проста и имеет официальный статус. В её основе лежит представление концентрации АХОВ, выбрасываемого непрерывным источником в атмосфере, как струи с гауссовыми распределениями по вертикали и в поперечном к ветру направлении. Определение дисперсий выполняется по входным метеорологическим параметрам. Источник распространения АХОВ в этом случае принимается как точечный. Модель легко реализуется с использованием вычислительной техники. Но сфера деятельности ограничивается расстоянием до 10 км, то есть модель имеет ограничение применения.

Также вызывает интерес модель Института экспериментальной метеорологии, разработанная в НПО "Тайфун" (г. Обнинск). Модель очень удобна при необходимости определения зоны химического заражения на расстоянии от 10 до 100 км.

Эта модель пригодна как для описания распространения облака, созданного мгновенным источником, так и струи от непрерывного источника.

Распределения концентрации примеси по всем трём координатам имеют гауссову форму, как и в модели Паскуилла-Гиффорда, однако положение центра облака или струи находят интегрированием кинематического уравнения:

$$\vec{u}(t) = \frac{d\vec{x}}{dt},$$

где  $\vec{u}(t)$  – скорость ветра в точке, где находится в настоящий момент облако;  
 $\vec{x}$  – вектор координат центра облака;  
 $t$  – время движения.

В данном случае процесс диффузии в перпендикулярных к ветру направлениях рассматривают как функцию времени, в отличие от чисто пространственных распределений в модели Паскуилла-Гиффорда.

Рассматриваемая модель включает важные свойства так называемых моделей "лагранжева облака", что позволяет учесть изменения направления и скорости ветра в процессе распространения облака АХОВ. Это условие является главным фактором, позволяющим применять модель для расстояний, намного превышающих 10 км, то есть фактически до 100 км. Но при прогнозировании химической обстановки на территории, удалённой от источника загрязнения АХОВ более, чем на 100 км, говорить о высокой достоверности прогноза химической обстановки не представляется возможным. Также в модели НПО "Тайфун" используются коэффициенты, полученные эмпирическим путём и имеющие достаточно большой диапазон значений.

Особый интерес представляет модель переноса с облаками токсичного вещества в атмосфере при возникновении локальных температурной и концентрационной неоднородностях (термик). Задача моделирования переноса многокомпонентных примесей в следе за термиком возникает, например, при рассмотрении аварийных ситуаций, связанных со взрывом или пожаром на ХОО [4].

Примером такой ЧС может служить описанная выше катастрофа на ПО "Азот" (Ионава, Литва), когда загорелся жидкий аммиак. В зоне огня оказалось изотермическое хранилище аммиака, частично эстакада наливки аммиака, цех производства нитрофоски, склад готовой продукции, где находилось 24 тыс тонн минеральных удобрений, и другие объекты. От горения минеральных удобрений в большом количестве стали выделяться токсические ядовитые вещества. Образовалось аммиачное облако высотой до 80 м. Глубина распространения зараженного воздуха достигала 30 км [8].

Модель переноса примеси с облаками горячего газа основана на нестационарных уравнениях газовой динамики с замыканием их на основе модели турбулентности второго порядка. Указанная модель учитывает вертикальную неоднородность пограничного слоя, перегрев примеси и развитие вертикальных конвективных течений, а также вес переносимой газом примеси. Численный алгоритм основывается на комбинации метода крупных частиц для решения уравнения Рейнольдса и метода случайных блужданий для решения уравнения переноса многокомпонентной примеси. В модели реализуется метод решения стохастического дифференциального уравнения.

Расчёты плотности температуры и скоростей потоков газа проводятся численным интегрированием по времени полных уравнений Навье-Стокса, осреднённых по Рейнольдсу.

Уравнения основываются на предположении, что коэффициент турбулентной диффузии численно равен коэффициенту кинематической вязкости среды. В уравнения также включаются силы, действующие на газ со стороны пассивной примеси.

Пассивная примесь имеет только вертикальную компоненту скорости относительно среды, обусловленную гравитационным оседанием.

Однако при всех достоинствах и у данной модели есть определённые ограничения по сфере применения (при условии отрицательной температуры воздушных масс), так как используемой в модели полуэмпирический коэффициент турбулентной вязкости имеет слишком большой диапазон значений.

В заключение можно сделать следующие выводы:

1. Для эффективной работы группировок сил и средств Единой государственной системы предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций при чрезвычайном происшествии химического характера необходима своевременная, долгосрочная оценка и прогноз возможной химической обстановки.

2. В настоящее время разработано достаточно большое количество математических моделей, позволяющих оценить распространение вредных веществ (примесей), в том числе оценить последствия аварий на химически опасных объектах.

3. Проблемную сторону математического моделирования распространения аварийно химически опасных веществ составляет распространение вредных примесей на расстояния, превышающие 100 км, так по мере увеличения расстояния масштабы распространения выброса в вертикальном направлении становятся сравнимыми с толщиной планетарного пограничного слоя и обычные предположения об однородности не позволяют использовать упрощённые модели.

4. Практически все имеющиеся в настоящее время математические модели имеют определённые недостатки, ограничивающие их использование при оценке химической обстановки. Это обстоятельство одновременно предполагает возможность и необходимость выполнения работ по совершенствованию имеющихся математических моделей или созданию новых, более полно отвечающих современным требованиям. Вновь разрабатываемые модели должны опираться на возможность использования современной вычислительной техники.

#### Литература

1. *Подвигин Г.П.* АХОВ и защита от них: учеб. пособие. С.-Пб., 2005. 60 с.
2. Количественная оценка риска химических аварий // Под. ред. Колодкина В.М. Ижевск, 2001. 228 с.
3. *Методика* оценки последствий химических аварий (Методика – ТОКСИ). М.: НТЦ Промышленная безопасность, 1999. 83 с.
4. *Аксаков А.В.* Численное моделирование распространения примеси в следе за термиком: дис. ... канд. физ.-мат. наук: 05.13.18. Ижевск, 2005. 126 с.
5. *Романов В.И.* Прикладные аспекты аварийных выбросов в атмосферу. Справочное пособие. М.: Физматпосobie. 2006. 490 с.
6. *Бражников М.М., Кирвель И.И., Калинович А.С.* Оценка химической обстановки в чрезвычайных ситуациях. Минск: БГУИР, 2010. 26 с.
7. *Тихомилов С.А.* Определение и характеристика очагов химических аварий // Медицинский журнал. <http://prizvanie.su/?author=1&paged=227>.
8. *Ионавский* взрыв: 20 лет крупнейшей техногенной катастрофе в СНГ. <http://news.mail.ru/incident/2448277>.
9. Катастрофа на изотермическом хранилище жидкого аммиака // Дайджест – Промышленная безопасность. <http://ru-safety.info/post/100011600040036>.
10. *Стыцюра Д.В.* Анализ моделей распространения примеси в атмосфере // Матер. междунар. науч.-практ. конф. "XXIX Неделя науки СПбГТУ". 2001. Ч. II. С. 75-77. <http://www.uran.donetsk.ua/~masters/2009/fvti/daikun/library/article1.htm>.