

УДК 533.27:519.63

Ю. А. СКОБ

Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Украина

РАСЧЕТ ВЕРОЯТНОСТИ ПОРАЖЕНИЯ ЧЕЛОВЕКА НА ОСНОВЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ РАССЕЯНИЯ ТОКСИЧНОГО ГАЗА В АТМОСФЕРЕ

Разработана математическая модель испарения токсичного газа с пятна пролива в результате разрушения емкости хранения сжиженного газа и дальнейшего рассеивания газовой примеси в приземном слое атмосферы. Разработана вычислительная технология определения полей вероятности поражения человека токсичным газом на основе пробит-анализа. Для автоматизации вычислительного процесса табличная зависимость «пробит-функция-вероятность поражения» заменена кусочно-кубическим сплайном. Проведены тестовые расчеты полей вероятности поражения человека, который подвергся воздействию газообразного хлора. Результаты можно использовать для определения суммарного риска техногенного объекта.

Ключевые слова: многокомпонентный газ, испарение сжиженного газа, рассеяние в атмосфере, массовая концентрация примеси, поражающие факторы, пробит-функция, вероятность поражения.

Введение

Технологические процессы предприятий авиационной промышленности включают использование, транспортировку и хранение отравляющих химических веществ (ОХВ) в сжиженном состоянии [1]. Нарушение правил эксплуатации оборудования приводит к его отказам, которые сопровождаются выбросом в атмосферу ОХВ с образованием токсичных облаков [2]. Одним из наиболее опасных видов техногенной аварии является разрушение емкости хранения сжиженного газа (СГ) с образованием пятна пролива [3] (рис. 1). Концентрация ОХВ характеризует отклонение от нормального состава воздуха и является опасным параметром.

Экспозиция обслуживающего персонала промышленного объекта определенным концентрациям ОХВ формирует поражающий фактор – ингаляционную токсодозу. Превышение пороговых значений токсодозы приводит к социальным последствиям – отравлению различной степени тяжести и человеческим жертвам. Поэтому определение риска предприятия для такого рода аварии является важной и актуальной инженерно-практической задачей.

Оценка последствий техногенной аварии включает в себя определение вероятности поражения обслуживающего персонала, который может быть подвергнут воздействию ОХВ, на основе математического моделирования рассеивания токсичной примеси в атмосфере [4].

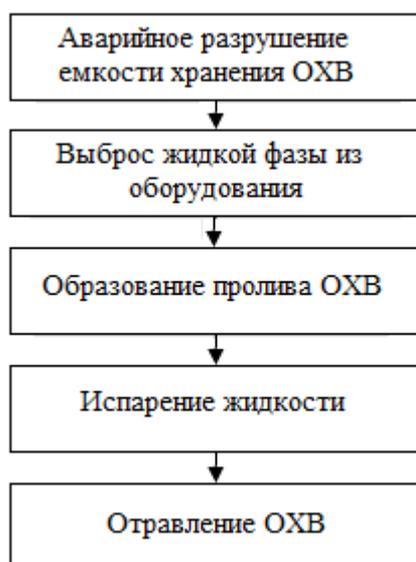


Рис. 1. Развитие техногенной аварии

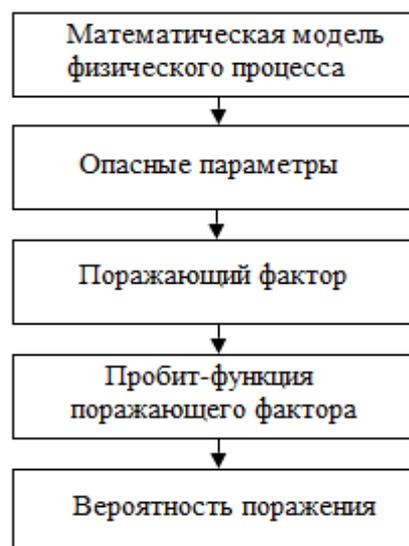


Рис. 2. Схема вероятностной оценки последствий аварии

Математическое моделирование физических процессов выброса и рассеяния вредной примеси в приземном слое атмосферы позволяет осуществить прогноз полей массовой концентрации ОХВ, определить ингаляционную токсодозу и вероятность поражения обслуживающего персонала [5].

Адекватное описание физических процессов смешения нереагирующих газов с воздухом и дальнейшего распространения смеси при истечении струи в открытое пространство или замкнутое помещение с принудительной (или естественной) вентиляцией возможно только с использованием системы нестационарных уравнений Навье-Стокса для сжимаемого газа. Ограниченные возможности современных компьютеров не позволяют эффективно осуществлять прямое численное решение этих уравнений. В настоящее время, численное моделирование турбулентных течений осуществляют путем решения осредненных по Рейнольдсу-Фавру уравнений Навье-Стокса, дополненных моделью турбулентности [6]. Однако большинство моделей турбулентности не описывают с одинаковой степенью адекватности различные типы течений. Особенно это касается течений с интенсивными отрывами потока и/или большими градиентами давления температуры. Поэтому существует необходимость построения новых моделей и расчетных схем для численного моделирования такого рода течений.

Кроме того, современные методики оценки последствий поражения обслуживающего персонала на основе пробит-анализа используют зависимость вероятности от пробит-функции в табличном виде для экспертного анализа [5]. Это не позволяет применить данный подход в автоматическом режиме в компьютерной системе для получения нестационарных полей поражающих факторов и вероятности поражения и требует усовершенствования вычислительной технологии.

Целью данной работы является разработка адекватной математической модели процесса испарения токсичной примеси с поверхности пятна пролива в результате техногенной аварии, формирования токсичного облака и его дальнейшего распространения в приземном слое атмосферы с целью получения пространственно-временных полей поражающего фактора ингаляционной токсодозы и определения по ней полей вероятности поражения человека на основе пробит-анализа.

