

**Э.А. ГРАНОВСКИЙ, В.А. ЛЫФАРЬ**

ООО «Научный центр изучения рисков «Ризикон», г. Северодонецк

**АНАЛИЗ МЕТОДОВ ОЦЕНКИ РИСКА ПОСЛЕДСТВИЙ  
АВАРИЙНЫХ ВЫБРОСОВ И РАССЕЯНИЯ ПАРОГАЗОВЫХ  
ПРИМЕСЕЙ В АТМОСФЕРЕ**

*Проведен анализ существующих технологий оценки последствий аварийных выбросов опасных химических веществ в атмосферу. Предложено учитывать отравляющее действие примесей на основе данных United States Environmental Protection Agency, а также World Health Organization. Сделаны выводы относительно перспективных направлений дальнейших разработок.*

Одним из наиболее опасных проявлений аварий в промышленности и транспорте является выброс опасных химических веществ в парогазовой фазе и распространение их в атмосфере. Крупнейшие техногенные катастрофы: на химическом заводе Union Carbide в индийском городе Бхопал, Индия, 1984 г. (число жертв до 18 тысяч человек), взрыв на химическом заводе компании «Нипро Кемикл Планта» в г. Фликсборо, Великобритания, 1974 г. (число жертв взрыва более 60 человек, мощные разрушения). Взрыв и ядовитое облако в г. Севезо, Италия, 1976 г. стали причиной уничтожения целого города, а также толчком для появления в 1982 г. «директивы Севезо», ставшей началом создания современного европейского законодательства в области безопасности в промышленности.

При выбросе парогазовой фазы в атмосферу в результате «мгновенного» образования облака, истечения из разгерметизированного оборудования, находящегося под давлением, испарения с поверхности пролива опасных химических веществ (ОХВ), возможно формирование и рассеяние в пространстве токсичных горючих примесей. Горючие примеси могут сгорать в различных режимах и взрываться при определенных обстоятельствах.

В настоящее время существует несколько уровней моделей для количественного описания процесса рассеяния выброса газообразных веществ в атмосфере:

- 1) простые полуэмпирические модели;
- 2) гауссовы модели дисперсии примеси в атмосфере;
- 3) модели рассеяния, основанные на интегральных законах сохранения;
- 4) модели, построенные на численном решении системы уравнений газодинамики (модели численного моделирования класса CFD - Computational Fluid Dynamics).

В ГОСТ Р 12.3.047-98 [10] опубликована методика расчета залповых выбросов на основе модели тяжелого газа. Тем не менее, практическое использование такого описания невозможно в связи с его несвязностью и ошибками в тексте. Разработанная в СССР методика РД 52.04.253-90 [11] и ее украинский аналог «Методика прогнозування наслідків виливу (викиду) небезпечних хімічних речовин при аваріях на промислових об'єктах і транспорті» (Зареєстровано в Міністерстві юстиції України 10 квітня 2001 р. за N 326/5517), основанная на эмпирических соотношениях, являлась первоначальной для определения максимальных глубин зон поражений на основе ингаляционного токсичного воздействия на человека. Рациональность применения данной методики для ГО ЧС определялась в первую очередь отсутствием лучшей методики на тот момент и простотой вычислений, что было необходимо в условиях отсутствия достаточно производительной вычислительной техники и прикладных программ. При этом граничным параметром являлась «токсодоза», измеряемая в мг·мин/литр, что нельзя рассматривать как дозу в привычном смысле (измеряемую либо в единицах массы, либо отношением количества полученного вещества в течение времени воздействия к массе тела), и являющуюся скорее «концентрационным напором». В мире нигде больше не встречается подобное определение причины поражения. Кроме того, в этих методиках нет вычисления пространственно-временного распределения концентраций  $c(x, y, z, t)$ , что не позволяет получать входные данные для определения степеней

