

УДК 004.827:504.5

*О. Н. ЗЕМЛЯНСКИЙ*, доц., Академия пожарной безопасности  
им. Героев Чернобыля, Черкассы

*В. Е. СНИТЮК*, д-р техн. наук, проф., зав. каф., ЧГТУ, Черкассы

## ПРОГНОЗИРОВАНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ «ТЯЖЕЛОГО ГАЗА» ПОСЛЕ ЗАЛПОВОГО ВЫБРОСА

Рассмотрена проблема определения концентрации «тяжелого газа» после залпового выброса. Показано, что доаварийное построение модели для прогнозирования его концентрации является необходимым условием своевременного и адекватного принятия решений. Предложена технология уточнения такой модели по результатам нескольких измерений в послеаварийный период.

**Ключевые слова:** химическая авария, «тяжелый газ», концентрация, нечеткая нейросеть, прогнозирование.

**Введение.** Химические аварии последних десятилетий в мире и в Украине являются следствием развития химической промышленности, ростом спроса на ее продукцию, изношенностью основных фондов, а также стремлением к увеличению объемов производства из-за уменьшения нормы прибыли. Сотни и тысячи погибших, десятки тысяч пострадавших, экологический ущерб являются причиной роста научных исследований процессов химического заражения местности вследствие аварий и выброса опасных химических веществ. Важным направлением таких исследований является прогнозирование концентрации опасных химических веществ (ОХВ). Важным направлением таких исследований есть прогнозирование концентрации ОХВ и построение диаграмм концентрации ОХВ на местности для определенных моментов времени. Важно заметить, что решение соответствующей задачи является результатом интегрального эффекта учета общих моделей концентрации ОХВ и частных факторов учета особенностей окружающей среды для химических предприятий, дорог или других объектов, связанных с производством, транспортировкой или хранением ОХВ.

**Анализ литературных данных и постановка проблемы.** Аварии на химических предприятиях несут большую опасность, поскольку поражающее действие ОХВ проявляется при малых их концентрациях, а скорость распространения является сравнительно высокой. Адекватность и своевременное принятие решений в таких условиях будет способствовать уменьшению количества жертв и пострадавших, проведению соответствующих мероприятий. Их основанием является своевременное прогнозирование динамики концентрации ОХВ на местности. Известно, что распространение ОХВ характеризуется размером зоны поражения и скоростью перемещения опасного облака. В среднем, такое облако перемещается со скоростью ветра, что несколько упрощает расчеты. Прогнозирование концентрации ОХВ сопровождается значительной неопределенностью [1]. Для количественного описания процесса распространения ОХВ сегодня известны три подхода [2], базирующиеся на использовании:

- гауссовских или дисперсионных моделей;
- моделей рассеяния, в которых используются интегральные законы сохранения в облаке в целом при залповом выбросе, сюда же включаются модели

- «тяжелого газа»;
- моделей прямого численного моделирования.

В гауссовских моделях вводят эвристики, заключающиеся в эмпирическом определении коэффициентов, описывающих атмосферную турбулентность. Сами модели описывают два процесса в атмосфере – перемещение в поле ветра и рассеяние за счет атмосферной турбулентности. Недостатком таких моделей является недостаточная точность вблизи места выброса при сильном выбросе.

Поведение ОХВ при выбросе намного сложнее, чем это представляется в гауссовских моделях, поскольку не учитываются наведенные течения и высокая плотность вещества. Поэтому за рубежом были разработаны специальные модели, в которых учитывались соответствующие особенности ОХВ ("тяжелый газ") и названы моделями рассеяния "тяжелого газа". Известны реализации таких моделей: методика Всемирного банка [3], HGGYSTEM [4], предложенные в ГОСТ Р12.3.047-98 [5], методика РД 52.04.253-90 [6]. Общим недостатком таких методов являются завышенные реальные последствия аварий.