1. Постановка задачи рассеяния ОХВ

Рассмотрим формирование и движение газовой смеси на открытой промышленной площадке, на которой произошло аварийное разрушение емкости хранения сжиженного газа (рис. 3). Расчетная об-

ласть представляет собой параллелепипед с прямолинейными образующими, расположенными в правой декартовой системе координат (X, Y, Z) с основанием в плоскости XOZ (ось Y ориентирована в направлении противоположном действию сил тяжести Земли). Расчетная область разбивается на пространственные ячейки. Под влиянием окружающей среды СГ испаряется с пятна пролива и поступает в приземный слой атмосферы с суммарной интенсивностью G_{Σ} . Свежий воздух со скоростью ветра поступает через входную грань расчетной области, перемешивается с примесью, образуя газозвудушное облако с массовой концентрацией Q .

Для упрощения математической модели и ускорения компьютерных вычислений принимаем предположение, что физические процессы перехода выбрасываемого в приземный слой атмосферы вещества (вскипание) из жидкого состояния в газообразную фазу проходят мгновенно и в бесконечно тонком по высоте слое. Это допущение несколько огрубляет расчеты, но, в общем, достаточно адекватно позволяет описать процесс попадания газовой примеси в воздух окружающего пространства.

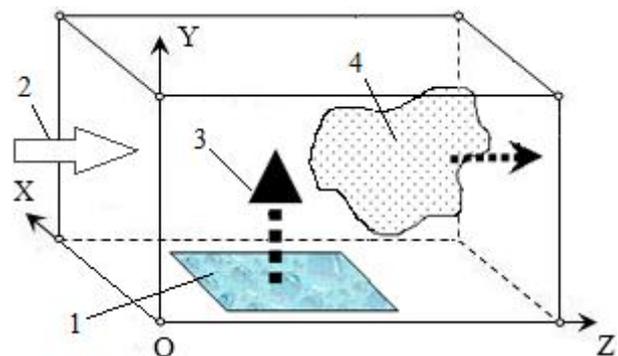


Рис. 3. Схема техногенной аварии:

1 – пятно пролива; 2 – поток воздуха;
3 – примесь; 4 – газозвудушное облако.

Течение газовой смеси в расчетной области будет определяться параметрами окружающей атмосферы, площадью пятна пролива, параметрами газовой примеси, поступающей в результате испарения в атмосферу. В какой-то момент времени испарение может прекратиться и поступления примеси в область не будет.

2. Математическая модель

2.1. Основные уравнения

Описание физических процессов смешения газовых примесей с воздухом и дальнейшего распространения смеси при испарении СГ в открытое пространство или помещение с принудительной (или

естественной) вентиляцией возможно только с использованием системы нестационарных уравнений Навье-Стокса для сжимаемого газа. В настоящее время, численное моделирование турбулентных течений осуществляют путем решения осредненных по Рейнольдсу-Фавру уравнений Навье-Стокса, дополненных моделью турбулентности [6]. Однако большинство моделей турбулентности не описывают с одинаковой степенью адекватности различные типы течений. Особенно это касается течений с интенсивными отрывами потока и/или большими градиентами давления температуры. Предполагается, что основным фактором, влияющим на рассматриваемые физические процессы, является конвективный перенос массы, импульса и энергии. Поэтому достаточно использовать упрощенные уравнения Навье-Стокса, которые получены отбрасыванием вязких членов в уравнениях движения газовой смеси (эйлеров подход с источниковыми членами) [5].

Расчетная область разбивается на пространственные ячейки, причем размеры граней подбираются в соответствии с характерным размером особенностей расчетной области (шероховатости обтекаемой поверхности, размерностью обтекаемых объектов). Полная система уравнений, описывающая нестационарное трехмерное течение двухкомпонентной смеси газов в данной постановке имеет вид [7]:

$$\frac{\partial \bar{a}}{\partial t} + \frac{\partial \bar{b}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{c}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{d}}{\partial z} = \rho \bar{f}, \quad (1)$$

где \bar{a} , \bar{b} , \bar{c} , \bar{d} , \bar{f} – вектор-столбцы вида:

$$\bar{a} = [\rho, \rho u, \rho v, \rho w, E]^T, \quad (2)$$

$$\bar{b} = [\rho u, P + \rho u^2, \rho uv, \rho uw, (E + P)u]^T, \quad (3)$$

$$\bar{c} = [\rho v, \rho vu, P + \rho v^2, \rho vw, (E + P)v]^T, \quad (4)$$

$$\bar{d} = [\rho w, \rho wu, \rho wv, P + \rho w^2, (E + P)w]^T, \quad (5)$$

$$\bar{f} = [0, 0, -g, 0, -g\nu]^T, \quad (6)$$

где t – время;

u, v, w – составляющие вектора скорости \bar{q} ;

P, ρ – давление и плотность;

E – полная энергия единицы объема газовой смеси:

$$E = \rho \left(e + \frac{1}{2} (u^2 + v^2 + w^2) \right), \quad (7)$$

где e – внутренняя энергия единицы массы газа; компоненты вектора;

\bar{f} – суть проекции распределенных объемных источников;

g – ускорение свободного падения.

Закон переноса компоненты смеси с учетом скорости диффузии, имеет вид [5]:

$$\frac{\partial(\rho Q)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u Q)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v Q)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w Q)}{\partial z} = \rho_Q, \quad (8)$$

где Q – относительная массовая плотность примеси (отношение плотности газообразного вещества примеси к плотности смеси),

ρ_Q – интенсивность изменения плотности примеси вследствие диффузии в соответствии с законом Фика $\rho_{Q_t} = \text{div}(\rho \vartheta_D \text{grad} Q)$ (коэффициент диффузии ϑ_D определяется по методике, предложенной М. Е. Берляндом [5]).

Система уравнений (1-8) является незамкнутой. Дополним ее уравнениями, определяющими теплофизические свойства компонент смеси. Для идеального политропного газа величина e связана с P и ρ смеси зависимостью: $e = \frac{P}{(k-1)\rho}$.