отравлений или массы парогазовой фазы  $m = \iiint c(x, y, z, t) dx dy dz$ , находящейся между нижним и верхним пределами распространения пламени, т. е. способной гореть и взрываться. Наиболее близкое понятие к «токсодозе» – причинный коэффициент  $x = \int_{t_b}^{t_e} c^n dt$ , в котором используется корреляционный коэффициент  $n$ , характеризующий степень токсичности вещества. Однако нужно отметить, что не прямое использование причинного коэффициента и наличие корреляционного степенного коэффициента существенно меняет смысл определения токсичных последствий в сравнении с понятием «токсодоза». Вероятность различных степеней отравлений можно определять на основании функции плотности вероятности поражения:

$$P = \int_0^x \frac{1}{(2 \cdot \pi)^{1/2} \cdot \sigma \cdot x} \cdot \exp \left[ -\frac{(\ln(x) - m^*)^2}{2 \cdot \sigma^2} \right] dx$$

где:  $x$  - причинный коэффициент;

$\sigma$  - 1-й параметр логарифмического распределения;

$m^*$  - 2-й параметр логарифмического распределения.

Соответствующие коэффициенты получаются в результате обработки экспериментальных данных, которые наиболее широко представлены в данных EPA. При этом для легких поражений предлагается пользоваться таким критерием как AEGL-2 (*Acute Exposure Guideline Levels*) – уровень воздействия, выше которого предсказано, что общее население, включая восприимчивых индивидуумов, может получить необратимые или другие серьезные, длительные неблагоприятные последствия для здоровья или состояние, при котором человек, возможно, не сможет покинуть опасную зону самостоятельно. Вероятность смертельных поражений определяется на основе данных Всемирной токсикологической лаборатории [19] или иных источников.

Основной проблемой дальнейшего применения этих методик является ограниченность и сомнительная достоверность выходных данных, не позволяющая получать адекватные количественные показатели процессов формирования и рассеяния парогазовой фазы в атмосфере и последствий ее дисперсии.

Гауссовы модели разработаны на представлении распределения концентрации в пространстве на основе распределения Гаусса [1-5]. Для вычислений на основе гауссовых моделей используются эмпирические коэффициенты, соответствующие атмосферной турбулентности при различных условиях состояния атмосферы. В таких моделях, как правило, не учитываются архимедовы силы, законы сохранения массы и энергии облака. Эти модели имеют приемлемую точность либо в дальней зоне на удалении от места выброса, либо при малом выбросе, а также в случае нейтральной по плотности воздуха примеси.

Однако процессы выброса и формирования облаков сложнее, чем это описывается в моделях первого и второго типов. При рассеянии выброса ОХВ наблюдается обтекание препятствий и формирование застойных зон (рис. 1). В зависимости от плотности выброшенного вещества, возможно его всплытие в воздухе или опускание и растекание по поверхности.

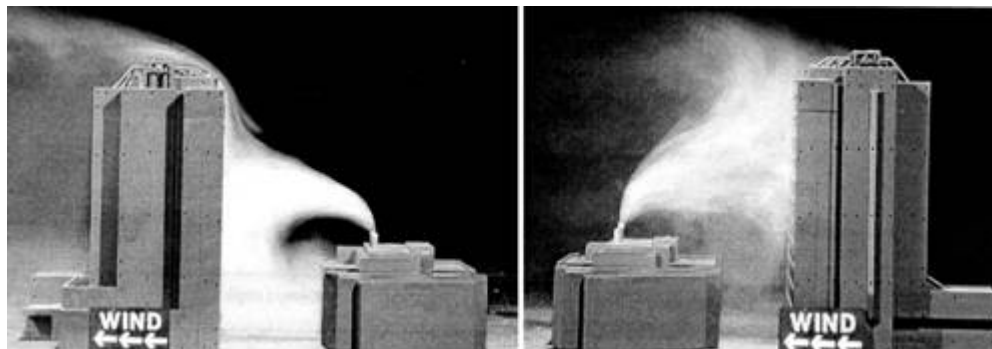


Рис. 1. Визуализация рассеяния выбрасываемой примеси в загроможденном пространстве.

