

# Проблемы, суждения

УДК 66.004.4:533.601.1.001.24

© Коллектив авторов, 2004

## МЕТОДИКА РАСЧЕТА РАСПРОСТРАНЕНИЯ АВАРИЙНЫХ ВЫБРОСОВ, ОСНОВАННАЯ НА МОДЕЛИ РАССЕЙНИЯ ТЯЖЕЛОГО ГАЗА

А.А. ШАТАЛОВ, канд. техн. наук (Ростехнадзор), М.В. ЛИСАНОВ, А.С. ПЕЧЕРКИН, доктора техн. наук, А.В. ПЧЕЛЬНИКОВ, канд. физ.-мат. наук, С.И. СУМСКОЙ (ФГУП «НТЦ «Промышленная безопасность»)

**Р**аспространение выбросов опасных веществ в атмосфере и их воздействие на людей и окружающую среду — важные факторы, определяющие тяжесть последствий аварий на опасных производственных объектах. В настоящей статье рассматриваются основные вопросы моделирования и разработки методики расчета рассеяния и оценки последствий химически- и пожаровзрывоопасных выбросов, которая получила условное название «Токси-3». Методика «Токси-3» — дальнейшее развитие Методики оценки последствий химических аварий («Токси-1» и «Токси-2» [1]). По сравнению с методикой «Токси-2» в методику «Токси-3» внесены существенные изменения и дополнения, которые касаются прежде всего особенностей рассеяния тяжелых газов.

### Основные подходы к моделированию рассеяния газообразных веществ

В настоящее время сложились три основных подхода для количественного описания процесса рассеяния выброса газообразных веществ в атмосфере:

гауссовские модели рассеяния, иногда называемые дисперсионными;

модели рассеяния, базирующиеся на интегральных законах сохранения либо в облаке в целом (залповый выброс), либо в поперечном сечении облака (продолжительный выброс). Иногда их называют моделями с сосредоточенными параметрами (одна из разновидностей — модель рассеяния тяжелого газа);

модели, построенные на численном решении системы уравнений сохранения в их оригинальном виде, именуемые часто моделями или методами прямого численного моделирования.

Гауссовские модели свое название получили от известного распределения Гаусса, которое лежит в основе математического описания пространственно-временного изменения концентрации газа [1–3]. Для решения уравнений гауссовских моделей используются 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 и

приемлемую точность они дают в тех зонах, 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 существенную роль играют наведенные течения (струи разной конфигурации, расширяющиеся облака) и высокая плотность выбрасываемого вещества. Последняя особенно важна, в связи с чем был даже введен специальный термин — «тяжелый газ», для описания поведения которого разработаны модели рассеяния тяжелого газа. Наиболее известные их реализации: методика Всемирного банка [4]; свод методик HGSYSTEM [5]; методики, созданные при поддержке исследовательских организаций TNO — The Netherlands Organization of Applied Scientific Research, Нидерланды [6], Det Norske Veritas (DNV Technica), Норвегия [7].

В ГОСТ Р 12.3.047—98 содержится методика расчета залповых выбросов на основе модели рассеяния тяжелого газа, но конспективность изложения и ряд грубых опечаток делают почти невозможным ее использование на практике. Отдельно стоит Методика прогнозирования масштабов заражения сильнодействующими ядовитыми веществами при авариях (разрушениях) на химически опасных объектах и транспорте (РД 52.04.253—90), основанная на эмпирических и малообоснованных соотношениях, существенно завышающих реальные последствия аварий.