2.2. Граничные условия

Граничные условия на входе будем задавать на поверхностях тех граней, примыкающих к границам расчетной области, через которые в расчетную область поступает атмосферный воздух. Набегающий поток на входе определяется величинами:

– полной энтальпии

$$I_{00} = \frac{k}{k-1} \frac{P}{\rho} + \frac{u^2 + v^2 + w^2}{2}; \quad (9)$$

– функции энтропии

$$S_0 = \frac{P}{\rho^k}; \quad (10)$$

– направлением вектора скорости потока (углами $\alpha_x, \alpha_y, \alpha_z$) относительной массовой плотностью примеси Q .

Параметры потока на входе определяются из равенств (9, 10) с учетом заданных $\alpha_x, \alpha_y, \alpha_z$ с привлечением соотношения для «левого» инварианта Римана [7]. На непроницаемых участках, ограничивающих расчетную область поверхностей, выполняются условия «непротекания»: $q_n = 0$, где \bar{n} – вектор нормали к рассматриваемой границе. На поверхности испарения выставляется условие протекания примесного газа с заданной интенсивностью. Граничные условия на выходе будем задавать на поверхностях тех граней конечно-разностных ячеек, которые примыкают к границам расчетной области и через которые предполагается вытекание или втекание смеси. В выходных областях, кроме атмосферного давления P_A , задаваемого либо взятого из эксперимента, использовались соотношения для «правого» инварианта Римана [7].

2.3. Начальные условия

В начальный момент времени во всех «газообразных» ячейках расчетной области принимаются параметры окружающей среды. В ячейках с испарением или истечением газа задается закон изменения расхода примеси.

2.4. Алгоритм численного решения

Векторное уравнение (1) является следствием законов сохранения массы, импульса и энергии, которые могут быть представлены в интегральной форме для каждой расчетной ячейки:

$$\frac{\partial}{\partial t} \iiint_V a dV + \iint_{\sigma} \hat{A} d\sigma = \iiint_V \rho f dV, \quad (11)$$

где V – объем элементарной расчетной ячейки;

σ – ограничивающая поверхность данной ячейки, которая имеет внешнюю нормаль \vec{n} ($\vec{\sigma} = \sigma \vec{n}$);

\hat{A} – тензор плотности потока консервативных переменных a , столбцами которого являются векторы \vec{b} , \vec{c} , \vec{d} , соответственно.

Закон переноса компоненты смеси (8) может быть также представлен в интегральной форме для каждой расчетной ячейки:

$$\frac{\partial}{\partial t} \iiint_V \rho Q dV + \iint_{\sigma} \rho Q d\sigma = \iiint_V \rho Q dV. \quad (12)$$

2.5. Метод расчета

Компьютерное решение системы фундаментальных уравнений газовой динамики для смеси, дополненной законами сохранения массы примесей в интегральной форме, получено явным методом С. К. Годунова [7]. Для аппроксимации уравнений Эйлера применяется конечно-разностная схема первого порядка. Центральные разности второго порядка используются для диффузионных источников членов в уравнениях сохранения примесей. Простая интерполяция давления применяется в вертикальном направлении. Метод Годунова характеризуется робастным алгоритмом, устойчивым к большим возмущениям параметров потока (например, давления).

В основе метода расчета лежит идея использования для построения разностной схемы точных решений уравнений с кусочно-постоянными начальными данными. Для гиперболической системы такие решения распадаются на совокупности независимых и сравнительно просто рассчитываемых деталей – «распадов разрывов».

Уравнения (11, 12) допускают возникновение и существование поверхностей разрыва двух видов: ударных волн и тангенциальных разрывов. Функции, удовлетворяющие уравнениям (11, 12), можно рассматривать в качестве обобщенных решений уравнений газовой динамики. Использование интегральных законов сохранения массы, импульса, энергии и концентрации газообразной примеси в качестве исходных для построения разностных уравнений обеспечивает построение разрывных решений без выделения разрывов.

Совокупность газодинамических параметров во всех ячейках в момент времени t^n представляет собой известное решение на временном слое с индексом n . Параметры в момент времени $t^{n+1} = t^n + \tau$ (на слое $n+1$) рассчитывались посредством применения явных разностных аппроксимаций для соотношений в рамках интегроинтерполяционного метода С. К. Годунова [7]. На первом этапе непрерывное распределение параметров заменяется кусочно-постоянными среднеинтегральными значениями в каждой расчетной ячейке. При этом границы ячейки представляют собой неустойчивые поверхности произвольного разрыва, которые распадаются на устойчивые волновые элементы: ударную волну, контактную поверхность и волну разрежения. Для каждого такого разрыва определяются потоки массы, импульса и энергии через грани газовых ячеек. Устойчивость конечно-разностной схемы обеспечивается выбором величины шага по времени τ .

2.6. Моделирование испарения

В результате дискретизации расчетной области поверхность пятна пролива СГ также разбивается на ряд конечно-разностных ячеек у земли в плоскости XOZ (рис. 4). При равномерном разбиении в направлении осей OX и OZ площади граней «испаряющих» ячеек одинаковы. Сделав допущение о равномерности потока с пятна пролива, можно определить индивидуальный заданный расход газа для каждой из «вентиляционных» ячеек $G_i = G_{\Sigma}/k$, где k – количество ячеек, примыкающих к пятну пролива сжиженного газа.

Пусть имеется газовая среда, для которой термодинамические величины – давление p , плотность ρ , внутренняя энергия единицы массы ε – подчиняются уравнению состояния. Предположим, что в начальный момент времени t для левого полупространства $x < 0$ среда характеризуется значениями параметров p_1, ρ_1, u_1 , а для правого полупространства $x > 0$ – значениями p_2, ρ_2, u_2 (здесь u – компонента

вектора скорости в направлении координаты x , а другие ее компоненты равны нулю) (рис. 5).

