

УДК 533.27:519.63

Ю. А. СКОБ

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

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СТРУЙНОГО ИСТЕЧЕНИЯ ГАЗОВОЗДУШНОЙ СМЕСИ С РАЗЛИЧНОЙ КОНЦЕНТРАЦИЕЙ ПРИМЕСИ В АТМОСФЕРЕ

Разработана математическая модель струйного истечения и рассеивания в приземном слое атмосферы загрязняющей газовой примеси различной концентрации. Для оценки экологического воздействия загрязнения использована вычислительная технология определения полей вероятности поражения человека токсичным газом на основе пробит-анализа. Проведены тестовые расчёты полей вероятности поражения человека, который подвергся воздействию токсичного газа, выброшенного в атмосферу с различной концентрацией. Результаты можно использовать для определения экологического воздействия загрязняющих атмосферу техногенных объектов.

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

Введение

Современные авиационные газотурбинные двигатели, работающие на углеводородном топливе, являются источниками загрязнения приземного слоя атмосферы различными веществами – продуктами сгорания [1]. Некоторые из них (например, оксиды углерода CO и азота – NO_x) являются токсичными газовыми примесями, ингаляция которых может привести к отравляющему поражению живых организмов. Кроме того, технологические процессы предприятий авиационной промышленности включают использование, транспортировку и хранение отравляющих химических веществ (ОХВ) в сжиженном и газообразном состоянии под высоким давлением [2]. Нарушение правил эксплуатации оборудования приводит к его отказам, которые сопровождаются выбросом в атмосферу ОХВ с образованием токсичных облаков [3]. Наиболее опасными видами техногенной аварии являются разрушение емкости хранения сжиженного газа (СГ) с образованием пятна пролива [4] и струйное истечение в атмосферу газовых смесей с различной массовой концентрацией опасных примесей (рис. 1). Концентрация ОХВ характеризует отклонение от нормального состава воздуха и является опасным параметром, определяющим степень вредного воздействия на окружающую среду. Причём содержание токсичных примесей в смеси может колебаться от ничтожных величин до значительных, что необходимо адекватно учитывать при математическом моделировании рассматриваемых физических процессов выброса ОХВ и дальнейшего его рассеяния в приземном

слое атмосферы с учётом рельефа местности и климатических условий (рис. 2).

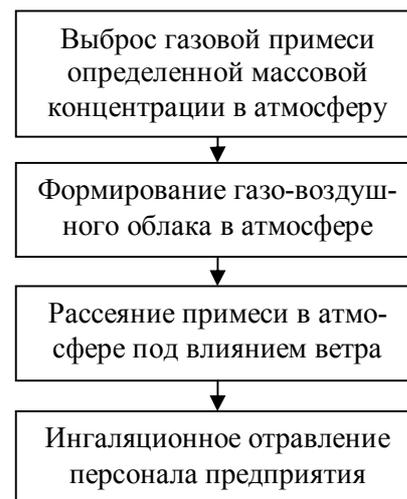


Рис. 1. Развитие техногенной аварии

Экспозиция обслуживающего персонала промышленного объекта определённым 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 математи-

ческого моделирования рассеяния токсичной примеси в атмосфере [5].

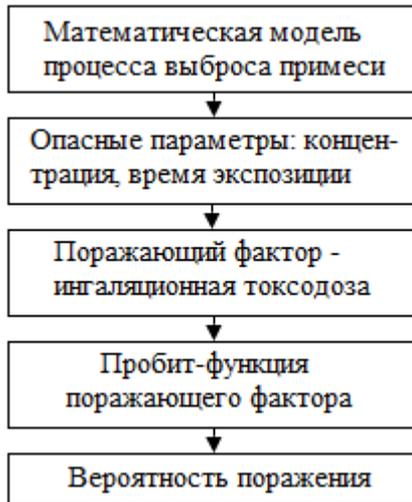


Рис. 2. Схема вероятностной оценки последствий аварии

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 [6].

Адекватное описание физических процессов смешения не реагирующих 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 путём решения осреднённых по Рейнольдсу-Фавру уравнений Навье-Стокса, дополненных моделью турбулентности [7]. 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 расчётных 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 [6]. Это не позволяет при-

менить 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 струйного истечения токсичной примеси различной концентрации, 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 выброса ОХВ

Рассмотрим формирование и движение газовой смеси на открытой промышленной площадке, на которой произошло аварийное разрушение ёмкости хранения высокого давления (рис. 3).