Необходимость расчета процессов рассеяния тяжелого газа с помощью специальных моделей вызвана следующим. Многие выбросы при промышленных авариях в начальный момент времени имеют плотность большую, чем воздух. Это может быть обусловлено различными причинами (или их сочетанием):

высокой молекулярной массой вещества. Например, вещества с молярной массой больше молярной массы воздуха (29,5 г/моль) при нормальных условиях — тяжелые газы, к ним относятся пропан, бутан, пары нефти, бензина, хлор, сероводород и др.;

низкой температурой, например метан при нормальных условиях имеет плотность ниже плотности воздуха, однако при температуре, равной температу-

ре кипения, его плотность становится выше плотности воздуха и тогда метан уже относится к тяжелым газам. Рассеяние испарения от пролива метана следует рассчитывать по модели тяжелого газа;

наличием аэрозолей, например аммиак при нормальных условиях и при температуре кипения — легкий газ, соответственно и при смешении с воздухом образующиеся смеси имеют плотность меньше, чем воздух. Однако наличие в смеси капельных включений может привести к тому, что не только без воздуха, но и при подмешивании воздуха в процессе распространения получающиеся смеси будут тяжелыми газами;

протеканием химических реакций, которые приводят к образованию тяжелого газа.

Выбросы тяжелого газа под действием силы тяжести быстро оседают на землю, в результате чего образуются 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 была бы покрыта, будь плотность облака равна плотности воздуха. Более того, при выбросах тяжелого газа наблюдается такое явление, как распространение облака против ветра, которое отсутствовало бы, будь газ нейтральным.

Образующиеся под действием силы тяжести облака тяжелого газа имеют большую поверхность обмена (через которую происходит подмешивание воздуха в дрейфующий выброс) с атмосферой. В результате, несмотря на то, что удельная скорость подсоса уменьшается с увеличением плотности облака, общая масса воздуха, вовлекаемая в облако, существенно возрастает по сравнению с массой воздуха, вовлекаемой в облака нейтральной плавучести, т.е. действие силы тяжести в конечном итоге приводит к более быстрому рассеянию тяжелого газа по сравнению с нейтральными выбросами.

Необходимость учесть эти эффекты, в целях существенного улучшения прогностических возможностей (на сотни и даже тысячи процентов), стала главной причиной массового перехода за рубежом от моделей гауссовского типа к модели рассеяния тяжелого газа.

Как и все модели, модель рассеяния тяжелого газа обладает рядом ограничений. Прежде всего это касается рельефа местности и наличия застройки. Учесть эти факторы позволяют модели, основанные на численном решении полной системы уравнений газодинамики. Это наиболее сложный, но и перспективный подход. На сегодня он реализован в нескольких программных продуктах, например в вычислительном комплексе PHOENICS [8] и компьютерной программе, разработанной во ВНИИГАЗе [9].

#### Моделирование рассеяния в атмосфере (основные положения методики «Токси-3»)

Модель рассеяния тяжелого газа базируется на интегральных законах сохранения. Суть этого подхода состоит в следующем. Выбирается некоторый пространственный объем, параметры которого представляют

интерес. При этом происходит отказ от детального описания картины течения внутри этого объема и, соответственно, от возможности получить детальное распределение параметров течения. Вместо этого отслеживается изменение интегральных характеристик этого объема (масса, импульс, энергия и т.д.), т.е. не известно, как изменилась, к примеру, плотность в той или иной точке, но известно, как изменилась масса всего рассматриваемого объема; не известно как изменилась энергия в той или иной точке, но известно как изменилась вся энергия рассматриваемого объема и т.д. Понятно, что отслеживать изменение интегральных величин гораздо проще: для этого не надо решать сложные системы уравнений в частных производных, а следует записать лишь потоки для соответствующих величин через границы рассматриваемого объема. Зная интегральные характеристики объема (масса, импульс, энергия), можно получить и некоторую информацию о том, как соответствующие параметры распределены внутри него. Для этого априори задается закон распределения того или иного параметра внутри объема. Например, можно предположить, что все параметры распределены равномерно. В более сложном варианте можно задать неоднородное распределение параметров внутри объема. Обычно в качестве таких распределений выбирают гауссовские профили, степенные зависимости и т.д.

