

# Моделирование аварийных процессов с выбросом опасного вещества с использованием программного комплекса TOXI+Risk



**Е.А. Хамидуллина,**  
канд. хим. наук,  
доцент



**Т.И. Дроздова,**  
канд. хим. наук, доцент



**О.А. Давыдкина,**  
магистрант



**А.А. Агапов,**  
канд. техн. наук, директор по  
информационным технологиям

ФГБОУ ВО Иркутский национальный исследовательский технический университет

ЗАО НТЦ ПБ

Выполнены моделирование процесса развития аварийной ситуации при разгерметизации емкостного оборудования с хлором на станции водоподготовки и расчет показателей риска с использованием программного комплекса TOXI+Risk.

*Modeling of processes of emergency situation development at depressurization of tanks and vessels with chlorine at the water treatment station, and the calculation of risk indices with the use of software TOXI+Risk were executed.*

**Ключевые слова:** опасное вещество, хлор, моделирование, риск аварии, программный комплекс TOXI+Risk.

Любая человеческая деятельность потенциально опасна — аксиома науки о безопасности. Поэтому оценка риска — это интуитивный набор действий, которые человек выполняет в повседневной жизни (например, оценивает расстояние до приближающейся машины при переходе дороги), или особая процедура, проводимая специалистами с применением специальных средств на опасных производственных объектах (ОПО), где цена ошибки особенно велика. В число таких ОПО в первую очередь входят производства, на которых обращаются токсичные и высокотоксичные химические вещества. И это не только крупные химические комбинаты, но и объекты жизнеобеспечения (мясокомбинаты, молокозаводы, станции водоподготовки и др.), которые в силу специфики нельзя удалить от мест проживания людей. Поэтому необходимо максимально обеспечивать безопасную эксплуатацию ОПО, выявляя степень опасности в ходе оценки риска.

К специальным средствам оценки риска на химически опасных объектах (и не только) относится и программный комплекс (ПК) TOXI+Risk, обладающий возможностью расчета последствий аварий на производственных объектах, в частности основ-

ных показателей риска (индивидуальный, коллективный, социальный), а также поля потенциального риска. Расчеты выполняют с учетом размещения людей, расположения потенциальных источников выброса опасных веществ: промышленных площадок, производственных помещений, многочисленного оборудования.

В данной работе ПК TOXI+Risk использовали для моделирования последствий аварийного выборождения хлора на станции водоподготовки, расположенной в Иркутской обл. (хлор в качестве дезинфицирующего средства используют девять районов области<sup>1</sup>). Цель работы — количественная оценка химической опасности при использовании свободного хлора для дезинфекции воды. На станциях, обрабатывающих большой объем воды, хранят значительные запасы хлора. В соответствии с Федеральным законом от 21 июля 1997 г. № 116-ФЗ «О промышленной безопасности опасных произ-

<sup>1</sup> В регионах с большим объемом водопотребления и сброса сточных вод хлором обезвреживают воду, используемую в бытовых и хозяйственных целях, обеспечивая тем самым надежную дезинфекцию в условиях изношенности водопроводов.

водственных объектов» большинство таких станций относятся к ОПО, поскольку содержат хлор в количестве более 0,5 т.

Определение зон распространения опасных веществ в случае их аварийных выбросов — сложная задача оценки риска промышленных объектов. По понятным причинам экспериментальные исследования распространения опасных веществ в атмосфере затруднены, поэтому особую значимость приобретает математическое моделирование этого процесса как наиболее универсальный и доступный способ получения информации. Программный комплекс TOXI+Risk предназначен для компьютерного моделирования и оценки возможных последствий аварийных ситуаций с участием опасных веществ [1–5]. Он позволяет выполнить оценку риска комплексно в соответствии с документом [6], значительно упрощая задачу исследователя, не требуя ручных расчетов риска, что практиковалось еще несколько лет назад [7].

В результате моделирования процесса распространения опасного вещества в окружающем пространстве оценены зоны распространения хлора при гипотетической аварии и исследованы характеристики облака рассеяния.