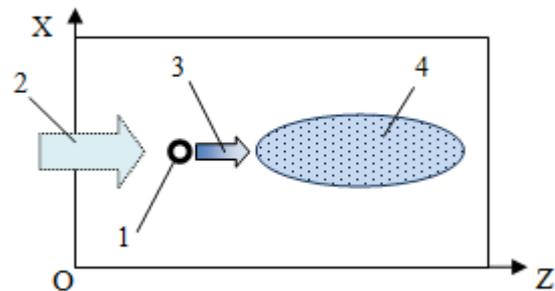


Рис. 3. Схема техногенной аварии:

- 1 – источник загрязнения; 2 – поток воздуха; 3 – струя смеси; 4 – газо-воздушное облако

Расчётная область представляет собой параллелепипед с прямолинейными образующими, расположенные в правой декартовой системе координат (X, Y, Z) с основанием в плоскости XOZ (ось Y ориентирована в направлении, противоположном действию сил тяжести Земли). Расчётная область разбивается на пространственные ячейки. Газовая смесь с массовой концентрацией примеси Q поступает в приземный слой атмосферы с суммарной интенсивностью G_{Σ} . Свежий воздух со скоростью ветра поступает через входную грань расчётной области.

2. Математическая модель

2.1. Основные уравнения

Описание физических процессов смешения газовых примесей с воздухом и дальнейшего распространения смеси при струйном истечении в откры-

тое 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 путём решения осреднённых по Рейнольдсу-Фавру уравнений Навье-Стокса, дополненных моделью турбулентности [7]. 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 упрощённые уравнения Навье-Стокса, которые получены отбрасыванием вязких членов в уравнениях движения газовой смеси (эйлеров подход с источниковыми членами) [6].

Расчётная область разбивается на пространственные ячейки, причём размеры граней подбираются в соответствии с характерным размером особенностей расчётной области (шероховатости обтекаемой поверхности, размерностью обтекаемых объектов). Полная система уравнений, описывающая нестационарное трёхмерное течение двухкомпонентной смеси газов в данной постановке имеет вид [8]:

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

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

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

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

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

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

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

где t – время;

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

P, ρ – давление и плотность;

E – полная энергия единицы объёма 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 распределённых объёмных источников;

g – ускорение свободного падения.

Закон переноса компоненты смеси с учётом скорости диффузии, имеет вид [6]:

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

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

ρQ – 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 определялся по методике, предложенной М. Е. Берляндом [6]).

Система уравнений (1) - (8) является незамкнутой. Дополним её уравнениями, определяющими теплофизические свойства компонент смеси. Для идеального политропного газа величина e связана с

$$P \text{ и } \rho \text{ смеси зависимостью: } e = \frac{P}{(k-1)\rho}.$$

2.2. Граничные условия

Граничные условия на входе будем задавать на поверхностях тех граней, примыкающих к границам расчётной области, через которые в расчётную 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 учётом заданных $\alpha_x, \alpha_y, \alpha_z$ с привлечением соотношения для «левого» инварианта Римана [8]. На непроницаемых участках, ограничивающих расчётную область поверхностей, выпол-

няются условия «непротекания»: $q_n = 0$, где \vec{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 расчётной 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 [8].

2.3. Начальные условия

В начальный момент времени во всех «газообразных» ячейках расчётной области принимаются параметры окружающей среды. В ячейках с испарением или струйным истечением газовой смеси 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 расчётной 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 расчётной 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 расчётной 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 расчёта

Компьютерное решение системы фундаментальных уравнений газовой динамики для смеси, дополненной законами сохранения массы примесей в интегральной форме, получено явным методом С. К. Годунова [8]. Для аппроксимации уравнений Эйлера применяется конечно-разностная схема первого порядка. Центральные разности второго поряд-

ка 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, плотности или концентрации примеси).

В основе метода расчёта 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 обобщённых 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 [8]. На первом этапе непрерывное распределение параметров заменяется кусочно-постоянными среднеинтегральными значениями в каждой расчётной 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 истечения

В результате дискретизации расчётной 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 истечения, можно определить индивидуальный заданный расход газа для каждой из «вентиляционных» ячеек $G_i = G_{\Sigma}/k$, где k – количество ячеек, примыкающих к пятну пролива.

