

УДК 331.823

© Коллектив авторов, 2005

## ВЕРИФИКАЦИЯ МЕТОДИК ОЦЕНКИ ПОСЛЕДСТВИЙ АВАРИЙНЫХ ВЫБРОСОВ ГАЗА ОТ ИСТОЧНИКОВ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОГО ДЕЙСТВИЯ

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

В данной статье сравниваются результаты, полученные в экспериментах по рассеянию газов и рассчитанные по методикам, которые основаны на модели тяжелого газа [1, 2, 3] и распределении Гаусса для концентрации выброшенного газа [4, 5, 6]. В качестве экспериментальных данных выбраны результаты опытов серии Торней Айленд (Великобритания) [7, 8]. Эти опыты наиболее достоверны, подробно описаны, имитируют длительные аварийные выбросы опасных веществ (ОВ).

В зависимости от характера разрушения оборудования выбросы ОВ можно разделить на залповые и длительные. Под залповым выбросом обычно понимают ситуацию, когда емкость полностью разрушена и за короткое время ОВ оказывается в окружающей среде. В этом случае за время от нескольких секунд до нескольких десятков секунд в окружающую среду могут поступать десятки тонн ОВ. При наличии в таком выбросе газовой фазы и (или) капельных включений на месте выброса формируется первичное облако ОВ. Если плотность в первичном облаке больше плотности воздуха, то существенную роль в рассеянии ОВ играет сила тяжести. Под ее действием происходит быстрое распространение облака в радиальном направлении (обычно этот процесс называют гравитационным растеканием). В результате этого за несколько десятков секунд после выброса первичное облако распространяется на десятки и даже сотни метров, в том числе в направлении против ветра. Такое быстрое распространение облака представляет большую опасность для людей, поскольку приводит к высокому риску поражения в соответствующей зоне. В дальнейшем первичное облако распространяется в атмосфере как единое целое. Характерная особенность распространения первичного облака — зона поражения на поверхности земли в каждый момент представляет собой фигуру, по форме напоминающую эллипсоид, перемещающийся от места выброса в направлении ветра. При этом между местом выброса и первичным облаком с определенного момента может создаваться зона, где ОВ почти отсутствует.

В случае, когда разрушение оборудования незначительно, например образуется небольшое отверстие, ОВ из емкости будет поступать в окружающую среду в течение некоторого времени. Источник такого типа называется источником продолжительного действия, а сам выброс — длительным. Длительные выбросы наблюдаются также при испарении из проливов. Как правило, интенсивность поступления ОВ в атмосферу при длительном выбросе составляет от нескольких сот грам-

мов до нескольких килограммов в секунду, хотя бывают и большие расходы. Например, при крупных разгерметизациях оборудования со сжиженным газом возможны расходы до нескольких десятков килограммов в секунду. Длительный выброс ОВ продолжается гораздо дольше, чем залповый: поступление ОВ в атмосферу может длиться десятки и сотни минут. В случае длительного выброса облако, которое часто называют вторичным, имеет форму шлейфа. В нем, пока действует источник, ОВ присутствует во всем пространстве: от места выброса до переднего края. При длительных выбросах существование в окружающей среде высоких концентраций ОВ может продолжаться гораздо дольше, чем при залповых.

Таким образом, залповые выбросы представляют значительную опасность, прежде всего, с точки зрения быстрого охвата значительных площадей выбросом ОВ. Опасность же длительных выбросов связана с тем, что они позволяют существовать высоким концентрациям достаточно продолжительное время.

В работах [1, 9] было показано, что в случае залповых выбросов сформулированные корректно гауссовские модели существенным образом завышают концентрацию ОВ в облаке и пропорционально занижают поперечные размеры облака. Этот недостаток обусловлен отсутствием в гауссовских моделях учета силы тяжести, играющей существенную роль в большинстве аварийных выбросов. В данной статье аналогичная процедура верификации применяется к длительным выбросам.

### Краткое описание расчетных моделей

В зависимости от геометрии источника гауссовские модели для длительного выброса можно подразделить на модели рассеяния от следующих источников: точечного, линейного, площадного, объемного. Ниже представлены основные расчетные формулы гауссовских моделей рассеяния для источников продолжительного действия, расположенных на поверхности земли, с учетом различных факторов. Во всех случаях мощность источника  $q_0$  полагается постоянной.

Наиболее простую форму имеет формула для точечного источника, действующего бесконечно долгое время [10]:

$$c(x, y, z) = \frac{q_0}{U \pi \sigma_y \sigma_z} \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right) \exp\left(-\frac{z^2}{2\sigma_z^2}\right), \quad (1)$$

где  $c(x, y, z)$  — пространственное распределение концентрации (поскольку источник начал действовать бесконечно давно, то  $c(x, y, z)$  не зависит от времени);  $x, y, z$  — пространственные переменные соответственно вдоль ветра, поперек ветра и по высоте;  $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$  — дисперсия, зависящая соответственно от  $x$  и состояния атмосферы.

Для точечного источника, начавшего действовать в момент  $t = 0$ , при учете диффузии в направлении ветра, концентрационное поле описывается формулой

$$c(x, y, z, t) = q_0 \frac{1}{U} \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_y}} \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_z}} H(t) \times \left[ \operatorname{erf}\left(\frac{x}{\sqrt{2\sigma_x}}\right) - \operatorname{erf}\left(\frac{x-Ut}{\sqrt{2\sigma_x}}\right) \right] \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right) \exp\left(-\frac{z^2}{2\sigma_z^2}\right), \quad (2)$$

где  $H(t) = \begin{cases} 0, & t < 0 \\ 1, & t > 0 \end{cases}$  — функция Хевисайда;

$\operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x \exp(-t^2) dt$  — функция ошибок;  $\sigma_x$  — дисперсия, зависящая от  $x$  и состояния атмосферы.