Газодинамические модели являются сложными при реализации. Трудоемкость их реализации вступает в противоречие с целесообразностью и позитивным эффектом [2, 7, 8]. Некоторые преимущества по сравнению с указанными моделями обладает методика "ТОКСИ - 3", описанная в [9]. Реализованные в ней модели базируются на описании рассеяния "тяжелого газа" и использовании интегральных представлений. Такая композиция позволяет ненамного превысить время расчетов по сравнению с гауссовскими моделями, но значительно повысить их точность.

Анализ моделей указанных трех классов, позволяет прийти к заключению о теоретической целесообразности их построения и рациональности использования для предварительной, грубой оценки.

Каждое химическое предприятие или маршрут транспортировки ОХВ имеет особенности, которые в исследованных моделях не могут быть учтены. К ним относятся: рельеф местности, сооружения, насаждения, транспортные потоки и т.п. Неопределенность, которую вносят такие объекты и системы, в процесс определения концентрации ОХВ в послеаварийный период не позволяет осуществлять адекватное прогнозирование и, соответственно, проводить необходимые измерения по спасению населения и минимизации экологического ущерба.

**Цель и задачи исследования.** Целью исследования является уменьшения неопределенности при прогнозировании концентрации ОХВ в доаварийный период в потенциально опасной области, а также уточнение модели концентрации ОХВ в послеаварийный период на основании нескольких измерений. Достижение цели исследования связано с решением ряда задач, а именно:

- определение особенностей движения первичного облака и изменения концентрации ОХВ;
- структурная идентификация модели для определения концентрации ОХВ в зоне потенциального заражения;
- параметрическая оптимизация модели как результат обучения;
- уточнение и переобучение модели с учетом измеренных значений послеаварийный период.

Решение указанных задач, учитывая локальный характер пространственного положения потенциальных мест аварии, позволит осуществить упреждающее моделирование последствий аварии, где бы она не произошла, получить поле

концентрации ОХВ для любого момента времени от возникновения аварийной ситуации. Поскольку априорно полученная модель может давать смещенные результаты из-за неправильно измеренных или указанных данных, следствием чего являются неправильно установленные ее параметры, то необходимо осуществлять их коррекцию. Для этого после аварии осуществляем измерение концентрации в одной или нескольких точках (что и делается на практике) и по результатам анализа осуществляется коррекция и, возможно, переобучение модели. Уточненная модель является основой прогнозирования и используются для анализа типа "Если А, то ..." и принятия решений.

**Особенности движения первичного облака и определения концентрации ОХВ.** Под "тяжелым газом" понимают ОХВ, плотность которых в момент выброса превышает плотность воздуха. Наиболее распространенными представителями "тяжелых газов" являются хлор и аммиак. Хлор из-за высокой молярной массы, а аммиак – в случае капельных включений в смеси. При выбросе "тяжелого газа" образуются облака, высотой в несколько метров и поперечным размером в несколько сотен метров (максимально). Движение облака может задерживаться из-за шероховатости поверхности, под которой понимают наличие растительности и других помех на пути облака. Определение и учет коэффициента шероховатости – эмпирическая процедура, результаты его определения впоследствии оказывают влияние на прогнозирование концентрации ОХВ. Заметим также, что полученные и описанные результаты моделирования имеют скорее теоретический характер, поскольку их верификация проводится в сравнении с результатами опытов, проведенных, в основном, за рубежом. Отличием этих опытов было отсутствие жилой застройки, низкая шероховатость местности, некоторые эксперименты проводились над поверхностью моря. Очевидно, что экстраполяция разработанных методов на реальную ситуацию и потенциальные места аварий в Украине должна была бы выполняться с учетом указанных особенностей, но практически осуществить коррекцию моделей оказывается невозможным.

