

Относительная интенсивность люминесценции светокорректирующих пленок, как и следовало ожидать, увеличивается пропорционально концентрации добавленного люминофора. Для пленок с одинаковой концентрацией люминофоров, но из разных базовых марок ПЭВД, наблюдается воспроизводимость относительной интенсивности люминесценции $\pm 8\%$, в пределах погрешности метода измерения [5]. Это указывает на сохранение исходных свойств люминофора в композиции независимо от типа базовой марки ПЭВД как на лабораторном, так и на промышленном оборудовании.

Хорошая воспроизводимость оптических свойств наблюдается и в пределах одной партии пленки, что было исследовано при выпуске промышленной партии пленки из ПЭВД марки 153 с 0.02% комплекса нитрата европия с 1,10-фenantrolином. Относительная интенсивность люминесценции десяти отобранных образцов по длине рукава 1500 м составляет $25 \pm 2\%$, что находится в пределах погрешности метода измерения данной величины.

Таким образом, полученные данные показы-

вают, что производство светокорректирующих сельскохозяйственных пленок с применением типичных люминофоров и базовых марок ПЭВД, рекомендованных для этой цели ГОСТ 10354, с успехом может быть осуществлено с использованием технологии сухого смешения компонентов с последующей стандартной экструзией с раздувом и получением материалов хорошего качества и разбросом оптических показателей не более $\pm 8\%$.

Библиографический список

1. Kusnetsov S.I., Leplianin G.V. // Plasticulture. 1989. V. 3. № 83. P. 13.
2. Карапев В.Е. // Вестник Дальневосточного отделения РАН. 1995. № 2. С. 66.
3. Гайдук М.И., Золин В.Ф., Гайгерова Л.С. Спектры люминесценции европия Eu³⁺. М.: Наука, 1974.
4. Серебренников В.В. Синтезы соединений редкоземельных элементов. Ч. 2. Томск: ТГУ, 1986.
5. Минич А.С., Баталов А.П., Райда В.С. // Пластические массы. 1992. № 6. С. 59.

Институт химии нефти СО РАН
(г. Томск)

УДК 66.013.004.6

ВЕРИФИКАЦИЯ МЕТОДИК ДЛЯ ОЦЕНКИ ПОСЛЕДСТВИЙ ХИМИЧЕСКИХ АВАРИЙ

С.А.Губин, С.М.Лыков, И.В.Маклашова, А.С.Печеркин, В.И.Сидоров, С.И.Сумской

Анализ уровня опасности объектов, содержащих опасные химические (токсичные) вещества, представляет собой актуальную задачу, поскольку он необходим для оценки возможных последствий аварий, при которых происходит выброс опасных веществ за пределы оборудования [1, 2]. Составной частью анализа уровня опасности того или иного объекта является моделирование процессов выброса вещества, распространения за пределами оборудования, а также воздействия на окружающую среду.

В настоящее время для анализа последствий при выбросах токсичных веществ широко используется «Методика прогнозирования масштабов заражения сильнодействующими ядовитыми веществами при авариях (разрушениях) на химически опасных объектах и транспорте» (РД 52.04.2531-90) [3] (далее методика ГО). На наш взгляд, эта методика не вполне учитывает целый ряд факторов, как физического, так и методологического характера, которые могут существенно

влиять на прогнозирование уровня опасности.

С целью устранения недостатков методики ГО и получения более обоснованной и универсальной методики была предпринята попытка разработки новых подходов к оценке последствий выброса опасных веществ. Эти подходы были частично реализованы в согласованной Госгортехнадзором России «Методике оценки последствий химических аварий» (далее методика «ТОКСИ-2») [4], а также воплощаются в разрабатываемой в настоящее время третьей редакции этой методики (далее методика «ТОКСИ-3»). В методике «ТОКСИ-3» в качестве модели рассеяния используется модель рассеяния тяжелого газа. Обе методики разработаны в НТЦ «Промышленная безопасность» с участием специалистов МИФИ.

Масштабы последствий при выбросе опасных веществ могут варьироваться в широких пределах и зависят от следующих взаимосвязанных факторов:

1) физико-химические и токсикологические свойства опасных веществ (плотность газовой фазы, температура кипения, давление насыщенных паров, показатели токсичности и т.д.);

2) условия, при которых опасное вещество находится в оборудовании перед выбросом (давление и температура, фазовый состав);

3) количество опасного вещества, попавшего в окружающую среду (с учетом времени выброса и его скорости);

4) доля опасных веществ, попавших в облако, распространяющееся в атмосфере; при этом содержание вещества в атмосфере определяется количеством газовой фазы, выброшенной из оборудования в атмосферу; вещества, переходящего в газовую фазу при мгновенном вскипании перегретой жидкой фазы выброса; вещества, попадающего в атмосферу в виде аэрозоля (капельной взвеси), который не оседает на подстилающую поверхность, а дрейфует вместе с газовой фазой в облаке; вещества, испарившегося из разрушенного оборудования и из пролива жидкой фазы на месте выброса и попавшего в атмосферу;