Как известно, размеры зон поражения при выбросах токсических веществ определяются количеством и свойствами опасного вещества, а также особенностями пространства, в котором происходит рассеяние. Так, жидкий хлор, находящийся в оборудовании под давлением, относится к перегретым жидкостям II категории опасности [8] поскольку его критическая температура ( $T_{\text{крит}} = 144\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) выше, а точка кипения ( $T_{\text{кип}} = -34,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) ниже температуры окружающей среды. Особенность таких веществ — мгновенное испарение части жидкости при разгерметизации и охлаждение оставшейся доли до точки кипения при атмосферном давлении. За счет мгновенного испарения хлора в первичное облако переходит до 20 % хлора, содержащегося в аварийной емкости. Мгновенно испарившимся хлором будет диспергирована и унесена в виде мелких капель часть жидкой фазы, что увеличит массу первичного облака примерно до 36 % общей массы хлора. Вторичное облако образуется за счет продолжающего кипеть жидкого хлора вследствие теплопритока от поверхности контакта. Этот процесс, переходя в режим квазистационарного испарения, продолжается еще какое-то время и характеризуется относительно низкой интенсивностью образования газообразного хлора. Облака рассеиваются в атмосфере и воздействуют на людей и окружающую среду.

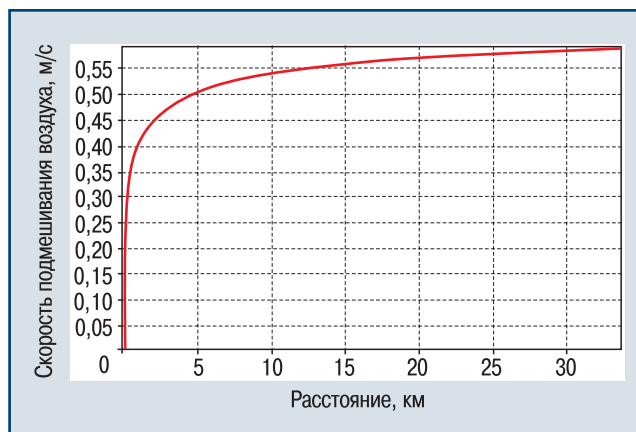
Метеорологические условия, при которых происходит рассеяние облака, оказывают существенное влияние на размеры зоны распространения токсичного газа. Хлор — тяжелый газ, и поэтому в его распространение большой вклад вносит гравитационное растекание и ветер в приземном слое атмосферы. В процессе рассеяния облака тяжелого

газа выделяют две фазы. За гравитационным растеканием следует смешение с воздухом и рассеяние, но четкой границы между этими процессами нет: считается, что смешение происходит постоянно, даже в период первоначального образования облака.

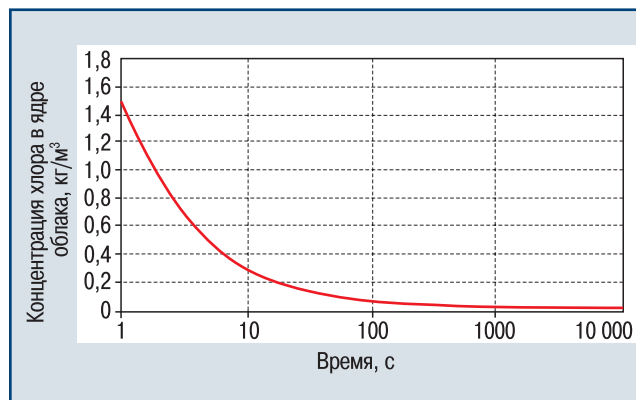
Учитывая свойства тяжелого газа и особенности метеоусловий в регионе, представляется интересным исследовать некоторые подходы при моделировании рассеяния хлора в атмосфере в целях определения наихудших условий рассеяния и параметров наиболее опасного сценария аварии.

Моделирование аварийной ситуации проводили при условии, что жидкий хлор находится в контейнере объемом 800 л при давлении 1,5 МПа; в аварии участвует единичная емкость, находящаяся на открытой площадке. Расчет рассеяния проводили по пороговой (0,6 мг·мин/л) и смертельной (6 мг·мин/л) токсодозе. При этом рассматривали наиболее опасный сценарий аварии — с полным разрушением контейнера и выбросом хлора в окружающую среду.

Расчеты показали, что в начальный период гравитационного растекания увеличение скорости подмешивания воздуха максимально по сравнению с последующими периодами распространения облака (рис. 1). Концентрация опасного газа в ядре облака резко падает в начальный момент времени (рис. 2).



▲ Рис. 1. Зависимость скорости подмешивания воздуха в облако газа от расстояния до места выброса



▲ Рис. 2. Динамика концентрации хлора в ядре облака во времени

Через 15 мин после аварийной разгерметизации максимальный диаметр хлорного облака достигнет 350 м. При этом его эффективная высота будет увеличиваться прямо пропорционально времени. Таким образом, уже через считанные минуты люди вблизи источника выброса окажутся в ядовитом постоянно растущем в диаметре облаке высотой примерно с человеческий рост.