**Идентификация модели для определения концентрации ОХВ.** Большая вариабельность факторов, сопровождающих аварии, неопределенность исходной информации, не позволяют адекватно использовать гауссовские модели. В доаварийный период при наличии вычислительных ресурсов рационально осуществить моделирование последствий возможных аварий с отображением зон концентрации ОХВ и занесением соответствующей информации в базу данных. В качестве модели выберем нейро-нечеткую сеть ANFIS [10], позволяющую осуществлять обработку экспертных заключений и идентификацию неизвестных зависимостей. Начальными данными для обучения сети будут табличные данные, которые являются синергетическим результатом знаний и опыта эксперта, использования известных методик и программных систем. Строки в таблице соответствуют реперным точкам, характеризующим аварию. Кортежи таблицы исходных данных имеет вид:

$$BD_1 = \langle x_0, y_0, z_0, t_0, V, v, u, S \rangle, \quad (1)$$

где  $(x_0, y_0, z_0)$  – координата точки аварии,  $t_0$  – время возникновения аварии,  $V$  – общий объем выбросов,  $v$  – объемная скорость выброса,  $u$  – скорость ветра,  $S$  – стабильность атмосферы по Пасквилу.

По данным таблицы  $BD_1$  необходимо получить другую таблицу

$$BD_2 = \langle x, y, z, t, C \rangle, \quad (2)$$

где  $(x, y, z)$  – координата точки, в который в момент времени  $t$  концентрация ОХВ будет равна  $C$ . Тем самым необходимо осуществить отображение

$$BD_1 \rightarrow BD_2. \quad (3)$$

Осуществить отображение (3) возможно, используя нечеткие продукционные правила такого типа:

$$\begin{aligned} & \text{Если } x_0 \in A_1^1 \& y_0 \in A_2^1 \& z_0 \in A_3^1 \& t_0 \in A_4^1 \& V \in A_5^1 \& v \in A_6^1 \& \\ & \& u \in A_7^1 \& S \in A_8^1 \& x \in A_9^1 \& y \in A_{10}^1 \& z \in A_{11}^1 \& t \in A_{12}^1, \text{ то } C \in C^1, \\ & \text{Если } x_0 \in A_1^n \& y_0 \in A_2^n \& z_0 \in A_3^n \& t_0 \in A_4^n \& V \in A_5^n \& v \in A_6^n \& \\ & \& u \in A_7^n \& S \in A_8^n \& x \in A_9^n \& y \in A_{10}^n \& z \in A_{11}^n \& t \in A_{12}^n, \text{ то } C \in C^n, \end{aligned} \quad (4)$$

где  $A_i^j, \tilde{N}^j$  – нечеткие множества с соответствующими функциями принадлежности  $\mu_{A_i^j}(x)$ ,  $i = \overline{1,12}$ ,  $j = \overline{1,n}$ .

Известно, что системой типа (4), можно как угодно точно аппроксимировать непрерывную функцию [11]. Функции принадлежности, учитывая предположение о характере изменения концентрации ОХВ, являются гауссовскими  $\mu(z) = \exp[-(z-a)^2 / 2\delta^2]$ , где  $a$  и  $\delta$  – параметры. В выражении (4) таких параметров  $12n$ . Каждое продукционное правило в (4) соответствует одному заключению эксперта о варианте возникновения аварии и точке определения концентрации ОХВ. Подавая на вход сети ANFIS данные из базы  $BD_1$ , на выходе необходимо получить данные из  $BD_2$ . Для определения соответствующего преобразования обучим нейро-нечеткую сеть с использованием одного из методов: генетического алгоритма, градиентного метода или гибридного метода, в котором интегрированы градиентный метод и метод наименьших квадратов. Осуществляя параметрическую идентификацию модели (обучение ANFIS), используем первую часть выборки или таблицы  $BD_1$ , которую и называют обучающей. Вторая часть выборки, называемая контрольной, используется для проверки качества обучения по критерию минимума среднеквадратической ошибки. Если качество модели оказывается неприемлемым, то, учитывая случайный выбор начальных значений весовых коэффициентов, осуществляем переобучение модели.