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 её компоненты равны нулю) (рис. 5).

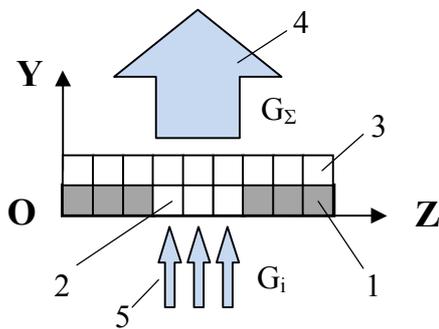


Рис. 4. Дискретизация пятна пролива: 1 – земля; 2 – ячейки пятна пролива; 3 – ячейки атмосферы; 4 – суммарный расход газа через пятно пролива; 5 – расход газа через одну ячейку пятна пролива

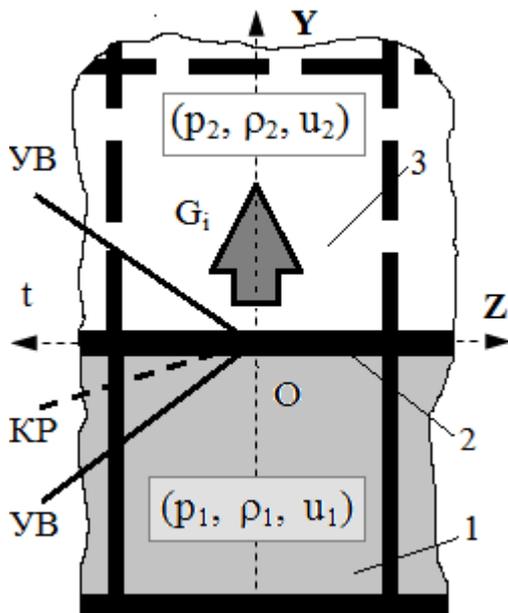


Рис. 5. Расчётная схема для определения расхода испарения газа: 1 – фиктивная вычислительная ячейка со стороны пятна пролива; 2 – граница «пролив-воздух»; 3 – воздушная расчётная ячейка

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 невозмущённых 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 проёму, 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 расчётный расход газа G_i отличался от заданного G_3 на наперёд заданную малую величину ϵ (рис. 6). Итерационный алгоритм подбора противодавления в текущий момент времени процесса испарения представлен в работе [9].

Тестирование такого алгоритма показало быструю сходимость процесса подбора давления «испарения» и незначительное увеличение общего времени нестационарного расчёта движения газовой смеси в расчётной области. Так как информация о предыдущем шаге итерации по времени запоминается в специальной структуре данных, то итерационный процесс подбора противодавления в процессе общего расчёта 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. 6).

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 истечения (испарения) $G_3 = f(t)$ 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 [10].

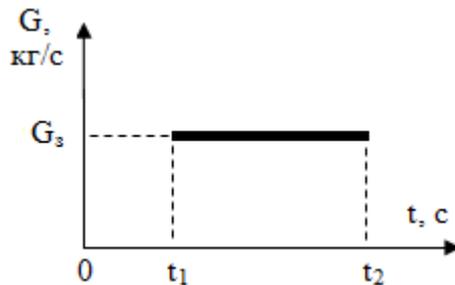


Рис. 6. Постоянный закон интенсивности испарения: t_1 , t_2 – время начала и конца процесса испарения; G_3 – заданная интенсивность испарения

Воспользуемся кусочно-кубическим эрмитовым сплайном, обобщённым Ю. К. Чернышевым для описания зависимости интенсивности испарения от времени [11]. 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 её обобщения [10].

3. Вероятностная оценка безопасности

В результате моделировании 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 (см. рис. 2).

Рассмотрим вычислительную технологию определения вероятности поражения. Пусть инте-

гральная 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

$$P = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{\text{Pr}} e^{-\frac{1}{2}(t-5)^2} dt. \quad (14)$$

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

$$D = \int_0^{\tau_3} Q^n dt, \quad (15)$$

где τ_3 – время экспозиции (время, за которое набирается ингаляционная токсодоза), с;

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

n – табличный коэффициент (например, для окиси углерода $n = 1$, для хлора $n = 2$).

