

В.А. Сулименко, А.А. Комаров, Г.В. Васюков, Р.А. Загуменников
(Академия ГПС МЧС России; e-mail: r-unk@yandex.ru)

ОСОБЕННОСТИ РАСЧЁТА ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА ВОЗНИКНОВЕНИЯ ВЗРЫВООПАСНЫХ СМЕСЕЙ ПРИ АВАРИЙНЫХ СИТУАЦИЯХ

Разработан метод расчёта параметров процесса возникновения взрывоопасных смесей с учётом подвижности среды. Метод учитывает влияние размера зоны корреляции турбулентной структуры среды.

Ключевые слова: турбулентная диффузия, аварийные взрывы, взрывоопасные смеси.

V.A. Sulimenko, A.A. Komarov, G.V. Vasjukov, R.A. Zagumennikov **FEATURES OF CALCULATION OF PARAMETERS** **THE OCCURRENCE OF EXPLOSIVE MIXTURES AT EMERGENCY**

Developed a method for calculating the parameters of the occurrence of explosive mixtures with the mobility of the environment. The method takes into account the effect of the size of the turbulent zone of the correlation structure of the environment.

Key words: turbulent diffusion, emergency explosions, explosive mixtures.

Статья поступила в редакцию Интернет-журнала 7 июля 2015 г.

Последствия от аварийных выбросов горючих веществ в воздушную среду могут быть различными: от взрыва до сгорания в виде огневого шара, пожара-вспышки. При незначительном смешении горючего с воздухом происходит диффузионное горение, скорость которого определяется интенсивностью поступления окислителя (воздуха) в зону горения. Поэтому оно происходит на поверхности контакта горючего и окислителя и протекает достаточно медленно. При существенном разбавлении горючего воздухом процесс горения становится невозможным. Однако, у каждого вещества имеются такие соотношения горючего с окислителем, при которых может происходить кинетическое горение, скорость которого определяется скоростью химической реакции, и возможно развитие избыточного давления. Диапазон концентраций, внутри которого смесь является взрывоопасной, ограничен нижним и верхним пределами распространения пламени. Для большинства углеводородов он составляет от 1-2 % до 15-20 % от общего объёма смеси. Исходя из выше сказанного, для определения параметров сценария развития аварии, связанного с выбросом горючих веществ, необходимо знать количество и состав горючей смеси.

При проектировании потенциально взрывоопасных производственных предприятий проводятся расчёты по прогнозированию возможных последствий аварийного выброса горючего вещества. При этом принимается какой-то сценарий развития (он может быть, как наиболее вероятный для большинства производственных объектов, так и генетически возможный – для критически важ-

ных объектов) [1-2]. Поэтому в данном случае начальные и граничные условия в математических моделях назначаются, исходя из принятого сценария и относятся только к одному конкретному варианту аварии. Это, с одной стороны, упрощает задачу расчёта последствий аварии с точки зрения подробности выходных данных по моделированию [3-8], но, с другой стороны, выдвигает на первый план вопрос достоверного определения тенденций развития аварии на конкретном объекте. В данном случае неопределимую важность оказывают расчётные данные, проводимые при расследовании уже произошедших аварий, для которых из показаний очевидцев, фотографий, видеозаписей, протоколов осмотра мест происшествий, проектной документации возможно с высокой точностью определить те или иные начальные и граничные условия аварии.

Известно, что распределение концентрации вещества по объёму и его изменение во времени описывается уравнением диффузии [9]:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_x \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + D_y \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + D_z \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} + \frac{\partial Q}{\partial V} - \operatorname{div}(\vec{W} \cdot C), \quad (1)$$

где C – объёмная концентрация вещества в смеси;

D – коэффициент диффузии;

Q – объёмный расход вещества;

W – скорость воздушного потока;

x, y, z – пространственные координаты;

t – время;

V – объём смеси.

Уравнение (1) в n -мерных ($n = 1, 2, 3$) координатах допускает следующее решение [10]:

$$C(r, t) = \int_0^t \frac{Q}{2^n \cdot (\pi D \cdot \tau)^{n/2}} \cdot \exp\left(-\frac{r^2}{4D \cdot \tau}\right) d\tau, \quad (2)$$

где $r = x$ для одномерного случая, $r^2 = x^2 + y^2$ для двухмерного случая, $r^2 = x^2 + y^2 + z^2$ для трехмерного случая – расстояние от источника с расходом Q до рассматриваемой точки;

t – время.

Для мгновенного выброса вещества в точке с нулевыми координатами выражение (2) имеет наиболее простой вид:

$$C(r, t) = \frac{V_0^n}{2^n \cdot (4\pi D \cdot \tau)^{n/2}} \cdot \exp\left(-\frac{r^2}{4D \cdot \tau}\right), \quad (3)$$

где V_0^n – объём выброса.

Для расчёта конкретных диффузионных задач используются численные методы. Численное интегрирование уравнения (1) осуществляется по явной разностной схеме. Шаг по времени выбирается из соображений устойчивости схемы. Вектора скорости потока должны быть известны заранее.

