

## Моделирование рассеяния выбросов опасных веществ в атмосфере

М. В. Лисанов, А. В. Пчельников, С. И. Сумской

*МИХАИЛ ВЯЧЕСЛАВОВИЧ ЛИСАНОВ — доктор технических наук, заведующий отделом ФГУП НТЦ «Промышленная безопасность». Область научных интересов: анализ риска аварий, моделирование последствий промышленных аварий.*

*АНДРЕЙ ВЛАДИМИРОВИЧ ПЧЕЛЬНИКОВ — кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник ФГУП НТЦ «Промышленная безопасность». Область научных интересов: анализ риска аварий, моделирование последствий промышленных аварий.*

*СЕРГЕЙ ИВАНОВИЧ СУМСКОЙ — старший научный сотрудник ФГУП НТЦ «Промышленная безопасность». Область научных интересов: численное моделирование газодинамических течений.*

105066, Москва, ул. А. Лукьянова, д. 4, к. 8, ФГУП «НТЦ «Промышленная безопасность», тел./факс (095)261-21-49, E-mail risk@safety.ru

Выброс токсичных веществ является одним из самых опасных сценариев, по которому может развиваться аварийная ситуация. Линейные размеры зон поражения при выбросе токсичных веществ могут достигать нескольких сотен и даже тысяч метров. Среди аварий, произошедших на промышленных объектах, именно выбросы токсичных веществ приводили к наибольшему количеству пострадавших. Авария, вызванная утечкой паров токсичного метилизоцианата в Бхопале (Индия) 3 декабря 1984 года, стала крупнейшей за всю историю мировой промышленности. В ней погибло около 3000 человек и пострадало около 200000 человек [1].

Катастрофы подобного масштаба могут возникать и в результате природных катаклизмов. Например, при выбросе углекислого газа на озере Ниос (Камерун) в августе 1986 года погибло около 1800 человек и пострадало около 1000 человек. Облако газа распространилось на расстояние до 25 км.

Высокая опасность токсичных выбросов обусловлена тем, что поражающее действие многих веществ проявляется при низких концентрациях их паров, поэтому зоны поражения могут иметь большую протяженность. Помимо больших пространственных зон поражения, выбросы токсичных веществ обладают еще одним достаточно высоким фактором опасности, а именно, временным. В начальный момент, сразу после поступления вещества в атмосферу они могут распространяться со скоростью до нескольких десятков метров в секунду, а затем, уже в атмосфере токсичное облако будет перемещаться со скоростью ветра, т.е. порядка нескольких метров в секунду. При этом в первые секунды после выброса протяженность зоны поражения может составить несколько десятков метров, а по истечению нескольких минут — до нескольких сотен метров. С точки зрения вероятности поражения, эта скорость достаточно велика. И при отсутствии сигналов, оповещающих об опасности, либо в условиях, когда действия человека, попавшего в зону поражения, не будут адекватно соответствовать возникшей опасности, такой скорости распространения вполне достаточно, чтобы не оставить ему никаких шансов на спасение.

Сопоставимую угрозу представляют и выбросы пожаровзрывоопасных веществ. Облака пожаровзрывоопасных веществ могут дрейфовать на сотни метров, сохраняя при этом способность к воспламенению. Воспламенение дрейфующих облаков вблизи мест сосредоточения людей может привести к многочисленным жертвам. Размеры зон, охватываемых пламенем (или детонационной волной), распространяющимся в топливно-воздушных облаках, могут составлять сотни метров. Памятен такой случай. В 1989 году на железной дороге под Уфой при аварии на продуктопроводе с широкой фракцией легких углеводородов произошел взрыв облака топливно-воздушной смеси. Место утечки находилось на расстоянии около 900 м от железной дороги. В результате аварии погибли и серьезно пострадали 1224 человека из 1284, оказавшихся в зоне поражения [2].

Таким образом, процесс распространения токсичных и взрывоопасных выбросов характеризуется двумя параметрами: размером зоны поражения и скоростью перемещения опасного облака в окружающей среде. Следовательно, для предсказания последствий опасных выбросов и принятия адекватных мер защиты необходима количественная оценка этих параметров, которая может быть получена методом моделирования распространения опасных веществ в окружающей среде.

Проблема моделирования данного процесса актуальная и весьма сложная. В ее рамках возникает целый комплекс вопросов, связанных с тем, каким образом можно смоделировать процесс распространения выброса опасных веществ. В настоящее время на часть этих вопросов получены разумные, достаточно полные ответы, относительно ответов на другие можно руководствоваться лишь некоторыми приблизительными соображениями. Некоторые вопросы не находят пока ответа.

В данной статье рассматривается ряд вопросов, касающихся разработки методики расчета рассеяния и оценки последствий токсичных и пожаровзрывоопасных выбросов, которая получила условное название «ТОКСИ-3» [3]. Эта методика разработана ФГУП НТЦ «Промышленная безопасность» и является дальнейшим развитием методик «ТОКСИ-2» и «ТОКСИ-1» [4, 5]. В методику «ТОКСИ-3» внесены существенные

изменения и дополнения, которые касаются прежде всего особенностей рассеяния «тяжелых газов».

### Моделирование рассеяния в атмосфере. Состояние вопроса

Для предсказания последствий выбросов токсичных и пожароопасных веществ крайне необходимым является моделирование распространения этих веществ в атмосфере.

К настоящему времени сложились три основных подхода для количественного описания процесса рассеяния выброса газообразных веществ в атмосфере:

1) гауссовские модели рассеяния, называемые также дисперсионными моделями;

2) модели рассеяния, базирующиеся на интегральных законах сохранения либо в облаке в целом (залповый выброс), либо в поперечном сечении облака (длительный выброс); иногда такие модели называют моделями с сосредоточенными параметрами, в отдельную подгруппу выделена модель рассеяния «тяжелого газа»;

3) модели, построенные на численном решении системы уравнений сохранения (в их оригинальном виде) и именуемые часто как модели или методы прямого численного моделирования.

Гауссовские модели, построенные на распределении Гаусса, описывают пространственно-временное изменение концентрации газа. Для возможности реализации гауссовских моделей в них вводятся эмпирические коэффициенты, описывающие атмосферную турбулентность. Гауссовские модели учитывают только два процесса, происходящие с выбросом в атмосфере, — перемещение в поле ветра и рассеяние за счет атмосферной турбулентности. Естественно, что приемлемую точность оценок эти модели дают для тех зон, где доминируют указанные процессы: либо на большом удалении от места выброса, либо во всем диапазоне расстояний, но при слабом выбросе.

Однако поведение реального выброса намного сложнее, чем это предполагается в гауссовских моделях. На начальной стадии распространения вещества существенную роль играют наведенные течения (струи разной конфигурации, расширяющиеся облака) и высокая плотность выбрасываемого вещества. Последнее особенно важно, в связи с чем был даже введен специальный термин — «тяжелый газ», для описания поведения которого были разработаны специальные модели — «модели рассеяния тяжелого газа». Наиболее известными реализациями моделей рассеяния «тяжелого газа» являются методика Всемирного банка [6], свод методик HGSYSTEM [7], методики, созданные при поддержке ведущих зарубежных исследовательских организаций TNO — The Netherlands Organization of Applied Scientific Research (Нидерланды) [8], Det Norske Veritas (DNV Technica) (Норвегия) [9].