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

$$P_r = a + b \cdot \ln(D), \quad (16)$$

где a и b – табличные полуэмпирические коэффициенты (например, для окиси углерода $a = -37,98$, $b = -3,7$; для хлора $a = -8,29$, $b = 0,92$).

4. Апробация математической модели

Предложенный алгоритм и метод учёта переменной интенсивности истечения газовой смеси с поверхности пятна выброса в приземный слой атмосферы был реализован в виде подсистемы исследовательского программного комплекса «Fige». Ком-

плекс позволяет производить трёхмерный анализ рассеяния токсичных газообразных примесей во времени и пространстве в практически приемлемое время и делать прогноз рисков летального исхода вследствие воздействия ингаляции токсичного газа на организм человека (рис. 7, 8).

Тестирование разработанной информационной технологии и анализ эффективности алгоритма проводились на примере истечения газовой смеси хлора различной концентрации – токсичного тяжёлого газа с пятна выброса в форме окружности радиусом 0,5 м с координатами центра $x=16$ м, $z=16$ м в расчётной области с габаритами $19 \times 5 \times 50$ м и вариантом по количеству ячеек вдоль координатных осей $19 \times 5 \times 50$. Ветер набегает со скоростью 10 м/с под углом 0° к оси OZ. Удельная интенсивность истечения смеси равнялась $7,415 \text{ г}/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$.

Считалось, что выброс начинался с момента времени $t_1=0$ с и прекращался по истечении $t_2=5$ с.

Температура истекающей примеси соответствовала данным вскипания хлора 293 К, молярная масса примеси 0,035 кг/моль.

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

Анализ изменения полей массовой концентрации хлора проводился в плоскости XOZ в слое вычислительных ячеек у земли (рис. 7).

Максимальную по площади и наиболее насыщенную по концентрации примеси зону облако занимает для случая исходной концентрации примеси в выбрасываемой струе $Q = 100\%$ (рис. 7 а). С уменьшением начальной концентрации до $Q = 75\%$ (рис. 7 б) и $Q = 50\%$ (рис. 7 в) площадь опасной зоны уменьшается с заметным снижением насыщенности примеси в облаке, что в конечном итоге должно сказаться и на картине безопасности на промышленной площадке.

Поля массовой концентрации примеси можно рассматривать как распределение опасного параметра процесса выброса и рассеяния токсичного газа. Эти данные используются для расчёта токсодозы, как поражающего фактора, пробит-функции для хлора и, соответственно, вероятности летального исхода для человека при ингаляции данного токсичного вещества (рис. 8).

Как и следовало ожидать, исходя из анализа вариантов струйного истечения смеси с различным концентрационным содержанием примеси, наиболее опасным является вариант выброса чистой примеси $Q = 100\%$ (рис. 8 а). С уменьшением концентрации до $Q = 75\%$ (рис. 8 б) и $Q = 50\%$ (рис. 8 в) площадь зоны с опасными значениями условной вероятности

поражения персонала токсичным газом уменьшается, что приводит в конечном итоге к снижению суммарного риска и благоприятно сказывается на состоянии безопасности рассматриваемого промышленного предприятия.

Заключение

Разработана математическая модель процесса истечения с переменной интенсивностью токсичной газовой смеси с различным содержанием примеси с пятна выброса, образовавшегося в результате разрушения ёмкости хранения, и его рассеяния в приземном слое атмосферы. Модель позволяет получать пространственно-временные распределения концентрации токсичного газа и ингаляционной токсодозы, необходимые для определения полей вероятности поражения обслуживающего персонала на основе пробит-анализа и осуществлять автоматизированный анализ и прогноз состояния безопасности техногенного объекта.

Литература

1. ICAO. *Environmental Protection. Aircraft Engine Emissions [Text] / International Civil Aviation Organization*. – New York : CRC Press, 2008. – 97 p.
2. Brauer, R. L. *Safety and Health for Engineers [Text] / R. L. Brauer*. – New Jersey : Wiley, 2015. – 742 p.
3. 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.
4. 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.
5. 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.
6. *Numerical Modeling of Hydrogen Release, Mixture u Dispersion in Atmosphere [Электронный ресурс] / 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.
7. *Computational Fluid Dynamics for Engineers [Text] / B. Andersson, R. Andersson, L. Hakansson et al*. – New York : Cambridge University Press, 2012. – 212 p.
8. Toro, E. F. *Riemann Solvers and Numerical Methods for Fluid Dynamics: A Practical Introduction [Text] / E. F. Toro*. – Berlin : Springer, 2009. – 724 p.