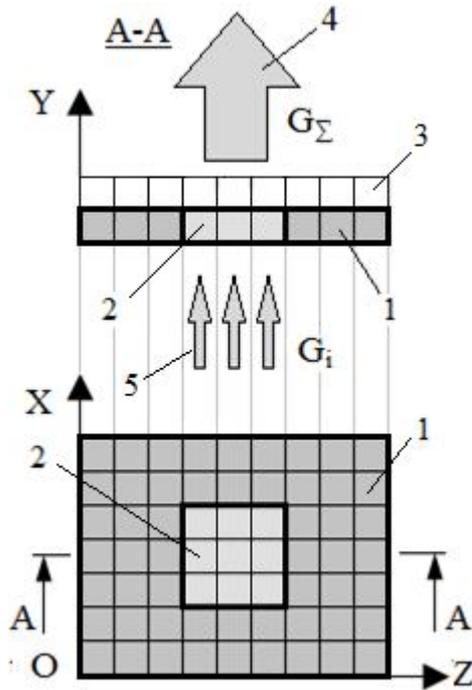


Рис. 4. Дискретизация пятна пролива:
1 – земля; 2 – ячейки пятна пролива; 3 – ячейки атмосферы; 4 – суммарный расход газа через пятно пролива; 5 – расход газа через одну ячейку пятна пролива

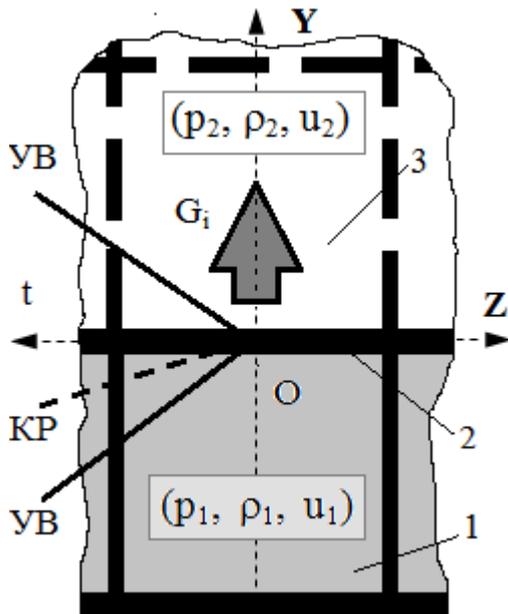


Рис. 5. Расчетная схема для определения расхода испарения газа: 1 – фиктивная вычислительная ячейка со стороны пятна пролива; 2 – граница «пролив-воздух»; 3 – воздушная расчетная ячейка

Если привести в соприкосновение две массы газа, сжатые до различных давлений (p_1 – давление со стороны пятна пролива, p_2 – давление со стороны

атмосферы), и убрать перегородку между ними, то поверхность их соприкосновения будет поверхностью разрыва в начальном распределении давления. Начальный разрыв распадается на несколько разрывов, которые с течением времени будут отходить друг от друга. На контактном разрыве испытывает скачок плотность, а значит, и внутренняя энергия (R_1, E_1 – для левой и R_2, E_2 – для правой областей), а давление P и поперечная компонента скорости U непрерывны. В свою очередь, эти области отделены от невозмущенных областей с параметрами (p_1, ρ_1, u_1) снизу («слева») и (p_2, ρ_2, u_2) сверху («справа») либо ударной волной УВ или волной разрежения ВР.

Решая задачу распада разрыва на грани конечно-разностной ячейки, примыкающей к вентиляционному проему, можно определить плотность R и скорость U , а значит, и индивидуальный расход газа G_i через рассматриваемую грань. Используя метод итераций, можно подобрать давление p_2 таким образом, чтобы расчетный расход газа G_i отличался от заданного G_3 на наперед заданную малую величину ϵ (рис. 6).

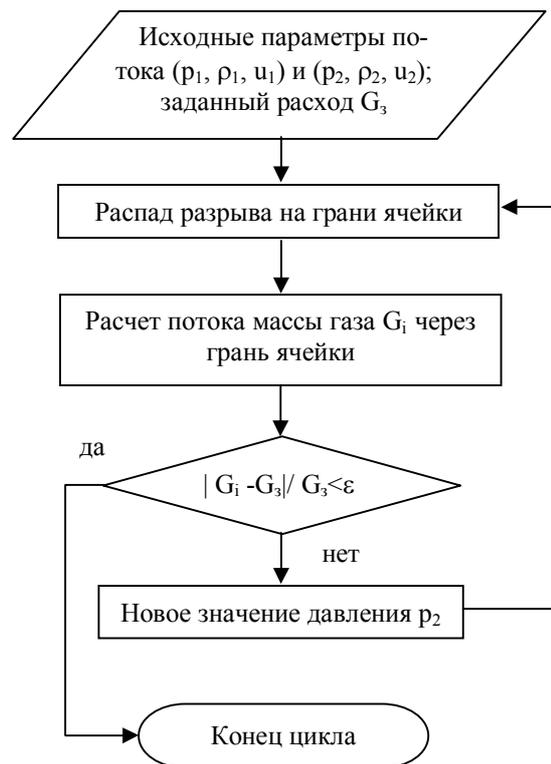


Рис. 6. Итерационный алгоритм подбора противодавления в текущий момент времени процесса испарения

Тестирование такого итерационного алгоритма показало быструю сходимость процесса подбора давления «испарения» и незначительное увеличение общего времени нестационарного расчета движения

газовой смеси в расчетной области. Так как информация о предыдущем шаге итерации по времени запоминается в специальной структуре данных, то итерационный процесс подбора противодействия в процессе общего расчета ускоряется.

2.7. Интерполяция функции интенсивности испарения

При моделировании испарения с пятна пролива интенсивность «выброса» примеси в газовой фазе в атмосферу обычно принимают постоянной $G = \text{const}$ (рис. 7).

