



В.Н. Антипов,
проф., д-р техн. наук,
директор

ООО «Энергия-2», г. Тюмень

Анализ некоторых результатов расчетов последствий аварийных выбросов опасных веществ

Проанализированы результаты расчетов последствий аварийных выбросов опасных веществ, представленные в работах [5, 6] с использованием ТОКСИ+ и PHAST, а также используемая методика РД-03-26—2007. Сделан вывод, что авторы этих работ не учитывают особенности физических свойств перегретых жидкостей, влияющих на формирование облака опасного вещества, его рассеяние с учетом ветра и создание поражающих факторов. Используемая методика требует существенной переработки.

The results of the calculations of hazardous substances emergency discharge consequences with ТОКСИ+ and PHAST presented in Articles [5, 6], as well as used methodology are analyzed. It is shown that the authors of these Articles had not considered the specifics of the superheated liquid physical properties effecting on the formation of hazardous substance cloud, its dissipation considering the wind and creation of adverse factors. Used methodology requires significant update.

Ключевые слова: ТОКСИ+, PHAST, аварийный выброс, зоны поражения, хлор, пропан, перегретые жидкости.

В соответствии с Федеральным законом № 225-ФЗ [1] с 1 января 2012 г. вступили в силу требования по обязательному страхованию гражданской ответственности владельца опасного объекта за причинение вреда. Согласно этому закону страховая сумма будет зависеть от ожидаемого числа погибших в результате возможной аварии, которое должно определяться в результате проведения анализа риска. В такой ситуации повышаются требования к методикам и программным комплексам, используемым при проведении анализа риска.

Специалистами ЗАО НТЦ ПБ разработан программный комплекс ТОКСИ+^{Risk}, в основу которого положены методическое руководство [2] и методика «Токси» (редакция 2.2). В работах [3, 4], посвященных анализу методического руководства [2], были отмечены неточности, ошибки и физически не обоснованные допущения в ряде определений и математических моделях, что в отдельных случаях может приводить к значительному (нереальному) завышению опасности. В настоящей статье анализируются результаты расчетов и выводов, представленные в работах [5, 6].

Авторы работы [5] утверждают: «...одним из основных критериев обоснованности методик и программных продуктов должны быть результаты их верификации с другими программами, данными экспериментов и результатами расследования аварий...» Однако с приведенным утверждением мож-

но согласиться только частично. Не ясно, что вкладывают авторы в понятие «верификация»?

Обоснованием достоверности и точности моделей, методик и созданных на их основе программных комплексов может служить только сравнение результатов расчетов с экспериментальными данными. Проведение экспериментов с опасными веществами сопряжено с большими трудностями и огромными затратами. Поэтому зачастую приходится сопоставлять результаты реально происшедших аварий с расчетами, выполненными по разработанной методике. Однако такое сопоставление может только косвенно оценить, противоречат или нет результаты расчетов фактическим данным, но никак не доказать достоверность рассматриваемой модели или методики.

Никакая методика не может быть использована в качестве эталона для оценки других методик. Можно сравнивать результаты расчетов, выполненных по различным методикам для одной и той же задачи. Но это будет всего лишь сравнением результатов расчетов, но никак не подтверждением достоверности методики.

Любая математическая модель — лишь модель, и насколько она отвечает реальным условиям, может подтвердить только эксперимент. Данные расследования аварий часто носят субъективный характер.

В работе [5] представлены результаты расчетов последствий аварийных выбросов опасных веществ,

выполненных в программных комплексах ТОКСИ+ и PHAST, для двух аварий: модельной и реальной, произошедшей 6 января 2005 г. в штате Южная Каролина (США). Общим является то, что в обоих случаях рассматриваются перегретые жидкости: в одном случае — сжиженный пропан, в другом — сжиженный хлор. Различия аварий — в размерах цистерн, количестве содержащегося в них опасного вещества и в размерах сквозных отверстий. При этом хлор обладает токсичными свойствами, а пропан относится к горючим опасным веществам.

В модельной аварии рассматривается разгерметизация цистерны (сквозное отверстие в стенке диаметром 20 мм), содержащей 5 т сжиженного пропана при температуре 20 °С и давлении 0,86 МПа. Истечение пропана происходит на свободную бетонную поверхность при скорости ветра 2 и 5 м/с. Исходной информации, представленной в работе [5], явно недостаточно для количественного анализа результатов расчета. Можно провести только качественный анализ с учетом физических явлений, которые возникают при аварии.

При истечении пропана в атмосферу одновременно происходят несколько физических процессов: истечение жидкого пропана в виде струи с достаточно большой скоростью, объемное взрывное вскипание жидкого пропана и перемешивание с воздухом благодаря турбулентной и молекулярной диффузии. В случае, когда на пути вытекающей струи стоит твердая преграда, то в результате механического взаимодействия струи с твердой стенкой происходит диспергирование оставшейся жидкой части (которая еще не перешла в парообразное состояние) и разброс пропана на большие расстояния. Когда вытекающая струя не встречает препятствия, то она взаимодействует с потоком воздушной массы. На это взаимодействие существенное влияние оказывают скорость и направление ветра относительно вытекающей струи. В рассматриваемой модельной аварии истечение происходит на бетонную поверхность, и первоначальная скорость вытекающей струи будет достигать 58 м/с. Разброс пропана в виде пара и аэрозоля при ударе о твердую стенку будет в радиусе около 50 м. При определении времени полного опорожнения цистерны необходимо учитывать, что скорость истечения пропана будет со временем уменьшаться [7].

Приведенный анализ модельной аварии позволяет сделать вывод: вторичное облако (в случае перегретой жидкости) уже на стадии его формирования разбавлено воздухом. Допущение, принятое в методическом руководстве [2], а следовательно, и в программном комплексе ТОКСИ+, — «в начальный момент времени в облаках (первичном и вторичных) опасное вещество воздухом не разбавлено» — не состоятельно. Поэтому результаты расчета для модельной аварии, представленные в работе [5], вызывают сомнения.

В реальной аварии при столкновении двух поездов на железной дороге в одной из цистерн, в которой находилось 82 т сжиженного хлора, пробито отверстие, через которое и произошел выброс опасного вещества в атмосферу. Обстоятельства аварии описаны в работах [5, 6].

Из информации об аварии не все можно принимать на веру. Вызывают сомнения, например, данные о температуре транспортирования хлора (–3 °С), в то время как температура воздуха составляла 13 °С. Вызывает сомнения и то, что часть жидкого хлора пролилась на подстилающую поверхность и что «по различным оценкам, в цистерне оставалось до половины содержимого, хлор находился внутри цистерны еще несколько дней после аварии...» [6]. Это означает, что температура хлора, пролитого на поверхность земли, а также хлора, оставшегося в цистерне, должна быть –34,1 °С (температура кипения хлора при атмосферном давлении). Вызывает сомнения и информация очевидцев, которым в ночное время удалось с высокой точностью определить форму и размеры облака на местности, на которой имеется множество построек (авария произошла в промышленной зоне). Однако не вызывают сомнения данные о числе погибших и обратившихся за медицинской помощью, так как эти факты были зафиксированы в соответствующих документах медицинских учреждений.

Приведенные данные об аварии позволяют сделать важные выводы. Рискующих людей, находящихся в достаточной близости от места аварии, было большое количество. Число погибших составило всего девять человек, из них восемь находились в помещениях.