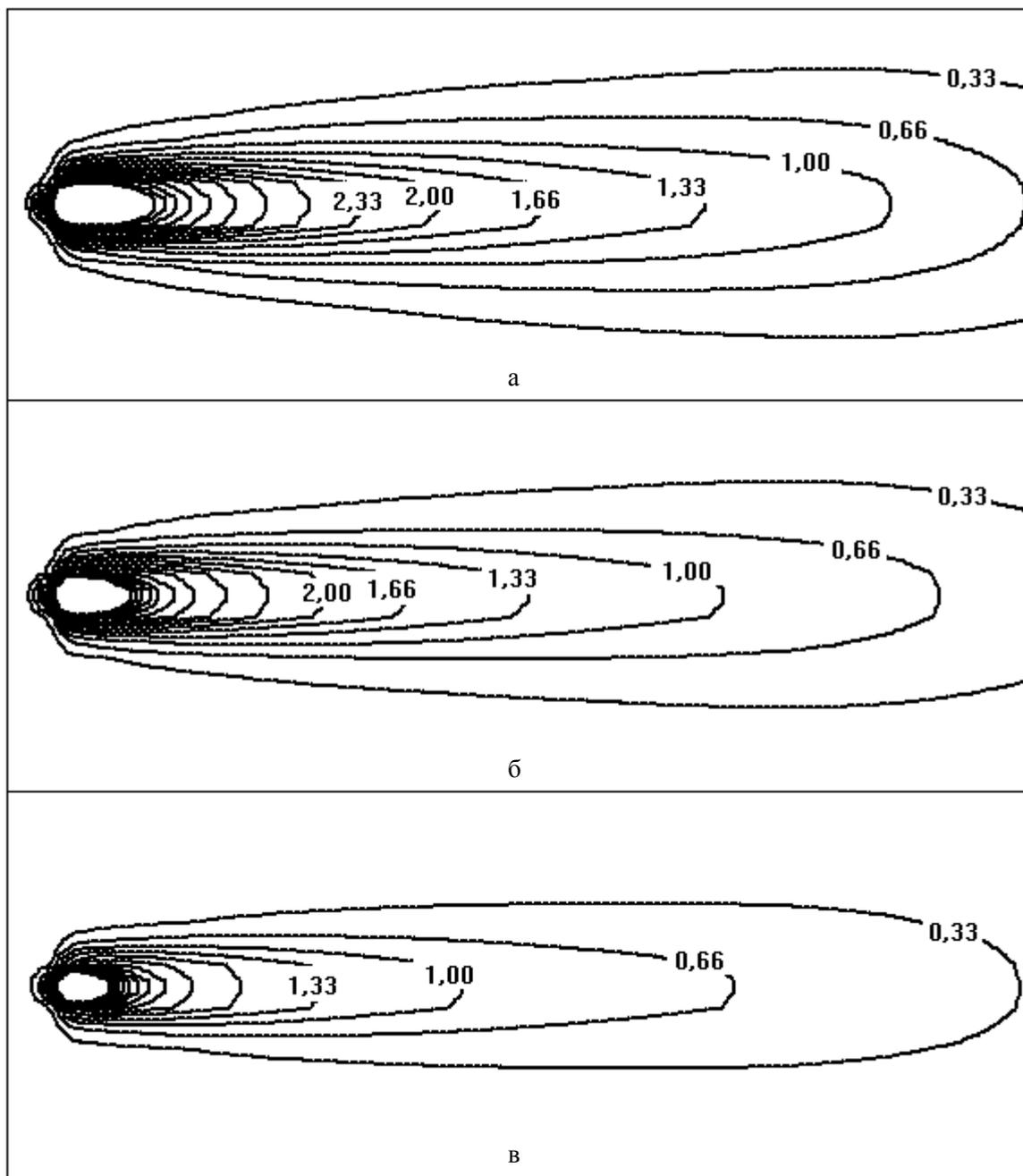


Рис. 7. Поля массовой концентрации примеси в момент времени $t = 5$ с для различной начальной концентрации Q : а – 100%; б – 75%; в – 50%

9. Скоб, Ю. А. Расчет вероятности поражения человека на основе моделирования рассеяния токсичного газа в атмосфере [Текст] / Ю. А. Скоб // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2016. – № 4 (131). – С. 79-88.