Для источника, начавшего действовать в момент  $t = 0$  и окончившего в момент  $t = t_0$ , при учете диффузии в направлении ветра, концентрационное поле описывается формулой

$$c(x, y, z, t) = q_0 \frac{1}{U} \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_y}} \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_z}} \times \left\{ [H(t) - H(t-t_0)] \left[ \operatorname{erf}\left(\frac{x}{\sqrt{2\sigma_x}}\right) - \operatorname{erf}\left(\frac{x-Ut}{\sqrt{2\sigma_x}}\right) \right] + H(t-t_0) \left[ \operatorname{erf}\left(\frac{x-Ut+Ut_0}{\sqrt{2\sigma_x}}\right) - \operatorname{erf}\left(\frac{x-Ut}{\sqrt{2\sigma_x}}\right) \right] \right\} \times \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right) \exp\left(-\frac{z^2}{2\sigma_z^2}\right). \quad (3)$$

Для площадного источника размером  $z_0 \times 2y_0$ , расположенного вертикально поперек ветра и действующего бесконечно долгое время, концентрационное поле описывается формулой

$$c(x, y, z) = \frac{q_0}{U} \frac{1}{2} \left[ \operatorname{erf}\left(\frac{y+y_0}{\sqrt{2\sigma_y}}\right) - \operatorname{erf}\left(\frac{y-y_0}{\sqrt{2\sigma_y}}\right) \right] \times \left[ \operatorname{erf}\left(\frac{z+z_0}{\sqrt{2\sigma_z}}\right) - \operatorname{erf}\left(\frac{z-z_0}{\sqrt{2\sigma_z}}\right) \right]. \quad (4)$$

Для площадного источника, размером  $z_0 \times 2y_0$ , расположенного поперек ветра и начавшего действовать в момент  $t = 0$ , при учете диффузии в направлении ветра, концентрационное поле описывается формулой

$$c(x, y, z, t) = q_0 \frac{1}{U} H(t) \left[ \operatorname{erf}\left(\frac{x}{\sqrt{2\sigma_x}}\right) - \operatorname{erf}\left(\frac{x-Ut}{\sqrt{2\sigma_x}}\right) \right] \times \left[ \operatorname{erf}\left(\frac{y+y_0}{\sqrt{2\sigma_y}}\right) - \operatorname{erf}\left(\frac{y-y_0}{\sqrt{2\sigma_y}}\right) \right] \times \left[ \operatorname{erf}\left(\frac{z+z_0}{\sqrt{2\sigma_z}}\right) - \operatorname{erf}\left(\frac{z-z_0}{\sqrt{2\sigma_z}}\right) \right]. \quad (5)$$

Для площадного источника размером  $z_0 \times 2y_0$ , расположенного поперек ветра и начавшего действовать в момент  $t = 0$ , а окончившего действовать в момент  $t = t_0$ , при учете диффузии в направлении ветра, концентрационное поле описывается формулой

$$c(x, y, z, t) = q_0 \frac{1}{U} \times \left\{ [H(t) - H(t-t_0)] \times \left[ \operatorname{erf}\left(\frac{x}{\sqrt{2\sigma_x}}\right) - \operatorname{erf}\left(\frac{x-Ut}{\sqrt{2\sigma_x}}\right) \right] + H(t-t_0) \times \left[ \operatorname{erf}\left(\frac{x-Ut+Ut_0}{\sqrt{2\sigma_x}}\right) - \operatorname{erf}\left(\frac{x-Ut}{\sqrt{2\sigma_x}}\right) \right] \right\} \times \left[ \operatorname{erf}\left(\frac{y+y_0}{\sqrt{2\sigma_y}}\right) - \operatorname{erf}\left(\frac{y-y_0}{\sqrt{2\sigma_y}}\right) \right] \times \left[ \operatorname{erf}\left(\frac{z+z_0}{\sqrt{2\sigma_z}}\right) - \operatorname{erf}\left(\frac{z-z_0}{\sqrt{2\sigma_z}}\right) \right]. \quad (6)$$

(Выражения (2)–(6) взяты из работы [4].)

Формулы (1)–(6) представляют собой точные решения для заявленных геометрий. Иногда, чтобы смоделировать начальную стадию рассеяния, применяют приближенные подходы. Сразу отметим, что такие подходы не призваны более детально описать физическую картину вблизи места выброса: делать это бессмысленно, поскольку используемые в гауссовских моделях допущения (прежде всего величины эмпирических коэффициентов) справедливы лишь, начиная с некоторого расстояния. Согласно работе [11] при расстояниях менее 100 м гауссовские модели переноса «плохо учитывают специфические особенности формирования концентрационного поля». Назначение допущений, учитывающих начальный размер источника, состоит в исключении из решения некоторых нефизических эффектов, например бесконечно больших концентраций вблизи места выброса. Один из примеров модификации гауссовского подхода в таком направлении — методика «Токси-2» [6]. В ней для исключения нефизических бесконечно больших концентраций предлагается включить в знаменатель формулы (1) дополнительное слагаемое, формально учитывающее начальный размер облака. В результате имеем выражение

$$c(x, y, z) = \frac{q_0}{U(\pi\sigma_y\sigma_z + \pi R^2)} \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right) \exp\left(-\frac{z^2}{2\sigma_z^2}\right), \quad (7)$$

где  $R$  — характерный размер облака на месте выброса.

Безусловное преимущество такого подхода в том, что он никоим образом не меняет значения дисперсий  $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ , которые получаются на основе экспериментальных данных.

Существуют различные способы расчета  $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$  [11]. В данной статье расчеты в основном проводятся с дисперсиями, приведенными в работе [5]. Лишь при расчете по методике «Токси-2» используются дисперсии, описанные непосредственно в этой методике.