Анализ расчетных данных, полученных в программных комплексах PHAST и ТОКСИ+ для двух значений скорости ветра (1 и 2 м/с), представленных на рис. 4 в работе [5], позволяет сделать важные выводы: закономерность влияния скорости ветра на границы зон действия поражающих факторов по методикам PHAST и ТОКСИ+ совершенно иная. Так, с увеличением скорости ветра зона действия поражающих факторов по методике PHAST уменьшается, а по методике ТОКСИ+ — увеличивается. По обеим методикам почти вся территория промзоны попадает в зону действия поражающих факторов с вероятностью 90%-ной гибели людей. Если принять расчеты по указанным методикам за основу, то число погибших на порядок, а то и на два, должно превосходить фактическое значение. По крайней мере, 90 % людей, обратившихся за медицинской помощью, т.е. почти 500 человек, должны быть в числе погибших. Такое расхождение расчетных значений и фактических дает право усомниться в результатах расчетов.

Зона действия поражающих факторов со смертельным исходом, рассчитанная по методике ТОКСИ+, не совпадает с зоной, рассчитанной по ме-

тодике «Токси-2», представляющей собой узкую полосу, уходящую в бесконечность [6]. Сами авторы работы [6] указывают на непригодность методики «Токси-2» для случая аварии с тяжелым газом (плотность газообразного хлора при стандартных термодинамических условиях составляет около $3,2 \text{ кг/м}^3$).

Авторы работы [5] по результатам расчета зон действия поражающих факторов для двух аварий, одна из которых реальная, другая модельная, делают выводы:

«1. Программные комплексы ТОКСИ+ и PHAST предназначены для решения задач по количественному анализу риска аварийных выбросов опасных веществ и имеют схожие возможности для расчета основных физических эффектов и показателей риска, связанных с тепловым, барическим и токсическим поражением людей при авариях.

2. Результаты расчета размеров зон вероятности поражения при выбросах горючих и токсичных веществ, в том числе при сравнении с данными реальной аварии с хлором, по этим двум программным комплексам имеют удовлетворительное согласие».

С такими выводами нельзя согласиться. В первом выводе следует обратить внимание на то, что в работе [5] не рассматриваются тепловые и барические эффекты. Со вторым — вследствие большого расхождения расчетных значений и фактических результатов реальной аварии с хлором.

Скорее можно сделать вывод, что расчеты, выполненные с помощью программных комплексов ТОКСИ+ и PHAST дают неудовлетворительные результаты по сравнению с данными конкретной реальной аварии с хлором. Правоммерно тогда задать вопрос: в чем причина такого расхождения результатов расчетов в ТОКСИ+ с данными реальной аварии? Причину необходимо искать в самой методике ТОКСИ+, в заложенных в ней моделях.

Всякая модель основана на принятии определенных допущений и условий, каждое из которых вносит определенную погрешность в конечные результаты расчетов и устанавливает границы применимости той или иной модели. Так, в методическом руководстве [2] принята физическая модель мгновенного формирования первичного облака опасного вещества цилиндрической формы, причем это облако не разбавлено воздухом.

В работе [8] утверждается, что «цилиндрическая форма для «первичного» облака в наиболее точном виде отвечает реальным фактам, наблюдаемым в эксперименте» и приводится фотография одного из экспериментов в Торней Айленде. Но при этом не упомянуты условия эксперимента: облако газообразного вещества сформировано цилиндрической формы искусственно с помощью пленки в штелевых условиях. Пленка мгновенно сбрасывается. В верхней части и у подножия облака видны фрагменты сброшенной пленки. Давление в созданном облаке равно атмосферному. На фотографии видно,

что уже в первые секунды облако начинает менять форму, границы облака размытые. Особенно четко это прослеживается в левой и верхней частях облака. Интересно было бы проследить за изменениями размеров и формы облака в разные моменты времени.

Размывание облака можно объяснить протеканием диффузионных процессов, в результате которых происходит взаимное проникновение как молекул воздуха в облако, так и молекул газа (в том числе и молекул опасного вещества) из облака в окружающую воздушную массу. При отсутствии ветра будет иметь место только молекулярная диффузия. Взаимопроникновение частиц газа и воздуха происходит в соответствии с законами молекулярной физики для газовых сред. Диффузия протекает в направлении падения концентрации вещества и ведет к равномерному распределению вещества по всему объему и к выравниванию его химического потенциала.

Если газ под пленкой находился бы под избыточным давлением, то картина была бы совершенно иной. Облако начало бы расширяться в соответствии со свойствами гидростатического давления (гидростатическое давление по всем направлениям действует одинаково), принимая более или менее правильную форму шара или при определенных условиях форму усеченного шара с плоским основанием.

Согласно методическим указаниям [2], которые положены в основу программных комплексов ТОКСИ+ и ТОКСИ+^{Risk}, первичное облако цилиндрической формы образуется мгновенно, причем облако не разбавлено воздухом, а его радиус R (при отсутствии данных о начальных размерах облака) принимается равным его высоте H и вычисляется по формуле

$$R = H = \sqrt[3]{\frac{Q}{\pi \rho_{\text{п}}}}, \quad (1)$$

где Q — масса опасного вещества, которое перешло в парообразное состояние и образовало первичное облако, кг; $\rho_{\text{п}}$ — плотность паров опасного вещества, кг/м^3 .

Радиус первичного облака для случая рассматриваемой реальной аварии, вычисленный по формуле (1), будет равен 15–20 м, в зависимости от принятого значения количества вылившегося хлора. Все люди, находящиеся в пределах указанного радиуса, должны были погибнуть уже в первую секунду аварии, так как даже один вдох чистого хлора (неразбавленного воздухом) приводит к летальному исходу. Со временем облако должно расширяться и зона действия поражающих факторов со смертельным исходом увеличиваться. Смертельная токсодоза хлора составляет 6 мг·мин/л , пороговая — $0,6 \text{ мг·мин/л}$. Смертельную дозу опасного вещества можно получить и при малых концентрациях этого вещества в воздухе за счет увеличения времени экспозиции (пребывания в облаке).

В случае реальной аварии с хлором первичное облако не может сформироваться мгновенно. Процессами, протекающими в первые минуты разрушения цистерны, пренебрегать нельзя. Будут одновременно протекать процессы истечения жидкого хлора через отверстие в стенке цистерны, удар вытекающей струи о твердую преграду, дробление и разброс на большие расстояния жидких капель, взрывное вскипание (фазовый переход) перегретого хлора, смешение опасного вещества с воздушной массой благодаря турбулентной диффузии, обусловленной скоростью ветра. Именно эти процессы играют основную роль в создании и формировании облака паровоздушной смеси.

Скорость, с которой будет вытекать хлор через отверстие в цистерне, составит приблизительно 16 м/с. Полное опорожнение цистерны произойдет приблизительно за 25 с [7]. Вылетающая с такой скоростью струя, ударяясь о твердую преграду, разлетается по всем направлениям в виде аэрозоля и свободного пара (с учетом фазового перехода) в радиусе около 35–40 м. Происходит одновременное смешение с воздухом, этому смешению способствует турбулентная диффузия. За первую секунду произойдет выброс хлора массой около 3300 кг. С учетом вышеперечисленных процессов первоначальная объемная доля хлора в облаке составит около 0,02 %. За следующую секунду времени будет выброшено в атмосферу приблизительно такое же количество хлора. При этом объем облака несколько увеличится, и концентрация хлора в нем возрастет, так как на части пространства происходит наложение двух концентраций. И так процессы истечения, смешения хлора с воздухом и формирования облака будут непрерывными до тех пор, пока полностью не завершится опорожнение. Причем в течение периода опорожнения концентрация облака будет возрастать. После завершения истечения смешение облака с воздушной массой и перемещение его в пространстве будут продолжаться с непрерывным уменьшением концентрации отравляющего вещества (ОВ), т.е. каждому моменту времени будут соответствовать свои границы облака и значения концентрации опасного вещества в нем.