10. Knott, G. D. *Interpolating Cubic Splines* [Text] / G. D. Knott. – Boston : Birkhäuser, 2012. – 254 p.

11. Чернышев, Ю. К. Выпуклые векторные сплайны в применении к профилированию лопаток

ГТД [Текст] / Ю. К. Чернышев // *Авиационно-космическая техника и технология* : Сб. науч. трудов Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т». – Вып. 21. – 2000. – С. 16-18.

12. Engeln-Müllges, G. *Numerik-Algorithmen: Verfahren, Beispiele, Anwendungen* [Text] / G. Engeln-Müllges, K. Niederdrenk, R. Wodicka. – Berlin : Xpert. press, 2010. – 756 p.

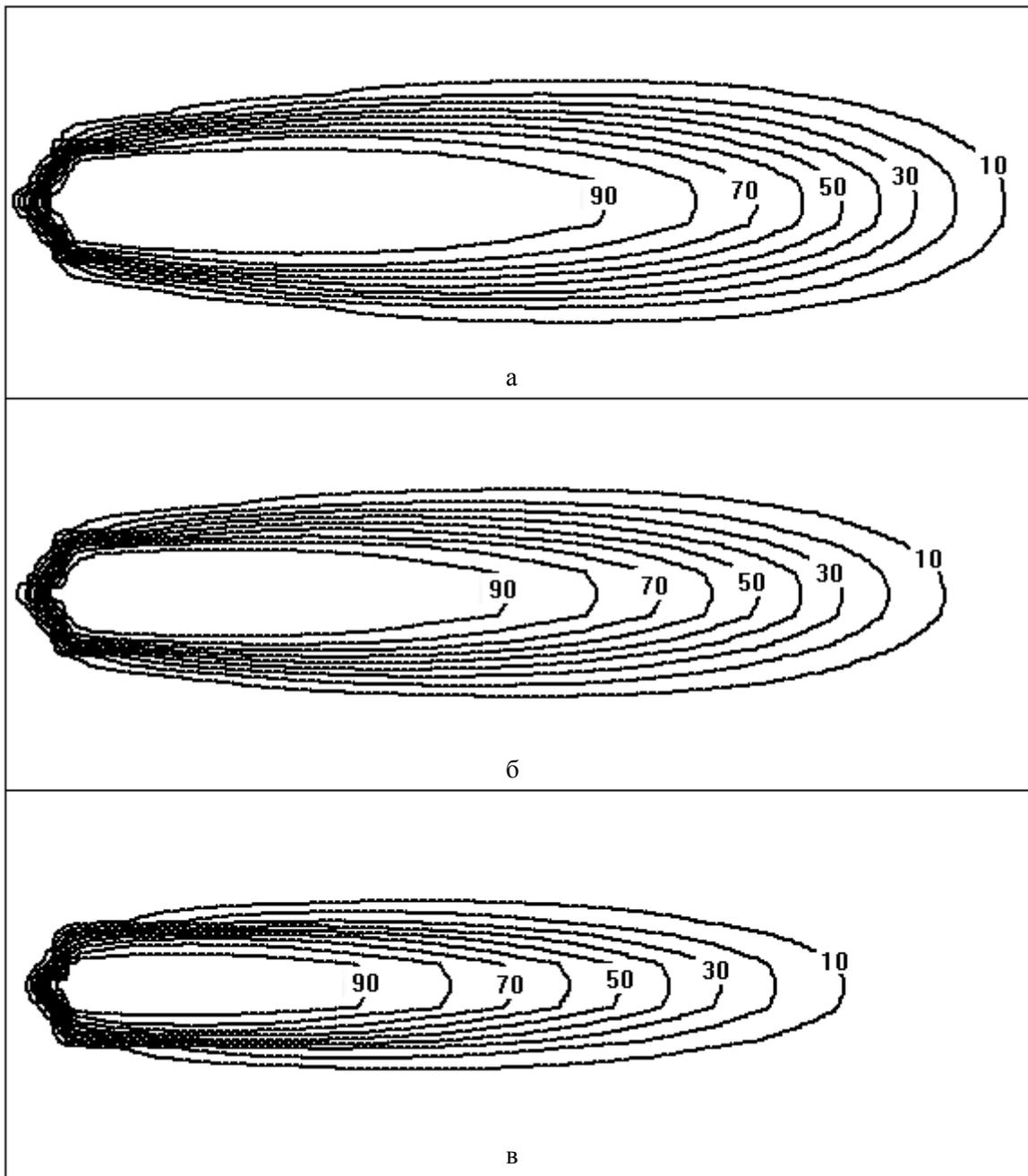


Рис. 8. Поля условной вероятности поражения в момент времени $t = 5$ с для различной начальной концентрации примеси Q : а – 100%; б – 75%; в – 50%