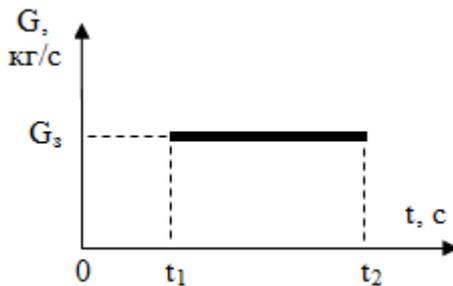


Рис. 7. Постоянный закон интенсивности испарения: t_1, t_2 – время начала и конца процесса испарения; G_3 – заданная интенсивность испарения

Если имеется суммарная масса m пролитого СГ и время t_1 начала и t_2 конца процесса испарения, тогда текущая интенсивность испарения может быть найдена из соотношения

$$G = m / (t_2 - t_1) = \text{const}. \quad (13)$$

Иногда закон испарения $G_3 = f(t)$ (рис. 8) задан табличной функцией, которая получена либо из эксперимента, либо с помощью аналитической модели. В этом случае возникает проблема интерполирования таблично-заданной функции. При выборе подходящего метода интерполирования, следует учитывать возможный сложный характер функции и неравномерность расположения узлов интерполяции [8].

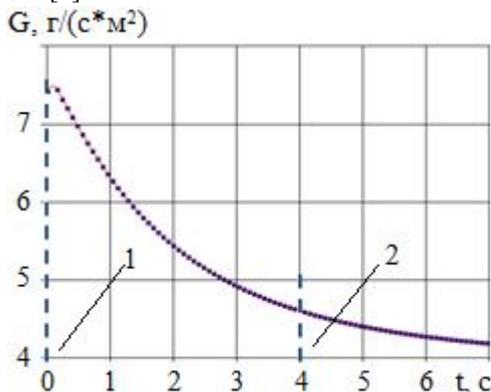


Рис. 8. Интерполирование интенсивности испарения кусочно-кубическим сплайном: 1 и 2 – начало и конец испарения

В работе [9] Ю. К. Чернышев провел аналитический обзор наиболее известных методов интерполирования (метод конформных отображений, эрмитовы сплайны, сплайн Безье), рассмотрел их преимущества и недостатки и пришел к выводу, что наиболее подходящими являются кусочно-кубические эрмитовы сплайны. Ю. К. Чернышев ввел дополнительные промежуточные узлы интерполяции и доказал, что данный прием устраняет колебания знака второй производной.

Вспользуемся кусочно-кубическим эрмитовым сплайном, обобщенным Ю. К. Чернышевым для описания зависимости интенсивности испарения от времени. Выше на графике представлены результаты интерполирования выбранным методом табличной функции удельной интенсивности испарения от времени. Анализ полученного графика позволяет сделать вывод о пригодности использования кусочно-кубического эрмитового сплайна при моделировании процесса испарения СГ с поверхности пролива с переменной интенсивностью. Кроме того, данный сплайн можно использовать в процессе получения полей вероятности поражения человека с использованием пробит-функций. Обычно в инженерной практике получение вероятности поражения исследователем происходит визуально с использованием таблицы зависимости вероятности от пробит-функции поражающего фактора. Это неудобно, и не позволяет использовать данный аппарат интегрированным в компьютерную систему оценки техногенной безопасности.

В основе лежит методика Х. Акимы построения нелинейных приближений первой производной в узлах интерполирования и ее обобщения [10]. Для приближения производной в узлах интерполирования предлагается формула:

$$P_i = \frac{D_{i-1}\varphi(D_{i+1} - D_i) + D_i\varphi(D_{i-1} - D_{i-2})}{\varphi(D_{i+1} - D_i) + \varphi(D_{i-1} - D_{i-2})}, \quad (14)$$

$$\text{где } D_i = \frac{y_{i+1} - y_i}{x_{i+1} - x_i};$$

$\varphi(x)$ – любая четная функция, возрастающая на положительной полуоси и равная нулю при $x=0$.

После того, как непротиворечивым образом построены приближения производных в узлах, на интервале интерполирования достаточно задать функцию со второй производной, заведомо сохраняющей знак. Такой функцией может служить кусочно-параболический интерполяционный сплайн, дробно-рациональный сплайн или обобщенный эрмитов сплайн.

Предположим, интерполируемая на интервале $[0, 1]$ функция задана в точках $t_0=0$ и $t_1=1$ нулевыми значениями, а производные в концах интервала равны соответственно $p_0>0$ и $p_1<0$. Всегда можно найти

интерполирующую функцию, составленную из двух парабол, сшитых в некоторой точке внутри заданного интервала вместе с первыми производными и удовлетворяющую заданным краевым условиям [10]. Точку сшивания можно всегда выбрать так, чтобы кусочно-постоянная вторая производная на участках непрерывности была отрицательна.

В работе [10] показано, что постоянный знак второй производной в тех же условиях можно так же обеспечить, выбрав интерполирующую функцию в виде гиперболы:

$$f(t) = \frac{p_0 p_1 t(t-1)}{p_0 t + p_1 (t-1)}, \quad (15)$$

где дано доказательство того, что обычные эрмитовы сплайны третьей степени допускают обобщение, позволяющее обеспечить желаемое постоянство знака второй производной на интервале интерполирования:

$$g(t) = \frac{t(t-1)}{1-st(t-1)} [p_0(t-1) + p_1 t], \quad (16)$$

где $s = \min(0, p_0/p_1 + 2, p_1/p_0 + 2)$.

Каждый из описанных методов обладает своими достоинствами и недостатками в практике программирования для описания профилей сложной формы, задаваемых набором узлов (x_i, y_i) графика однозначной функции $y=f(x)$ и функций распределения, но неизменно обеспечивает отсутствие осцилляций между узлами интерполирования и неожиданных выбросов, зачастую сопровождающих интерполирование с помощью столь популярных кубических сплайн-функций.

Следует отметить, что построенные таким образом сплайн-функции не образуют линейного пространства: сумма двух сплайн-функций, построенных по наборам узлов (x_i, u_i) , (x_i, v_i) , не совпадает со сплайн-функцией, построенной по набору узлов (x_i, u_i+v_i) .