Особо следует оговорить оригинальный способ определения дисперсий — метод учета начальных размеров, предложенный в работе [4]. Автор утверждает, что этот метод «является более обоснованным» подходом к учету начальных размеров выброса. Формально в работе [4] используются те же выражения для дисперсий, что и в любой другой гауссовской модели, однако ее автор исходит из того, что источник, находящийся в некоторой точке с координатами  $(x, y, z)$ , заменяется виртуальным, расположенным на некотором расстоянии от реального. И дисперсии рассчитываются не как функции расстояния от места нахождения реального источника, а как функции расстояния от вновь введенного виртуального источника. При этом виртуальное расстояние выбирается из условия совпадения дисперсии, отсчитываемой от места виртуального источника, и характерного размера реального источника.

Последняя из методик, используемых в данной статье, — методика, основанная на модели рассеяния тяжелого газа, «Токси-3» [1, 2, 12]. Согласно ей облако от источника продолжительного действия имеет вид шлейфа, схематично представленного на рис. 1. Концентрация  $c(x, y, z)$  в таком облаке-шлейфе описывается следующим пространственным распределением:

$$\left. \begin{aligned} c(x, y, z) &= c_{\text{ц}} \exp \left[ - \left[ \frac{z}{S_z} \right]^\beta \right], \text{ при } |y| < b; \\ c(x, y, z) &= c_{\text{ц}} \exp \left[ - \left[ \frac{z}{S_z} \right]^\beta \right] \exp \left[ - \left[ \frac{|y| - b}{S_y} \right]^2 \right], \text{ при } |y| \geq b, \end{aligned} \right\} (8)$$

где  $c_{\text{ц}}$  — концентрация на оси облака-шлейфа,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  $S_z, S_y$  — характеристика дисперсии облака соответственно по вертикали и горизонтали, м;  $\beta = 1 + \alpha$  ( $\alpha$  — показатель степенной зависимости скорости ветра от высоты);  $b$  — полуширина облака-шлейфа, м.

На рис. 1 изображена ситуация, когда источник действует бесконечно долго, и поэтому облако-шлейф не имеет ни переднего, ни заднего фронта. В такой си-

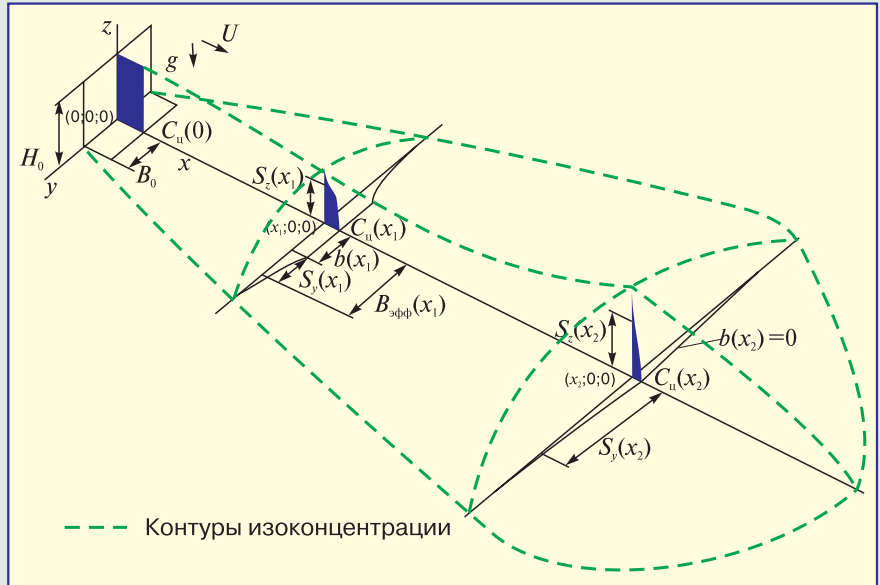


Рис. 1 Схема рассеяния длительного выброса тяжелого газа ( $B_0, H_0$  — начальный размер облака, соответственно полуширина и высота)

туации формально отсутствует зависимость концентрации от времени, что и отражено в формулах (8). В случае, когда источник действует конечное время, необходимо учитывать время прихода (ухода) облака для данной точки.

В отсутствие аэрозолей состояние облака-шлейфа тяжелого газа характеризуется семью параметрами (часть из них представлена на рис. 1):  $c_{\text{ц}}, S_z, S_y, b$ , эффективным расходом воздуха и выброшенного вещества в поперечном сечении облака-шлейфа  $q_{\text{сумм}}$ ,  $\text{кг}/\text{с}$ ; эффективным потоком энергии в поперечном сечении облака-шлейфа  $E_{\text{сумм}}$ ,  $\text{Дж}/\text{с}$ ; положением переднего (заднего) фронта облака-шлейфа (в случае, если учитывается начало и конец действия источника)  $x_n(x_3)$ . По этим параметрам возможно восстановить профиль и определить такие термодинамические параметры внутри облака, как плотность  $\rho_{\text{эфф}}$  (удельный объем  $V_{\text{эфф}}$ ) и температуру  $T_{\text{эфф}}$ . Кроме того, облако характеризуется еще тремя параметрами: эффективными полушириной  $B_{\text{эфф}}$ , м; высотой  $H_{\text{эфф}}$ , м, и скоростью  $u_{\text{эфф}}$ , м/с. Эти три параметра соотносятся с введенными ранее параметрами следующим образом:

$$B_{\text{эфф}} = b + 0,5\sqrt{\pi} S_y; \quad (9)$$

$$H_{\text{эфф}} = \frac{1}{\beta} \Gamma \left( \frac{1}{\beta} \right) S_z; \quad (10)$$

$$u_{\text{эфф}} = \frac{\Gamma[(1+\alpha)/\beta]}{\Gamma[1/\beta]} u_0 \left( \frac{S_z}{z_0} \right)^\alpha; \quad (11)$$

$$q_{\text{сумм}} = 2B_{\text{эфф}} H_{\text{эфф}} u_{\text{эфф}} / V_{\text{эфф}}, \quad (12)$$

где  $\Gamma(a) = \int_0^{+\infty} x^{a-1} e^{-x} dx$  — гамма-функция (интеграл Эйлера второго рода);  $u_0$  — скорость ветра на высоте  $z_0$ , м/с;  $z_0$  — высота, на которой задается скорость ветра, м.