Не менее важно изучить влияние горизонтальной и вертикальной подвижности атмосферы на распространение облака, размеры которого определяют как испарение жидкой фазы, так и нагрев (охлаждение) газовой фазы при смешении с воздухом. Размеры зон поражения в зависимости от скорости ветра на высоте 10 м представлены в табл. 1. Из нее видно, что при увеличении скорости ветра существенно уменьшаются зоны смертельного и порогового поражения. Например, при скорости ветра 1 м/с длина зоны порогового поражения на треть больше, зона смертельного поражения в 2 раза больше, чем при скорости ветра 10 м/с. С уменьшением скорости ветра отношение длины зоны порогового поражения к длине зоны смертельного поражения уменьшается, что говорит о сближении границ этих зон.

Скорость уменьшения концентрации хлора в облаке до безопасных значений в большой степени зависит от вертикальной устойчивости атмосферы. С высотой давление и температура воздуха в атмосфере снижается. Вертикальный градиент температуры на низких высотах — около 0,01 °С/м. В том случае, когда температура с высотой увеличивается, вертикальный градиент будет отрицательный (устойчивое состояние атмосферы). Положительный вертикальный градиент характерен для ясного дня, а отрицательный — для ясной ночи. Облачная или пасмурная погода препятствует развитию как неустойчивого, так и устойчивого состояния. В общем случае интенсивность рассеяния облака газа тем выше, чем больше значение вертикального градиента. В табл. 2 представлена зависимость размеров зон поражения от стратификации (класса устойчивости) атмосферы при распространении облака хлора. Видно, что для класса устойчивости атмосферы А (конвекция, неустойчивая стратификация) длина зон поражения существенно меньше, чем для класса устойчивости F (инверсия, устойчивая стратификация), причем различия составляют сотни метров.

Еще один фактор, влияющий на скорость рассеяния облака — шероховатость подстилающей

поверхности местности, где происходит рассеяние. Результаты моделирования, представленные в табл. 3, свидетельствуют о том, что наличие в районе химически опасного объекта факторов, увеличивающих шероховатость поверхности (деревья, высокие кустарники, бетонные сооружения) уменьшает размеры зон поражения, что в свою очередь снижает возможные негативные последствия для населения.

Таблица 1

Скорость ветра, м/с	Длина зоны поражения, м		Отношение длины зоны порогового поражения к длине зоны смертельного поражения
	порогового	смертельного	
1,0	721,3	210,9	3,4
2,8	625,9	145,5	4,3
4,6	594,3	126,8	4,7
6,4	533,3	111,6	4,8
8,2	528,6	107,2	4,9
10,0	526,9	103,6	5,1

Таблица 2

Тип стратификации атмосферы	Длина зоны поражения, м	
	порогового	смертельного
A	447,9	106,3
B	490,1	118,1
C	538,1	131,7
D	574,5	141,9
E	585,7	143,4
F	652,7	162,3

Таблица 3

Тип местности, коэффициент шероховатости поверхности $z_0$	Длина зоны поражения, м			
	смертельного		порогового	
	по ветру	против ветра	по ветру	против ветра
Равнинная местность, трава; $z_0 = 0,05$	351	72	897	73
Деревья, заборы; $z_0 = 0,30$	245	80	821	81
Леса; $z_0 = 0,90$	188	81	651	84
Центры больших поселков; $z_0 = 1,30$	172	80	602	83

Наихудшие условия рассеяния хлора образуются ночью в ясную безветренную погоду при расположении станции водоподготовки со складом хлора на равнинной местности с малой плотностью деревьев и кустарников.

Последствия аварийной ситуации можно охарактеризовать с помощью детерминированных и вероятностных критериев поражения. Оценку по любому из этих критериев позволяет выполнить ПК TOXI+Risk. На рис. 3 показаны зоны поражения при разрушении оборудования с хлором в зависимости от подхода к оценке распространения опасных факторов аварии. Моделирование аварий-



**▲ Рис. 3. Зоны распространения хлорного облака в случае полного разрушения контейнера:**

1 — граница зоны, в пределах которой вероятность поражения человека составляет 99 %; 2 — граница зоны, в пределах которой достигается смертельная токсодоза; 3 — граница зоны, в пределах которой вероятность поражения человека составляет 1 %; 4 — зона, в пределах которой достигается пороговая токсодоза; 5 — граница области с предельно допустимой концентрацией

ной ситуации с полным разрушением контейнера с хлором выполнено для канализационно-очистных сооружений левого берега Иркутска. Совместное использование детерминистских и вероятностных критериев поражения позволяет увидеть более полную картину аварийного сценария выброса хлора.