Предположим, что модель

$$C = F(x_0, y_0, z_0, t_0, V, v, u, S, x, y, z, t) \quad (5)$$

получена. Зависимость (5), определяемая нейросетью ANFIS, может быть использована для построения полей концентрации ОХВ в зависимости от начальных значений параметров аварии и окружающей среды, а также для анализа чувствительности концентрации ОХВ к изменениям параметров аварии. Модель (5) является основной рабочей моделью в доаварийный период.

После аварии адекватное использование модели может быть гарантировано только после ее верификации. Предлагаем осуществлять ее таким образом. На первом шаге необходимо определить правильно ли были заданы исходные значения в (5), если это не так, то необходимо установить, какие именно значения измерены или определены неправильно и осуществить коррекцию. Для этого производится измерение концентрации в нескольких точках и на их основании по разработанным ранее правилам осуществляется ее перерасчет. Возможен случай, когда начальные

значения параметров аварии определены правильно, но на выходе нейросети значение концентрации значительно отклоняется от измеренного значения. Очевидно, что такая модель параметрически неправильно идентифицирована. Тогда некоторые строки в базе данных  $BD_1$  необходимо удалить, а на их место записать данные, соответствующие результатам эксперимента и переобучить нейросеть. Отметим, что такое переобучение займет намного меньше времени, чем полное обучение на всех образах из  $BD_1$ .

**Экспериментальные данные и их обработка.** Очевидно, что верификация предложенной технологии должна опираться на результаты экспериментов, проведение которых в силу поражающих характеристик «тяжелых газов» является проблематичным, а то и невозможным. Поэтому были использованы результаты опытов по рассеянию фреона-12, которые проводились в 1982/83 гг. на открытом пространстве в местечке Торней-Айлэнд (Thorney Island) в Англии. Известно, что там было осуществлено около двух десятков залповых выбросов газообразного фреона-12, как чистого, так и разбавленного воздухом. Облако газа после выброса имело форму цилиндра, объем которого составлял около 2000 куб. м. Основные характеристики выбросов и условий рассеяния были такими: процент фреона-12 – 24%, скорость ветра 3,5%, стабильность атмосферы по Пасквилу – Е. Значения концентрации фреона по оси ветра приведены в табл.

Таблица - Результаты эксперимента на Торней Айлэнд

X, м	70	100	150	180	220	350	500
C, % об	3,1	1,35	0,8	0,6	0,45	0,28	0,14

Для построения модели были использованы данные, полученные вследствие 64 экспертных заключений на основании опыта, знаний и результатов моделирования с помощью системы АЛОНА, с использованием различных значений начального объема газа, процента его разбавленности, скорости ветра и стабильности атмосферы по Пасквилу, преобразованной к численному виду. В эксперименте также предполагалось, что до 500 м от источника аварии условия внешней среды совпадали с условиями на Торней Айлэнд, а после 500 м – учитывалась застройка и насаждения.

После обучения нейро-нечеткой сети типа ANFIS с нечетким выводом в форме Цукамото на 50 образах и верификации модели на 14 контрольных точках по результатам 10 запусков установлено, что средняя относительная ошибка составила 28%, что является неприемлемым значением для использования при прогнозировании концентрации ОХВ. Далее была произведена замена трех строк в таблице данных, которые на взгляд эксперта вносили наибольшую смещенность в модель, на строки, соответствующие концентрации фреона на расстоянии 70, 180, 220 и 500 м в опытах на Торней Айлэнд. Сеть была переобучена. На контрольных точках, соответствующих расстоянию от центра аварии на Торней Айлэнд в 100, 150, 350 м средняя относительная точность составила 1,7%, а для точек, находящихся за чертой в 500 м, точность составила 3,6%. Полученные результаты свидетельствуют о высокой точности модели, а также о применимости предложенной технологии для прогнозирования концентрации ОХВ и возможного уточнения моделей.