В методике «Токси-3» для распределения концентрации  $c$  внутри облака в точке с координатами  $x, y, z$  используются следующие уравнения (для простоты приводятся уравнения только для выброса газовой фазы):

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

где  $x_c$  — положение центра облака (или переднего края облака — для длительного выброса), м;  $r$ ,  $b$  — соответственно радиус (для залпового источника) и полуширина (для постоянно действующего источника) центральной части (ядра) облака, м;  $c_c$  — концентрация опасного вещества в центре облака, кг/м<sup>3</sup>;  $t$  — время, с;  $S_z$ ,  $S_y$  — дисперсия соответственно вертикальная и горизонтальная (вдоль ветра и в поперечном направлении), м;  $\beta = 1 + \alpha$  ( $\alpha$  — показатель степенной зависимости скорости ветра от высоты).

Картина рассеяния при мгновенном выбросе тяжелого газа приведена на рис. 1, распределение концентрации полностью совпадает с распределениями, используемыми в моделях [5, 7].

Характерная особенность распределения, описанного уравнениями (1), и принципиальное отличие от распределения, используемого в гауссовской модели, — наличие так называемого ядра облака. Внутри ядра при залповом выбросе в любой горизонтальной плоскости концентрация 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 идет постепенно и требуется некоторое время, чтобы диффузия от боковой поверхности достигла центра облака. Радиус (полуширина) ядра может увеличиваться под действием силы тяжести, вызывающей гравитационное растекание облака, плотность которого выше плотности воздуха. В остальном же данное распределение отражает те же процессы, что и гауссовское: рассеяние в горизонтальном (экспоненциальные сомножители с пространственными переменными  $x$  и  $y$ ) и вертикальном (экспоненциальные сомножители с пространственной переменной  $z$ ) направлениях.

Облака, описываемые распределением (1), характеризуются следующими основными параметрами:  $c_c$ ;  $S_z$ ;  $S_y$ ;  $r(b)$ ;  $x_c$ , а также  $Q_{eff}$  — энергия в облаке, Дж. Зная их и предполагая, что давление в облаке равно известному давлению окружающей среды  $P_0$ , можно, решая термодинамическую задачу с соответствующим уравнением состояния, определить плотность среды в облаке  $\rho_m$  (кг/м<sup>3</sup>) или, что то же самое, плотный объем среды в облаке  $V_m$  (м<sup>3</sup>/кг) и температуру среды в нем  $T_m$  (К).

Учитывая, что формально облако не имеет границ (экспоненциальное распределение плавно спадает до бесконечности), представляется удобным ввести некоторые его эффективные характеристики, которые бы отражали его размеры:  $R_{eff}$  — эффективный радиус облака, м, или  $B_{eff}$  — эффективная полуширина облака при длительном выбросе, м;  $H_{eff}$  — эффективная высота облака, м;  $M_{eff}$  — эффективная масса воздуха и опасного вещества в облаке, кг (для залпового выброса);  $M_{eff\ mol}$  — эффективный расход воздуха и опасного вещества, кг/с (для постоянного выброса). Эти величины вычисляются по следующим формулам:

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

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

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

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

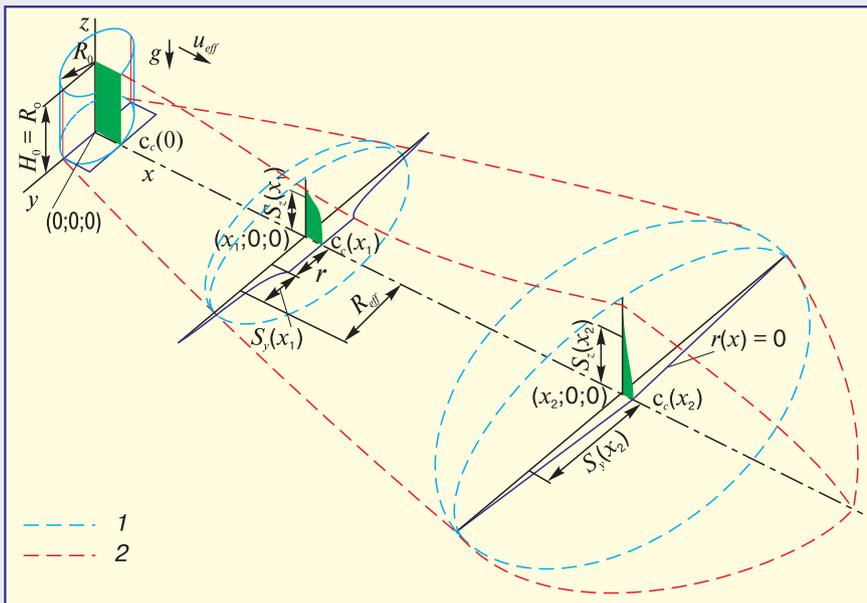
Облака, описываемые распределением (1), рассматриваются как единое целое, перемещающееся в поле ветра, т.е. все части облака при залповом выбросе в конкретный момент двигаются с постоянной скоростью и все горизонтальные слои каждого поперечного сечения шлейфа

двигаются также с одинаковой скоростью (хотя в разных сечениях скорость может быть разной). Фактически это означает отсутствие сдвига по высоте относительно друг друга различных частей облака. Поскольку 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  $z_0$ .

Для определения переменных, используемых при описании облака, составим уравнения: два — на основании интегральных законов сохранения всей массы вещества в облаке и суммарной энергии в облаке; три — описывающие соответственно гравитационное растекание облака, его боковое рассеяние и движение центра масс облака; одно — представляющее закон сохранения массы выброшенного вещества.



**Рис. 1. Картина рассеяния при мгновенном выбросе тяжелого газа ( $R_0$ ,  $H_0$  — начальные размеры облака, соответственно радиус и высота):**

1 — контуры изоконцентрации; 2 — зона достижения заданной концентрации

Для составления первых двух уравнений запишем интегральные законы изменения массы облака и количества энергии в нем. Эти величины будут изменяться за счет соответствующих потоков через границы облака. Таких границ у облака три: верхняя (эффективная площадь  $S_{eff\ top} = \pi R_{eff}^2$  — для залпового выброса и  $S_{eff\ top} = 2u_{eff} B_{eff}$  — для постоянно действующего источника); боковая (эффективная площадь совпадает с  $S_{eff\ top}$ ); боковая (эффективная площадь  $S_{eff\ side} = 2\pi R_{eff} H_{eff}$  — для залпового выброса и  $S_{eff\ side} = 2u_{eff} H_{eff}$  — для постоянно действующего источника). Тогда изменение массы облака 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 плотности подсосываемого в облако воздуха (эта величина равна плотности воздуха в окружающей среде  $\rho_{air}$ ), эффективной площади соответствующей поверхности и эффективной скорости подсоса.

Для расчета подмешивания воздуха сверху используются следующие выражения:

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

где  $u_{e\ top}$  — скорость подмешивания воздуха через верхнюю поверхность.

Для расчета подмешивания воздуха через боковые поверхности:

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

где  $u_{e\ side}$  — скорость подмешивания воздуха через боковую поверхность.

Изменение массы облака описывается следующим образом:

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

В уравнениях (9) необходимо определить две количественные характеристики  $u_{e\ top}$  и  $u_{e\ side}$ . Решающее влияние на результат оказывает точность определения  $u_{e\ top}$ , влияние  $u_{e\ side}$  ограничивается непосредственно местом

выброса. Подмешивание через боковую поверхность меньше, во-первых, потому что площадь верхней поверхности существенно больше площади боковой поверхности и, во-вторых, скорость подмешивания через боковую поверхность  $u_{e\ side}$  по мере дрейфа облака уменьшается, стремясь к нулю, в то время как скорость подмешивания через верхнюю поверхность  $u_{e\ top}$  увеличивается, стремясь к определенному постоянному значению.