Следовательно, первичное облако опасного вещества на примере реальной аварии с хлором уже в первые секунды разбавлено воздухом. Именно этим можно объяснить тот факт, что все люди, находившиеся вблизи от места аварии, не погибли сразу, и в течение длительного времени продолжались спасательные работы по выводу людей с загазованной территории, а число жертв от аварии было ограниченным и значительно меньшим, по сравнению с расчетами в программном комплексе ТОКСИ+.

Если бы не было ветра, т.е. в условиях абсолютно го штиля, паровоздушное облако приняло бы форму усеченного шара. При наличии ветра облако будет сноситься по ходу ветра с одновременным перемеши-

ванием с воздухом и изменением формы. По большому счету первоначальная форма облака не имеет принципиального значения, так как облако, попадая в воздушный поток, становится частью потока воздуха с поперечными размерами, определяемыми масштабом турбулентности и первоначальным радиусом разброса опасного вещества. Температуру смеси и концентрацию ОВ в смеси (благодаря интенсивному перемешиванию) можно считать в каждый фиксированный момент времени одинаковыми в пределах нормального сечения облака (как части потока воздуха).

Воздушный поток обладает значительной интенсивностью турбулентного перемешивания, благодаря которому он может переносить взвешенные частицы веществ, плотность которых многократно превышает плотность воздуха [9]. Основной вклад в передачу количества движения, тепла и массы как в горизонтальной, так и вертикальной плоскостях вносят крупномасштабные компоненты турбулентности (масштабы которых соизмеримы с масштабами течения воздуха в целом). При построении полуэмпирических теорий тепломассопереноса в турбулентных потоках используется сходство между турбулентным и молекулярным переносом. По аналогии вводятся понятия пути перемешивания, интенсивности турбулентности, коэффициента турбулентной диффузии и т.д.

После завершения формирования облака начинается процесс рассеяния опасного вещества в атмосферу. Для расчета этого процесса в методических указаниях [2] предлагаются математические модели распределения концентрации для первичного и вторичного облаков. Анализу математической модели рассеяния для первичного облака посвящены работы [3, 4].

Представляется целесообразным провести анализ закона распределения концентрации опасного вещества для случая вторичного облака, который описывается зависимостями:

$$c'_i(x, y, z) = c'_{ui} \exp \left[- \left[\frac{z}{S'_{zi}} \right]^\beta \right] \text{ при } |y| < b'_i \quad (2)$$

$$\text{и } x'_{zi} < x < x'_{ni};$$

$$c'_i(x, y, z) = c'_{ui} \exp \left[- \left[\frac{z}{S'_{zi}} \right]^\beta \right] \exp \left[- \left[\frac{|y| - b'_i}{S'_{yi}} \right]^2 \right] \quad (3)$$

$$\text{при } |y| \geq b'_i \text{ и } x'_{zi} < x < x'_{ni};$$

$$c'_i(x, y, z) = 0 \text{ при } x'_{ni} < x \text{ и } x < x'_{zi}. \quad (4)$$

К ним добавляются следующие соотношения:

$$q'_i = 2c'_{ui} B'_{эффi} H'_{эффi} u'_{эффi}; \quad (5)$$

$$B'_{эффi} = b'_i + 0,5\sqrt{\pi} S'_{yi}; \quad (6)$$

$$H'_{эфф i} = \frac{1}{\beta} \Gamma \left(\frac{1}{\beta} \right) S'_{zi}; \quad (7)$$

$$u'_{эфф i} = \frac{\Gamma[(1+\alpha_b)/\beta]}{\Gamma[1/\beta]} u_{10} \left(\frac{S'_{zi}}{z_{10}} \right)^{\alpha_b}. \quad (8)$$

В выражениях (2)–(8) приняты те же самые обозначения, которые представлены в приложении 2 руководящего документа [2], а именно:

c'_i — концентрация опасного вещества в некоторой точке в некоторый момент времени при рассеянии вторичного облака, образующегося на l -й стадии поступления опасного вещества в атмосферу в i -м сценарии, кг/м³; x — координата вдоль ветра, м; y — координата, перпендикулярная направлению ветра, м; z — координата высоты, м; $c'_{\text{ц}i}$ — концентрация опасного вещества в центре (на оси) облака в некоторый момент времени при рассеянии вторичного облака, образующегося на l -й стадии поступления опасного вещества в атмосферу в i -м сценарии, кг/м³; S'_{zi} — вертикальная дисперсия при рассеянии вторичного облака, образующегося на l -й стадии поступления опасного вещества в атмосферу в i -м сценарии, м; β — вспомогательный коэффициент; b'_i — полуширина ядра вторичного облака, образующегося на l -й стадии поступления опасного вещества в атмосферу в i -м сценарии, м; x'_{zi} — координата задней кромки вторичного облака, образующегося на l -й стадии поступления опасного вещества в атмосферу в i -м сценарии, м; $x'_{\text{п}i}$ — координата передней кромки вторичного облака, образующегося на l -й стадии поступления опасного вещества в атмосферу в i -м сценарии, м; S'_{yi} — горизонтальная дисперсия при рассеянии вторичного облака, образующегося на l -й стадии поступления опасного вещества в атмосферу в i -м сценарии, м; q'_i — расход опасного вещества (газообразного и находящегося в жидкой фазе) во вторичном облаке, образующемся на l -й стадии поступления опасного вещества в атмосферу в i -м сценарии, кг/с; $B'_{эфф i}$ — эффективная полуширина вторичного облака, образующегося на l -й стадии поступления опасного вещества в атмосферу в i -м сценарии, м; $H'_{эфф i}$ — эффективная высота вторичного облака, образующегося на l -й стадии поступления опасного вещества в атмосферу в i -м сценарии, м; $u'_{эфф i}$ — эффективная скорость движения вторичного облака, образующегося на l -й стадии поступления опасного вещества в атмосферу в i -м сценарии, м/с; Γ — гамма-функция; α_b — показатель степенной зависимости скорости ветра от высоты; z_{10} — стандартная высота, на которой задается скорость ветра, принимается равной 10 м.

Следует отметить, что руководящим документом [2] предусмотрена возможность последовательной реализации нескольких стадий аварии. Для каждой из этих стадий рассчитывается свое вторичное обла-

ко. В отдельных случаях может реализоваться только одна стадия аварии.

Из выражений (2) и (3) следует:

в любой фиксированной точке (x, y, z) вторичного облака c'_i не зависит от времени, т.е. остается постоянной величиной в пределах времени существования заданной стадии аварии, при переходе в другую стадию аварии концентрация во всех точках облака изменяет свое численное значение скачкообразно;

распределение концентрации опасного вещества симметрично относительно координатной плоскости yoz , причем существует ядро облака, в пределах которого концентрация зависит только от координаты z .

Необходимо отметить абсурдность условия (4). Концентрация не может быть равной нулю за указанными пределами x , так как в соответствии с документом [2] вторичное облако представляет собой непрерывный поток опасного вещества в смеси с воздухом.

О каком рассеянии опасного вещества может идти речь, если концентрация в любой точке облака не изменяется со временем? Процесс рассеяния опасного вещества в обязательном порядке должен протекать во времени.