5) атмосферные условия, при которых происходит процесс рассеяния опасных веществ, в частности: уровень турбулентности, определяющий скорость рассеяния в различных направлениях; обычно для его оценки используют так называемый класс устойчивости (стабильности) атмосферы; скорость ветра и характер его пространственно-временного изменения, как по величине, так и по направлению; температура окружающей среды; влажность воздуха;

6) действия по ликвидации аварии, определяющие, в частности время ликвидации мест утечек и проливов опасных веществ;

7) характеристики местности, где произошел выброс (рельеф, характер шероховатости подстилающей поверхности, наличие застройки и т.п.).

Перечисленные выше факторы выбраны исходя из возможности появления в той или иной точке пространства в тот или иной момент времени того или иного количества опасных веществ, т.е. перечисленные факторы учитывают лишь физику процесса. Последствия выбросов определяются также распределением на территории, прилегающей к месту выброса, возможных объектов поражения (речь, прежде всего, идет, конечно, о людях) и степенью их устойчивости к воздействию опасных веществ), характером поведения человека в зоне поражения, а также наличием укрытий и средств индивидуальной защиты, ослабляющих воздействие опасных веществ. В данной статье, однако, мы ограничимся

только физическими факторами, определяющими последствия выброса.

При моделировании последствий аварийных ситуаций необходим адекватный учет всех перечисленных выше факторов. Рассмотрим на примере трех выбранных нами методик (методика ГО, методики «ТОКСИ-2» и «ТОКСИ-3»), каким образом они учитываются при моделировании аварий.

Рассмотрим подробнее различия верификационных методик. Учет различных факторов на стадии поступления опасных веществ в окружающую среду, а затем в атмосферу и на стадии рассеяния эти методики представлены ниже:

1. Учет различных сценариев аварийных ситуаций.

Методики "ТОКСИ" позволяют рассмотреть весь спектр возможных аварийных ситуаций с учетом конструктивных особенностей конкретной технологической установки, на которой произошла авария (частичное или полное разрушение оборудования, истечение газовой, жидкой или двухфазной сред, срабатывание отсекающей арматуры, остановка компрессоров или насосов).

Методика ГО рассматривает единственный вариант развития аварийной ситуации – мгновенный выброс всего содержимого объекта. Таким образом, методика ГО не учитывает все многообразие аварийных ситуаций в отличие от методик "ТОКСИ", которые пригодны для анализа последствий любой аварийной ситуации и построения полей риска с учетом вероятности возникновения той или иной ситуации. Последнее обстоятельство особенно важно, так как оно позволяет предсказать возможный ущерб, определяемый не самыми крупными (полное разрушение оборудования с залповым выбросом опасных веществ в окружающую среду) авариями, вероятность которых невелика, а более мелкими и более частыми отказами.

Более того, на первый взгляд, может показаться, что использование методики ГО вполне целесообразно и дает возможность рассмотреть наихудший вариант аварийной ситуации – полное разрушение того или иного объекта. Однако это не совсем так. Существует класс оборудования, для которого сценарий методики ГО – мгновенный выброс всего содержимого – просто невозможен. К таким объектам относятся трубопроводы. Хотя в методике ГО приведены примеры (№ 2.4), относящиеся именно к трубопроводам, из которых следует, что 500 т аммиака, содержащегося в трубопроводе, мгновенно выбрасывается в окружающую среду, такая ситуация не реальна. В наихудшем сценарии развития аварии может произойти полный ("гильотинный")

разрыв трубопровода и тогда в течение некоторого, достаточно продолжительного времени содержимое трубопровода будет выбрасываться в окружающую среду.

Таким образом, применять методику ГО к авариям на трубопроводах необходимо с большой осторожностью, поскольку реальная картина и сценарий гипотетической аварии, заложенный в методику, могут отличаться весьма существенно.

2. Учет фазового состояния вещества в оборудовании.

В методике ГО входные параметры, например давление и температура, характеризующие состояние вещества внутри технологического объекта, отсутствуют, и, следовательно, в общем случае можно утверждать, что использование методики ГО не позволяет правильно предсказывать изменения в последствиях аварии с изменением параметров вещества внутри объекта, что может привести к существенным искажениям в оценке последствий.