В ГОСТ Р 12.3.047-98 [10] дается методика расчета залповых выбросов на основе модели «тяжелого газа». (К сожалению, конспективность изложения и ряд грубых опечаток делают фактически невозможным ее использование на практике.) Отметим также отечественную методику РД 52.04.253-90 [11], основанную на эмпирических соотношениях. Она также малоэффективна, так как существенно завышает реальные последствия аварий.

Необходимость выделения в специальный класс моделей расчета процессов рассеяния «тяжелого газа» вызвана следующим обстоятельством. Большинство газовых выбросов при промышленных авариях в начальный момент имеют большую плотность, чем воздух. Причины этому могут быть различные:

— высокая молярная масса, более 29,5 г/моль (молярная масса воздуха), при нормальных условиях к «тяжелым газам» относятся пропан, бутан, пары нефти, бензина, хлор, сероводород и т.д.;

— низкая температура (например, метан при нормальных условиях имеет плотность ниже плотности воздуха, а при температуре, равной температуре кипения ( $-161,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), его плотность становится выше плотности воздуха, и тогда метан уже является «тяжелым газом», поэтому процесс рассеяния метана от пролива следует рассчитывать по модели «тяжелого газа»);

— наличие аэрозолей (например, аммиак и при нормальных условиях, и при температуре кипения является легким газом, и соответственно при смешении с воздухом образующиеся смеси имеют плотность меньше, чем воздух, однако в случае капельных включений в смеси она становится «тяжелым газом»);

— протекание в выбросе химических реакций, которые приводят к образованию «тяжелого газа».

Выбросы «тяжелого газа», склонные к оседанию под действием силы тяжести, образуют невысокие, но протяженные облака (высота таких облаков составляет до нескольких метров, а поперечный размер до нескольких десятков и даже сотен метров). В результате площадь покрываемой облаком поверхности земли оказывается на порядок больше той площади, которая могла быть, если бы плотность облака не была больше плотности воздуха. Более того, при выбросах «тяжелого газа» имеет место такое явление, как распространение облака против ветра, которое также отсутствует, если газ не отличался по плотности от воздуха.

Облака «тяжелого газа» имеют большую поверхность обмена с атмосферой (поверхность, через которую происходит подмешивание воздуха в дрейфующий выброс). В результате, несмотря на то, что удельная скорость подмешивания воздуха уменьшается с увеличением плотности облака, общая масса воздуха, вовлекаемая в облако, существенно возрастает по сравнению с облаками нейтральной плавучести. А это означает, что действие силы тяжести в конечном итоге приводит к более быстрому рассеянию «тяжелого газа», чем выбросов нейтральной плавучести.

Необходимость учета указанных эффектов с целью существенного улучшения прогностических возможностей методического аппарата (на сотни и даже тысячи процентов) и стала главной причиной массового перехода за рубежом от моделей гауссовского типа к моделям рассеяния «тяжелого газа».

Как и все модели, модель рассеяния «тяжелого газа» обладает рядом ограничений. Прежде всего, это связано с необходимостью учета особенностей рельефа местности и наличия застройки. В наибольшей степени учесть эти факторы позволяют модели, основанные на численном решении полной системы уравнений газодинамики. Это сложный, но наиболее перспективный подход. В настоящее время он реализован в нескольких программных продуктах, например, в

вычислительном комплексе PHOENIX [12] и компьютерной программе, разработанной во ВНИИГАЗ [13].

Таким образом, в принципе существует большой спектр возможностей для расчета процесса рассеяния выбросов опасных веществ: от простейших, сильно завышенных оценок по гауссовским моделям до детальных расчетов по сложным газодинамическим моделям.

В России для решения практических задач в области промышленной безопасности, как уже отмечалось во введении, широко используются более простые гауссовские модели. Однако развитие вычислительной техники и доступность персональных компьютеров открывает возможности перехода на более адекватные модели расчета рассеяния. Такой переход совершенно незаметен для пользователя, поскольку время расчета в рамках более адекватных моделей ненамного превосходит время расчета по гауссовским моделям. К моделям, которые позволяют значительно улучшить качество прогноза при сравнительно незначительном увеличении затрат, относятся модели рассеяния «тяжелого газа», построенные на интегральных методах и находящиеся в вышеприведенной классификации во второй группе. Именно такой подход и использовался в методике «ТОКСИ-3».

**Основные положения методики «ТОКСИ-3» для расчета процесса рассеяния вещества в атмосфере**

*Основные положения модели, базирующейся на интегральных соотношениях*

Методика «ТОКСИ-3» позволяет рассчитать характеристики перемещающегося в атмосфере опасного облака в рамках модели рассеяния «тяжелого газа», которая базируется на интегральных законах сохранения. Суть этого подхода состоит в следующем. Выбирается некоторый объем, представляющий пространство, в котором рассеивается вещество (в газообразном и капельно-жидком состояниях). При этом не стремятся детально описать картину течения внутри этого объема и, соответственно, получить детальное распределение параметров течения. В рамках данной модели отслеживается изменение интегральных характеристик среды в пределах этого объема (масса, импульс потока, энергия и т.д.), т.е. остается неизвестным, как изменилась, например, плотность в той или иной точке, но можно рассчитать, как изменилась масса среды во всем рассматриваемом объеме; неизвестно, как изменилась энергия в той или иной точке, но можно определить, как изменилась вся энергия системы в рассматриваемом объеме и т.д. Понятно, что отслеживать изменение интегральных величин гораздо проще: для этого не требуется решать сложные системы уравнений в частных производных, а необходимо рассчитать лишь потоки соответствующих величин (массы, энергии и др.) через границы рассматриваемого объема.

Из интегральных характеристик (масса, импульс, энергия), можно получить и некоторую информацию о том, как соответствующие параметры распределены внутри данного объема. Для этого априори задается закон распределения того или иного параметра внутри объема. Например, можно предположить, что все параметры распределены равномерно. В более сложном варианте задается неоднородное распределение пара-

метров. Обычно в качестве таких распределений выбирают гауссовские профили, степенные зависимости и т.д.

*Задание профиля концентрации внутри облака*

Для описания распределения концентрации  $c$  вещества внутри облака в точке с координатами  $x, y, z$  в методике «ТОКСИ-3» [3] используются следующие уравнения:

$$\left. \begin{aligned}
 &\text{для залпового выброса} \\
 &c(x, y, z, t) = c_c(t) \exp \left[ - \left[ \frac{z}{S_z(t)} \right]^\beta \right], \\
 &\text{при } (x - x_c)^2 + y^2 < r^2 \\
 &c(x, y, z, t) = c_c(t) \exp \left[ - \left[ \frac{z}{S_z(t)} \right]^\beta \right] \times \\
 &\times \exp \left[ - \frac{(x - x_c)^2 + y^2 - r^2(t)}{S_y^2(t)} \right], \\
 &\text{при } (x - x_c)^2 + y^2 \geq r^2 \\
 &\text{для постоянно действующего источника} \\
 &c(x, y, z) = c_c(x) \exp \left[ - \left[ \frac{z}{S_z(x)} \right]^\beta \right], \text{ при } |y| < b \\
 &c(x, y, z) = c_c(x) \exp \left[ - \left[ \frac{z}{S_z(x)} \right]^\beta \right] \times \\
 &\times \exp \left[ - \left[ \frac{|y| - b(x)}{S_y(x)} \right]^2 \right], \text{ при } |y| \geq b
 \end{aligned} \right\} (1)$$

где  $x_c$  — положение центра облака (или его переднего края — для длительного выброса);  $r, b$  — радиус для залпового источника и полуширина для постоянно действующего источника центральной части (ядра) облака;  $c_c$  — концентрация вещества в центре (на оси) облака;  $t$  — время;  $S_z, S_y$  — дисперсия соответственно вертикальная и горизонтальная (по высоте и в поперечном направлении);  $\beta = 1 + \alpha$  ( $\alpha$  — показатель степенной зависимости скорости ветра от высоты).