Для определения параметров, характеризующих состояние облака, используются следующие уравнения:

описывает сохранение массы выброшенного вещества  $q_0$

$$q_0 = 2c_{\text{ц}}(x)B_{\text{эфф}}H_{\text{эфф}}u_{\text{эфф}}; \quad (13)$$

описывает изменение расхода вещества в шлейфе

$$\frac{d}{dx}[q_{\text{сумм}}] = 2B_{\text{эфф}}\rho_{\text{возд}}u_{\text{подм.верх}} + 2H_{\text{эфф}}\rho_{\text{возд}}\gamma \frac{d}{dt}[B_{\text{эфф}}], \quad (14)$$

где  $u_{\text{подм.верх}}$  — скорость подмешивания воздуха, м/с;  $\gamma = 0,45$ ;

описывает гравитационное растекание облака

$$\frac{d}{dx}[B_{\text{эфф}}] = \frac{C_E}{u_{\text{эфф}}} \sqrt{gH_{\text{эфф}} \left[ 1 - \frac{\rho_{\text{возд}}}{\rho_{\text{эфф}}} \right]}, \quad (15)$$

где  $C_E = 1,16$  — константа подбиралась по экспериментальным данным;  $g$  — ускорение свободного падения;

описывает боковое рассеяние выброса за счет атмосферной диффузии

$$\left. \begin{aligned} \frac{d}{dx}[S_y] &= 2 \frac{1}{S_y} (2/\pi)^{1/2} (b + 1/2\pi^{1/2} S_y) \frac{d}{dx}[S_y], \\ \text{при } b > 0; \\ S_y(x) &= 2^{1/2} \sigma_y (x + x_i), \text{ при } b = 0; \end{aligned} \right\} (16)$$

описывает сохранение энергии в облаке  $E_{\text{сумм}}$

$$\frac{d}{dx}[E_{\text{сумм}}] = 2B_{\text{возд}}\rho_{\text{возд}}u_{\text{подм.верх}}e_{\text{возд}} + 2H_{\text{эфф}}\rho_{\text{возд}}\gamma \frac{d}{dt}[B_{\text{эфф}}]e_{\text{возд}} + 2B_{\text{эфф}}Q_{\text{пов}}, \quad (17)$$

где  $\rho_{\text{возд}}$ ,  $e_{\text{возд}}$  — соответственно плотность и удельная (на 1 кг) внутренняя энергия воздуха в окружающей среде;  $Q_{\text{пов}}$  — тепловой поток, поступающий в облако с поверхности земли, Дж/(с·м<sup>2</sup>);

описывает положение переднего (заднего) фронта облака

$$\frac{d}{dt}[x_f] = u_{\text{эфф}}. \quad (18)$$

Способы расчета  $Q_{\text{пов}}$ ,  $u_{\text{подм.верх}}$ ,  $\sigma_y$  аналогичны описанным ранее в работах [1, 2]. Там же приведены численные значения констант.

Совместное решение уравнений (8) с соотношениями (9)–(18) и термодинамическими соотношениями, связывающими плотность, энергию и температуру, позволяет определить все искомые переменные.

### Краткое описание экспериментов Торней Айленд

Серии экспериментов Торней Айленд насчитывают десятки опытов [7, 8]. В данной статье для верификации моделей используются результаты опытов 045–047, в которых осуществлялся продолжительный выброс фреона-азотной смеси, рассеяние выброса происходило над ровным полем (характерный размер шероховатости 0,018 м). В опытах регистрировались метеорологические параметры, концентрации выброса на различных расстояниях от источника и на разных высотах с применением видео, кино- и фотосъемки. Краткая характеристика экспериментов приведена ниже.

Номер опыта.....	045	046	047
Скорость ветра, м/с.....	2,1	3,2	1,5
Класс устойчивости атмосферы (по Пасквилу).....	E/F	D	F
Интенсивность выброса, м <sup>3</sup> /с.....	4,3	4,3	4,2
Начальная плотность выброса относительно воздуха.....	2,00	2,00	2,05

С точки зрения верификации описанных моделей достоинство опытов 045–047 в том, что они в достаточной степени соответствуют граничным условиям описанных моделей, т.е. допускают задание начальных условий выброса в виде прямоугольного сечения с заданной концентрацией и соответствующим расходом через это сечение.

### Сравнение результатов расчетов с результатами опытов

При верификации методик учитывались следующие требования:

физическая достоверность (математическое описание явления может быть приведено с упрощениями, но без искажения имеющихся физических закономерностей и ограничений);

удовлетворительное описание количественных характеристик и качественных тенденций, наблюдаемых в достоверных экспериментальных работах.

Следует отметить, что лишь совместное выполнение указанных требований может свидетельствовать об адекватности методики, так как присутствие в логике расчетов некорректных математических манипуляций («подгоночных коэффициентов») или нефизических положений, использование для верификации сомнительных экспериментальных данных или случайное совпадение с ними лишает проведенные расчеты объективности. Наиболее полное представление о качестве прогноза методики можно получить только рассмотрев и сравнив различные характеристики.

Результаты расчетов приведены при использовании: гауссовских методик для точечного источника (далее методика 1, формула (1)), для плоского площадного источника, расположенного перпендикулярно к направлению ветра (далее методика 2, формула (6)), с виртуальным точечным источником (далее методика 3) [4, 5]; «Токси-2» (далее методика 4, формула (7)); методики рассеяния тяжелого газа «Токси-3» (далее методика 5, формулы (8)–(18)).

Коэффициенты дисперсии для гауссовских моделей представлены в двух вариантах: при использовании методик 1–3 брались зависимости дисперсий от расстояния [5], а методики 4 («Токси-2») — зависимости, приведенные в работе [6].