Следует отметить, что в двух случаях методика ГО все-таки косвенно дает возможность учесть фазовый состав. Во-первых, это относится к случаям, когда рассматриваются изотермические хранилища амиака. Они выделены в методике ГО в особый случай, предполагающий, что вещество находится в объекте при температуре, близкой к температуре кипения, т.е. косвенно характеризуется фазовое состояние вещества, и, во-вторых, к случаям, когда температура вещества в технологическом оборудовании совпадает с температурой воздуха. В методике ГО величиной, определяющей размеры зоны поражения, является эквивалентное количество вещества в облаке. Эта величина, в свою очередь, определяется четырьмя характеристиками: токсичностью вещества; состоянием атмосферы; скоростью и длительностью испарения при проливе на поверхность, а также долей жидкой фазы вещества, переходящей в пар при мгновенном вскипании перегретой жидкой фазы. Из четырех перечисленных характеристик только последняя связана с состоянием вещества в оборудовании. Эта величина, согласно методике ГО, вычисляется путем перемножения двух коэффициентов K_1 и K_7 .

Первый из них K_1 соответствует, как мы предполагаем, доле вскипающего вещества, находящегося при температуре 20°C. Второй коэффициент K_7 должен отражать изменение доли вскипающего вещества с изменением степени перегрева жидкой фазы, т.е. с изменением температуры, при которой хранится жидккая фаза. В тоже время непонятно по какой причине, но величина K_7 зависит от температуры воздуха. От-

метим, что в реальных ситуациях температура в оборудовании может быть существенно больше (до сотен градусов Цельсия), чем температура воздуха. Разумеется в этом случае использование методики ГО может привести к совершенно неверной оценке. Возможна и обратная ситуация, когда температура в оборудовании меньше, чем температура окружающего воздуха, и тогда методика ГО даст завышенную оценку, ибо доля жидкой фазы, перешедшая в газовую фазу, в реальности будет меньше, чем предсказанная по методике ГО. Таким образом, только в случае, когда температура вещества в объекте равна температуре воздуха, применение методики ГО целесообразно и, соответственно, позволяет получить достоверные оценки.

Методики "ТОКСИ" не имеют указанного недостатка и дают возможность корректно учесть состояние вещества внутри технологического объекта и в зависимости от этого состояния рассчитать долю вскипающей жидкой фракции и определить скорость выброса вещества в любом агрегатном состоянии. Более того, методики "ТОКСИ" могут быть легко адаптированы на случай, учитывающий изменение состояния внутри объекта со временем.

Таким образом, методика ГО не всегда может корректно учитывать состояние вещества в оборудовании и, как следствие, дать заведомо неверную (как заниженную, так и завышенную) оценку количества вещества, перешедшего в первичное облако в случае, когда температура внутри объекта отличается от температуры окружающей среды.

3. Учет реальных физических процессов, протекающих при аварии на стадии выброса.

Протекание аварии связано с целой совокупностью физических процессов и только при их адекватном учете можно надеяться на получение правильных размеров зон поражения. Как уже отмечалось выше, для оценки размеров зон поражения важное значение имеет, сколько опасных веществ (а при длительном выбросе и за какое время) попадает непосредственно в атмосферу и рассеивается в ней.

В методике ГО масса опасных веществ, попадающих в атмосферу, определяется коэффициентами K_1 и K_7 для первичного облака и коэффициентами K_2 и K_4 для вторичного облака. Выше (в п.2) относительно K_7 нами уже были высказаны критические замечания, однако даже с их учетом далеко не всегда можно получить правильную массу опасных веществ в первичном облаке, если проводить расчеты по методике ГО. В случае, если в оборудовании находилась жидккая фаза в перегретом состоянии, то при ее выбросе в ок-

ружающую среду помимо газовой фазы будет образовываться аэрозольная взвесь (охлажденные до температуры кипения капельки жидкого вещества). Часть этой взвеси будет осаждаться на землю и впоследствии испаряться, а другая часть будет оставаться в воздухе и испаряться в результате теплообмена с ним. В таком случае в атмосфере будет распространяться облако с массой большей, чем масса газа, образующегося при вскипании перегретой жидкой фазы. Присутствие аэрозолей в облаке, распространяющемся в атмосфере, доказывают многочисленные опыты (см. например работы [5, 6]), причем масса аэрозоля в облаке сопоставима с массой газа.

Таким образом, при моделировании рассеяния необходимо учитывать наличие в облаке аэрозоля. Однако в методике ГО этот существенный фактор не отражен, что может дать неверную (занизенную в несколько раз) оценку количества вещества, перешедшего в первичное облако.

В методиках «ТОКСИ» учитывается возможность наличия аэрозольных включений, как в первичном облаке, так и в струйных выбросах из частично разрушенного оборудования. В этих методиках задается коэффициент, указывающий, во сколько раз из-за наличия аэрозолей надо увеличить массу опасного вещества, распространяющегося в атмосфере. Такой коэффициент был выбран, согласно рекомендациям работы [7], равным двум. В методике «ТОКСИ-2» наличие аэрозоля учитывается путем включения в распространяющееся в атмосфере облако дополнительной массы. Однако влияние аэрозоля на динамику распространения самого облака не учитывается. В методике же «ТОКСИ-3» наличие аэрозоля учитывается путем включения в модель скорости испарения аэрозольных капель и определения влияния того или иного количества аэрозоля на плотность среды в облаке.