Для расчета  $u_{e\ top}$  применяются различные зависимости, которые строятся на той или иной форме аппроксимации экспериментальных данных. В методике «Токси-3» используется следующее выражение:

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

где  $k = 0,41$  — константа Кармана;  $u_t = \sqrt{u_*^2 + (b_* w_*)^2}$  — характерная скорость трения;  $b_* = 0,2$  — постоянный ко-

эффициент и  $w_* = \left( \frac{g Q_h H_{eff}}{\rho_m T_m c_{pm}} \right)^{1/3}$  — вспомогательные ве-

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

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

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

На рис. 2 приведены экспериментальные значения и расчетная (по формуле (10)) зависимость безразмерной скорости подсоса воздуха в облако  $u_{e\ top}/u_*$  от  $Ri_*$ . Несмотря на существующий определенный разброс в экспериментальных данных (особенно в области больших значений  $Ri_*$ ), зависимость (11) в целом удовлетворительно описывает имеющуюся эмпирическую информацию.

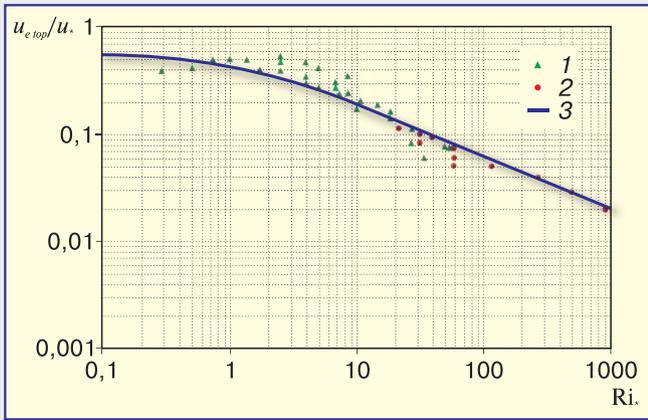
При расчете скорости подмешивания воздуха через боковую поверхность предполагается, что  $u_{e\ side}$  пропорциональна скорости бокового растекания облака за счет действия силы тяжести:

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

где  $\gamma$  — коэффициент пропорциональности, который в разных моделях выбирается в диапазоне от 0 (отсутствие подмешивания через боковую поверхность) до 1. В данном случае принято значение 0,3.

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

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



**Рис. 2. Зависимость скорости подсоса воздуха в облако от числа Ричардсона:**

1, 2 — экспериментальные данные, полученные соответственно Маккуэйдом [10] и Краненбургом [11]; 3 — зависимость, используемая в методике «Токси-3»

Вместе с воздухом из окружающей среды в облако поступает и дополнительная энергия, в том числе за счет теплообмена с подстилающей поверхностью. Изменение энергии в облаке, таким образом, можно описать уравнениями, аналогичными формулам (13), но с добавлением слагаемых, описывающих теплообмен:

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

Удельная энергия воздуха  $e_{air}$  складывается из удельной энергии сухого воздуха, воды (если последняя присутствует в атмосфере) и ее паров:

$$e_{air} = T_{air} c_{p\_dry\ air} (1 - w_v - w_l) + T_{air} c_{p_{wv}} w_v + (T_{air} c_{wl} - q_{wl}) w_l, \quad (15)$$

где  $T_{air}$  — температура воздуха;  $c_{p\_dry\ air}$ ,  $c_{wl}$ ,  $c_{p_{wv}}$  — теплоемкость соответственно сухого воздуха, воды и ее паров;  $w_p$ ,  $w_v$  — массовая доля в воздухе соответственно воды и ее паров;  $q_{wl}$  — теплота испарения воды.

Энергия, поступающая от подстилающей поверхности, 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.