При турбулентном режиме никакого ядра быть не может (т.е. b'_i должна равняться нулю). Не реально и симметричное распределение концентрации ОВ в турбулентном потоке воздушных масс.

Определение $c'_{\text{ц}i}$ не соответствует физическому смыслу этого параметра, входящего в выражения (2) и (3). В самом деле, полагая в выражении (2) значение z равным нулю, можно выяснить физический смысл $c'_{\text{ц}i}$ — это концентрация опасного вещества на поверхности земли, а не в центре облака. Концентрация на поверхности земли принимает максимальное значение. Следовательно, выражение (5) не является законом сохранения массы, как это утверждается в документе [2]. Для того чтобы выражение (5) представляло собой закон сохранения массы, необходимо заменить в нем $c'_{\text{ц}i}$ на среднее интегральное значение концентрации по всему облаку.

Выражения (6) и (7) не только не обоснованы, но и противоречат физическому смыслу. В левой части равенств (6) и (7) стоят $B'_{эфф i}$ и $H'_{эфф i}$, значения которых зависят от количества опасного вещества во вторичном облаке, в правой части — S'_{yi} и S'_{zi} , значения которых, как указывается в работе [10], зависят от «состояния атмосферы» и определяются «на основе экспериментальных данных». С математической точки зрения абсурдно приравнивать функции разных аргументов. К тому же в руководящем документе [2] не дается четкого определения используемого понятия «дисперсия».

Числитель в правой части выражения (8) для эффективной скорости движения вторичного обла-

ка упрощается: $\Gamma[(1 + \alpha_b)/\beta] = \Gamma(1) = 1$, поскольку $\beta = 1 + \alpha_b$. Зачем было усложнять вид формулы?

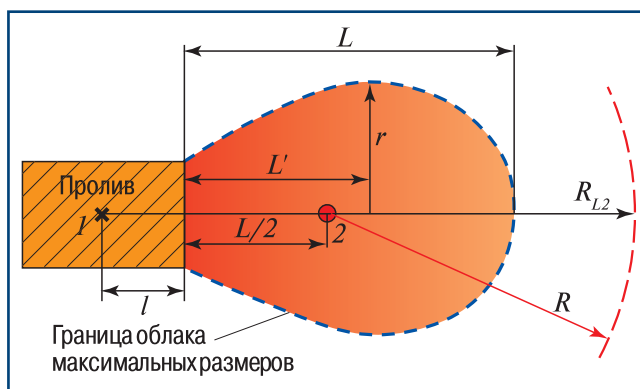
Возникает также вопрос: каким образом в выражениях (7) и (8) попала специальная функция Γ ? Неплохо бы авторам привести вывод этих формул.

В п. 10 [2] отмечается, что методические указания учитывают переменную по высоте скорость ветра, принимая при этом степенную зависимость. Однако самой зависимости не приводится, и в действительности изменение скорости по высоте нигде не используется. Встречающийся в формулах показатель степени α_b — это просто отвлеченное число и никак не характеризует значение скорости. Только в совокупности со степенной зависимостью этот показатель приобретет физический смысл. Но как только будут записаны степенные зависимости изменения скорости по высоте для трех слоев атмосферы (от 0 до 20 м, от 20 до 50 м и свыше 50 м), то сразу же возникнут дополнительные вопросы и обнаружатся противоречия. Приводимые в приложении 7, табл. 7.5 [2] значения показателей степени для трех слоев атмосферы вызывают сомнения. Чтобы их снять, необходимо внести разъяснения или хотя бы поместить ссылку на работы, из которых было бы видно: как, кем и при каких условиях были получены значения показателя степени как функции шероховатости, состояния атмосферы и высоты слоя.

Следует обратить внимание на то, что под ветром понимается горизонтальная составляющая движения воздуха в атмосфере. В действительности же движение воздуха имеет и вертикальную составляющую, которая значительно меньше горизонтальной. Значение скорости ветра существенно меняется по высоте. Около поверхности земли изменение скорости ветра подчиняется логарифмическому закону, а не степенному. Непосредственно на поверхности земли скорость равна нулю. По мере удаления от поверхности земли скорость ветра возрастает и на определенных высотах может достигать 50 м/с и более. Скорость ветра определяют на метеостанциях на определенной высоте (10 м). Движение воздуха в атмосфере имеет турбулентный характер и только в непосредственной близости к поверхности земли существует ламинарный пограничный слой. Следует также отметить, что профиль скорости можно строить только для квазиустановившегося турбулентного потока (регулярная турбулентность). Для случая неустановившегося турбулентного течения построение профиля изменения скорости по высоте вообще невозможно, так как при построении профиля скорости необходимо иметь значения осредненной по времени местной скорости.

Расчеты, формально выполненные для вторичных облаков по формулам (2)–(8), дают «застывшие» формы облаков (т.е. справедливы для любого момента времени). В качестве примера приведем результаты расчетов по методическому руководству [2], которые представлены в работе [6], для случая

пролива на дневную поверхность стабильных жидкостей, таких как нефть, бензин, дизельное топливо и т.п. (см. рисунок [6]).



▲ **Схема распространения вторичного облака ТВС при аварийном выбросе и испарении стабильных жидкостей:**

1 – источник выброса опасного вещества; 2 – источник иницирования ТВС; L – максимальная дальность дрейфа облака ТВС в направлении ветра; l – размер пролива в направлении ветра; L' – расстояние, на котором достигается максимальная ширина облака; r – полуширина облака ТВС; R_{L2} – максимальный размер зоны поражения при взрыве с учетом дрейфа облака ТВС (от источника выброса), R – граница зоны избыточного давления при взрыве ТВС

Авторы работы [6] не указывают, как долго будет держаться это облако (видимо, пока не произойдет взрыв). В соответствии с формулами (2) и (3) образованное вторичное облако неподвижно и вообще не будет рассеиваться. На представленном рисунке приведены зоны действия поражающих факторов, соответствующие взрыву топливно-воздушной среды (ТВС). На открытой поверхности на месте пролива нефти в худшем случае возможны только пожары пролива. Физическое объяснение невозможности взрыва ТВС на открытой поверхности дается в работе [11]. Взрывы ТВС возможны только в закрытых помещениях. Следует отметить, что во всем мире не зафиксировано ни одного случая взрыва облака паровоздушной смеси (образованное от испарения товарной нефти) на открытой поверхности.

Испарение — довольно длительный процесс (исчисляется часами и сутками), и допущение о формировании вторичного облака с концентрацией опасного вещества, равной единице (т.е. облако не разбавлено воздухом), да еще при наличии ветра, не реально. При разливе стабильной жидкости на дневную поверхность происходит ее испарение в атмосферу, и молекулы опасного вещества, попадая в воздух, становятся неотъемлемой частью воздуха. Возможны случаи, когда горючее опасное вещество вообще не будет создавать поражающих факторов, поскольку оно попросту будет рассеиваться в атмосфере, нанося при этом только экологический ущерб.

Выводы

Результаты расчетов последствий аварийных выбросов опасных веществ для аварии, представленных в работах [5, 6] и выполненных с применением программного комплекса ТОКСИ+^{Risk}, не соответствуют основным показателям реальной аварии. Принятая в руководящем документе РД-03-26—2007 [2] модель мгновенного образования первичного облака не отвечает реальным условиям, так как не учитывает процессы, протекающие в период формирования этого облака.

В результате анализа закона распределения концентрации (п. 35 РД-03-26—2007 [2]) опасного вещества для аварий с вторичными облаками выявлены существенные недостатки, которые противоречат физической сущности происходящих процессов.