При взрывах облаков топливовоздушных смесей в условиях сложного рельефа местности и при наличии застроек отражение, дифракция и интерференция ударных волн

приводит к существенному усложнению картины с возникновением кумулятивных эффектов. Анизотропия распространения ударных волн в пространстве наблюдалась во время крупных промышленных аварий, в которых границы зон заданных степеней разрушений существенно отличались от полученных в виде концентрических окружностей, полученных по аналитическим зависимостям.

В начальный момент выброса и распространения парогазовой фазы существенную роль играют процессы струйных течений, турбулентного подмешивания воздуха и высокая плотность вещества, которая в случае существенного превышения плотности окружающей среды должна рассматриваться как «тяжелый газ». Наиболее известными реализациями моделей рассеяния тяжелого газа является: методика Всемирного банка [6], методики класса HGSYSTEM [7], методики, созданные такими организациями как TNO (Голландия) [8], Det Norske Veritas (DNV Technica) (Норвегия) [9], U. S. Environmental Protection Agency (EPA – агентство защиты окружающей среды США) [20], NIST (Национальный институт стандартов и технологий США) [21], методики класса DEGADIS [22].

Примером использования моделей тяжелого газа в России является методика «Токси-3» [18]. Модель дисперсии нейтрального газа «Токси-2» является примером гауссовой модели нейтрального газа. В Украине и других странах используются модели программного комплекса «РизЭкс-2» [25-26]. При достаточно высоком качественном походе при моделировании дисперсии «тяжелого газа» в методике «Токси-3» [18], в определении токсичных последствий, к сожалению, по-прежнему используется понятие «пороговой токсодозы» и параллельно пробит-уравнение для определения вероятности отравлений, что взаимно противоречит друг другу.

Наиболее широко распространенные модели, используемые в США, Канаде, ЕС и других странах являются модели EPA класса AERMOD. Основными разработчиками прикладного программного обеспечения для этого класса моделей являются компании Lakes Environmental (Канада) [23] и BREEZE (США) [24]. Модели AERMOD содержат три основных модуля: AERMOD (модель дисперсии примеси в атмосфере), AERMET и инструментальный набор AERSURFACE для создания входных данных, связанных с состоянием атмосферы и рельефом местности, AERMAP – программные средства, предназначенные для привязки модели к трехмерным данным местного рельефа и объектов. Кроме того, в моделях данного класса содержится ряд средств, позволяющих учитывать особенности распространения примеси над трассами, водными преградами, лесным массивом и т. д. Использование моделей этого класса связано с существенными затратами и усилиями при подготовке входных данных и имеет больше смысла при оценке экологических рисков от промышленных источников загрязнения.

Наиболее перспективными и, безусловно, верифицируемыми и валидируемыми моделями являются модели класса CFD. До недавнего времени их использование не имело перспективы инженерного применения в связи с необходимостью использования мощных вычислительных ресурсов. В последнее время развитие вычислительной техники уже приближается к рациональному использованию моделей такого класса в распределенных задачах. Причем интеграция таких моделей позволяет одновременно моделировать как истечение примеси в атмосферу, формирование смесей, распространение их во времени и пространстве с учетом всех влияющих факторов, так и явления горения и взрыва, распространения ударной волны и численное определение воздействия этой волны на объекты, их элементы и людей. Так как применение таких моделей по-прежнему выдвигает высокие требования к вычислительным средствам, рациональна разработка гибридной методики, учитывающей коэффициенты турбулентной диффузии, зависящие от вида местности (так называемой «шероховатости») и состояния атмосферы, но содержащую упрощенный алгоритм дисперсии в плоскостном симметричном пространстве. Это позволило бы повысить скорость расчетов, одновременно объединив положительные качества моделей класса DEGADIS и HGSYSTEM с дополнительным учетом переменных условий истечения. Примерами успешного использования моделей класса CFD являются такие продукты как ANSYS [27], FDS [28] и другие.