Картина рассеяния при мгновенном и длительном выбросах «тяжелого газа» приведена на рис. 1. (Облака, образующиеся при мгновенном (залповом) выбросе, иногда называют первичными, а облака, образующиеся при длительном выбросе, т.е. выброс от постоянно действующего источника — вторичными). Характерная особенность распределения концентрации, описываемого уравнениями (1), и принципиальное отличие от распределения, используемого в гауссовской модели, заключается в наличии так называемого ядра облака. Внутри ядра при залповом выбросе в любой горизонтальной плоскости облака концентрация вещества постоянна, при выбросе от постоянно действующего источника она постоянна вдоль любой горизонтальной линии, перпендикулярной направлению ветра. Наличие ядра с постоянной концентрацией отражает тот факт, что размытие облака по краям осуществляется постепенно и требуется время, чтобы диффундирующий газ от боковой поверхности достиг центра облака.

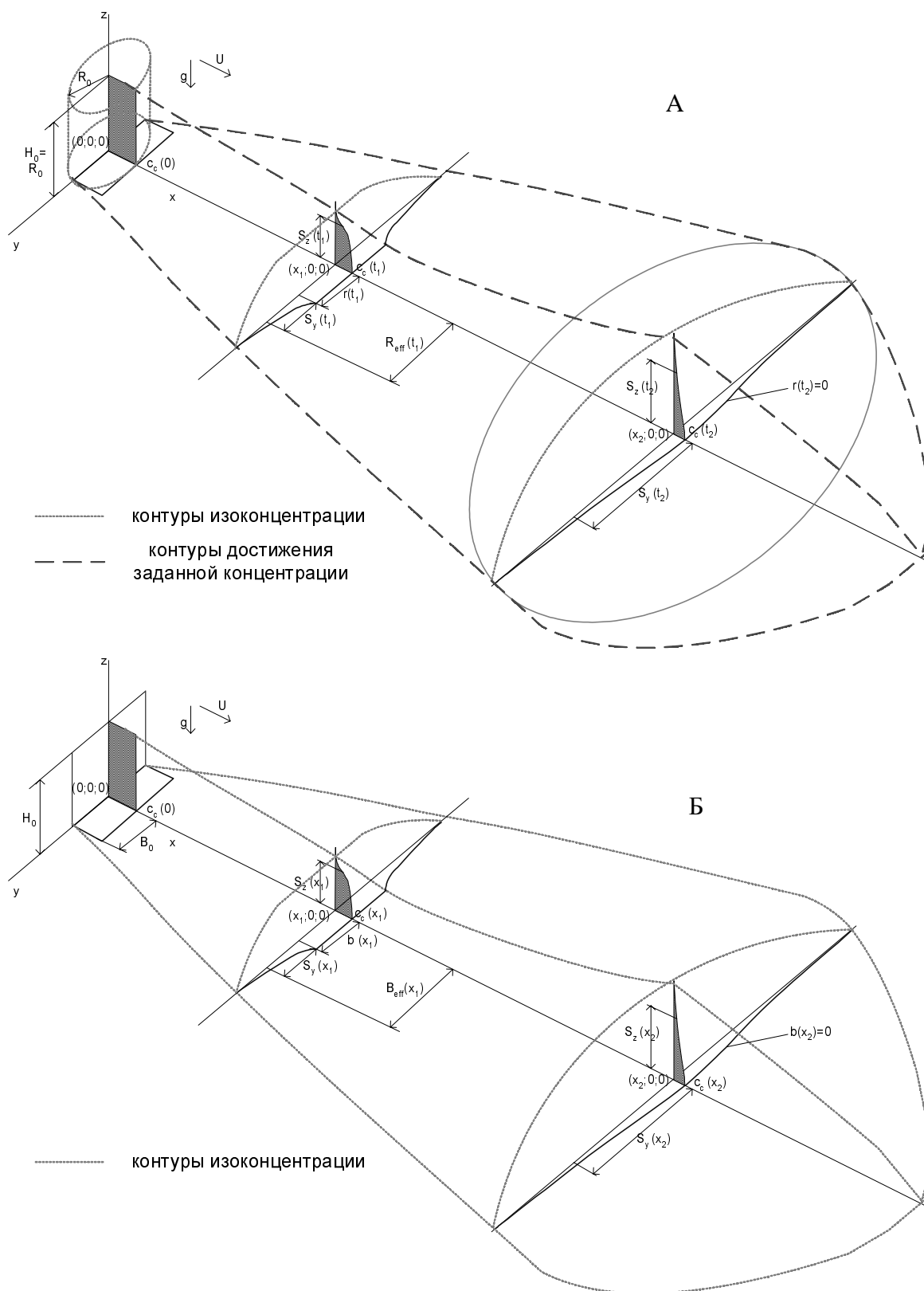


Рис. 1. Схема рассеяния «тяжелого газа» при залповом (А) и длительном (Б) выбросах.

На рис. А:  $R_0$ ,  $H_0$  — начальные радиус и высота облака; на рис. Б:  $B_0$ ,  $H_0$  — начальные полуширина и высота облака

Радиус (полуширина) ядра облака может увеличиваться под действием силы тяжести, вызывающей гравитационное растекание облака, плотность которого больше плотности воздуха. В остальном данное распределение отражает те же процессы, что и гауссовское: перенос в поле ветра, рассеяние в горизонтальном (экспоненциальные множители с пространственными переменными  $x$  и  $y$ ) и вертикальном (экспоненциальные множители с пространственной переменной  $z$ ) направлениях.

Помимо параметров  $c_c$ ,  $S_z$ ,  $S_y$ ,  $r(b)$ ,  $x_c$ , облако рассеиваемого вещества характеризуются  $Q_{eff}$  — энергией (поток энергии для длительного выброса) в облаке и  $M_{liq}$  — массой (массовым расходом для длительного выброса) жидкой (капельной) фазы вещества в облаке. Зная эти величины, в предположении, что давление в облаке равно давлению окружающей среды  $p_0$ , можно использовать уравнение состояния среды в облаке и определить такие характеристики среды в облаке, как плотность  $\rho_m$  или удельный объем  $V_m$  и температуру  $T_m$ .

#### Введение эффективных характеристик в физическую модель рассеяния облака

С учетом того обстоятельства, что формально облако не имеет границ (экспоненциальное распределение плавно спадает до нуля на бесконечности), представляется удобным ввести некоторые его эффективные характеристики:  $R_{eff}$  — эффективный радиус облака при залповом выбросе или  $B_{eff}$  — эффективная полуширина облака при длительном выбросе;  $H_{eff}$  — эффективная высота облака;  $M_{eff}$  — эффективная масса воздуха и рассеиваемого вещества в облаке для залпового выброса или эффективный расход воздуха и вещества для постоянного выброса. Эти величины вычисляются по следующим формулам:

$$R_{eff} = r + 0,5\sqrt{\pi}S_y, \text{ или } B_{eff} = b + 0,5\sqrt{\pi}S_y \quad (2)$$

$$H_{eff} = \frac{1}{\beta} \Gamma\left(\frac{1}{\beta}\right) S_z \quad (3)$$

$$M_{eff} = \pi R_{eff}^2 H_{eff} / V_m \text{ или } M_{eff} = 2 B_{eff} H_{eff} u_{eff} / V_m \quad (4)$$

где  $\Gamma$  — гамма-функция;  $u_{eff}$  — эффективная скорость движения облака.