Из всех использованных методик только в методике «Токси-3» (методика 5) учитывается изменение скорости ветра с высотой, в остальных методиках такого учета нет. Поскольку в моделируемых ситуациях изменение скорости ветра по высоте играло существенную роль, то было решено использовать при расчетах по методикам 1–4 не скорость ветра на высоте 10 м, а наблюдавшуюся в экспериментах скорость перемещения облака, соответствующую осредненной по слою у поверхности земли скорости ветра. Например, согласно экспериментальным данным, средняя видимая скорость движения облака в опыте 045 составляла 0,9 м/с, именно эта скорость и была принята в расчетах по методикам 1–4.

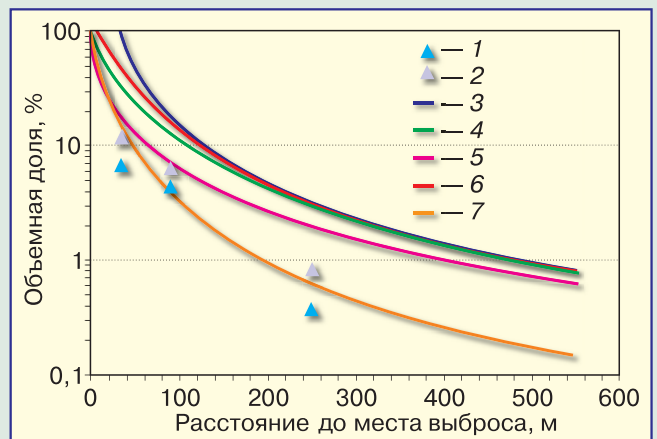
Кроме того, при расчете был сделан еще ряд допущений.

Во-первых, из-за ограничений методики 3 пришлось проводить расчеты по гауссовским методикам с явно завышенным размером шероховатости. Причина этого состоит в том, что методика 3, изначально предназначенная для применения в условиях города, не содержит в качестве входного параметра характерного размера шероховатости, который в условиях городской застройки сравним с размером самого облака. По нашей оценке, размер шероховатости в методике 3 составляет около 0,2 м. Данное значение и использовалось во всех расчетах по гауссовским методикам. Это следует иметь в виду при анализе полученных результатов. По нашим оценкам, приводимые ниже концентрации, рассчитанные по гауссовским методикам, занижены в 1,5 раза.

Наконец, для проведения расчетов по методикам 2–5 необходимо было задать размер начального источника, т.е. высоту и ширину прямоугольной области, расположенной поперек ветра. Во всех расчетах по этим методикам предполагалась высота этой области 0,5 м, что соответствовало схеме проведения экспериментов. Ширина же прямоугольной области в начальном сечении при расчетах по методикам 2–4 составляла 9,92 м, а по методике 5 — 12 м.

Все остальные параметры расчета соответствовали данным, приведенным выше, в краткой характеристике экспериментов Торней Айленд. В случае указания двойного класса рассеяния расчеты проводились для более устойчивого состояния атмосферы (при классе устойчивости атмосферы E/F выбирался класс F).

Результаты компьютерного моделирования экспериментов Торней Айленд приведены на рис. 2–6 на примере опыта 045. На рис. 2 показаны результаты расчета по пяти рассматриваемым методикам и экспериментальные данные. Видно, что гауссовские методики завышают концентрацию на оси выброса, по сравнению со значениями, наблюдаемыми в эксперименте (напомним, что в реальности характер этого завышения еще больше, поскольку на рис. 2 приведены значения, посчитанные при заведомо большей шероховатости

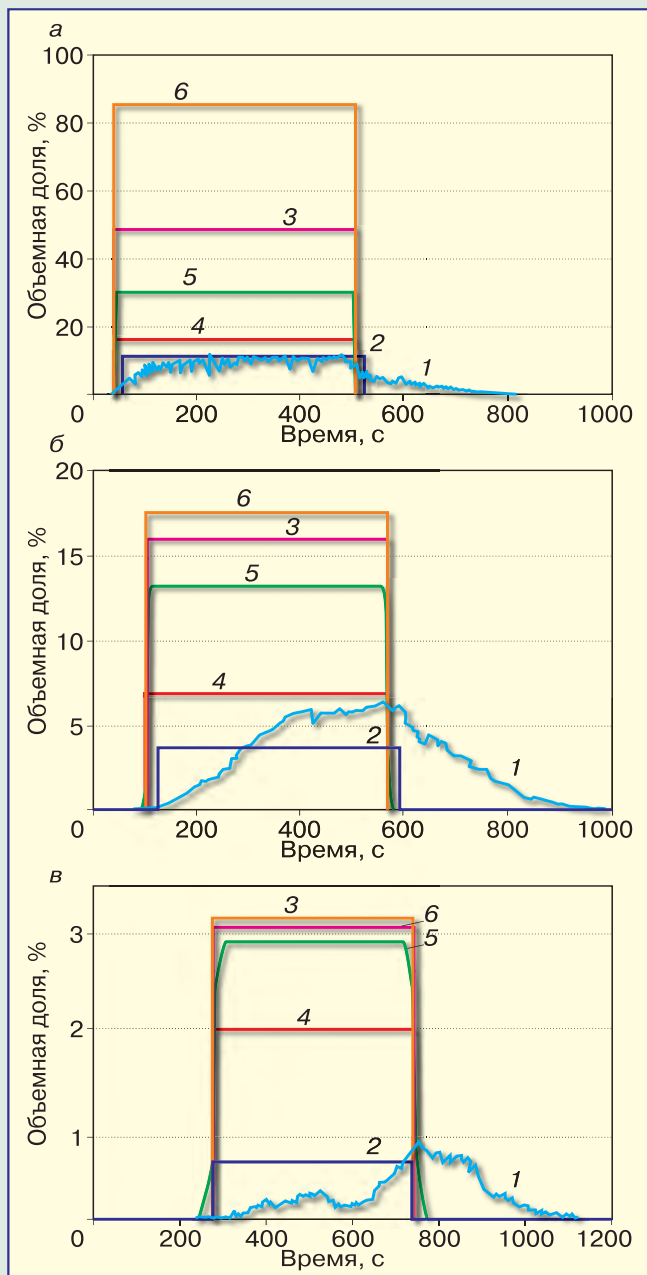


**Рис. 2. Зависимость объемной доли вещества в воздухе от расстояния до места выброса:**

1, 2 — опыт 045, соответственно максимальные значения в трех точках и осредненные за 600 с; 3–7 — методика соответственно 1–5

поверхности, чем в эксперименте). Наиболее точно результаты эксперимента описывает методика 5 — «Токси-3». Следует отметить, что гауссовская модель с использованием виртуального источника (методика 3), вообще говоря, не совпадает ни со стандартным гауссовским подходом, ни с методикой рассеяния тяжелого газа, хотя несколько ближе, чем стандартные гауссовские подходы, лежит к экспериментальным данным.