На твёрдых границах принимается, что поток вещества в направлении препятствий равен нулю, то есть $\frac{\partial C}{\partial x} = 0$. В этом случае принимается, что значение концентрации во внешней точке на границе равно концентрации в крайней к границе точке. Например, если на левой границе области значение концентрации равно $C(i = 1)$, то для внешней к области точке ($i = 0$) принимаем, что $C(0) = C(1)$. Для упрощения изложения здесь и далее приводятся соотношения на границах только для одной координатной оси. Для остальных осей граничные условия принимаются аналогичным образом.

Тогда как фактическая область пространства безгранична, то в расчётах всегда рассматривается какой-то конкретный интересующий участок. Указанный случай связан с тем, что необходимо задавать "свободные" границы, когда через них вещество протекает. В этом случае поток вещества через "свободную" границу (при условии, что источники вещества вне расчётной области отсутствуют) находится из соотношения (для левой границы) $C(0) = C(1)^2/C(2)$. Тогда поток вещества через границу равен $D \cdot (C(1) - C(0))$. Для правой границы имеем $C(n + 1) = C(n)^2/C(n - 1)$. Поток вещества через границу равен $D \cdot (C(n + 1) - C(n))$. Приведённые соотношения вытекают из некоторых соображений. На "свободной" границе расчётные значения концентрации должны быть достаточно малы. Это связано с тем, что расчётная область выбирается из условия малого влияния "свободной" границы на решение, то есть источники утечки в постановке начальных условий должны быть удалены на достаточное расстояние от "свободных" границ. Тогда из решения (3) следует, что $\frac{C(0)}{C(1)} \approx \frac{C(1)}{C(2)} \approx \exp\left(-\frac{\Delta x \cdot X}{4 \cdot D \cdot t}\right)$. Откуда вытекает условие $C(0) = C(1)^2/C(2)$ на левой "свободной" границе.

На границе, где концентрация задана заранее (например, она равна нулю на открытом проеме помещения во внешнюю среду), во внешних ячейках принимается заранее заданная концентрация.

Рассмотрим особенности формирования взрывоопасных облаков на примере одномерной задачи. Уравнение (1), записанное для одномерного случая и при отсутствии притока вещества, имеет вид:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - \frac{\partial(W \cdot C)}{\partial x}. \quad (4)$$

Примем, что расчётная область разбита на $I = 50$ расчётных ячеек, размер которых $\Delta x = 10$ м. Пусть в правой ячейке произошёл мгновенный выброс вещества, которое заняло всю правую ячейку (начальная концентрация в правой ячейке будет $C = 100$ %). Скорость потока отсутствует $W = 0$ и притока вещества больше нет.

На рис. 1 и рис. 2 приведено сравнение результатов расчёта уравнения (4) при отсутствии подвижности среды ($W = 0$) по численной схеме с результатами расчётов по аналитическому выражению (3). На рис. 1 показано сравнение мгновенных пространственных распределений концентрации, на рис. 2 – сравнение временных зависимостей концентрации в трёх точках, указанных на рис. 1.

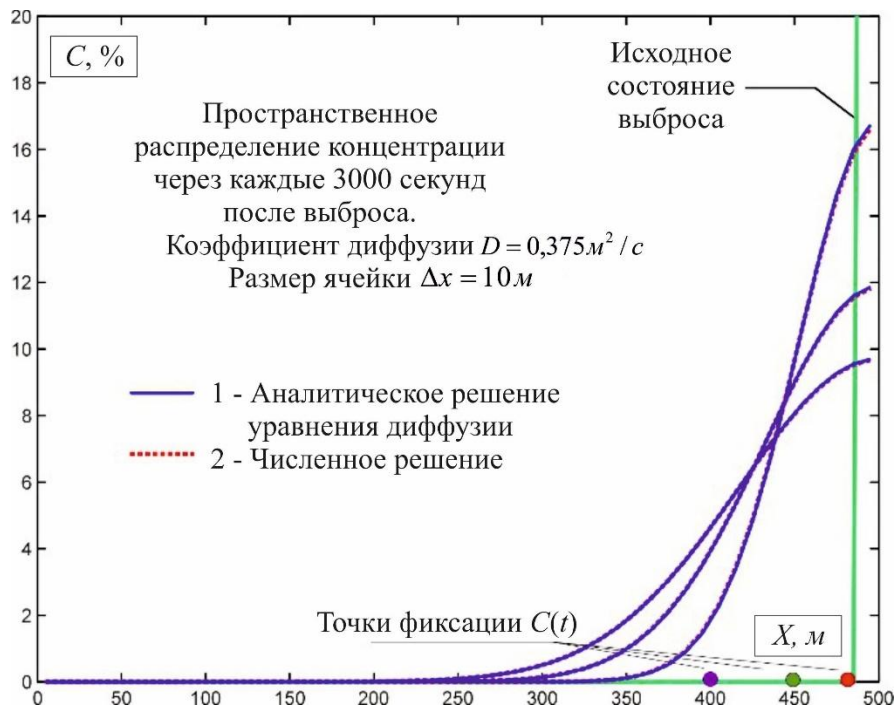


Рис. 1. Сравнение результатов по разработанному численному методу и существующему аналитическому