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

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

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

Уравнение, описывающее боковое рассеяние:

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

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

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

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

а сохранение массы выброшенного вещества  $M_R$  — очевидными алгебраическими соотношениями:

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

Таким образом, приведенная модель описывает следующие процессы: движение облака при переменной по высоте скорости ветра; гравитационное растекание; рассеяние облака в вертикальном направлении за счет атмосферной турбулентности (подмешивание воздуха в облако), а также в горизонтальном — за счет подмешивания воздуха в облако (атмосферная турбулентность, гравитационное растекание); вовлечение в облако паров воды из атмосферы; нагрев или охлаждение облака из-за подмешивания воздуха; теплообмен облака с подстилающей поверхностью.

Еще раз подчеркнем, что принципиальное значение имеют два процесса, которые необходимо описать с максимальной точностью: гравитационное растекание и подмешивание воздуха через верхнюю границу.

Для решения задачи необходимо задать способ определения температуры в облаке и возможность конден-

сации паров. Исходные данные: энергия  $Q_{eff}$  и давление в облаке, равное атмосферному. При наличии в атмосфере паров или жидкой фазы воды считается известной и массовая доля воды в облаке. Масса воды  $M_w$ , вовлеченной в облако, пропорциональна массе воздуха, вовлеченного в облако. В результате термодинамического расчета надо найти плотность в облаке, температуру, массовую долю сконденсировавшейся воды и воды, оставшейся в газовой фазе. Это делается с помощью соотношений для условий конденсации паров (уравнение для определения давления насыщенного пара) и баланса энергии внутри облака, который описывается следующим образом:

$$Q_{eff} = T_m c_{pR} M_R + T_m c_{p dry air} (M_{eff} - M_w - M_R) + T_m c_{wl} M_w w_l + T_m c_{pww} M_w w_v - q_{wl} M_w w_l, \quad (21)$$

где  $c_{pR}$  — теплоемкость газовой фазы выброшенного вещества.

Из уравнения (21) можно найти температуру в облаке  $T_m$ , после чего определить плотность:

$$\rho_m = \mu_{cloud} P_0 / (T_m R), \quad (22)$$

где  $\mu_{cloud}$  — молярная масса газовой фазы в облаке.

Составленная система уравнений решается с помощью соответствующих численных методов.

### Сравнение различных моделей рассеяния с экспериментальными данными

Разработанная методика «Токси-3» была верифицирована по ряду экспериментальных данных, также проведено 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 четыре методики (компьютерных кода): «Токси-2» [1] (гауссовская модель) и «Токси-3», HGSYSTEM [5], PHAST 6.1\* (модели рассеяния тяжелого газа).

При верификации методики использовали опыты по рассеянию фреона-12 (дихлордифторметан), которые проводились в 1982–1983 гг. на открытом пространстве в местечке Торней-Айленд (Великобритания). Было осуществлено около 20 залповых выбросов газообразного фреона-12 (как чистого, так и разбавленного воздухом). Облако газа после выброса имело форму цилиндра объемом около 2000 м<sup>3</sup>. Основные характеристики выбросов и рассеяния приведены в таблице, результаты расчетов — на рис. 3 (для опыта 017 показана зависимость максимальной концентрации, достигаемой в ходе всего выброса, от расстояния). На рис. 3 видно, что в целом методики, основанные на модели рассеяния тяжелого газа («Токси-3», PHAST 6.1, HGSYSTEM) более точно описывают процесс рассеяния, чем методика «Токси-2», базирующаяся на гауссовской модели. В «Токси-2» концентрация завышена в 10 раз даже на достаточно больших расстояниях. Отметим, что методики, основанные на моделях рассеяния тяжелого газа («Токси-3», PHAST 6.1, HGSYSTEM), дают близкие результаты.

\* Авторы выражают глубокую благодарность ООО «Институт риска и безопасности» и лично В.А. Пантелееву за проведение тестовых расчетов с использованием компьютерной программы PHAST 6.1.