Совпадение с данными опытов по достижению концентрации на различных расстояниях — важное достоинство методики. И то, что «Токси-3» достигает хорошего согласования по этому показателю, безусловно, свидетельствует об адекватности физических моделей, заложенных в ней. На рис. 3 приведены зависимости концентрации от времени в различных точках пространства. Характерное отличие всех расчетных зависимостей от экспериментальных данных (рис. 3) — постепенное увеличение с расстоянием временной разницы в приходе основной массы выброса к месту установки датчика. Если на расстоянии 36 м расчетное время прихода выброса почти совпадает с экспериментальным и составляет около 40 с, то на расстоянии 250 м имеется существенная разница между расчетным временем прихода и реально наблюдаемым. Наибольшее повышение концентрации в эксперименте наблюдается через 650 с, согласно же расчету в это время прохождение выброса через точку уже близко к завершению: расчетная концентрация падает до нуля примерно на 750-й секунде. Такое отсроченное повышение концентрации в эксперименте объясняется тем, что на практике существенное влияние на движение выброса оказывает трава, высота которой составляла 30–35 см. Это влияние сказывалось, прежде всего, на скорости движения выброса. В то время, как облако над травой двигалось со средней скоростью 0,9 м/с, облако в траве перемещалось с гораздо меньшей скоростью. На расстоянии более 250 м от места выброса в опытах вообще сначала регистрировалось датчиками, расположенными на большей высоте, прохождение облака в



**Рис. 3. Кривые, построенные согласно расчетным данным, и показания датчиков, расположенных на оси выброса на расстоянии 36 (а), 90 (б) и 250 м (в) от места выброса:**  
 1 — опыт 045; 2–6 — методики соответственно «Токси-3», «Токси-2», 3, 2 и 1

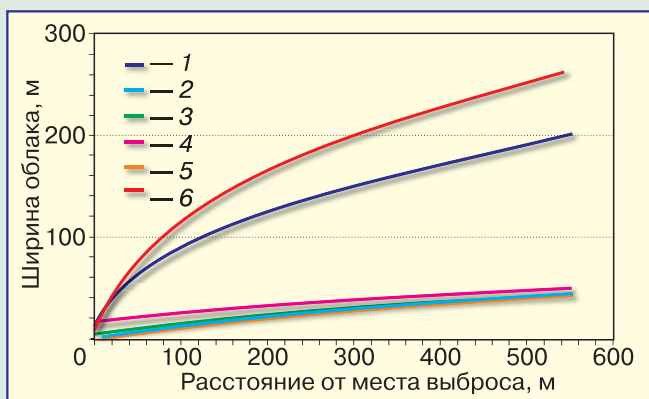
верхних слоях, и лишь после ухода облака из верхних слоев, у поверхности земли начинался существенный рост концентрации. Эта ситуация отражена на рис. 3, в для показаний датчика, расположенного в точке 250 м; поведение концентрации в верхних слоях можно оценить по расчетным кривым. Естественно, если в расчетах этот эффект торможения в траве не учитывался, то и на расчетных кривых замедление скорости распространения выброса наблюдаться не будет.

Другое отличие экспериментальных кривых от расчетных, хорошо заметное на рис. 3, — достаточно быстрое «размытие» переднего и заднего фронтов облака-шлейфа. В расчетах такого эффекта не наблюдается. Само это явление — диффузия в направлении ветра — учитывалось только при расчете по методике 2, поэтому и масштаб его влияния можно оценить лишь из результатов расчета именно по этой методике. Как видно из рис. 3, в расчетах по методике 2 действительно имеет место «размытие» как переднего, так и заднего фронта.

В целом видно, что методика «Токси-3» более точно описывает динамику процесса рассеяния (см. рис. 3). Об этом свидетельствует и такая характеристика, как ингаляционная доза (интеграл по времени от концентрации в определенной точке пространства), отчасти учитывающая динамику процесса. В таблице приводятся дозы, рассчитанные с использованием всех пяти методик, и доза, определенная на основе экспериментальных данных. Методика «Токси-3» имеет наилучшее совпадение с опытом, остальные методики существенно завышают ингаляционную дозу — на величину до нескольких сотен процентов (см. таблицу).

Еще одна характеристика, по которой проводилось сравнение с опытом, — размеры облака. В опытах устанавливалась, прежде всего, площадь, покрываемая шлейфом. Она определялась из условия превышения объемной доли исследуемого вещества в воздухе 0,1 %, что соответствовало пределу чувствительности датчиков. На рис. 4 приведены кривые, рассчитанные по пяти рассматриваемым методикам и соответствующие объемной доле 0,1 %. Из рис. 4 хорошо видно насколько сильна роль силы тяжести. Все гауссовские методики дают узкую зону, ширина которой на расстоянии 500 м от точки выброса составляет около 100 м. Согласно экспериментальным данным наблюдалась ширина примерно в 4 раза большая: на расстоянии 500 м от места выброса — около 400 м, т.е. гауссовские методики как минимум на 400 % недооценивают поперечный размер облака (с учетом использованных завышенных