Проблема устранения паразитических осцилляций актуальна и в случае применения векторных сплайн-функций. Предположим, некий плоский профиль лопатки компрессора $g=f(t)$ задан своими узлами: $g_i=f(t_i)$, $i=0, 1, 2, \dots, n$. Пусть также известно, что для некоторого интервала изменения параметра t кривизна имеет один и тот же знак. Векторный эрмитов сплайн на отдельном участке интерполирования $t \in [0, 1]$ может быть записан в виде:

$$\Phi(t) = r_0(1-3t^2+2t^3) + r_1(3t^2-2t^3) + t(1-t)(p_0(1-t)-p_1 t), \quad (17)$$

где r_0, r_1, p_0, p_1 – соседние узлы интерполирования и касательные векторы в них.

3. Вероятностная оценка безопасности

В результате моделирования рассеяния токсичной газовой примеси в атмосфере можно получить функции изменения во времени и пространстве массовой концентрации примеси Q . На основании этого определяется опасность воздействия ОХВ на обслуживающий персонал (рис. 2).

Рассмотрим вычислительную технологию определения вероятности поражения. Пусть интегральная степень воздействия t является случайной, удовлетворяющей нормальному закону распределения с математическим ожиданием равным 5 и дисперсией равной 1. В этом случае величина вероятности поражения P (измеряется в долях единицы) может быть оценена по следующей формуле

$$P = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{\text{Pr}} e^{-\frac{1}{2}(t-5)^2} dt. \quad (18)$$

С другой стороны, интегральную степень воздействия t можно оценить с помощью уравнения регрессии вида $t = a + b f(\bar{x})$, где $\bar{x} = \{x_k\}$ – количественные оценки поражающих факторов, a, b – коэффициенты уравнения регрессии.

Задавая верхний предел интеграла (18) (пробит-функцию $P_t = t|_{\bar{x}}$), можно определить вероятность поражения. При воздействии отравляющего химического вещества (ОХВ) на персонал техногенного объекта основным поражающим фактором является ингаляционная токсидоза D – интеграл по времени концентрации ОХВ в воздухе

$$D = \int_0^{\tau_3} Q^n dt, \quad (19)$$

где τ_3 – время экспозиции (время, за которое набирается ингаляционная токсидоза), c ;

Q – пространственно-временное значение массовой концентрации ОХВ, ppm;

n – табличный коэффициент (например, для окиси углерода $n=1$).

Пробит-функция для поражения человека вследствие воздействия ингаляции смертельной токсодозы отравляющего химического вещества в общем случае определяется по формуле

$$P_t = a + b \cdot \ln(D), \quad (20)$$

где a и b – табличные полуэмпирические коэффициенты (например, для окиси углерода $a = -37,98$, $b = -3,7$).

Связь пробит-функции и вероятности смертельного поражения человека продемонстрирована на рис. 9.

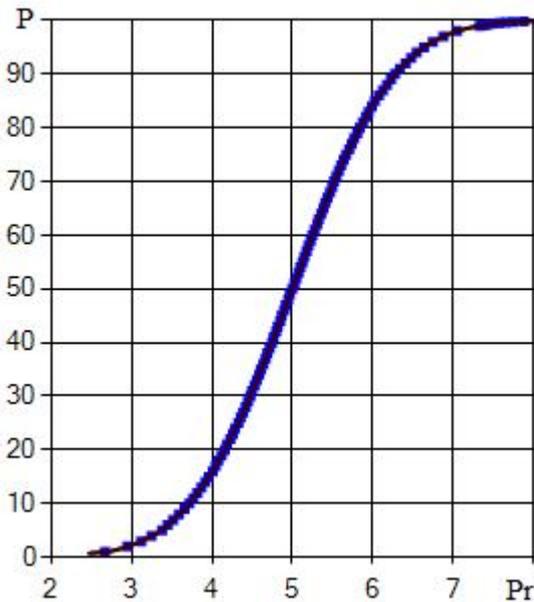


Рис. 9. Интерполирование зависимости вероятности P поражения от пробит-функции Pr поражающего фактора

4. Апробация математической модели

Предложенный алгоритм и метод учета переменной интенсивности испарения сжиженного токсичного газа с поверхности пятна пролива в процессе выброса газовой примеси в приземный слой атмосферы был реализован в виде подсистемы исследовательского программного комплекса «Fige». Комплекс позволяет производить трехмерный ана-

лиз рассеяния токсичных газообразных примесей во времени и пространстве в практически приемлемое время и делать прогноз рисков летального исхода вследствие воздействия испарений токсичного газа на организм человека (рис. 10, 11).

Тестирование разработанной информационной технологии и анализ эффективности алгоритма проводились на примере испарения хлора – токсичного тяжелого газа с пятна пролива в форме окружности радиусом 8 м с координатами центра $x=16$ м, $z=16$ м в расчетной области с габаритами $50 \times 10 \times 50$ м и вариантом по количеству ячеек вдоль координатных осей $50 \times 10 \times 50$. Ветер набегаёт со скоростью 10 м/с под углом 45° к оси OZ . Удельная интенсивность испарения была задана зависимостью, представленной на рис. 8.

Считалось, что испарение начиналось с момента времени $t_1=0$ с и принудительно прекращалось по истечению $t_2=4$ с, например, с помощью заливки пятна пролива специальной пеной. Время окончания расчета было принято 11 с, чтобы дать возможность газо-воздушному облаку покинуть пределы расчетной области.

Температура испаряющейся примеси соответствовала данным вскипания хлора 259 К, молярная масса примеси 0,035 кг/моль.

Пятно пролива после сканирования карты объектов аппроксимируется коллекцией пространственных вычислительных ячеек, на нижней грани которых будут выставлены граничные условия «испарения» токсичной примеси.