Методическое руководство РД-03-26—2007 требует существенной переработки для практического применения при проведении анализа риска аварий объектов, на которых обращаются опасные вещества, являющиеся перегретыми жидкостями.

Список литературы

1. *Федеральный закон Российской Федерации № 225-ФЗ «Об обязательном страховании гражданской ответственности владельца опасного объекта за причинение вреда в результате аварии на опасном объекте»*// Рос. газ. — № 5248. — 2010. — 2 авг.
2. *РД-03-26—2007. Методические указания по оценке последствий аварийных выбросов опасных веществ.* — Сер. 27. — Вып. 6. — М.: НТЦ «Промышленная безопасность», 2008. — 120 с.

3. *Антипов В.Н.* Гармонизация методических руководств по анализу риска с федеральными законами// Проблемы анализа риска. — 2009. — Т. 6. — № 3. — С. 28—46.

4. *Антипов В.Н.* Критический анализ методов оценки возможных последствий аварий// Берг коллегия. — 2010. — № 5. — С. 12—15.

5. *Сравнение* результатов расчетов последствий аварийных выбросов опасных веществ по программным комплексам ТОКСИ+ и PHAST/ М.В. Лисанов, К.В. Ефремов, С.И. Сумской, В.А. Пантелеев// Безопасность труда в промышленности. — 2011. — № 2. — С. 56—60.

6. *Сравнение* результатов моделирования аварийных выбросов опасных веществ с фактами аварий/ С.И. Сумской, К.В. Ефремов, М.В. Лисанов, А.С. Софьин// Безопасность труда в промышленности. — 2008. — № 10. — С. 42—50.

7. *Динамика* аварийного опорожнения сосуда, заполненного сжиженным пропаном/ В.Н. Антипов, Н.М. Бухарова, И.А. Скаков, В.Л. Мартынович// Проблемы анализа риска. — 2010. — Т. 7. — № 4. — С. 66—71.

8. *Методы* и методики оценки последствий промышленных аварий// Безопасность труда в промышленности. — 2010. — № 12. — С. 62—63.

9. *Медников Е.П.* Турбулентный перенос и осаждение аэрозолей. — М.: Наука, 1981. — 176 с.

10. *Верификация* методик оценки последствий аварийных выбросов газа от источников продолжительного действия/ С.И. Сумской, А.В. Пчельников, М.В. Лисанов и др.// Безопасность труда в промышленности. — 2005. — № 8. — С. 28—35.

11. *Антипов В.Н., Скаков И.А.* Особенности взрыва топливно-воздушной смеси// Сб. «Безопасность критических инфраструктур и территорий». — Екатеринбург: УроРАН, 2011. — С. 26—28.

antipew72@mail.ru

Отзыв на статью В.Н. Антипова «Анализ некоторых результатов расчетов последствий аварийных выбросов опасных веществ»

М.В. ЛИСАНОВ, д-р техн. наук (ЗАО НТЦ ПБ), **С.И. СУМСКОЙ**, канд. техн. наук (АНО «Агентство исследований промышленных рисков»)

Отдавая дань уважения квалификации, вниманию и усилиям автора статьи хотелось бы заметить, что критика и комментарии как движущая сила развития воспринимаются авторами обсуждаемой модели с благодарностью и конструктивным образом, а именно как повод к анализу и, при необходимости, ревизии положений, которые, по мнению критиков, являются спорными или неверными. С этой точки зрения есть необходимость отделить научные аргументы и контраргументы от ненаучных. Последние часто можно расценивать как популистские. Явно избыточное их количество наводит на мысль о целях публикаций, отличных от научных, о чем можно сожалеть.

Отметим, что затронутые В.Н. Антиповым вопросы многократно и публично обсуждались на на-

учных семинарах «Промышленная безопасность»¹, где, в частности, отмечались субъективность и необоснованность его основных критических высказываний. Тем не менее, учитывая настойчивость автора, проявившуюся в том числе в письме (исх. № 627 от 18.11.2011) руководителю Ростехнадзора с упреком в адрес главного редактора журнала «Безопасность труда в промышленности» и просьбой подействовать в публикации статьи², прокомментируем еще раз высказанные в статье замечания.

К популистской критике следует отнести пугающие цифры ожидаемого числа погибших: «По край-

¹ Например, 19-й научный семинар «Промышленная безопасность», 22 ноября 2010 г. (www.riskprom.ru).

² Никаких указаний главному редактору относительно публикации статьи со стороны руководства Ростехнадзора не поступало. (Примеч. ред.)

ней мере, 90 % людей, обратившихся за медицинской помощью, т.е. почти 500 человек должны быть в числе погибших», которые выглядят, как результат расчетов по методике РД-03-26—2007 (далее — РД). На самом деле в работе [5]¹ такого утверждения нет.

В начале статьи автор заявляет о важности правильного расчета числа погибших при авариях и о необходимости оценки корректности существующих методик по этому параметру. С этой точки зрения автор рассматривает методику РД. Здесь следует отметить, что методика РД не предназначена для расчета числа погибших, ее назначение — определение пространственных размеров зон различного негативного воздействия. Следует понимать, что расчет числа погибших и размеров зон различного воздействия — две разные (хотя и взаимосвязанные) задачи. Кроме того, автор имеет несколько искаженное представление о программном комплексе ТОКСИ+: в основе его лежат более 20 методик, а не только методика РД.

Нельзя согласиться с рассуждениями о смысле термина «верификация» и выводом, что единственно возможный способ верификации — это сравнение результатов расчетов с экспериментальными данными. Заметим, что речь идет о полуэмпирических моделях, т.е. построенных на теоретических предпосылках и модельных параметрах, полученных из эксперимента. Смысл и оправдание развития такого рода моделей состоит в том, что точный расчет, теоретически вполне возможный в отдельных случаях, обычно трудоемок и непрактичен, в особенности учитывая наличие большого числа случайных и неизвестных факторов, а также, справедливо отмеченный В.Н. Антипьевым, каскадный характер турбулентных процессов формирования направления и скорости ветра. Что может свести на нет усилия по точной оценке и расчету той или иной стадии или ситуации. Именно поэтому существует значительное число полуэмпирических моделей и нельзя отказывать в праве сравнивать их, хотя бы во имя научного интереса. Аналогии существуют. Например, в разделе теоретической химии, называемой квантовой химией, считается вполне допустимой верификация полуэмпирических моделей по результатам неэмпирических расчетов.

Автор подробно обсуждает сравнительный расчет истечения и распространения пропана по двум методикам, реализованным в программах ТОКСИ+ и PHAST². При этом делаются неожиданные выводы о несостоятельности одной из модельных

¹ Здесь и далее приведена нумерация источников, соответствующая списку литературы в статье В.Н. Антипьева.

² Напомним, в работе [5] отмечалось, что программный продукт PHAST и его версия для оценки риска SAFETI (PHAST RISK), разработанные международной фирмой Det Norske Veritas (DNV), широко используются для количественной оценки риска в нефтегазовой и химической промышленности более 20 лет (число пользователей PHAST — свыше 450 организаций во всем мире, SAFETI — свыше 150). В России программы DNV успешно применялись для разработки деклараций промышленной безопасности, паспортов безопасности опасных объектов и другой

посылок РД, относящейся к формированию облака в начальный момент, а также определения параметров источника распространения (массовый расход и размер), логически не следующих из сравнения результатов расчетов по указанным программам.