Еще один процесс, определяющий количество опасных веществ в атмосфере помимо вскипания перегретой жидкости и перехода в атмосферу газа и аэрозоля, – это кипение охлажденной жидкой фазы при попадании ее на поверхность с более высокой температурой. В методике ГО процессы кипения вообще не рассмотрены, хотя при выбросе из изотермических хранилищ именно за счет кипения, а также вследствие вскипания части незначительно перегретой жидкой фазы, находящейся внутри хранилища на некоторой глубине, происходит формирование первичного облака. В методиках «ТОКСИ» кипение и его вклад в формирование первичного облака учитываются. Отметим, что в методиках «ТОКСИ» все аспекты кипения пролива не учитываются, в частности кипение пролива уже на стадии формиро-

вания вторичных облаков.

В заключение нашего краткого обзора реальных физических процессов, протекающих при аварии, перечислим факторы, относящиеся к стадии выброса, не учитываемые ни в одной из рассматриваемых методик:

детальная картина пролива (форма пролива, процесс растекания жидкости с постепенным нарастанием поверхности зеркала пролива);

стадия смешения опасного вещества с воздухом сразу после выброса, вместо этого в методике «ТОКСИ-2» предполагается появление на месте аварии облака чистого продукта, движущегося со скоростью ветра, а в методике «ТОКСИ-3» допускается задание начальной степени разбавления такого облака; однако, это всего лишь простейший способ учесть смешение с воздухом, он лишь в первом приближении имитирует реальную картину течения и смешения сразу после выброса; согласно методике ГО, начальную стадию выброса и смешения опасного вещества с воздухом понять вообще не представляется возможным; на самом же деле при выбросе из оборудования, находящегося при избыточном давлении, в пространстве в месте со-прикосновения опасного вещества и воздуха возникают резкие градиенты скорости и градиенты давления и плотности, поэтому в этих областях будет генерироваться сильная турбулентность, которая, в свою очередь, приведет к интенсивному подмешиванию воздуха в облако опасного вещества, вследствие чего уже вблизи места выброса в облаке будет наблюдаться концентрация опасного вещества меньше (причем, гораздо меньше) 100%, соответствующих чистому облаку, в результате чего рассеиваться будет не чистое облако, а существенно разбавленное, что, естественно, может оказаться на размерах зон поражения.

4. Учет физических процессов при моделировании рассеяния опасного вещества в атмосфере.

Наряду с количеством опасного вещества, поступающего в атмосферу для адекватного расчета размеров зон поражения необходимо правильно моделировать процесс рассеяния. В настоящее время существует несколько подходов к такому моделированию, а именно:

гауссовские модели рассеяния; в этих моделях используют формульные выражения;

модели рассеяния, базирующиеся на интегральных законах сохранения либо в облаке в целом (залповый выброс), либо в поперечном сечении облака (шлейфовые облака); в этих моделях применяют обыкновенные дифференциальные уравнения;

модели, построенные на решении системы уравнений сохранения в исходном виде; этим моделям соответствует система уравнений в частных производных.

В методике «ТОКСИ-2» используется гауссовская модель рассеяния, какая модель рассеяния применяется в методике ГО определить трудно, поскольку в ней приведены лишь табличные значения, полученные, скорее всего, также по гауссовской модели.

В методике «ТОКСИ-3» используется модель рассеяния тяжелого газа, основанная на интегральных законах сохранения. Она учитывает такие факторы, как влияние силы тяжести на рассеяние, наличие в облаке аэрозольных частиц опасного вещества, фазовые переходы в облаке, реальную геометрию облака, а также температурное неравновесие по отношению к окружающей среде.

Наиболее точные результаты дает модель рассеяния третьего типа, однако для расчетов по такого рода моделям требуются большие затраты. В связи с этим возникает вопрос, а насколько хорошо могут предсказывать процесс рассеяния гауссовские и интегральные модели. Ответить на этот вопрос можно путем сравнения достоверных экспериментальных данных, полученных в известных условиях, с результатами расчета. Именно поэтому для верификации моделей рассеяния в рассматриваемых методиках мы выбрали крупномасштабные эксперименты для выбросов фреоно-воздушных смесей.

Исследования проводили в 1982/83 гг. в Торней-Айленд (Thorney Island) в Англии [8]. Было выполнено около двух десятков опытов по выбросу газообразного фреона-12 (дихлордифторметан) как чистого, так и разбавленного воздухом в объеме порядка 2 тыс. м³. Опыты проводили в ровном поле, выброс осуществлялся путем сброса с цилиндрического жесткого каркаса мягкой герметичной оболочки, под которую заранее запускалась смесь. В этом случае в окружающей среде практически мгновенно образовывалось облако правильной цилиндрической формы с однородным составом внутри. Мы выбрали несколько экспериментов, данные о которых приведены в табл. 1.