Методика	Расстояние от места выброса, м					
	36		90		250	
	Доза, кг·ч/л	Ошибка по отношению к эксперименту, %	Доза, кг·ч/л	Ошибка по отношению к эксперименту, %	Доза, кг·ч/л	Ошибка по отношению к эксперименту, %
1	92,4	711	19,2	201	3,33	550
2	32,6	186	14,3	125	3,17	519
3	17,5	53	7,47	17	2,15	320
«Токси-2»	52,6	361	17,4	173	3,44	571
«Токси-3»	12,1	6	4,02	-37	0,660	29
Эксперимент	11,4	0	6,38	0	0,513	0



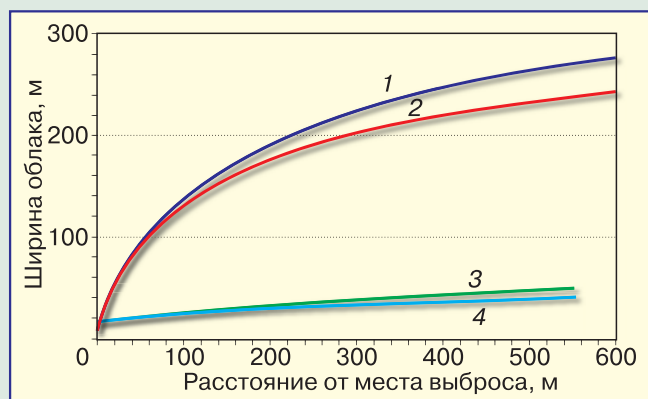
**Рис. 4. Зависимость ширины облака от расстояния до места выброса:**

1 — опыт 045; 2–6 — методика соответственно 1–5

размеров шероховатости). Расчеты по методике «Токси-3» существенно лучше описывают размер облака: расчетная ширина завышена по отношению к экспериментальному значению примерно на 30 %. Возможная причина — наличие высокой травы.

Анализ размеров облака наиболее ярко показывает недостатки гауссовских моделей и преимущества методики «Токси-3». Этот пример иллюстрирует, что даже при сравнительно слабой интенсивности выброса, длительные выбросы все равно существенным образом растекаются по поверхности и долгое время распространяются вдоль нее, слабо диффундируя вверх. В гауссовских моделях отсутствует такое сильное растекание по поверхности и, наоборот, присутствует более интенсивное вертикальное рассеяние. Любопытно отметить, что гауссовские модели не только недостаточно точно описывают количественные характеристики облака, но даже качественное поведение выброса они могут описывать неправильно.

Приведем следующий пример. При переходе от более устойчивого состояния атмосферы к менее устойчивому, согласно гауссовскому подходу, увеличивается ширина облака (рис. 5). Такое увеличение понятно: переход от более устойчивого состояния атмосферы к менее устойчивому сопровождается увеличением турбулентности (и соответствующим увеличением коэффициентов дисперсии) и, как следствие, более быстрым рассеянием, в том числе и в поперечном направлении, что и расширяет облако. Однако при учете ускорения свободного падения переход от одного состояния устойчивости атмосферы к другому приводит к более сложной реакции. В случае, когда плотность выброса больше плотности воздуха, поведение выброса определяется также и ускорением свободного падения. Переход от более устойчивого состояния к менее устойчивому приведет к увеличению турбулентности и опять же к более быстрому рассеянию. В результате плотность выброса в случае менее устойчивой стратификации атмосферы будет падать быстрее, чем при более устойчивой. При уменьшении плотности снижается и скорость гравитационного растекания. Таким образом, при более устойчивой стратификации гравитационное



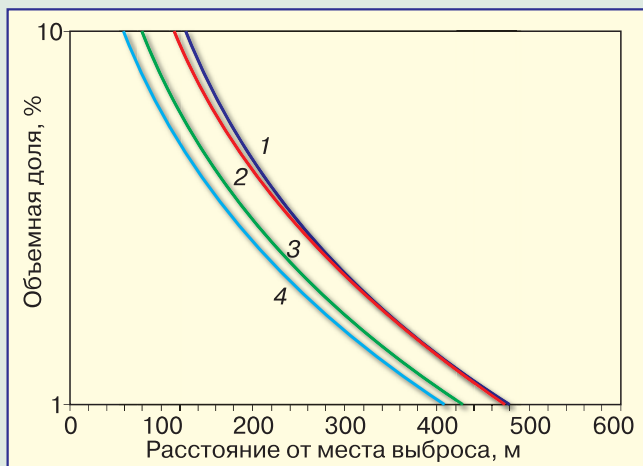
**Рис. 5. Зависимость ширины облака от класса устойчивости атмосферы в случае расчета по гауссовской методике и методике, основанной на модели рассеяния тяжелого газа (скорость ветра на высоте 10 м во всех расчетах составляла 1 м/с):**

1, 2 — методика «Токси-3», класс устойчивости соответственно F и E; 3, 4 — методика 2, класс устойчивости соответственно E и F

растекание более существенно, чем при менее устойчивой, а поскольку гравитационное растекание играет большую роль, нежели боковой размыв облака за счет турбулентности, то в случае более устойчивой стратификации облако окажется шире. Расчеты по методике «Токси-3» полностью подтверждают описанную картину: при более устойчивой стратификации поперечный размер облака действительно больше (см. рис. 5).