Номер опыта	Объем выброса, м <sup>3</sup>	Объемная доля фреона, %	Скорость ветра, м/с	Стабильность атмосферы по Пасквилю
007	2000	24,0	3,4	E
008	2000	19,7	2,4	D
017	1700	100,0	5,0	D/E

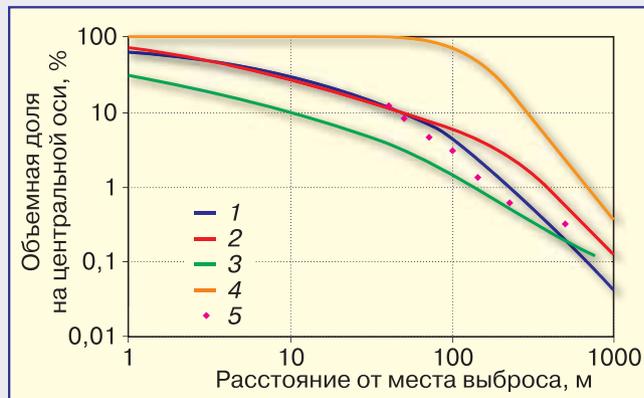


Рис. 3. Результаты расчетов, выполненных по методикам PHAST 6.1 (1), «Токси-3» (2), HGSYSTEM (3), «Токси-2» (4), и экспериментальные данные (5)

Сравнение результатов расчетов по разным методикам и экспериментальных данных показало, что для залповых выбросов тяжелого газа использовать гауссовские модели рассеяния можно лишь для прогнозирования протяженности (по направлению ветра) зоны поражения в качестве очень консервативной оценки, понимая, что как концентрации на некотором расстоянии, так и протяженность зон поражения могут оказаться завышенными в несколько раз. И, конечно, ни в коем случае нельзя использовать гауссовские модели для прогнозирования размеров зон поражения в поперечном направлении и против ветра, так как здесь ошибка может достигать сотен и даже тысяч процентов.

### Моделирование начальной стадии выброса опасных веществ

Выше основное внимание было уделено собственно картине рассеяния газов в атмосфере. Однако рассеяние газа — лишь одна из стадий процесса выброса и распространения. Помимо этого существует еще целый ряд факторов обуславливающих последствия выброса, а именно:

1. Поступление выброса из разрушенного оборудования в окружающую среду. При оценке последствий необходимо определить сценарии, при которых происходит выброс, а также характеристики выброса (интенсивность, фазовый состав, длительность, температура и т.д.), которые зависят от физико-химических свойств вещества и условий, при которых оно находится в оборудовании перед выбросом (в том числе давление, температура, наличие жидкой фазы, конструктивные особенности оборудования, расположение, размер и форма дефектного отверстия и т.д.).

2. Возможность появления аэрозолей в выбросе и последующее их распространение с выбросом.

3. Возможность образования проливов и последующее их поведение.

### Заключение

В статье проанализированы современные подходы к оценке последствий аварий с выбросом газообразных опасных веществ, плотность которых выше плотности воздуха. Показано, что гауссовские модели рассеяния при некоторых условиях существенно искажают картины реального пространственно-временного распределения концентрации газа. Расчеты по таким моделям завышают концентрацию и занижают площадь поражения.

Изложены основные принципы и соотношения методики расчета рассеяния аварийных выбросов «Токси-3», основанной на модели тяжелого газа. Представлены данные ее верификации и сравнения с другими методиками расчета.

Предполагается, что использование модели тяжелого газа позволит, помимо оценки последствий выбросов токсичных веществ, определять размеры облаков топливовоздушных смесей и оценивать количество топлива во взрывоопасных пределах. Тем самым в дополнение к Методике оценки последствий аварийных взрывов топливно-воздушных смесей (РД 03-409—01) будет реализована возможность расчета зон поражения при «пожаре-вспышке» (низкоскоростном горении) дрейфующих облаков, образующихся при выбросе и рассеянии, например, паров нефтепродуктов, метана и других взрывоопасных и горючих веществ, широко применяемых в промышленности.