Помимо расчета размеров зон поражения оценены численные показатели риска гибели людей, попадающих в зону действия поражающих факторов. Исследования выполнены для водозаборных очистных сооружений г. Усолье-Сибирское, где хлор используют для водоподготовки. Риск прогнозировали для сценариев с полной и частичной разгерметизацией хлорного контейнера.

Исходные данные для расчета:

число одновременно находящихся на станции работников — 10 чел., число рискующих из числа персонала — 30 чел. (данные приняты из расчета работы станции в 3 смены по 10 чел. в каждой);

детерминированные критерии поражения по пороговой и смертельной токсодозе хлора 0,6 и 6 мг·мин/л соответственно;

время экспозиции 1800 с;

температура воздуха 10 °С, скорость ветра на высоте 10 м составляет 0,1 м/с, направление ветра юго-восточное (преобладает в данной местности), класс устойчивости атмосферы F (наихудшие метеоусловия для рассеяния, при необходимости программа позволяет учитывать метеостатистику региона [1]);

коэффициенты защищенности от токсичных веществ, взрывов, термического воздействия приняты равными нулю;

тип местности — центры малых городов, коэффициент шероховатости 0,55;

оборудование — контейнер с хлором объемом 800 л, давление в емкости 1,48 МПа;

материал поверхности пролива — бетон (температура подстилающей поверхности равна температуре окружающей среды);

время ликвидации аварии равно времени ликвидации отверстия и составляет 1800 с [9];

частоты возникновения событий, инициирующих аварию приняты в соответствии с методикой [10].

Результаты расчета зон поражения для ситуации аварийной разгерметизации и полного разрушения контейнера представлены в табл. 4, из которой видно, что с увеличением отверстия разгерметизации зоны порогового и смертельного поражения сближаются. И, как следствие, размеры зон поражения растут пропорционально величине отверстия разгерметизации.

Таблица 4

Площадь отверстия разгерметизации, м <sup>2</sup>	Длина зоны поражения от точки выброса, м		Расстояние по направлению ветра от точки выброса до точки, где достигается максимальная ширина зоны, м	Частота возникновения сценария, год <sup>-1</sup>
	по ветру	против ветра		
<b>Пороговая зона поражения</b>				
1,96·10 <sup>-5</sup>	148,54	120	20,23	4,0·10 <sup>-5</sup>
1,23·10 <sup>-4</sup>	249,88	220	30,80	1,0·10 <sup>-5</sup>
4,91·10 <sup>-4</sup>	329,41	290	24,77	6,2·10 <sup>-6</sup>
1,96·10 <sup>-3</sup>	329,41	290	43,42	3,8·10 <sup>-6</sup>
7,85·10 <sup>-3</sup>	329,41	290	68,29	1,7·10 <sup>-6</sup>
Полное разрушение	348,60	310	12,58	3,0·10 <sup>-7</sup>
<b>Смертельная зона поражения</b>				
1,96·10 <sup>-5</sup>	110,89	99	20,23	4,0·10 <sup>-5</sup>
1,23·10 <sup>-4</sup>	220,02	200	30,80	1,0·10 <sup>-5</sup>
4,91·10 <sup>-4</sup>	304,28	270	24,77	6,2·10 <sup>-6</sup>
1,96·10 <sup>-3</sup>	304,28	270	43,42	3,8·10 <sup>-6</sup>
7,85·10 <sup>-3</sup>	304,28	270	18,55	1,7·10 <sup>-6</sup>
Полное разрушение	327,76	290	12,58	3,0·10 <sup>-7</sup>



Рассчитанный индивидуальный риск для персонала станции в рассмотренных сценариях не превысил  $1,9 \cdot 10^{-5}$  год<sup>-1</sup>, а коллективный риск для персонала —  $5,6 \cdot 10^{-4}$  чел/год. Значения индивидуального и коллективного риска для третьих лиц составили  $5,3 \cdot 10^{-8}$  и  $1,9 \cdot 10^{-3}$  соответственно. Существенный коллективный риск для третьих лиц определяется большой плотностью населения вблизи предполагаемого места аварии. Следует отметить, что рассмотренные сценарии аварии не предполагали никаких действий персонала, направленных на локализацию и ликвидацию аварий. Как известно, число погибших определяется не только зоной поражения, но и действиями людей.