Завершив обсуждение результатов расчета по различным методикам, укажем еще раз на специфические черты методики 3 [4, 5]. С одной стороны, эта методика, равно как и любая гауссовская модель, не способна качественно описать выбросы тяжелых газов. С другой, результаты расчетов соответствующих величин по этой методике отличаются от получаемых по стандартным гауссовским моделям. Учитывая, что коэффициенты стандартных гауссовских моделей верифицированы опытным путем, можно быть уверенным — гауссовские модели отражают реальные физические процессы рассеяния нейтральных газов, и рассчитанные по этим моделям величины с приемлемой точностью совпадают с экспериментальными верификационными данными. Но методика 3 в общем случае дает результаты, не совпадающие с расчетами по стандартным гауссовским моделям (см. рис. 2–4), т.е. при ее использовании для моделирования опытных данных, по которым верифицировались стандартные гауссовские модели, мы, наверняка, не получим совпадения их с расчетными. Вряд ли причину этого несовпадения можно объяснить влиянием начального размера источника. Действительно, три гауссовские методики (1, 2 и 4), рассмотренные в данной статье, по-разному учитывают начальный размер источника, однако, начиная с некоторого расстояния (для опыта 045 со 120–130 м), все три методики дают почти одинаковый результат. Это является естественным с точки зрения физики процесса: система «облако—атмосфера», начиная с некоторого расстояния,

«забывает» о пространственных размерах начального источника и «помнит» только о количестве выброшенного вещества. Методика 3 в рассмотренных примерах не совпадает с гауссовским решением и на расстояниях 400–500 м, более того, остается неясным имеется ли вообще тенденция к сближению с гауссовскими методиками на больших расстояниях. Методика 3 обладает таким негативным свойством, как сильная чувствительность к начальным данным. Поясним подробнее. На рис. 2–4 для методики 3 приводились данные расчета для источника прямоугольной формы размером 9,92×0,5 м. Если изменить размеры начальной источника, то можно ожидать, что концентрационное поле также изменится, а разница в концентрациях должна исчезать по мере удаления от источника. Одним словом, мы вправе ожидать примерно такого же поведения как у гауссовских методик 1, 2 и 4. Однако расчеты для полукруглого источника радиусом 1,74 м, проведенные в соответствии с рекомендацией работы [4], показали, что два решения по методике 3, с разными начальными данными, дают решения, которые в рассматриваемом примере не стремятся друг к другу. Эта ситуация показана на рис. 6, там же, для сравнения приведены кривые, соответствующие расчетам по гауссовским методикам 1 и 2. Таким образом, методика 3 вступает в противоречие с известными законами физики.



**Рис. 6. Кривые, построенные, согласно результатам расчета, по гауссовским методикам 1 (1), 2 (2) и методике 3 для источника соответственно круглой (3) и прямоугольной (4) формы**

Скорее всего в подходе, изложенном в работах [4, 5], присутствует некоторая системная ошибка, которая и приводит к физически неверным результатам (физически неверным в данном случае означает несовпадение с опытом). С учетом новаторского характера работ [4, 5] не исключена возможность непредсказуемых проявлений этой системной ошибки.

### Выводы

Анализ сравнения результатов расчета рассеяния газа от источника продолжительного действия по различным методикам с экспериментальными данными, имитирующими аварийные выбросы, показал:

1. Методики, основанные на распределении Гаусса для концентрации рассеивающегося газа, не способны с достаточной степенью точности предсказывать рассеяние тяжелого газа от источника продолжительного действия, даже сравнительно невысокой мощности. Отмечено, что концентрации на оси выброса получают завышенными, а размеры облаков-шлейфов заниженными, расхождения с экспериментом составляют 400–500 %.

2. Методика, изложенная в работах [4, 5], разработанная в целях повышения точности расчета вблизи места выброса, также непригодна для расчета рассеяния длительных выбросов тяжелого и, в некоторых случаях, нейтрального газа.

3. Наилучшее согласие с экспериментальными данными получено при использовании методики «Токси-3» [1, 12], которая позволяет прогнозировать концентрационные поля, размеры облаков и ингаляционные дозы для выбросов от источника продолжительного действия.

### Список литературы

1. Методика расчета распространения аварийных выбросов, основанная на модели рассеяния тяжелого газа / А.А. Шаталов, М.В. Лисанов, А.С. Печеркин и др. // Безопасность труда в промышленности. — 2004. — № 9. — С. 46–52.
2. Верификация методик для расчета рассеяния токсических выбросов / С.А. Губин, С.М. Лыков, И.В. Маклашова и др. // Химическая промышленность. — 1999. — № 10. — С. 58–66.
3. Совершенствование методического обеспечения оценки последствий аварий на опасных производственных объектах / Д.В. Дегтярев, М.В. Лисанов, А.С. Печеркин и др. // Докл. и выступл. II научно-практической конференции «Проблемы прогнозирования чрезвычайных ситуаций», 23 окт. 2002 г. — М.: Едиториал УРСС. — 2003. — С. 317–324.
4. Замышляев Б.В. Влияние начальных размеров объемных источников выброса (истечения) невесомой примеси на оценку концентрационных полей, возникающих при распространении облаков гауссова типа // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. — 2004. — № 4. — С. 35–72.
5. Методика прогноза и оценки химической обстановки при авариях на аммиачных ХОО г. Москвы / АНО «Ассоциация «Содействие защите населения». — М., 2003. — 87 с.
6. Методика оценки последствий химических аварий (Методика «Токси». Редакция 2.2) // Методики оценки последствий аварий на опасных производственных объектах: Сб. докладов / ГУП «НТЦ «Промышленная безопасность». Сер. 27, Декларирование промышленной безопасности и оценка риска. — 2002. — Вып. 2. — С. 121–204.
7. McQuaid J. Design of the Thorney Island Continuous Release Trials // Journal of Hazardous Materials. — Vol. 16. — 1987. — P. 1–8.
8. Mercer A., Nussey C. The Thorney Island Continuous Release Trials: mass and flux balances. // Journal of Hazardous Materials. — Vol. 16. — 1987. — P. 9–20.
9. Heavy Gas and Risk Assessment / Proceedings on Symposiums. — Reidel, Dordrecht, Boston, Lancaster, Tokyo. — 1980–1986.
10. Гусев Н.Г., Беляев В.А. Радиоактивные выбросы в биосфере / Справочник. — М.: Энергоатомиздат, 1986.
11. Научно-методические аспекты анализа аварийного риска / В.Г. Горский и др.; Под ред. Г.Ф. Терещенко и А.А. Шаталова. — М.: Экономика и информатика. — 2000. — 260 с.
12. Методика оценки последствий аварийных выбросов опасных веществ (Методика «Токси». Редакция 3.1): Проект // ФГУП «НТЦ «Промышленная безопасность». — М. — 2005. — 61 с.