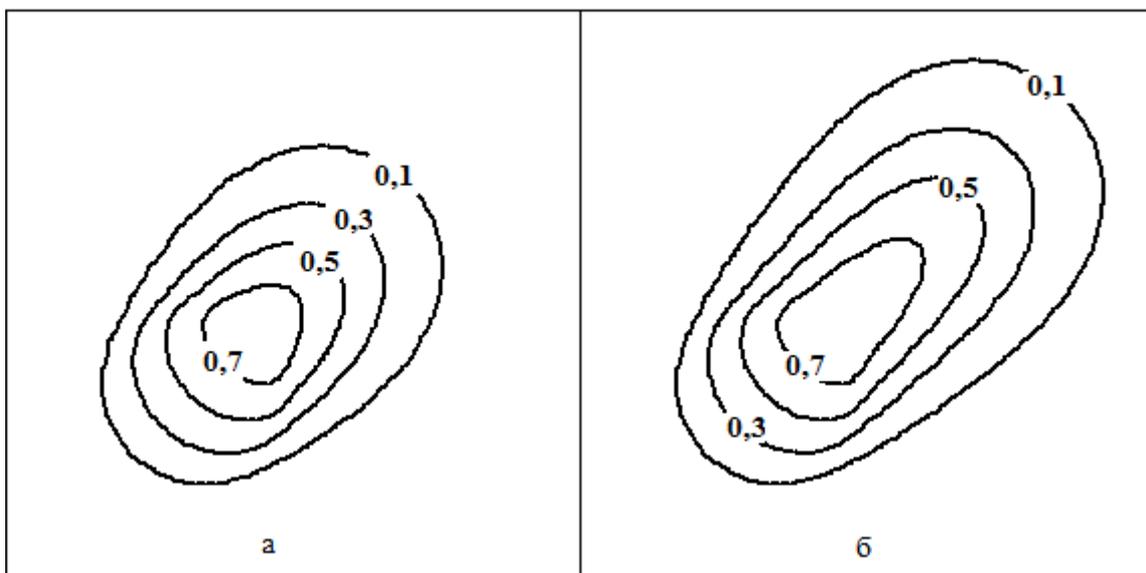


Рис. 10. Поля массовой концентрации токсичной примеси в разные моменты времени t после начала испарения: а – $t = 2$ с; б – $t = 3$ с

Анализ изменения полей массовой концентрации хлора проводился в плоскости XOZ в слое вычислительных ячеек у земли (рис. 10). В процессе рассеяния облако существенно меняет форму и размеры в соответствии с течением газовой смеси, которое вырабатывается исходя из выбранной схемы принудительной вентиляции.

Максимальную зону облако занимает в расчетной области до времени $t_2 = 4$ с, после которого испарение прекращается (в соответствующих ячейках пятна выставляются граничные условия «непротекания») и облако, теряя максимальную концентрацию из-за рассеивания, постепенно покидает расчетную зону (рис. 10).

Поля массовой концентрации хлора можно рассматривать как распределение опасного параметра токсичного газа. Эти данные используются для расчета токсодозы, как поражающего фактора, пробит-функции для хлора и, соответственно, вероятности летального исхода для человека при ингаляции данного токсичного вещества (рис 11).

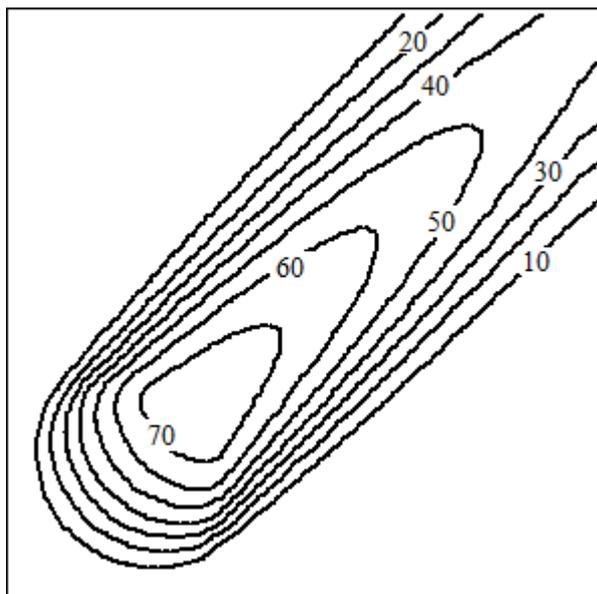


Рис. 11. Поле вероятности летального исхода в момент времени $t=11$ с после начала испарения

Заключение

Разработана математическая модель процесса испарения с переменной интенсивностью сниженного токсического газа с пятна пролива, образовавшегося в результате разрушения емкости хранения, и его рассеяния в приземном слое атмосферы. Модель позволяет получать пространственно-временные распределения концентрации токсичного газа и ингаляционной токсодозы, необходимые для опреде-

ления полей вероятности поражения обслуживающего персонала на основе пробит-анализа.

Разработана вычислительная технология оценки вероятности поражения по значению пробит-функции с использованием кусочно-кубического эрмитового сплайна вместо табличной функции. Технология позволяет осуществлять автоматизированный анализ и прогноз во времени и пространстве условной вероятности поражения персонала, который подвергается воздействию токсичного газа, как показателя безопасности техногенного объекта.