При рассмотрении модельной аварии автор утверждает, что «исходной информации³... явно недостаточно для количественного анализа результатов расчета». Каких данных не хватает не указывается.

Далее автор предлагает «качественный анализ» результатов расчета. Фактически в этом «анализе» дается лишь перечень протекающих физических процессов. Какой результат расчета был проанализирован остается непонятным. В критикуемой автором статье [5] результаты для модельной аварии представлены в виде концентрационных полей, рассчитанных по PHAST и ТОКСИ+. Соответственно и анализ, и критика результатов расчета, если они заявлены, должны касаться именно распределения концентраций. Высказывая очередное сомнение относительно результатов расчета, автор не уточняет: какие именно результаты расчета критикует и в чем собственно состоит эта критика.

Замечание автора относительно рис. 4 [5] связано с опечаткой: рис. 4, б и 4, г при макетировании статьи ошибочно поменяли местами. Поэтому никакой иной «закономерности влияния скорости ветра на границы зон действия поражающих факторов» нет, что при внимательном анализе видно из сравнительных расчетных данных, представленных в таблицах работы [5].

Автор справедливо отмечает, что в статье [5] не рассматриваются барические и тепловые эффекты. В выводах статьи говорится лишь о схожих возможностях для расчета основных физических эффектов и показателей риска, связанных с тепловым, барическим и токсическим поражением людей при авариях. Это несколько другой акцент вывода, и он подтверждается расчетами размеров взрывоопасных зон (они приведены на соответствующем рисунке в работе [6]).

К рациональному зерну критики можно отнести необходимость разработчикам РД уделять в

проектной документации. Сравнение различных версий программ ТОКСИ+ и PHAST приведено в табл. 1 работы [5], откуда видно, что рассматриваемые программы по возможностям расчета основных явлений при авариях и показателей риска практически совпадают. В программных продуктах PHAST для оценки масштабов последствий аварий использованы широко известные в мире методики для отдельных явлений: взрывов топливно-воздушной смеси, огненных шаров и струй (в основном разработанных фирмами Shell и TNO). Для этих методик накоплено большое количество материалов по теоретической базе и верификации с экспериментальными данными.

³ По-видимому, автора не устраивает подлинная информация, которая использована в работах [5, 6]: Collision of Norfolk Southern Freight Train 192 With Standing Norfolk Southern Local Train P22 With Subsequent Hazardous Materials Release at Graniteville, South Carolina, January 6, 2005. NTSB/RAR-05/04 PB2005-916304 Notation 7710A 490, 2005.

публикациях больше внимания объяснению обоснования выбора той или иной модели формирования источника и распространения, а также к интерпретации результатов расчетов и пределов их адекватности. Как выясняется, указанные моменты не всегда очевидны читающей аудитории, что может приводить к недоразумениям. Помимо этого, полезным является уточнение моделей, в частности учет падения давления и охлаждения конденсата при рассмотрении его истечения, что в определенных ситуациях может оказаться важным. Тем не менее, например, учет этих параметров при оценке последствий аварийного выброса сжиженного аммиака с использованием программы FLUENT¹ показал, что полученные расчетные значения зон смертельного поражения аммиаком согласуются с имеющимися данными по аварии в Потчеструме (ЮАР)², а численные результаты имеют хорошее совпадение с расчетами [6] по методике РД-03-26–2007 с использованием программного комплекса ТОКСИ+.

Суть претензий относительно аварии с хлором можно представить в виде:

недоумения, связанного с различием числа жертв, реально имевших место при аварии в Грэнитвилле в 2005 г., и в оценке автора;

вывода о том, что это различие обусловлено несостоятельностью предпосылки о формировании цилиндрической формы первичного облака и об отсутствии его разбавления воздухом в момент формирования.

По первому пункту соображения следующие. Автор, по всей видимости, невнимательно отнесся к интерпретации сравнительных расчетов [5, 6]. Статья В.Н. Антипьева посвящена анализу результатов расчетов, приведенных в работах [5, 6], но в них нет расчетов числа пострадавших (погибших), поэтому непонятно, что вообще критикует автор. Более того, автор предлагает для расчетов погибших собственный подход, он считает, что погибнуть могут 90 % людей, изначально находившихся в зоне, где достигаются токсодозы, соответствующие 90%-ной вероятности гибели. Это очень грубое допущение, сильно завышающее число пострадавших. И естественно, что эти расчеты автора совершенно не совпадают с практикой аварий (в том числе и с аварией в Грэнитвилле). Автор ошибочно считает, что люди, оказавшиеся в зоне поражения, остаются на своих местах и не предпринимают попыток к выходу из зоны: не учитывает роль оповещения населения специальными сигналами, а также действия спасательных служб, которые выводят людей из заблокированных мест,

и, наконец, действия медиков. Кстати, в Грэнитвилле именно четкие действия спасателей и медиков, а также своевременное оповещение об аварии позволили избежать катастрофических последствий. Обычно в числе погибших оказываются от 2 до 10 % людей, изначально находившихся в зоне поражения. Для Грэнитвилля это составило бы от одного до нескольких десятков человек. И эта оценка гораздо более корректна, чем насчитанные автором 500 человек погибших. Помимо прочего, большинство людей, оказавшихся в зоне летальных токсодоз, по всей видимости, находились не на открытом воздухе, а в закрытых помещениях, что нетрудно предположить, учитывая темное время суток и температуру 13 °С. Некоторые из тех, кто все же оказался на открытом воздухе, самостоятельно выходили из зоны поражения, не дожидаясь получения смертельных доз, других выводили пожарные, вероятно используя простейшие средства защиты органов дыхания.

По поводу предположения о форме первичного облака и степени разбавления его воздухом.

Согласно В.Н. Антипьеву первичное облако выброшенного газа, плотность которого выше плотности воздуха, представляет собой сферу (полусферу), но не цилиндр. По его мнению, в работе [8] приведен неудачный пример, так как в опыте в Торней Айленде изначально задавали форму облака — цилиндр.

В экспериментах в Торней Айленде не было избыточного давления в объеме, что позволило рассмотреть ситуацию в чистом виде для определения формы первичного облака при отсутствии резких градиентов давления и, как следствие, разлета облака. Было показано, что облако, имевшее в начальный момент времени форму цилиндра, быстро оседает (начало этого оседания и показано на рисунке [8]). При этом облако имеет низкую высоту и довольно изотропный размер по радиусу, т.е. форму блина-цилиндра, которая сохраняется на начальной стадии рассеяния. Что как раз и должно предоставить возможность «...проследить за изменениями размеров и формы облака в разные моменты времени».

Заметим, что в рассматриваемой ситуации (практически мгновенного испарения значительной доли хлора) первичная форма облака не существенна для оценки такой интегральной величины, как масштаб зоны смертельных токсодоз. Причина в том, что распространение облака происходит на расстояние, значительно превышающее размеры источника, и результат оценки зоны поражения почти не зависит от размеров первичного облака (полусферы или цилиндра), содержащего весь испарившийся хлор, не разбавленный воздухом. Это достаточно очевидно и вытекает из простейших оценок. Несколько странным представляется значение «первоначальной объемной

¹ Старовойтова Е.В., Галеев А.Д., Поникаров С.И. Оценка последствий аварийного выброса сжиженного аммиака с использованием программы FLUENT// Безопасность труда в промышленности. — 2011. — № 12. — С. 47–51.

² Маршалл В. Основные опасности химических производств. — М.: Мир, 1989. — 672 с.