Таблица 1. Результаты экспериментов по выбросу фреона-12.

№ опыта	Объем выброса, м ³	Объемная доля фреона, % (об.)	Скорость ветра, м/с	Стабильность атмосферы
Опыт 007	2000	19.4	3.2	E
Опыт 008	2000	15.5	2.4	D
Опыт 015	2100	8.2	5.4	C/D
Опыт 017	1700	100	5	D/E

В табл. 1 для характеристики состояния атмо-

сферы приведены категории устойчивости атмосферы по Паскилу, они согласуются с используемыми в отечественной практике характеристиками атмосферы следующим образом: A,B,C – конвекция; D - изотермия; E,F – инверсия; там, где указаны два класса в тестировании был выбран вариант с наихудшими условиями рассеяния, например для опыта 15 при стабильности C/D в расчетах полагался класс стабильности D – изотермия.

Результаты расчетов, а также экспериментальные точки приведены на рис. 1–4. Для всех четырех опытов приведены максимальные концентрации, достигаемые в ходе всего выброса, в зависимости от расстояния от источника выброса.

Из приведенных данных видно, что в целом методика рассеяния тяжелого газа ("ТОКСИ-3") более точно описывает процесс рассеяния, чем гауссовские модели ("ТОКСИ-2"). Причем наиболее существенны эти отличия в прилегающей к месту выброса области – первые несколько сот метров.

Таким образом, было проведено сравнение различных методик и выяснено, в какой полноте для различных стадий аварии учитываются факторы, определяющие протекание и, соответственно, последствия аварии. Было показано, что, чем полнее учитывается круг определяющих факторов, тем точнее получается предсказание. Например учет стадии рассеяния тяжелого газа позволяет получить более правдоподобные поля концентрации, чем в случае, когда такие факторы не учитываются (гауссовские модели). Проведенное рассмотрение даст возможность нам проранжировать методики в порядке убывания ожидаемой достоверности их предсказания. Такое ранжирование состоит в следующем:

1. Методика «ТОКСИ-3» - наиболее достоверная методика как с точки зрения моделей, описывающих собственно выброс, так и рассеяние.

2. Методика «ТОКСИ-2» – методика, достоверно описывающая выброс и рассеяние по упрощенной модели.

3. Методика ГО – методика, исходящая из достаточно угрубленных и не всегда адекватных предпосылок и, соответственно, дающая приближенные оценки.

Суммарная оценка различных методик для наглядности представлена в табл. 2.

Таблица 2. Сравнительные характеристики методик расчета зон поражения

Характеристика	Методика ГО	Методика "ТОКСИ-2"	Методика "ТОКСИ-3"
1. Учет различных сценариев аварии	Рассматривается единственный сценарий – мгновенный выброс всего ОХВ	Учитываются все возможные варианты аварии, учитывающие тип оборудования и его конструктивные особенности.	
2. Возможность расчета аварии на трубопроводе	Так как длительность истечения не учитывается, используется грубое приближение – мгновенный выброс всего содержимого трубопровода.	Используется простейшая модель истечения из трубопровода, которая учитывает конечную длительность выброса с постоянной скоростью, не учитываются волновые процессы в трубопроводе.	
3. Учет состояния вещества в оборудовании	Состояние вещества в общем случае в оборудовании не учитывается. Лишь в случае совпадения температуры воздуха и температуры в оборудовании правильно описывается влияние параметров в оборудовании на последствия аварии.	Корректно учитывается влияние температуры в оборудовании на долю вскипающей жидкости при выбросе ОХВ и влияние давления в оборудовании на скорость выброса ОХВ.	
4. Учет реальных физических процессов, протекающих при аварии			
4.1. Наличие аэрозолей	Наличие аэрозоля в выбросе не учитывается	Учитывается масса аэрозоля (равная массе газа) в облаке при выбросе вскипающих жидкостей	Учитывается масса аэрозоля (равная массе газа) в облаке при выбросе вскипающих жидкостей. Учитывается влияние аэрозоля на динамику рассеяния облака
4.2. Кипение пролива	Кипение пролива не учитывается	Кипение пролива учитывается только на стадии формирования первичного облака и не учитывается на стадии рассеяния вторичных облаков	
4.3. Растекание пролива	Детальная картина пролива (форма пролива, скорость растекания) не рассматривается		
4.4. Расчет начальной стадии смешения	Процесс смешения не рассматривается.		Возможно априорное задание степени смешения воздуха и опасного вещества после выброса
4.5. Рассеяние в атмосфере	Используемая модель рассеяния неизвестна (это может быть гауссовская модель рассеяния)	Используется гауссовская модель рассеяния Не учитывается садия рассеяния тяжелого газа	Используется модель рассеяния тяжелого газа там, где необходимо учитывать разную плотность среды и выброса а также гауссовская модель рассеяния на стадии пассивного рассеяния примеси
	Не учитываются характер подстилающей поверхности и ее шероховатость.	Учитываются характер подстилающей поверхности и ее шероховатость.	Учитываются характер подстилающей поверхности и ее шероховатость.
	Используется модель атмосферы, основанная на трех классах стабильности		Используется модель атмосферы, основанная на шести классах стабильности
	Не учитываются рельеф местности и наличие крупных строений	Не учитываются рельеф местности и наличие крупных строений	Не учитываются рельеф местности и наличие крупных строений
4.6. Определение размеров зоны поражения, степени поражения человека и количества людей, пораженных в ходе аварии	Определяется размер зоны поражения по пороговой токсодозе при ингаляционном воздействии, без учета времени пребывания человека в области поражения. Вероятность поражения человека не рассматривается. Количество пораженных в ходе аварии также не рассматривается.	Определяется размер зоны поражения по смертельной и пороговой токсодозе при ингаляционном воздействии с учетом времени пребывания человека в области поражения. Вероятность поражения человека не рассматривается. Количество пораженных в ходе аварии также не рассматривается.	