Облака, описываемые распределением (1), рассматриваются как единое целое, перемещающееся в поле ветра, т.е. все части облака от залпового выброса в конкретный момент времени двигаются с постоянной скоростью и все горизонтальные слои каждого поперечного сечения шлейфа также перемещаются с одинаковой скоростью (хотя в разных сечениях скорость может быть разной). Фактически это означает отсутствие сдвига по высоте друг относительно друга различных частей облака. Поскольку в целом облако дрейфует в переменном по высоте поле ветра, необходимо задать его эффективную скорость движения:

$$u_{eff} = \frac{\Gamma[(1+\alpha)/\beta]}{\Gamma(1/\beta)} u_0 \left(\frac{S_z}{z_0}\right)^\alpha \quad (5)$$

где  $u_0$  — скорость ветра на высоте  $z_0$ .

С использованием эффективных характеристик по методике «ТОКСИ-3» для описания состояния рассеиваемого вещества и движущегося в атмосфере облака составляется шесть уравнений: два — на основе интегральных законов сохранения всей массы вещества и суммарной энергии в облаке; три — описывающие соответственно гравитационное растекание облака, его боковое рассеяние и движение центра масс облака (передней кромки облака для длительного выброса); одно — представляющее закон сохранения массы выброшенного вещества.

#### Уравнения для расчета массы и внутренней энергии облака рассеиваемого вещества

При движении облака его масса и количество энергии в нем будут изменяться за счет соответствующих потоков через границы облака. Таких границ у облака три:

— верхняя (эффективная площадь границы  $S_{eff\ top} = \pi R_{eff}^2$  для залпового выброса и  $S_{eff\ top} = 2u_{eff}B_{eff}$  для постоянно действующего источника);

— нижняя (эффективная площадь границы совпадает с  $S_{eff\ top}$ );

— боковая (эффективная площадь для залпового выброса  $S_{eff\ side} = 2\pi R_{eff}H_{eff}$ , для постоянно действующего источника  $S_{eff\ side} = 2u_{eff}H_{eff}$ ).

Тогда изменение массы облака при его рассеивании будет описываться уравнением

$$\frac{d}{dt} [M_{eff}] = \dot{M}_{eff\ top} + \dot{M}_{eff\ side} \quad (6)$$

где  $\dot{M}_{eff\ top}$ ,  $\dot{M}_{eff\ side}$  — потоки массы, определяются как произведение трех величин: плотности подсасываемого в облако воздуха (она равна плотности воздуха в окружающей среде  $\rho_{air}$ ), эффективной площади соответствующей поверхности границы облака и эффективной скорости подсоса воздуха.

Для расчета потоков массы воздуха через границы облака используются следующие выражения:

через верхнюю границу

$$\left. \begin{aligned} \dot{M}_{eff\ top} &= S_{eff\ top} \rho_{air} u_{e\ top} = \pi R_{eff}^2 \rho_{air} u_{e\ top} \text{ — для залпового выброса} \\ \dot{M}_{eff\ top} &= S_{eff\ top} \rho_{air} u_{e\ top} = 2u_{eff} B_{eff} \rho_{air} u_{e\ top} \text{ — для постоянно действующего источника} \end{aligned} \right\} (7)$$

через боковые поверхности

$$\left. \begin{aligned} \dot{M}_{eff\ side} &= S_{eff\ side} \rho_{air} u_{e\ side} = 2\pi R_{eff} H_{eff} \rho_{air} u_{e\ side} \text{ — для залпового выброса} \\ \dot{M}_{eff\ side} &= S_{eff\ side} \rho_{air} u_{e\ side} = 2u_{eff} H_{eff} \rho_{air} u_{e\ side} \text{ — для постоянно действующего источника} \end{aligned} \right\} (8)$$

где  $u_{e\ top}$  и  $u_{e\ side}$  — скорость подмешивания воздуха соответственно через верхнюю и боковую поверхности.

Отсюда находим выражения, описывающие изменение массы облака при его движении в атмосфере:

$$\left. \begin{aligned} & \text{для залпового выброса} \\ & \frac{d}{dt} [M_{eff}] = S_{eff\ top} \rho_{air} u_{e\ top} + S_{eff\ side} \rho_{air} u_{e\ side} = \\ & = \pi R_{eff}^2 \rho_{air} u_{e\ top} + 2\pi R_{eff} H_{eff} \rho_{air} u_{e\ side} \\ & \text{для постоянно действующего источника} \\ & \frac{d}{dt} [M_{eff}] = S_{eff\ top} \rho_{air} u_{e\ top} + S_{eff\ side} \rho_{air} u_{e\ side} = \\ & = 2u_{eff} B_{eff} \rho_{air} u_{e\ top} + 2u_{eff} H_{eff} \rho_{air} u_{e\ side} \end{aligned} \right\} (9)$$

Для решений уравнений (9) необходимо знать две количественные характеристики:  $u_{e\ top}$  и  $u_{e\ side}$ . Решающее влияние на конечный результат оказывает точность определения скорости  $u_{e\ top}$ , влияние скорости  $u_{e\ side}$  ограничивается непосредственно местом выброса. Подмешивание воздуха через боковую поверхность меньше, во-первых, потому что площадь боковой границы облака существенно меньше верхней границы и, во-вторых, скорость подмешивания через боковую поверхность по мере дрейфа облака уменьшается, стремясь к нулю, в то время как скорость подмешивания через верхнюю поверхность увеличивается, стремясь к определенному постоянному значению.

Для расчета скорости подмешивания воздуха через верхнюю границу облака  $u_{e\ top}$  применяют различные зависимости, которые строятся на той или иной форме аппроксимации экспериментальных данных. В методике [3] используется следующее выражение:

$$u_{e\ top} = \frac{ku_t}{\Phi(Ri_*)} \quad (10)$$

где  $k = 0,41$  — константа Кармана;

$u_t = \sqrt{u_*^2 + (b_* w_*)^2}$  ( $u_*$  — динамическая скорость трения;  $b_* = 0,2$  — постоянный коэффициент и

$w_* = \left( \frac{g Q_h H_{eff}}{\rho_m T_m c_{pm}} \right)^{1/3}$  — вспомогательная величина

( $g = 9,8 \text{ м/с}^2$  — ускорение свободного падения);  $Q_h$  — тепловой поток, поступающий в облако с поверхности земли;  $c_{pm}$  — теплоемкость смеси в облаке);

$$\Phi(Ri_*) = \begin{cases} \frac{(1+0,8Ri_*)^{1/2}}{1+\alpha}, & \text{при } Ri_* > 0 \\ \frac{(1-0,6Ri_*)^{-1/2}}{1+\alpha}, & \text{при } Ri_* \leq 0 \end{cases} \quad (11)$$

$Ri_*$  — число Ричардсона,  $Ri_* = g \frac{\rho_m - \rho_{air}}{\rho_{air}} \cdot \frac{H_{eff}}{u_t^2}$

Зависимость (10) хорошо описывает имеющиеся экспериментальные данные, приведенные, например, в работах [14], [15].