Методику «Токси-3» планируется подготовить в качестве проекта нормативного документа к концу 2004 г. Авторы будут признательны за отзывы на данный материал и выражают готовность к сотрудничеству с заинтересованными специалистами.

### Список литературы

1. Методика оценки последствий химических аварий (Методика «Токси». Редакция 2.2 // Методики оценки последствий аварий на опасных производственных объектах: Сб. док-тов / ГУП «НТЦ «Промышленная безопасность». Сер. 27, Декларирование промышленной безопасности и оценка риска. — 2001. — Вып. 2. — С. 121–204.
2. Научно-методические аспекты анализа аварийного риска / В.Г. Горский и др.; Под ред. Г.Ф. Терещенко, А.А. Шаталова. — М.: Экономика и информатика, 2000. — 260 с.
3. Методика расчета концентраций в атмосферном воздухе вредных веществ, содержащихся в выбросах предприятий (ОНД-86 Госкомгидромет). — Л.: Гидрометеиздат, 1987.
4. Руководство по оценке промышленных опасностей (Techniques for Assessing Industrial Hazards: a Manual) // World Bank Tech. Paper 55, 1988.
5. The HGSYSTEM version 3.0 technical reference manual/ Shell Internationale Research Maatschappij BV. — Hague, 1994.
6. Methods for the calculation of physical effects CPR 14E. Part 1. TNO Yellow book. — 3<sup>rd</sup> edition. — TNO, 1997.
7. Witlox H.W.M. Unified Dispersion Model (UDM Version 6.0) Consequence Modelling Documentation: Theory Manual — Det Norske Veritas, 2000.
8. Иванов А.В., Матрюков Б.С. О достоверности использования вычислительного комплекса PHOENICS в расчетах рассеяния вещества в возмущенном потоке / Ред. журн. «Изв. вузов. Черная металлургия». — 1999. — № 11. — С. 64–68.
9. Едигаров А.С., Сулейманов В.А. Математическое моделирование аварийного истечения и рассеивания природного газа при разрыве газопровода // Математическое моделирование, 1995. — № 4. — С. 37–52.
10. McQuaid J. Some experiments on the structure of stably stratified shear flows // Tech. Paper 21, Safety in Mines Research Establishment. — Sheffield, 1976.
11. Kranenburg C. Wind-induced entrainment in a stably stratified fluid // Fluid Mech. — 1984. — № 145. — P. 253–273.

УДК 622.867.324

© В.И. Храмов, А.П. Федорович, В.А. Скрицкий, 2004

## СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СИСТЕМЫ САМОСПАСЕНИЯ ЛЮДЕЙ ПРИ АВАРИЯХ В ШАХТАХ

В.И. ХРАМОВ (Кузнецкое управление по технологическому и экологическому надзору Ростехнадзора), А.П. ФЕДОРОВИЧ, В.А. СКРИЦКИЙ (ФГУП РосНИИГД)

К наиболее тяжелым видам аварий в угольных шахтах относятся подземные пожары и взрывы метана (метановоздушной смеси с угольной пылью). Особая их опасность заключается в том, что они воздействуют на горные выработки на большом протяжении и угрожают жизни и здоровью горняков, в них находящихся.

На экзогенные пожары и взрывы метана приходится 40 % общего числа аварий. Однако последствия от них по числу и тяжести травмированных людей в 2–3 раза

превышают аналогичные показатели от всех остальных видов аварий. Особо следует отметить, что травматизм со смертельным исходом при подземных пожарах и взрывах метана, достигает 50 % и более общего числа пострадавших. Это подтверждается данными об авариях на шахтах: «Сокурская» (1978 г., погибло 78 % общего числа пострадавших), «Юр-Шор» (1980 г. — 54 %), им. 50-летия Октябрьской революции (1983 г. — 67 %) и «Зырянская» (1997 г. — 91 %).