В связи со сказанным выше возникает вопрос, каковы будут расхождения в предсказании размеров зон поражения по столь различным методикам. Этот вопрос следует считать основным, поскольку именно от ответа на этот вопрос и будет зависеть правомерность применения той или

иной методики. В данной статье предлагается провести сравнение результатов расчета нескольких гипотетических сценариев аварий на опасном химическом производстве для трех рассмотренных выше методик и на основании результатов соответствующих расчетов сделать

вывод о возможности и степени точности применения той или иной методики.

Рассмотрим два гипотетических сценария аварии.

Сценарий 1. Разрушение на химическом предприятии технологического трубопровода с жидким хлором, находящимся под давлением. Трубопровод соединен с емкостью, в которой также под давлением находится 40 т сжиженного хлора. Диаметр трубопровода – 2 см, расстояние до места разрыва – 20 м.

Сценарий 2. Разрушение на химическом предприятии технологической емкости, находящейся под давлением (той же самой, что и в сценарии 1), т.е. в которой под давлением находится 40 т сжиженного хлора.

Для обоих сценариев рассмотрим два варианта погодных условий при скорости ветра 1 м/с (инверсия) и 5 м/с (изотермия). Температура воздуха в обоих случаях – 0°C.

Рассмотрим два варианта условий нахождения сжиженного хлора в емкости. В первом случае он находится при температуре окружающей среды (0°C) и давлении 5 атм, а во втором случае

при температуре, отличной от температуры окружающей среды (40°C) и давлении 18 атм.

Будем считать, что время с начала аварии составляет 4 ч, также предположим, что люди в течение 30 мин покидают зону заражения.

Согласно методике ГО, все эти сценарии сводятся по своим последствиям к двум сценариям для двух различных скоростей ветра. Параметры зон поражения (в методике ГО эти зоны называются "зоны заражения") в этом случае сведутся также к двум расстояниям. Кстати, один из восьми выбранных нами сценариев – разрушение трубопровода при скорости ветра 5 м/с – полностью совпадает с одним из примеров (№ 2.1), приведённых в методике ГО. В этом примере размер зоны поражения составлял 6.84 км. При скорости ветра 1 м/с размер зоны поражения уже был равен 21 км – расстояние, на которое перенесется облако в течение 4 ч.

Расчеты размеров зон поражения по рассматриваемым методикам приведены в табл. 3.

Таблица 3. Пороговое и летальное воздействие

Расчет	Номер сценария (скорость ветра и температура в обоrudовании)	Размер зоны поражения по методикам, км					
		ГО		«ТОКСИ-2»		«ТОКСИ-3»	
		пороговое	летальное	пороговое	летальное	пороговое	летальное
1	Сценарий 1 (1 м/с и 0°C)	21	–	7.44	2.08	5.18	–
2	Сценарий 1 (5 м/с и 0°C)	6.84	–	2.09	0.58	1.95	0.54
3	Сценарий 1 (1 м/с и 40°C)	21	–	11.92	3.28	7.40	2.35
4	Сценарий 1 (5 м/с и 40°C)	6.84	–	4.42	1.16	4.33	1.20
5	Сценарий 2 (1 м/с и 0°C)	21	–	13.28	3.72	10.03	2.73
6	Сценарий 2 (5 м/с и 0°C)	6.84	–	5.08	1.33	5.38	1.33
7	Сценарий 2 (1 м/с и 40°C)	21	–	16.4	4.68	11.95	3.53
8	Сценарий 2 (5 м/с и 40°C)	6.84	–	5.75	1.49	5.95	1.35