В заключение отметим, что в Иркутском национальном исследовательском техническом университете используют ПК ТОКСИ+Risk при подготовке магистрантов и написании магистерских диссертаций.

### Список литературы

1. Программно-аппаратный комплекс «ТОКСИ+Метео» для оценки последствий возможных аварий с учетом данных о текущих погодных условиях/ А.А. Агапов, И.О. Хлобыстова, С.Л. Марухленко и др.// Безопасность труда в промышленности. — 2011. — № 1. — С. 22–25.
2. Сравнительный анализ результатов моделирования последствий химических аварий с использованием программного комплекса ТОКСИ+Risk/ Т.В. Савицкая, А.Ф. Егоров, Л.А. Запасная и др.// Безопасность труда в промышленности. — 2012. — № 8. — С. 78–83.
3. Егоров А.Ф., Савицкая Т.В., Агапов А.А. Опыт использования программного комплекса ТОКСИ+Risk для

подготовки специалистов// Безопасность труда в промышленности. — 2012. — № 5. — С. 22–24.

4. Сравнение результатов расчетов последствий аварийных выбросов опасных веществ по программным комплексам ТОКСИ+ и PHAST/ М.В. Лисанов, К.В. Ефремов, С.И. Сумской, В.А. Пантелеев// Безопасность труда в промышленности. — 2011. — № 2. — С. 56–58.

5. Сравнение результатов моделирования аварийных выбросов опасных веществ с фактами аварий/ С.И. Сумской, К.В. Ефремов, М.В. Лисанов, А.С. Софьин// Безопасность труда в промышленности. — 2008. — № 10. — С. 42–50.

6. Методические основы по проведению анализа опасностей и оценки риска аварий на опасных производственных объектах: рук. по безопасности: утв. приказом Ростехнадзора от 13 мая 2015 г. № 188. Документ опубликован не был. Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс» (дата обращения: 09.07.2015).

7. Тимофеева С.С., Хамидуллина Е.А. Анализ и моделирование процессов возникновения аварийных ситуаций при эксплуатации химически опасных объектов// Безопасность в техносфере. — 2011. — № 2 (29). — С. 27–35.

8. Маршалл В. Основные опасности химических производств. — М.: Мир, 1989. — С. 73.

9. РД 03-26—2007. Методические указания по оценке последствий аварийных выбросов опасных веществ: утв. приказом Ростехнадзора от 18 июня 2003 г. № 95. — Сер. 27. — Вып. 6. — М.: ЗАО НТЦ ПБ, 2008. — 124 с.

10. Методика определения расчетных величин пожарного риска на производственных объектах: утв. приказом МЧС России от 10 июля 2009 г. № 404. — Сер. 19. — Вып. 2. — 3-е изд. — М.: ЗАО НТЦ ПБ, 2011. — 312 с.

elena.irk@mail.ru

Материал поступил в редакцию 18 июня 2015 г.

## Внимание! В издательстве ЗАО НТЦ ПБ вышли новые нормативные документы



### ИНСТРУКЦИЯ ПО ДЕГАЗАЦИИ УГОЛЬНЫХ ШАХТ СЕРИЯ 05. ВЫПУСК 22

Инструкция по дегазации угольных шахт разработана на основе Методических рекомендаций о порядке дегазации угольных шахт (РД-15-09—2006), утвержденных приказом Ростехнадзора от 24.08.2006 № 797, предназначена для организаций, занимающихся проектированием, строительством и эксплуатацией систем дегазации угольных шахт, и применяется в части, не противоречащей действующим законодательным и иным нормативным правовым актам.

Приведена в редакции, действующей с 3 июля 2015 г.

С Каталогом изданий вы можете ознакомиться на интернет-сайте ЗАО НТЦ ПБ

<http://www.safety.ru/price>

ПО ВОПРОСАМ ПРИОБРЕТЕНИЯ обращайтесь в отдел распространения ЗАО НТЦ ПБ по адресу:  
105082, г. Москва, Переведеновский пер., д. 13, стр. 21

Тел/факс (495) 620-4753 (многоканальный)  
E-mail:ornd@safety.ru