References

1. ICAO. *Environmental Protection. Aircraft Engine Emissions*. New York, CRC Press Publ., 2008. 97 p.
2. Brauer, R. L. *Safety and Health for Engineers*. New Jersey, Wiley Publ., 2015. 742 p.
3. 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.
4. Nolan, Dennis P. *Handbook of Fire and Explosion Protection Engineering Principles: for Oil, Gas, Chemical and Related Facilities*. Burlington, Gulf Professional Publishing, Elsevier Publ., 2011. 351 p.
5. 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.
6. 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 Safe-*

ty, Pisa, Italy, 2005. 11 p. Available at: <http://conference.ing.unipi.it/ichs2005/Papers/110021.pdf> (accessed 3.02.2013).

7. Andersson, B., Andersson, R., Hakansson, L. et al. *Computational Fluid Dynamics for Engineers*. New York, Cambridge University Press Publ., 2012. 212 p.

8. Toro, E. F. *Riemann Solvers and Numerical Methods for Fluid Dynamics: A Practical Introduction*. Berlin, Springer Publ., 2009. 724 p.

9. Skob, Yu. A. Raschet veroiatnosti porazheniia cheloveka na osnove modelirovaniia rasseianiia toksichnogo gaza v atmosfere [Computation of the human impact probability on the basis of modeling of toxic gas

dispersion in the atmosphere]. *Aviacijno-kosmicna tehnika i tehnologia – Aerospace technic and technology*, 2016, no. 4, vol. 131, pp. 79-88.

10. Knott, G. D. *Interpolating Cubic Splines*. Boston, Birkhäuser Publ., 2012. 254 p.

11. Chernyshev, Ju. K. Vypuklye vektornye splajny v primenenii k profilirovaniu lopatok GTD [The convex splines vector applied to the profiling blade]. *Aviacijno-kosmicna tehnika i tehnologia – Aerospace technic and technology*, 2000, no. 21, pp. 16-18.

12. Engeln-Müllges, G., Niederdrenk, K., Wodicka, R. *Numerik-Algorithmen: Verfahren, Beispiele, Anwendungen*. Berlin, Xpert. press Publ., 2010. 756 p.

Поступила в редакцию 4.05.2017, рассмотрена на редколлегии 8.06.2017

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ СТРУМЕНЕВОГО ВИТІКАННЯ ГАЗОПОВІТРЯНОЇ СУМІШІ З РІЗНОЮ КОНЦЕНТРАЦІЄЮ ДОМІШКИ В АТМОСФЕРУ

Ю. О. Скоб

Розроблено математичну модель струменевого витікання і розсіювання в приземному шарі атмосфери забруднюючої газової домішки різної концентрації. Для оцінки впливу забруднення на навколишнє середовище використано обчислювальну технологію визначення полів ймовірності ураження людини токсичним газом на основі пробіт-аналізу. Проведено тестові розрахунки полів ймовірності ураження людини, який піддався впливу токсичного газу, викинутого в атмосферу з різною концентрацією. Результати можна використовувати для визначення екологічного впливу забруднення атмосфери техногенними об'єктами.

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

MATHEMATICAL MODELING OF JET FLOW OF GAS-AIR MIXTURE WITH VARIOUS IMPURITY CONCENTRATION IN TO THE ATMOSPHERE

Y. A. Skob

A mathematical model of jet flow and dispersion of a polluting gas admixture of various concentrations in the surface layer of the atmosphere has been developed. To assess the environmental impact of pollution, a computational technique was used to determine the fields of probability of human impact by toxic gas based on probit analysis. Test calculations of the probability fields of human impact, which was exposed to a toxic gas, thrown into the atmosphere with different concentrations, were carried out. The results can be used to determine the environmental impact of polluting atmosphere of man-made objects.

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.