## Выводы:

1. Использование простых полуэмпирических моделей для прогнозирования последствий распространения токсичных примесей в атмосфере утратило актуальность в связи с появлением более совершенных методик и возможностью использования компьютеров. Невозможно использовать данные методы для моделирования динамики формирования взрывоопасных зон или вероятности отравлений различной степени тяжести, а также для оценки риска при дисперсии примеси ОХВ в атмосфере.

2. Приемлемо применение гауссовых моделей рассеяния нейтрального газа для определения последствий токсичного ингаляционного воздействия на людей с использованием методов определения вероятности поражения на основе причинного коэффициента  $\int_{t_b}^{t_e} c^n dt$ , а также определение зон загазованности взрывоопасной примесью в случае ее нейтральной плотности.

3. В случае определения зон загазованности взрывоопасной примесью с плотностью выбрасываемого вещества, существенно превышающей плотность воздуха рекомендуется пользоваться моделями «тяжелого газа», в которых учитываются архимедовы силы и законы сохранения массы и энергии на начальной стадии формирования облака.

4. Наиболее перспективным направлением для прогнозирования взрывных явлений парогазовых облаков является разработка гибридной методики на основе численного решения уравнений газодинамики в пределах исследуемой области с учетом корреляционных коэффициентов турбулентной диффузии с учетом нестационарных условий формирования и рассеяния примеси.

1. Методика оценки последствий химических аварий (Методика «ТОКСИ»). М.:НТЦ «Промышленная безопасность», 1993. – 19 с.

2. Методика оценки последствий химических аварий (Методика «Токси-2.2», утв. НТЦ "Промышленная безопасность", согл. Госгортехнадзором России) в сборнике «Методики оценки последствий аварий на опасных производственных объектах»// Сборник документов. Серия 27. Выпуск 2 / Колл. авт. – 2-е изд., испр. и доп. - М.:ГУП НТЦ «Промышленная безопасность», 2002. – 208 с.

3. Горский В.Г. Научно-методические аспекты анализа аварийного риска. Под ред. Г.Ф. Терещенко и А.А. Шаталова. М.: Экономика и информатика, 2000. – 260 с.

4. Компьютерный код ALOHA® 5.2.3, Developed jointly by NOAA and EPA.

5. Методика расчета концентраций в атмосферном воздухе вредных веществ, содержащихся в выбросах предприятий (ОНД-86 Госкомгидромет), Л.:Гидрометеиздат, 1987.

6. Руководство по оценке промышленных опасностей (Techniques for Assessing Industrial Hazards: a Manual. World Bank Tech. Paper No. 55 ), The World Bank Group, 1988

7. The HGSYSTEM technical reference manual и свод компьютерных кодов HGSYSTEM version 3.0 (HEGADAS-T Version 3.2, Copyright © Shell Internationale Research Maatschappij BV, The Hague, 1988-1994; HEGABOX Version 3.01, Copyright © Shell Internationale Research Maatschappij BV, The Hague, 1991-1994)

8. Methods for the calculation of physical effects CPR 14E (Part 1) “TNO Yellow book”, 3<sup>rd</sup> edition, TNO, The Netherlands, 1997

9. UNIFIED DISPERSION MODEL (UDM) Theory Manual by H.W.M. Witlox CONSEQUENCE MODELLING DOCUMENTATION (UDM Version 6.0, January 2000), Det Norske Veritas.

10. ГОСТ Р 12.3.047-98 ССБТ. Пожарная безопасность технологических процессов. Общие требования. Методы контроля.

11. Руководящий документ. «Методика прогнозирования масштабов заражения сильнодействующими ядовитыми веществами при авариях (разрушениях) на химически опасных объектах и транспорте» (РД 52.04.253-90). Штаб Гражданской обороны СССР, Комитет гидрометеорологии при кабинете министров СССР. Ленинград, Гидрометеиздат, 1991.