доли хлора в облаке... 0,02 %» и нуждается в более подробном обосновании. Так, диаметр полусферы будет составлять 46 м, если в начальный момент в ней сосредоточен неразбавленный воздухом хлор, и 800 м, если объемная доля хлора 0,02 %. Это представляется невероятным и плохо согласуется с реалиями. Кажется очевидным, что гипотеза о неразбавленном первичном облаке в данном случае более реалистична, хотя, повторим, что для результата оценки размера зоны токсодоз в рассматриваемой ситуации не столь существенна.

Говоря о критике формул, описывающих распределение концентрации, заметим, что разработчики РД не являются авторами используемой модели рассеяния, которая весьма распространена, если не общепотребима, и острие критики логично было бы направить в другом направлении. Модель и формулы, как уже отмечалось, являются полуэмпирическими, со всеми ограничениями и условностями, присущими такого рода моделям. Критику можно было бы признать конструктивной, если бы автор предложил альтернативную модель и приложил бы свои усилия к описанию ее преимуществ.

Что касается следствий, вытекающих из формул, о неизменности концентраций от времени и скачкообразном изменении концентрации, то отметим следующее. Концентрация в фиксированной точке пространства действительно относительно постоянна в течение некоторого времени, что определяется временем действия источника и постулированным в РД постоянством массового расхода поступающего в атмосферу газа. Скачкообразные изменения, которые, как можно предположить, наблюдались автором, связаны с прекращением действия источника, и действительно имеют место при определенных условиях и моделируют достаточно резкую границу облака, которое в дальнейшем тем не менее «расплывается».

Распределение концентрации действительно симметрично относительно оси X в направлении ветра, и концентрация по оси Z максимальна на уровне земли. В этом мы не усматриваем противоречий, в отличие от автора критической статьи. Подобным же образом объясняются и другие комментарии, относящиеся к неизменности формы облака при проливе нефти.

Утверждение В.Н. Антипьева, что процессы рассеяния определяются только молекулярной диффузией: «При отсутствии ветра будет иметь место только молекулярная диффузия. Взаимопроникновение частиц газа и воздуха происходит в соответствии с законами молекулярной физики для газовых сред» — это ошибка в трактовке атмосферных процессов. Автор не учитывает три основных процесса: атмосферную диффузию (турбулентность), действие силы тяжести, генерацию турбулентности наведенными течениями. Взаимосвязь этих процессов дает цилиндрическую форму облака для «тяжелого

газа». Такая форма облака принята как допущение в РД и подтверждена результатами экспериментов.

В.Н. Антипьев сомневается в правильности учета в РД изменений скорости ветра. С одной стороны, по его мнению, они не учитываются, но с другой стороны, учитываются, но непонятным образом. На самом деле для учета изменения скорости ветра по высоте в РД используется переменная α_b : в п. 25 вводится характеристика профиля ветра α_b ; в п. 28 выбирается α_b , значения которой даны в табл. 7.3, далее α_b используется в формулах (94)–(96), (98)–(132). В РД применяются общепринятые профили скорости ветра, неявно (в математическом смысле) их можно видеть в формулах (92)–(93). Именно эти зависимости и аппроксимируются степенной зависимостью, использованной в РД. Специалистам эти зависимости хорошо известны (McRae G.J., Goodin W.R., Seinfeld J.H. *Atmospheric Environment*. — 1982. — Vol. 16. — Iss. 4. — P. 679–696; Flux-Profile Relationships in the Atmospheric Surface Layer/ J.A. Businger, J.C. Wyngaard, Y. Izumi, E.F. Bradley// *Journal of Atmospheric Sciences*. — 1971. — Vol. 28. — Iss. 2. — P. 191–190), поэтому критическая составляющая данного фрагмента несостоятельна.

Автор считает, что «около поверхности земли изменение скорости ветра подчиняется логарифмическому закону». В трактовке атмосферных процессов, далеко не всегда в атмосфере реализуется логарифмический профиль скорости ветра.

Итоговый вывод о непригодности модели РД по логике автора следует также распространить и на программу SAFETI компании DNV. Но он «не замечает» вполне удовлетворительное (с учетом допущений модели) согласие расчетов по РД и программе SAFETI¹ компании DNV, являющейся авторитетной для специалистов по анализу риска аварий во всем мире. В то же время В.Н. Антипьев не представляет ни одного факта, которому противоречили бы результаты расчетов по этим программам, ни каких-либо предложений по более точному расчету (методикам) последствий аварийных выбросов.

В статье имеется немало и других положений, с которыми сложно согласиться. Рассмотрим часть из них.

Автор считает, что процесс рассеяния в обязательном порядке должен протекать во времени: «О каком рассеянии опасного вещества может идти речь, если концентрация в любой точке облака не изменяется со временем?» По сути, автор

¹ Phast Risk — onshore QRA software system// DNV Managing Risk/ URL: <http://www.dnv.com/services/software/products/safeti/safetiqra/phastrisk.asp> (дата обращения 19.03.2012). Сравнение результатов расчетов последствий аварийных выбросов опасных веществ по программным комплексам ТОКСИ+ и PHAST/ М.В. Лисанов, К.В. Ефремов, С.И. Сумской, В.А. Пантелеев// Без-опасность труда в промышленности. — 2011. — № 2. — С. 56–60.

утверждает, что в разделе математики «Уравнения математической физики» для уравнений диффузии (рассеяния) отсутствуют стационарные решения, т.е. при наличии производных вида $\partial^2 c / \partial x^2$ в уравнении всегда должно быть и слагаемое вида $\partial / \partial t$. Математикам и физикам хорошо известен класс решений («стационарные решения»), когда имеют место процессы диффузии (т.е. рассеяния), но изменения во времени не происходят. Примером может служить стационарная струя. Большое количество решений для стационарных струй можно найти, например, в работах Е.В. Бруацкого¹. В этих решениях, как и в РД, «в любой фиксированной точке (x, y, z) [струи]... концентрация не зависит от времени, т.е. остается постоянной величиной в пределах времени существования [струи]...»

Утверждение автора — что «выражение (5)² не является законом сохранения массы», без подтверждения соответствующими выкладками не может рассматриваться как истинное. Кроме того, имеется непонятная логическая связка: «Концентрация на поверхности земли принимает максимальное значение. Следовательно, выражение (5) не является законом сохранения массы...» Необходимо пояснить подробнее, почему из максимума концентрации на земле следует, что уравнение (5) не является законом сохранения массы.

Так же неясен термин «среднее интегральное значение концентрации по всему облаку». Непонятно, чему равна эта концентрация. Автору следует не ограничиваться приведением бездоказательных формулировок, а дать правильные, на его взгляд, формулы, с четкими логическими связями, определениями переменных.

Далее автор утверждает, что выражения (6) и (7) противоречат физическому смыслу, поскольку аргументом $B'_{эфф i}$ и $H'_{эфф i}$ является количество опасного вещества, а аргументами S'_{yi} и S'_{zi} — «состояния атмосферы» и «экспериментальные данные». С математической точки зрения абсурдно приравнивать функции разных аргументов (т.е. $B'_{эфф i}$ и $H'_{эфф i}$, с одной стороны, S'_{yi} и S'_{zi} , с другой). Данное замечание ничего, кроме недоумения, вызвать не может. В математике в непрерывных функциях под аргументом понимается непрерывная независимая переменная. Как трактовать в качестве такой независимой переменной «экспериментальные данные» или «состояния атмосферы» остается загадкой. С другой стороны, даже неудобно напоминать, что в механике сплошных сред сложился стандартный набор независимых переменных: три пространственные переменные и время. В РД

именно эти четыре переменные и являются аргументами. Поэтому нет никаких «приравнений» функций разных аргументов, а есть выражение одной функции через другую, и все функции зависят от одних и тех же аргументов.