При расчете скорости подмешивания воздуха через боковую поверхность предполагается, что величина  $u_{e\ side}$  пропорциональна скорости бокового растекания облака за счет действия силы тяжести:

$$u_{e\ side} = \gamma \frac{d}{dt} [R_{eff}] \quad (12)$$

где  $\gamma$  — коэффициент пропорциональности, который в разных моделях выбирается в интервале от 0 (отсутст-

вие подмешивания через боковую поверхность) до 1. В методике «ТОКСИ-3» принято значение 0,3.

Таким образом, формулы (9) можно переписать следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} & \text{для залпового выброса} \\ & \frac{d}{dt} [M_{eff}] = \pi R_{eff}^2 \rho_{air} u_{e\ top} + 2\pi R_{eff} H_{eff} \rho_{air} \gamma \frac{d}{dt} [R_{eff}] \\ & \text{для постоянно действующего источника} \\ & \frac{d}{dx} [M_{eff}] = 2B_{eff} \rho_{air} u_{e\ top} + 2H_{eff} \rho_{air} \gamma \frac{d}{dt} [B_{eff}] \end{aligned} \right\} (13)$$

При движении облака рассматриваемого вещества вместе с воздухом из окружающей среды в него поступает дополнительная энергия, в том числе за счет теплообмена с подстилающей поверхностью. Изменение энергии облака можно описать уравнениями, аналогичными формулам (13), но с добавлением слагаемых, характеризующих теплообмен с подстилающей поверхностью:

$$\left. \begin{aligned} & \text{для залпового выброса} \\ & \frac{d}{dt} [Q_{eff}] = \pi R_{eff}^2 \rho_{air} u_{e\ top} e_{air} + 2\pi R_{eff} H_{eff} \times \\ & \times \rho_{air} \gamma \frac{d}{dt} [R_{eff}] e_{air} + \pi R_{eff}^2 Q_h \\ & \text{для постоянно действующего источника} \\ & \frac{d}{dx} [Q_{eff}] = 2B_{eff} \rho_{air} u_{e\ top} e_{air} + 2H_{eff} \rho_{air} \gamma \frac{d}{dt} [B_{eff}] e_{air} + \\ & + \pi B_{eff} Q_h \end{aligned} \right\} (14)$$

где  $e_{air}$  — удельная энергия воздуха.

Удельная энергия воздуха  $e_{air}$  принимается равной удельной энергии сухого воздуха (наличием воды в атмосфере пренебрегаем):

$$e_{air} = T_{air} c_{p\ dry\ air} \quad (15)$$

где  $T_{air}$  — температура воздуха;  $c_{p\ dry\ air}$  — теплоемкость сухого воздуха.

Энергия, поступающая от подстилающей поверхности,  $Q_h$  определяется по следующей формуле:

$$Q_h = \begin{cases} \max[Q_{h,n}, Q_{h,f}], & T_s > T_m \\ Q_{h,f}, & T_s < T_m \end{cases} \quad (16)$$

где  $Q_{h,n} = 3,5 \cdot 10^{-3} \left[ \frac{(T_s - T_m)^2}{0,5(T_s + T_m)} \right]^{2/3} \frac{P_0}{R} g^{1/3}$

( $R$  — универсальная газовая постоянная);

$Q_{h,f} = 1,22 \left( \frac{u_*^2}{u_{10}} \right) \rho_m c_{pm} (T_s - T_m)$  ( $u_{10}$  — скорость ветра на высоте 10 м);  $T_s$  — температура подстилающей поверхности.

*Уравнения для описания процессов рассеяния облака*

Уравнение, описывающее гравитационное растекание облака — определяющий процесс при рассеянии «тяжелых газов», выглядит следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} &\text{для залпового выброса} \\ &\frac{d}{dt} [R_{eff}] = u_{eff} \frac{d}{dx} [R_{eff}] = C_E \sqrt{gH_{eff}} [1 - \rho_{air} / \rho_m] \\ &\text{для постоянно действующего источника} \\ &\frac{d}{dx} [B_{eff}] = \frac{C_E}{u_{eff}} \sqrt{gH_{eff}} [1 - \rho_{air} / \rho_m] \end{aligned} \right\} (17)$$

где  $C_E$  — константа, подбирается по экспериментальным данным и согласно большинству подходов  $C_E = 1,15$ .

Боковое рассеяние облака описывается уравнением:

$$\left. \begin{aligned} &\text{для залпового выброса} \\ &\frac{d}{dt} [S_y] = \frac{u_{eff}}{S_y} \cdot 2 \left( \frac{2}{\pi} \right)^{1/2} \left( R_{eff} + \frac{1}{2} \pi^{1/2} S_y \right) \frac{d}{dx} [\sigma_y] \\ &\text{для постоянно действующего источника} \\ &\frac{d}{dx} [S_y] = \frac{1}{S_y} \cdot 2 \left( \frac{2}{\pi} \right)^{1/2} \left( B_{eff} + \frac{1}{2} \pi^{1/2} S_y \right) \frac{d}{dx} [\sigma_y] \end{aligned} \right\} (18)$$

где  $\sigma_y$  — зависимость коэффициента дисперсии от расстояния.

Перемещение центра облака (или его переднего края в случае постоянно действующего источника) описывается простым дифференциальным уравнением

$$\frac{d}{dt} [x_c] = u_{eff} \quad (19)$$

Сохранение массы выброшенного вещества  $M_R$  выражается очевидными алгебраическими соотношениями:

$$\left. \begin{aligned} &\text{для залпового выброса} \\ &M_R = c_c(t) \pi R_{eff}^2 H_{eff} \\ &\text{для постоянно действующего источника} \\ &M_R = 2c_c(x) B_{eff} H_{eff} u_{eff} \end{aligned} \right\} (20)$$

Таким образом, приведенная модель описывает следующие процессы: движение облака при переменной по высоте скорости ветра [уравнения (19)]; гравитационное растекание [уравнения (17)]; рассеяние облака в вертикальном направлении за счет атмосферной турбулентности (подмешивание воздуха в облако) и горизонтальном направлении за счет подмешивания воздуха в облако (атмосферная турбулентность, гравитационное растекание) [уравнения (13), (18)]; нагрев или охлаждение облака вследствие подмешивания воздуха; теплообмен облака с подстилающей поверхностью [уравнения (14)].

#### Термодинамический расчет состояния среды в облаке

Для решения задачи моделирования рассеяния выбросов опасных веществ в атмосфере необходимо задать способ определения температуры среды в облаке и количества жидкой фазы вещества в облаке  $M_{liq}$  (жидкая фаза в виде капель может находиться в обла-

ке изначально либо образоваться в облаке при конденсации паров вещества уже в ходе дрейфа облака).

Исходными данными для проведения термодинамического расчета рассматриваемого процесса являются общая масса вещества в облаке  $M_R$ ; эффективная масса облака  $M_{eff}$ ; эффективная внутренняя энергия облака  $Q_{eff}$ ; геометрические характеристики облака (эффективные радиус и высота для первичного облака — залповый выброс, эффективные полуширина и высота для вторичного облака — длительный выброс).

Кроме того, необходимы данные об окружающей среде и физические характеристики воздуха и рассеиваемого вещества.