Таким образом, выполнен расчет восьми вариантов гипотетической аварии. Сравним полученные результаты. При этом будем исходить из того, что, как показал выполненный выше анализ, наиболее точной с точки зрения исходных принципов из трех рассматриваемых методик является методика «ТОКСИ-3», следовательно можно ожидать, что и результаты расчета по этой методике будут наиболее полно отражать реальные последствия аварии. Исходя из этого, можно сделать следующие выводы:

1. Методика ГО дает самые большие зоны поражения по сравнению с другими методиками, рассмотренными в данной статье. В большинстве случаев по ней получаются существенно (в несколько раз) завышенные размеры зоны заражения. Лишь в ситуации, когда опасное вещество, выброшенное в окружающую среду, достаточно быстро полностью попадает в атмосферу и быстро начинает рассеиваться в атмосфере как пас-

сивная примесь, т.е. не генерируя собственного поля течения и без воздействия на выброс силы тяжести, размеры зон поражения более или менее удовлетворительно совпадают с рассчитанными по более точным методикам (см. табл. 3, расчеты 4, 6, 8.). Скорее всего, это объясняется тем, что неизвестные нам принципы, на которых основана методика ГО – это рассеяние по гауссовской модели залпового выброса. И тогда, действительно, если турбулентность в атмосфере велика, а время перехода выброшенного опасного вещества в атмосферу, наоборот, невелико, то возникает ситуация, когда, с одной стороны, все опасное вещество уже находится в атмосфере, а, с другой стороны, оно уже настолько перемешено с воздухом, что ни сила тяжести, ни течение, сгенерированное на стадии собственно истечения опасного вещества уже существенного значения не имеют. Это как раз и будет та ситуация, которая, как мы полагаем, заложена в основу ги-

потетического сценария методики ГО. Турублентность в атмосфере тем больше, чем меньше устойчивость атмосферы и чем больше скорость ветра. Следовательно, методика ГО будет относительно адекватной, если при быстром переходе выброшенного опасного вещества в атмосферу будет наблюдаться либо большая скорость ветра, либо небольшая скорость ветра, но неустойчивая стратификация (конвекция). И это подтверждается нашими расчетами. Действительно, при высоком уровне турбулентности (скорость ветра 5 м/с, изотермия) в случае выброса всего опасного вещества, находившегося в оборудовании, и его сравнительно быстрым времени испарения (несколько десятков минут) размеры зон поражения, рассчитанные по методикам ГО и «ТОКСИ-3» чрезвычайно близки. То, что скорость перехода опасных веществ в атмосферу влияет на размер зон поражения существенным образом, видно из двух примеров сценария 1 при скорости ветра 5 м/с (расчеты 2 и 4). В первом случае хлор находится при температуре 0°C, и скорость поступления опасного вещества во вторичное облако составляет 2.75 кг/с (длительность выброса – около 4 ч), а во втором случае хлор находится при температуре 40°C, скорость поступления опасных веществ во вторичное облако составляет 9.8 кг/с (длительность выброса – около 1 ч). В первом из этих двух вариантов аварии размер зоны поражения, согласно методике «ТОКСИ-3», составит 1.95 км, а во втором – 4.33 км, методика же ГО в обоих вариантах дает 6.84 км. Во втором случае (быстрый переход опасных веществ в атмосферу) размер зоны поражения, определенный по методике «ТОКСИ-3» гораздо ближе к величине, определенной по методике ГО, чем в первом случае (медленный переход опасных веществ в атмосферу). При малых скоростях ветра и устойчивом состоянии атмосферы размер зон поражения по методике «ТОКСИ-3» составляет около 10 км, а согласно методике ГО – 21 км – разница более, чем в два раза. И это еще не предел для методики ГО, ибо, если рассмотреть больший интервал времени с начала аварии, а не 4 ч, как в нашем примере, то по ГО можно получить еще большую величину зоны поражения.

Таким образом, из проведенных расчетов следует, что при достаточно больших временах перехода опасного вещества в атмосферу (свыше 1-2 ч) или при низком уровне турбулентности в атмосфере (скорости ветра 1-2 м/с и устойчивой стратификации атмосферы – инверсий) методика ГО будет давать завышенные размеры зон поражений в 2-4 раза. С учетом того факта, что при низком уровне турбулентности в атмосфере воз-

никают наихудшие условия рассеяния, получается, что именно для наихудшего варианта развития аварии методика ГО дает наибольшую ошибку – завышение размеров зон поражения.

2. Методика «ТОКСИ-2» также дает завышенные оценки зон поражения. Однако степень этого завышения существенно меньше по сравнению со степенью по методике ГО и составляет 30–50% по расстоянию. Например, при полном разрушении оборудования с хлором (сценарий 1, скорость ветра – 1 м/с, инверсия) зоны порогового поражения составят соответственно, 13.28 км по методике «ТОКСИ-2» и 10.03 км при температуре веществ в оборудовании 0°C (расчет 5) или 16.84 км и 11.95 км при температуре 40°C (расчет 8). Причина этого завышения обусловлена только неучетом на начальной стадии рассеяния действия силы тяжести на рассеяние выброса, поскольку в методике «ТОКСИ-2» реально учтены факторы, от которых зависит собственно процесс выброса.