Далее автор заявляет:

«Необходимо отметить абсурдность условия (4). Концентрация не может быть равной нулю за указанными пределами x , так как в соответствии с документом [2] вторичное облако представляет собой непрерывный поток опасного вещества в смеси с воздухом».

Формула (4) означает, что если точка x лежит за пределами облака ($x'_{ni} < x$ — передний край облака x'_{ni} не дошел до точки x , или $x < x'_{zi}$ — задний край облака x'_{zi} прошел точку x), то концентрация опасного вещества в окружающей среде равна нулю, т.е. нет облака — нет концентрации. Автор считает такой подход «абсурдностью», потому что «вторичное облако представляет собой непрерывный поток опасного вещества в смеси с воздухом». Объяснение туманное, чему должна равняться концентрация опасного вещества вне облака, если не равна нулю, — непонятно;

«При турбулентном режиме никакого ядра быть не может (т.е. b'_i должно равняться нулю)».

В турбулентных потоках может существовать ядро — зона, где параметры в поперечном сечении постоянны. Этот вопрос хорошо освещен в литературе¹. Причина наличия ядра очевидна: при выбросе из источника конечного размера, когда на месте выброса параметры потока одинаковы в поперечном сечении, турбулентный слой начинает формироваться на границе «выброс — окружающая среда». Этот турбулентный слой развивается постепенно, поэтому какое-то время в потоке будет существовать и зона потока с постоянными параметрами (ядро) и зона с изменением параметров (турбулентный слой). На каком-то расстоянии от источника турбулентные слои смыкаются, и тогда «ядро» исчезает;

«Не реально и симметричное распределение концентрации ОВ в турбулентном потоке воздушных масс».

Турбулентный поток (мгновенное распределение) действительно в каждый момент времени не является симметричным, однако в РД (равно как и в любом другом подходе) не рассматриваются мгновенные значения. Их рассмотрение не имеет практического смысла, поэтому рассматриваются лишь осредненные величины. При этом турбулентность предполагается однородной. Распределение же средней величины при таких допущениях неизбежно приобретет симметричный характер. Собственно, гауссовское распределе-

¹ Бруацкий Е.В. Турбулентные стратифицированные струйные течения. — Киев: Наукова думка, 1986.

² Здесь и далее приведена нумерация формул, соответствующая нумерации в статье В.Н. Антипова.

¹ Абрамович Г.Н. Турбулентные струи// Прикладная газовая динамика. — М.: Наука, 1969. — С. 332.

ние, характерное для множества процессов, в том числе и для атмосферной диффузии, и есть результат такого осреднения. Как хорошо всем известно, гауссовское распределение — симметрично. Таким образом, никакие несимметричные распределения при используемых предпосылках просто невозможны;

«В соответствии с формулами (2) и (3) образованное вторичное облако неподвижно и вообще не будет рассеиваться».

Автор не понимает, как долго будет существовать вторичное облако: «...не указывает, как долго будет держаться это облако (видимо, пока не произойдет взрыв)». Вторичные облака все-таки рассеиваются, об этом мы уже говорили выше. Что же касается «неподвижности» облака, то смысл этого утверждения вообще непонятен. Облако движется с известной скоростью. Перемещения переднего и заднего фронтов облака описываются приведенными в РД формулами (127)–(128). Время же существования вторичного облака формально ничем не ограничено: оно летит и рассеивается до все меньших и меньших концентраций;

«... $c_{ци}^i$ — это концентрация опасного вещества на поверхности земли, а не в центре облака».

В РД считается, что центр облака лежит на поверхности земли, автор же непонятно почему предположил, что центр облака лежит где-то в другом месте, при этом не уточняет где. Это элементарная подмена терминов РД в целях последующего «разоблачения» так называемых ошибок РД.

Стоит также добавить некоторые замечания по тексту критической статьи:

вместо фразы «из выражений (2) и (3) следует...» более правильно писать «Из выражений (2)–(4) следует...», поскольку полностью профиль концентрации описывают именно уравнения (2)–(4), а не (2) и (3);

использование термина «количество опасного вещества во вторичном облаке» не совсем правильно. Более корректно говорить о «расходе опасного вещества во вторичном облаке»;

«в руководящем документе [2] не дается четкого определения используемого понятия «дисперсия», но в РД нет понятия «дисперсия». В РД есть лишь переменная, которая в своем названии содержит слово «дисперсия», поэтому нет надобности давать толкование понятия «дисперсия»;

автор считает, что рис. 4 [5] — это результаты расчета, однако это всего лишь условная схема;

автор настаивает на приведении в РД математических выкладок (например, интегрирования до Г-функций), но РД не учебник и не сборник упражнений, поэтому это требование излишне.

В заключение следует обратить внимание еще на один момент критических высказываний автора: они в большинстве своем абсолютно не-

конструктивны. В одной-двух фразах содержатся категоричные, не подкрепленные никакими аргументами суждения, перечеркивающие целые разделы различных физико-математических дисциплин, при этом не приводится никаких суждений о том, как, по мнению автора, должен выглядеть правильный вариант. Это касается и выводов:

1. Почему отрицательные эмоции автора направлены только в адрес программного комплекса ТОКСИ+, в то время как в работах [5, 6] представлены удовлетворительные результаты сравнительного анализа программных комплексов ТОКСИ+ и PHAST DNV.

2. У какого закона распределения концентрации (если таковой закон существует) и кем выявлены существенные недостатки, которые могут противоречить физической сущности происходящих процессов.

3. Почему бы автору не обосновать «существенность» и не дать конкретные направления переработки методического руководства РД-03-26—2007, поскольку речь идет о действующем нормативном документе Ростехнадзора¹.

Таким образом, мы не можем согласиться с выводами статьи В.Н. Антипьева о непригодности модели РД-03-26—2007 для расчета последствий аварий, связанных с рассеянием опасных веществ в атмосфере, а призываем к более внимательному ее применению. Но признаем необходимость более подробных и тщательных обоснований выбора тех или иных параметров моделей и модельных ситуаций (например, влияние разбавления, учет изменения давления, температуры, расхода, рельефа местности и др.).

В связи с важностью развития конструктивной критики для совершенствования методического обеспечения анализа риска считаем целесообразным:

1. Авторам критических публикаций представлять конкретные факты, противоречащие расчетам, выполненным по этим документам, а также давать конструктивные предложения по их совершенствованию.

2. Обсуждение вопросов совершенствования методических документов проводить в рамках научных конференций и семинаров с участием ведущих специалистов в области оценки риска и моделирования аварий на опасных производственных объектах. ■

¹ РД-03-26—2007 разрабатывали ученые и специалисты надзорных органов более 10 лет. Результаты исследований регулярно с 2003 г. размещали на сайте safety.ru, они были отражены в многочисленных статьях и выступлениях, декларациях промышленной безопасности и иных документах по анализу риска, в том числе в работах по сравнению расчетов с данными аварий и с аналогичными зарубежными методиками. При утверждении РД-03-26—2007 были учтены отзывы более 20 ведущих экспертных и научных организаций (Институт динамики геосфер РАН, НИИ «Атмосфера», Институт вычислительного моделирования СО РАН, ФГУ ВНИИПО МЧС России, ВНИИ ГОЧС и др.).