Перечисленные исходные величины находятся решением уравнений (1)–(20). В результате термодинамического расчета определяются плотность смеси в облаке  $\rho_m$ ; температура смеси в облаке  $T_m$ ; масса рассеиваемого вещества в жидкой фазе облака  $M_{liq}$ ; геометрический размер облака — эффективная высота  $H_{eff}$ .

Ниже приводятся формулы для термодинамического расчета состояния среды в первичном облаке (для вторичных облаков приведенные ниже формулы справедливы при замене соответствующих переменных, описывающих состояние в первичном облаке, на переменные, описывающие состояние во вторичных облаках).

Состояние среды в облаке определяется из условия равенства энергии и плотности среды, распределенной в эффективном объеме, с энергией облака и его массой при давлении  $p_0 = 1$  атм.

Сначала рассчитывается доля жидкой фазы вещества в облаке:

$$M_{liq} = \frac{(M_R - M_{liq}^0) C_v T + M_{liq}^0 C_p T - \Delta H_{boil} M_{liq}^0 + (M_{eff} - M_R) C_{vair} (T_{air} - T_{boil}) - M_R C_v T_{boil}}{C_p T_{boil} - C_v T_{boil} - \Delta H_{boil}} \quad (21)$$

где  $M_{liq}^0$  — количество жидкого вещества в начальный момент (в начальном сечении выброса);  $C_v$  и  $C_p$  — теплоемкость соответственно газовой и жидкой фазы вещества в облаке;  $C_{vair}$  — теплоемкость воздуха;  $T$  — температура выбрасываемого вещества в начальный момент;  $T_0$  — температура воздуха;  $\Delta H_{boil}$  — теплота кипения выброшенного вещества;  $T_{boil}$  — температура кипения выброшенного вещества при давлении  $p_0 = 1$  атм.

Если величина  $M_{liq} > 0$ , то это означает, что в облаке находится капельная взвесь массой  $M_{liq}$ . Тогда температура облака  $T_m$  полагается равной  $T_{boil}$ , и плотность (удельный объем) среды в облаке определяется по соотношениям:

$$\mu_{eff} = \frac{(M_{eff} - M_{liq}) \mu_R \mu_{air}}{(M_R - M_{liq}) \mu_{air} + (M_{eff} - M_R) \mu_R} \quad (22)$$

$$\rho_m = \frac{p_0 \mu_{eff}}{T_m R} + c_c - \frac{p_0 \mu_R}{T_m R} \quad (23)$$

$$V_m = \frac{1}{\rho_m} \quad (24)$$

где  $\mu_R, \mu_{air}$  — молярная масса рассеиваемого вещества и воздуха, соответственно;  $\mu_{eff}$  — молярная масса смеси рассеиваемого вещества и воздуха.

Если величина  $M_{liq} \leq 0$ , то это означает, что в облаке находится только газовая смесь и массу капельной взвеси  $M_{liq}$  следует полагать равной 0.

Температура и плотность (удельный объем) среды в облаке в этом случае определяются из соотношений

$$T_{eff} = \frac{(M_R - M_{liq}^0)C_v T + M_{liq}^0 C_p T - \Delta H_{boil} M_{liq}^0 + (M_{eff} - M_R)C_{vair} T_{air}}{(M_{eff} - M_R)C_{vair} + M_R C_v} \quad (25)$$

$$\mu_{eff} = \frac{M_{eff} \mu_R \mu_{air}}{(M_R - M_{liq})\mu_{air} + (M_{eff} - M_R)\mu_R} \quad (26)$$

$$\rho_m = \frac{p_0 \mu_{eff}}{T_m R} \quad (27)$$

$$V_m = \frac{1}{\rho_m} \quad (28)$$

После определения состояния смеси в облаке проводится расчет геометрических размеров облака [по формулам (20)], изменение которых происходит за счет испарения жидкой фазы, а также в результате нагрева/охлаждения газовой фазы при подмешивании воздуха в облако [по формуле (14)].

Составленная система уравнений решается с помощью соответствующих численных методов, например, методом Рунге—Кутты.

### Сравнение результатов модельных расчетов с экспериментальными данными

Методика «ТОКСИ-3» была верифицирована по ряду экспериментальных данных, проведено также ее сравнение с другими методиками и моделями. Расчетные значения, полученные по двум моделям (гауссовская и рассеяния «тяжелого газа»), сравнивали с экспериментальными данными. При этом использовались три методики: стандартная гауссовская модель, учитывающие начальный размер облака и время действия источника выброса вещества [16] (данная методика применялась только для оценки длительных выбросов), «ТОКСИ-2» [4] (гауссовская модель) и «ТОКСИ-3» [3].

С целью верификации методики «ТОКСИ-3» были использованы результаты экспериментов по рассеянию газовых смесей фреон-12—азот, которые проводились в 1982—1984 гг. на открытом пространстве в местечке Торней Айленд (Thorney Island) (Великобритания) [17, 18].

В серии этих экспериментов имитировались различные варианты рассеяния выброса: залповые и длительные выбросы, при наличии отдельно стоящих препятствий и без таковых, при наличии протяженных заграждений и без них. В нашей работе для верификации методики «ТОКСИ-3» использовались результаты исследований распространения как залповых, так и длительных выбросов только на открытом пространстве.

В опытах Торней Айленд рассеяние выброса происходило практически над ровным полем (бывший аэродром на берегу моря), где росла трава высотой около 30—35 см (характерный размер шероховатости 0,018 м). Набегающий поток ветра следует охарактеризовать как высокооднородный — на десятки километров до полигона с наветренной стороны простиралось море. Регистрировались как метеорологические параметры (условия экспериментов), так и характеристики рассеиваемого выброса. Концентрацию рассеиваемого вещества измеряли на различных расстояниях от источника и на различных высотах. Измерительные датчики размещались достаточно часто и на большой площади: расстояние между датчиками составляло около 10 м вблизи места выброса и около 100 м на удалении, угол охвата сектора рассеяния — около 90°, протяженность зоны (в направлении ветра), где осуществлялась регистрация, составляла около 500 м. Помимо пространственно-временной регистрации концентрации проводилась видео, кино- и фотосъемка. Таким образом, получали пространственно-временное распределение концентрации, из которого, в частности, определялись геометрические размеры облака.

Было проведено около двадцати залповых выбросов. Облако газа после выброса имело форму цилиндра объемом около 2000 м<sup>3</sup>. Осуществлено также несколько десятков длительных выбросов. В этом случае выброс организовывали путем подачи с поверхности земли вертикально вверх газовой смеси посредством вентиляторов из емкости (2000 м<sup>3</sup>). Емкость размещалась сбоку от места выброса на расстоянии от него 50 м. Объемная скорость подачи газовой смеси 4—5 м<sup>3</sup>/с, соответственно продолжительность выброса составляла около 400 с. Для гашения вертикального потока использовалась специальная крышка.

Основные характеристики экспериментальных выбросов приведены в табл. 1. Результаты модельных расчетов в сравнении с экспериментально полученными данными представлены на рис. 2—5.