Таким образом, методики «ТОКСИ», на наш взгляд, более реалистично отражают картину аварии и поэтому их использование более целесообразно. Вместе с тем, если точность методики ГО удовлетворяет требованиям пользователя, ее результаты также могут быть применены для оценки последствий аварий на опасных объектах.

В заключение отметим, что необходимо и дальнейшее верификационное исследование методик «ТОКСИ» и усовершенствование их в части более точного предсказания последствий аварии, например с учетом рельефа местности.

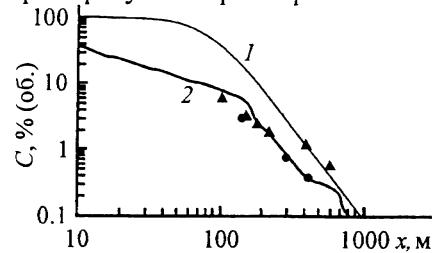


Рис. 1. Результаты расчетов по методикам «ТОКСИ-2» и «ТОКСИ-3» (соответственно кривые 1 и 2) и данные эксперимента № 7.

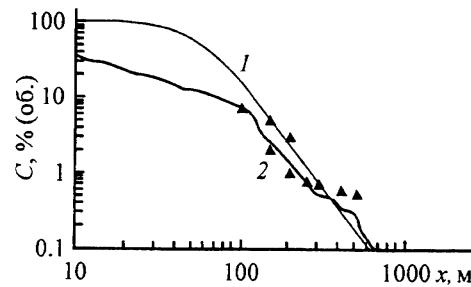


Рис. 2. Результаты расчетов по методикам «ТОКСИ-2» и «ТОКСИ-3» (соответственно кривые 1 и 2) и данные эксперимента № 8.

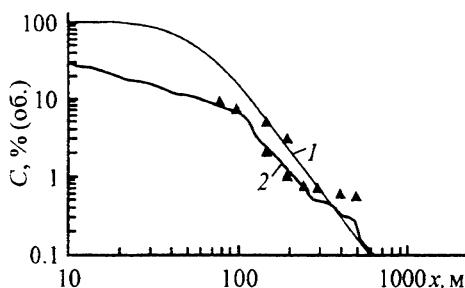


Рис. 3. Результаты расчетов по методикам «ТОКСИ-2» и «ТОКСИ-3» (соответственно кривые 1 и 2) и данные эксперимента № 15.

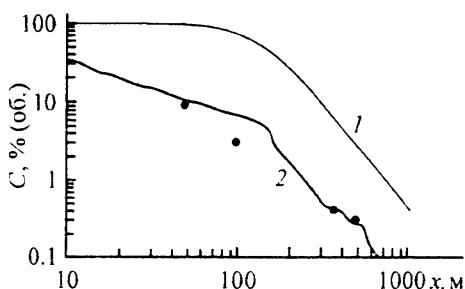


Рис. 4. Результаты расчетов по методикам «ТОКСИ-2» и «ТОКСИ-3» (соответственно кривые 1 и 2) и данные эксперимента № 17.

Библиографический список

1. Еременко В.А., Печеркин А.С., Сидоров В.И. // Хим. пром. 1992. № 7. С. 56.
2. Балашов В.К., Григоров С.И., Емельянов Е.Н. и др. // Там же. 1994. № 3. С. 15.
3. Методика прогнозирования масштабов заражения сильнодействующими ядовитыми веществами при авариях (разрушениях) на химически опасных объектах и транспорте (РД 52.04.253-90).
4. Сборник методик № 1. Методика оценки последствий химических аварий. Методика оценки последствий аварийных выбросов топливо-воздушных смесей. М.: НТЦ "Промышленная безопасность", 1999.
5. Goldwire H.C., McRae T.G., Jonson G.W. et al. // Desert Tortoise series data report: 1983 pressurised ammonia spills, UCID-20562, Lawrence Livermore National Laboratory, Livermore, CA, 1985.
6. Blewits D.N., Yohn J.F. and Ermak D.R. // Proc. Int. Conf. on Vapour Cloud Dispersion. New York: AIChE. 1987. P. 56.
7. Advisory Committee on Major Hazards "Second Report", HMSO, 1979.
8. Spicer T.O., Heavens J.A. Development of heavier-than-air dispersion model for the US coast guard hazard assessment computer system. S.Hartwig (ed.) Heavy Gas and Risk Assessment-III, P. 73. 1986 by Battelle-Institute e., Frankfurt am Main, Germany.

НТЦ "Промышленная безопасность", МИФИ