Литература

1. Brauer, R. L. *Safety and Health for Engineers [Text]* / R. L. Brauer. – New Jersey : Wiley, 2015. – 742 p.
2. Hughes, Ph. *Introduction to Health and Safety at Work: The Handbook for the NEBOSH National General Certificate [Text]* / Ph. Hughes, E. Ferrett. – Kidlington, Oxford : Butterworth-Heinemann, 2011. – 608 p.
3. Nolan, Dennis P. *Handbook of Fire and Explosion Protection Engineering Principles: for Oil, Gas, Chemical and Related Facilities [Text]* / Dennis P. Nolan. – Burlington : Gulf Professional Publishing, Elsevier, 2011. – 351 p.
4. Assael, M. J. *Fires, Explosions, and Toxic Gas Dispersions: Effects Calculation and Risk Analysis [Text]* / M. J. Assael, K. E. Kakosimos. – New York : CRC Press, 2010. – 349 p.
5. *Numerical Modeling of Hydrogen Release, Mixture u Dispersion in Atmosphere [Электронный ресурс]* [Text] / E. A. Granovskiy, V. A. Lyfar, Yu. A. Skob, M. L. Ugryumov // 1-st International Conference on Hydrogen Safety. – Pisa (Italy). – 2005. – 11 p. – Режим доступа: <http://conference.ing.unipi.it/ichs2005/Papers/110021.pdf>. – 3.02.2013.
6. *Computational Fluid Dynamics for Engineers [Text]* / B. Andersson, R. Andersson, L. Hakansson et al. – New York : Cambridge University Press, 2012. – 212 p.
7. Toro, E. F. *Riemann Solvers and Numerical Methods for Fluid Dynamics: A Practical Introduction [Text]* / E. F. Toro. – Berlin : Springer, 2009. – 724 p.
8. Knott, G. D. *Interpolating Cubic Splines [Text]* / G. D. Knott. – Boston: Birkhäuser, 2012. – 254 p.
9. Чернышев, Ю. К. *Выпуклые векторные сплайны в применении к профилированию лопаток ГТД [Текст]* / Ю. К. Чернышев // *Авиационно-космическая техника и технология: Сб. научн. трудов. Вып. 21.* – Харьков: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 2000. – С. 16-18.
10. Engeln-Müllges, G. *Numerik-Algorithmen: Verfahren, Beispiele, Anwendungen [Text]* / G. Engeln-Müllges, K. Niederdrenk, R. Wodicka. – Berlin : Xpert.press, 2010. – 756 p.

References

1. Brauer, R. L. *Safety and Health for Engineers*. New Jersey, Wiley Publ., 2015. 742 p.
2. Hughes, Ph., Ferrett, E. *Introduction to Health and Safety at Work: The Handbook for the NEBOSH National General Certificate*. Kidlington, Oxford, Butterworth-Heinemann, 2011. 608 p.
3. Nolan, Dennis P. *Handbook of Fire and Explosion Protection Engineering Principles: for Oil, Gas, Chemical and Related Facilities*. Burlington, Gulf Professional Publishing, Elsevier, 2011. 351 p.
4. Assael, M. J., Kakosimos, K. E. *Fires, Explosions, and Toxic Gas Dispersions: Effects Calculation and Risk Analysis*. New York, CRC Press Publ., 2010. 349 p.
5. Granovskiy, E. A., Lyfar, V. A., Skob, Yu. A., Ugryumov, M. L. Numerical Modeling of Hydrogen Release, Mixture и Dispersion in Atmosphere. *Proceedings of 1-st International Conference on Hydrogen Safety*, Pisa, Italy, 2005. 11 p.
6. Andersson, B., Andersson, R., Hakansson, L. *Computational Fluid Dynamics for Engineers*. New York, Cambridge University Press Publ., 2012. 212 p.
7. Toro, E. F. *Riemann Solvers and Numerical Methods for Fluid Dynamics: A Practical Introduction*. Berlin, Springer Publ., 2009. 724 p.
8. Knott, G. D. *Interpolating Cubic Splines*. Boston, Birkhäuser Publ., 2012. 254 p.
9. Chernyshev, Ju. K. Vypuklye vektornye splajny v primenenii k profilirovaniyu lopatok GTD [The convex splines vector applied to the profiling blade]. Kharkiv, *Aerospace technic and technology*, 2000, no. 21, pp. 16-18.
10. Engeln-Müllges, G., Niederrenk, K., Wodicka, R. *Numerik-Algorithmen: Verfahren, Beispiele, Anwendungen*. Berlin, Xpert.press Publ., 2010. 756 p.

Поступила в редакцию 04.05.2016, рассмотрена на редколлегии 14.06.2016

РОЗРАХУНОК ЙМОВІРНОСТІ УРАЖЕННЯ ЛЮДИНИ НА ОСНОВІ МОДЕЛЮВАННЯ РОЗСІЮВАННЯ ТОКСИЧНОГО ГАЗУ В АТМОСФЕРІ

Ю. О. Скоб

Розроблено математичну модель випаровування токсичного газу з плями проливу в результаті руйнування ємності зберігання зрідженого газу і подальшого розсіювання газової домішки в приземному шарі атмосфери. Розроблено обчислювальну технологію визначення полів ймовірності ураження людини токсичним газом на основі пробіт-аналізу. Для автоматизації обчислювального процесу табличну залежність «пробіт-функція-ймовірність ураження» замінено кусочно-кубічним сплайном. Проведено тестові розрахунки полів ймовірності ураження людини під впливом газоподібного хлору. Результати можна використовувати для визначення сумарного ризику техногенного об'єкту.

Ключові слова: багатокомпонентний газ, випаровування скрапленого газу, розсіювання в атмосфері, масова концентрація домішки, вражаючий фактор, пробіт-функція, ймовірність ураження.

COMPUTATION OF THE HUMAN IMPACT PROBABILITY ON THE BASIS OF MODELING OF TOXIC GAS DISPERSION IN THE ATMOSPHERE

Y. A. Skob

A mathematical model of the toxic gas evaporation from the spill spot as a result of the destruction of the liquefied gas storage tank, and further dispersion of gas admixture in the surface layer of the atmosphere is developed. A computing technology determining the human toxic impact probability on the basis of probit analysis is developed. To automate the process of computing the tabular dependence "probit-function-impact probability" is replaced by a piecewise cubic spline. The test calculations of impact probability fields for the person that is exposed to chlorine gas are provided. The results can be used to determine the overall risk of industrial object.

Key words: multicomponent gas, liquefied gas evaporation, atmospheric dispersion, admixture mass concentration, damaging factors, probit - function, impact probability.

Скоб Юрий Алексеевич – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры информатики, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: yuriy.skob@gmail.com.

Skob Yuriy Alekseevich – Candidate of Technical Science, Assistant Professor of Dept. of Informatics, National Aerospace University named after N. Ye. Zhukovsky "KhAI", Kharkov, Ukraine, e-mail: yuriy.skob@gmail.com.