На рис. 2 приведены расчетные и экспериментальные зависимости максимальных концентраций, достигаемых в ходе залпового выброса, от расстояния. Видно, что в целом методика, основанная на модели рассеяния «тяжелого газа» («ТОКСИ-3»), более точно

Таблица 1

Условия проведения экспериментов в Торней Айленд

Характеристика	Залповый выброс (опыт 007)	Длительный выброс (опыт 045)
Объем выброса, м <sup>3</sup> (объемная скорость выброса, м <sup>3</sup> /с)	2000	2000 (4,3)
Доля фреона в газовой смеси, %(об.)	24	31
Скорость ветра, м/с	3,4	2,1
Стабильность атмосферы по Пасквилу	E	E F



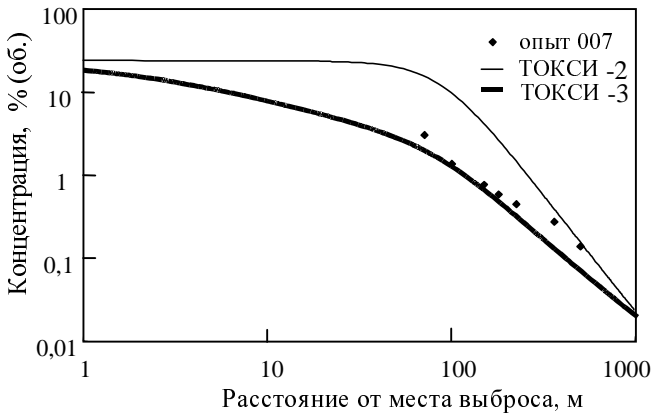


Рис. 2. Распределение концентрации фреона-12, рассчитанное по методикам «ТОКСИ-2» и «ТОКСИ-3», и экспериментальные данные (Торней Айленд, залповый выброс, опыт 007)

описывает процесс рассеяния, чем методика, построенная на гауссовской модели («ТОКСИ-2»). Расчетная по «ТОКСИ-2» концентрация почти в 10 раз превышает экспериментальную даже на достаточно больших расстояниях от места выброса.

Результаты компьютерного моделирования длительных выбросов в сравнении с экспериментальными данными приведены на рис. 3–5. Из рис. 3 видно, что методики, построенные на гауссовской модели, завышают концентрацию на оси выброса, по сравнению со значениями, регистрируемыми в эксперименте. Наиболее точно результаты эксперимента описывает методика расчета процесса рассеяния «тяжелого газа» «ТОКСИ-3».

Хорошее согласование расчетов по «ТОКСИ-3» с экспериментальными данными по концентрации рассеиваемого выброса, безусловно, свидетельствует об адекватности физической модели, заложенной в методику. Однако более полное представление о качестве прогноза в рамках той или иной методики можно получить, лишь сравнив различные характеристики. В этом плане значительный интерес представляют динамические характеристики процесса и, в частности, изменение концентрации во времени в различных

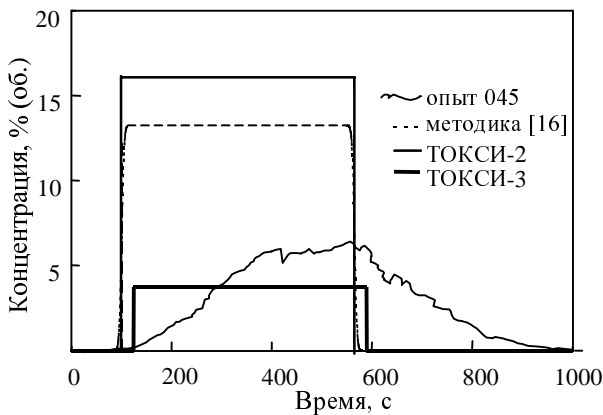


Рис. 4. Показания во времени датчика приземной концентрации, расположенного на оси выброса на расстоянии 90 м от места выброса (Торней Айленд, длительный выброс, опыт 045), и рассчитанные концентрации для разных моделей выброса

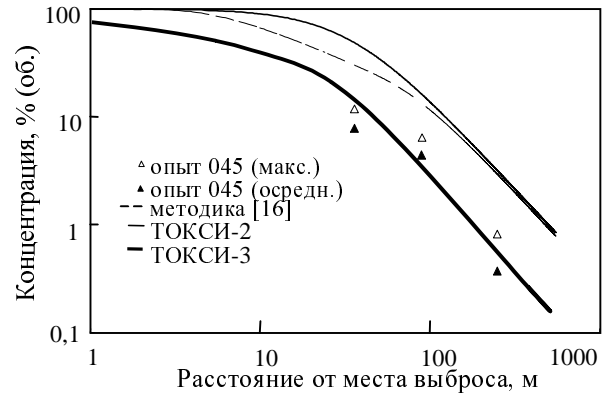


Рис. 3. Рассчитанные зависимости концентрации рассеиваемого газа от расстояния на оси выброса и экспериментальные данные (Торней Айленд, длительный выброс, опыт 045)

точках пространства.

На рис. 4 приведены расчетные концентрации и показания датчика приземной концентрации, расположенного на расстоянии 90 м от места выброса (аналогичные зависимости получены для расстояний 36 и 250 м). Характерным отличием всех расчетных зависимостей от экспериментальных данных является более ранний приход облака к месту регистрации концентрации и постепенное увеличение с расстоянием временной разницы в приходе основной массы выброса. Если на расстоянии 36 м от места выброса расчетное время прихода облака практически совпадает с экспериментом и составляет около 40 с, то на расстоянии 250 м имеет место существенная разница между расчетным временем прихода облака и реальным наблюдением. Такое отсроченное повышение концентрации в эксперименте объясняется тем, что на практике, как уже отмечалось, существенное влияние на скорость движения облака оказывают наличие препятствий, в данном случае — особенности рельефа местности и травы, высота которой составляла около 30–35 см. Облако над травой двигалось со средней скоростью 0,9 м/с, а в траве двигалось гораздо медленнее. На расстояниях более 250 м от места выброса в опы-

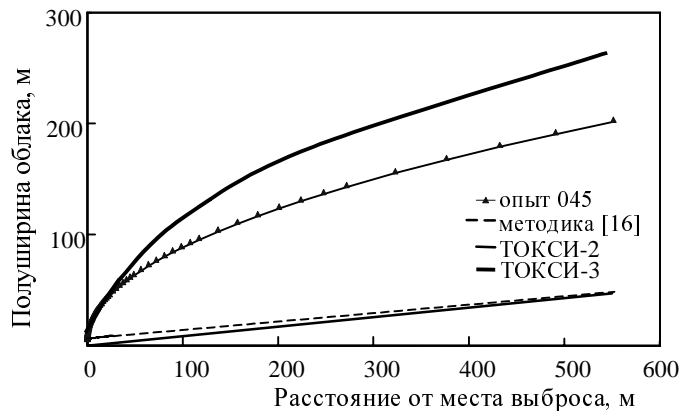


Рис. 5. Зависимость полуширины облака от расстояния до места выброса (Торней Айленд, длительный выброс, опыт 045)

Таблица 2

Расчетные и полученные из экспериментальных измерений ингаляционные дозы

Способ определения	Расстояние от места выброса					
	36 м		90 м		250 м	
	Доза, кг · ч/л	Δ, %	Доза, кг · ч/л	Δ, %	Доза, кг · ч/л	Δ, %
Эксперимент	11,4	—	6,38	—	0,513	—
Методика [16]	32,6	186	14,3	125	3,17	519
«ТОКСИ-2»	52,6	361	17,4	173	3,44	571
«ТОКСИ-3»	12,1	6	4,02	-37	0,660	29

тах вообще сначала регистрировалось прохождение облака в верхних слоях (датчиками, расположенными на большей высоте), и лишь после ухода облака из верхних слоев регистрировался существенный рост концентрации у поверхности земли. Поведение концентрации в верхних слоях можно оценить на рис. 4 по расчетным кривым. Естественно, что если в расчетах эффект торможения в траве не учитывался, то и на расчетных кривых замедление скорости распространения выброса наблюдаться не будет.