**Выводы.** Химическая безопасность населения в последние годы приобретает приоритетное значение. Ее повышение связано с необходимостью прогнозирования

будущих аварий, их последствий. Невозможность физического моделирования химических аварий не позволяет детально изучать возможные их масштабы и последствия. Кроме того, каждый химический объект имеет индивидуальные особенности, которые оказывают непосредственное влияние в случае аварии на процессы ее протекания. И здесь незаменимым является моделирование аварий и прогнозирование их последствий. Предложенная технология позволит строить в доаварийный период поля концентрации ОХВ, а в случае аварии использовать эту информацию для принятия решений. Метод уточнения соответствующих моделей направлен на учет особенностей конкретных аварий и коррекцию возможных действий по спасению населения в зоне поражения.

**Список литературы:** 1. Землянский, О. Н. Принципы и элементный базис реализации технологий прогнозирования чрезвычайных ситуаций в условиях неопределенности / О. Н. Землянский, В. Е. Снитюк // Труды Одесского политехнического университета. – 2010. – Вып. 1(33)-2(34). – С. 143-147. 2. Лисанов, М. В. Моделирование рассеяния выбросов опасных веществ в атмосфере / М. В. Лисанов, А. В. Пчельников, С. И. Сумской // Рос. хим. журнал. (Журнал Рос. хим. об-ва им. Д.И. Менделеева). – 2005. – т. XLIX. – № 4. – С. 18-28. 3. Руководство по оценке промышленных опасностей (Techniques for Assessing Industrial Hazards: a Manual). – World Bank Tech. – 1988. – Paper 55 4. The HGSYSTEM version 3.0 technical reference manual. – Shell Internationale Research Maatschappij BV. Hague. – 1994. 5. ГОСТ Р12.3.047-98 ССБТ. Пожарная безопасность технологических процессов. Общие требования. Методы контроля. 6. 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. М.: Гидрометеоиздат, 1991. 7. Иванов, А. В. О достоверности использования вычислительного комплекса PHOENICS в расчетах рассеяния вещества в возмущенном потоке / А. В. Иванов, Б. С. Майстрюков // Известия ВУЗов: Черная металлургия. – 1999. – №11. – С.64-68. 8. Едигаров А. С. Математическое моделирование аварийного истечения и рассеивания природного газа при разрыве газопровода / А. С. Едигаров, В. А. Сулейманов // Математическое моделирование. – 2005. – № 7:4. – С. 37-52. 9. Методика оценки последствий аварийных выбросов опасных веществ (Методика «ТОКСИ», редакция 3.1). – Проект. М.:ФГУП НТЦ «Промышленная безопасность», 2005. – 67 с. 10. Jang, J.-S. R. ANFIS : Adaptive-Network-Based Fuzzy Inference System / J.-S. R. Jang // IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics. –1993. – Vol. 23. – № 3. – С. 665-685. 11. Kosko, B. Fuzzy systems as universal approximations /B. Kosko / IEEE Transactions on Computers. – 1994. – Vol. 43. – № 11. – С. 1329-1333.

Поступила в редколлегию 01.06.2013

УДК 004.827:504.5

**Прогнозирование концентрации «тяжелого газа» после залпового выброса / О. Н. Землянський, В. Е. Снитюк // Вісник НТУ «ХП». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Х: НТУ «ХП», – 2013. - № 38 (1011). – С.146-151. – Бібліогр.:11 назв.**

Розглянуто проблему визначення концентрації «важкого газу» після залпового викиду. Показано, що доаварійна побудова моделі для прогнозування його концентрації є необхідною умовою своєчасного і адекватного прийняття рішень. Запропоновано технологію уточнення такої моделі за результатами декількох вимірювань у післяаварійний період.

**Ключові слова:** хімічна аварія, «важкий газ», концентрація, нечітка нейромережа, прогнозування.

The problem of "heavy gas" concentration after volley output was determining. Shown that pre-accident model predict concentration construct is essential for timely and appropriate decision making. The technology for model specification after several measurements results in the post-accident period was proposed.

**Keywords:** chemical accident "heavy gas" concentration, fuzzy neural network, prediction.