12. Иванов А.В., Мاستрюков Б.С. О достоверности использования вычислительного комплекса PHOENICS в расчетах рассеяния вещества в возмущенном потоке // Известия ВУЗов: Черная металлургия. – 1999. – №11. – С.64-68.
13. Едигаров А.С., Сулейманов В.А. Математическое моделирование аварийного истечения и рассеивания природного газа при разрыве газопровода // Математическое моделирование, 1995. – т.7, №4, – С. 37-52.
14. Компьютерный код PHAST 6.1 (Руководство пользователя «Process Hazard Analysis Software Tools PHAST ver. 6.1»), © Det Norske Veritas (DNV), 1999
15. Van Ulden, A.P., “A new bulk model for dense gas dispersion: two-dimensional spread in still air, in “Atmospheric dispersion of heavy gases and small particles” (Ooms, G. and Tennekes, H., eds.), pp. 419-440, Springer-Verlag, Berlin, 1984
16. McQuaid, J., “Some experiments on the structure of stably-stratified shear flows”, Tech. Paper p. 21, Safety in Mines Research Establishment, Sheffield, UK, 1976
17. Kranenburg, C., “Wind-induced entrainment in a stably stratified fluid”, J. Fluid Mech. 145, pp. 253-273, 1984
18. Моделирование аварийных ситуаций на опасных производственных объектах. Программный комплекс ТОКСИ+ (версия 3.0): Сборник документов. Серия 27. – М.: Открытое акционерное общество «Научно-технический центр по безопасности в промышленности», 2006. – 252 с.
19. Fairhurst S and Turner R. M. Toxicological assessments in relation to major hazards. Journal of Hazardous Materials **33**, p. 215-227, 1993.
20. <http://www.epa.gov/>
21. <http://www.nist.gov/index.html>
22. <http://gcmd.nasa.gov/records/DEGADIS-Model.html>
23. <http://www.weblakes.com/>
24. <http://www.breeze-software.com/>
25. Грановский Э.А., Лыфарь В.А. Программный комплекс для моделирования аварий и оценки риска «РизЭкс-2» // Тематический семинар «Оценка риска аварий на опасных производственных объектах». – М.: ФГУП «НТЦ по безопасности в промышленности», 2005. – С. 45–47.
26. Грановский Э.А., Лыфарь В.А., Ворона А.П. Моделирование случайных и детерминированных процессов возникновения и развития техногенных аварий с использованием программного комплекса "Ризэкс-2" // Моделирование и Анализ Безопасности и Риска в Сложных Системах: Труды Международной Научной Школы МА БР - 2007 (Россия, Санкт-Петербург, 4 - 8 сентября, 2007 г.) / СПб: ГУАП, 2007, - 540 стр.
27. <http://www.ansys.com/corporate/default.asp>
28. <http://www.nist.gov/index.html>

**Е.А. Грановський, В.А. Лифар**

**АНАЛІЗ МЕТОДІВ ОЦІНКИ РИЗИКУ НАСЛІДКІВ АВАРІЙНИХ ВИКИДІВ І РОЗСПІВАННЯ ПАРОГАЗОВИХ ДОМІШОК В АТМОСФЕРІ**

*Проведено аналіз існуючих технологій оцінки наслідків аварійних викидів небезпечних хімічних речовин в атмосферу. Запропоновано враховувати отруйну дію домішки на підставі даних United States Environmental Protection Agency, а також World Health Organization. Зроблено висновки щодо перспективних напрямків подальших розробок.*

**E.A. Granovskii, V.A. Lifar**

**METHODS ANALYSIS OF RISK ASSESSMENT OF EMERGENCY EMISSION CONSEQUENCES AND SCATTERING STEAM AND GAS ADMIXTURES TO THE ATMOSPHERE**

*The analysis of existing technologies of assessment of emergency emission consequences of hazardous chemicals into the atmosphere is made. Toxic effect of admixtures is proposed to take into account on the basis of United States Environmental Protection Agency and World Health Organization. Conclusions about the prospects for future developments are considered.*