Другим отличием экспериментальных кривых от расчетных, также заметным на рис. 4, является достаточно быстрое «размытие» переднего и заднего фронтов облака-шлейфа. В расчетах эффекта быстрого «размытия» не наблюдается. Как видно из рис. 4, в расчетах по методике [16] с учетом времени действия источника действительно имеет место «размытие» как переднего, так и заднего фронтов: концентрация в точке нарастает и спадает не скачкообразно, а плавно. Плавность этого нарастания увеличивается со временем, что свидетельствует о возрастающем со временем действии диффузии вдоль направления ветра. К моменту времени, когда облако удалится на 250 м от места выброса, продолжительность нарастания/спада, согласно методике [16], составляет около 30 с. Следует особо отметить, что в других опытах, например, проведенных в пустыне Тортоиз (США) не наблюдалось столь быстрого «размытия» переднего и заднего фронтов при струйном выбросе. Возможно, причиной такого поведения экспериментального выброса является трава, которая как бы разбивает выброс на две части: сравнительно быстро движущуюся выше кромки травы и медленно движущуюся в траве. При таком расщеплении выброса массообмен между верхним и нижним слоями может объяснить быстрое «размытие» фронтов. Впрочем, могут быть и другие, неизвестные пока причины такого рассеяния.

В целом из рис. 4 видно, что методика «ТОКСИ-3» более точно описывает динамику процесса рассеяния. Об этом свидетельствует и такая характеристика, как ингаляционная доза (интеграл по времени от концентрации в точке), отчасти учитывающая динамику процесса. Данные, приведенные в табл. 2, показывают, что методика «ТОКСИ-3» имеет наилучшее совпадение с опытом. Остальные методики существенно завышают ингаляционную дозу (на величину до нескольких сотен процентов).

Еще одна характеристика, по которой проводилось сравнение с опытом, — это размеры облака. В экспе-

риментах определялась, прежде всего, площадь, покрываемая шлейфом. Определение проводилось из условия превышения концентрации уровня 0,1% (об.), что соответствовало пределу чувствительности датчиков. На рис. 5 приведены границы облаков, рассчитанные по рассматриваемым методикам и соответствующие доли вещества 0,1% (об.). На этом рисунке приведена также линия, аппроксимирующая экспериментальные данные.

Рис. 5 показывает, насколько сильна роль силы тяжести в растекании облака. Гауссовские методики дают узкую зону, ширина которой на расстоянии 500 м от точки выброса составляет менее 100 м. В экспериментах ширина облака была примерно в четыре раза больше: на 500 м от места выброса около 400 м, т.е. гауссовские методики как минимум на 400% «недооценивают» поперечный размер облака. Расчеты по методике «ТОКСИ-3» значительно точнее дают размер облака: расчетная ширина завышена по отношению к экспериментальному значению примерно на 30%. Причиной такого завышения может быть наличие высокой травы.

В эксперименте наблюдалось заметное уменьшение скорости распространения облака в направлении ветра в непосредственной близости от поверхности земли. Возможно такое же замедление имеет место и в направлении поперек ветра, чем и объясняется более быстрое растекание облака в расчетах по сравнению с экспериментом. Но это всего лишь предположение и оно может быть уточнено при дальнейших исследованиях.

Анализ размеров облака наиболее ярко показывает недостатки гауссовских моделей и преимущества методики расчета динамики рассеяния «тяжелого газа». Этот пример иллюстрирует, что даже при сравнительно слабой интенсивности выброса из постоянно действующего источника формирующиеся облака все равно значительно растекаются по поверхности земли и долгое время распространяются вдоль нее, слабо диффундируя вверх. В гауссовских моделях отсутствует такое сильное растекание по поверхности и, наоборот, имеет место более интенсивное вертикальное рассеяние.

На основании проведенного анализа различных методик расчета динамики рассеяния облака от источников мгновенного и продолжительного действия и сравнения результатов расчета с экспериментальными данными можно сделать следующие выводы.

1. Стандартные методики, построенные на гауссовской модели, не способны с достаточной степенью точности предсказывать рассеяние «тяжелого газа» как залпового, так и от источника продолжительного действия даже сравнительно невысокой мощности: расчетные концентрации на оси выброса оказываются завышенными, а поперечные размеры облаков заниженными. Величина ошибки составляет 400—500%.

2. Разработанная в ФГУП НТЦ «Промышленная безопасность» методика «ТОКСИ-3» показала хорошую способность предсказывать с удовлетворительной точностью концентрационные поля, размеры облаков и ингаляционные дозы для выбросов из источников продолжительного действия. Расчеты по методике «ТОКСИ-3» хорошо согласуются с экспериментальными данными.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. *Маршалл В.* Основные опасности химических производств. М.: Мир, 1989, 672 с.
2. *Makhviladze G.M., Yakush S.E.* Proc. of the 29<sup>th</sup> Int. Symp. on Comb., 2002, p. 195—210.
3. Методика оценки последствий аварийных выбросов опасных веществ (Методика «ТОКСИ», редакция 3.1). Проект. М.: ФГУП НТЦ «Промышленная безопасность», 2005, 67 с.
4. Методика оценки последствий химических аварий (Методика «ТОКСИ-2.2» (утв. НТЦ «Промышленная безопасность», согл. Госгортехнадзором России). Опубликовано в сб. «Методики оценки последствий аварий на опасных производственных объектах». Сер. 27. Вып. 2. М.: ГУП НТЦ «Промышленная безопасность», 2002, 208 с.
5. Методика оценки последствий химических аварий (Методика «ТОКСИ»). М.: НТЦ «Промышленная безопасность», 1993, 19 с.
6. Руководство по оценке промышленных опасностей (Techniques for Assessing Industrial Hazards: a Manual). World Bank Tech. Paper 55, 1988.
7. The HGSYSTEM version 3.0 technical reference manual. Shell Internationale Research Maatschappij BV. Hague, 1994.
8. Methods for the calculation of physical effects CPR 14E. Part 1. TNO Yellow book. 3-rd edition. TNO, 1997.
9. *Witlox H.W.M.* Unified Dispersion Model (UDM Version 6.0) Consequence Modelling Documentation: Theory Manual — Det Norske Veritas, 2000.
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. Л.: Гидрометеиздат, 1991.
12. *Иванов А.В., Матрюков Б.С.* Изв. вузов. Черная металлургия, 1999, № 11, с. 64—68.
13. *Едигаров А.С., Сулейманов В.А.* Математическое моделирование, 1995, № 4, с. 37—52.
14. *McQuaid J.* Tech. Paper 21, Safety in Mines Research Establishment. Sheffield, 1976.
15. *Kranenburg C.* Fluid Mech., 1984, № 145, p. 253—273.
16. *Замышляев Б.В.* Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций, 2004, № 4, с. 35—72.
17. *McQuaid J.* J. of Hazardous Material, 1987, № 16, p. 1—8.
18. *Mercer A., Nussey C.* Ibid., 1987, № 16, p. 9—20.