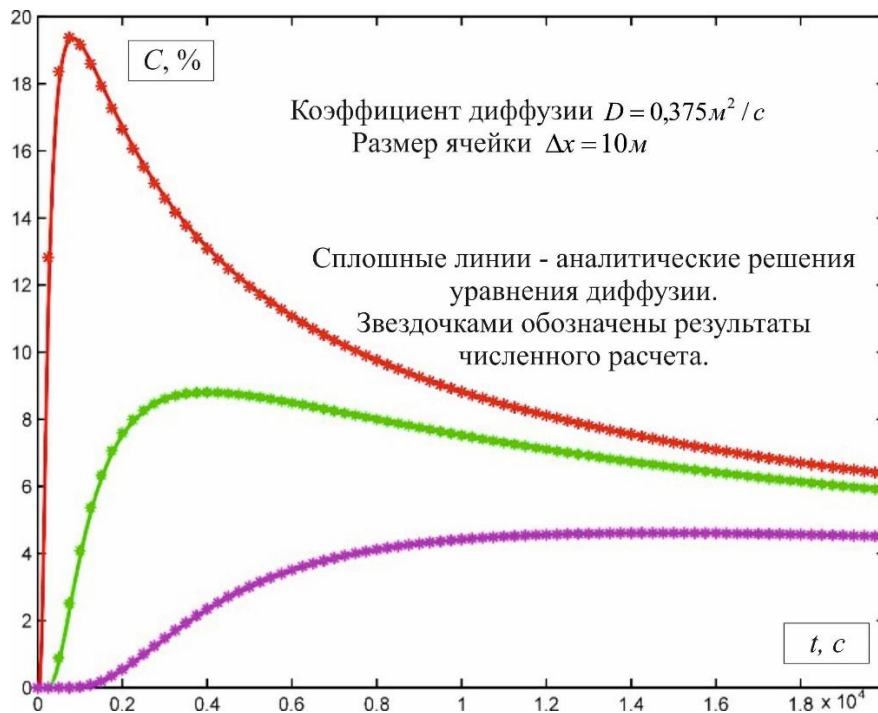


Рис. 2. Временные зависимости концентрации в трёх точках пространства

Видно, что численные решения практически полностью соответствуют решениям, полученным по аналитической формуле (3).

Рассмотрим влияние подвижности атмосферы на результаты расчётов. Из уравнения (4) следует, что при отсутствии диффузии ($D = 0$) и постоянной скорости движения среды ($W = \text{const}$) концентрация смеси изменяется по закону: $C(x, t) = f(x - W \cdot t)$, где f – произвольная функция. Для рассмотренного выше случая функция f имеет вид: $F = 100\%$ при $490 < x - W \cdot t < 500$. Численная аппроксимация первой производной в точке i может иметь вид:

$$C'(i) = \frac{C(i+1/2) - C(i-1/2)}{\Delta x} = \frac{1}{2} \cdot \frac{C(i+1) - C(i-1)}{\Delta x}, \quad \text{или} \quad C'(i) = \frac{C(i+1) - C(i)}{\Delta x},$$

или $C'(i) = \frac{C(i) - C(i-1)}{\Delta x}$. Тогда аппроксимация второй производной будет

выглядеть как: $C''(i) = \frac{1}{K} \frac{C'(i)}{\Delta x}$, где $K = \frac{3}{8}; \frac{1}{2}; \frac{5}{8}$. Это будет зависеть от принятой

аппроксимации первой производной и направления движения среды. В итоге численный аналог уравнения (4) при отсутствии диффузии ($D = 0$) и постоянной скорости движения среды ($W = \text{const}$) будет иметь вид:

$$\frac{\Delta C}{\Delta t} = -\frac{K \cdot (W \cdot C)'}{\Delta x} = -(K \cdot W \cdot \Delta x) \cdot C'' \approx D_w \frac{\partial^2 C}{\partial x^2}. \quad (5)$$

Из уравнения (5) следует, что прямое численное интегрирование (4) осуществляет не только расчёт смещения облака по скорости потока, но и выполняет расчёт диффузии облака с формальным коэффициентом диффузии, который равен: $D_w = K \cdot W \cdot \Delta x$.

Учитывая, что значение коэффициента турбулентной диффузии определяется как: $D = 0,5 \cdot W_{\text{пульс}} \cdot l$, где $W_{\text{пульс}}$ – пульсационная составляющая скорости потока, l – длина существования зоны корреляции вихревой структуры ($l = 5 \dots 10R_K$, где R_K – радиус области корреляции). Откуда следует, что размер расчётной ячейки должен быть равен l – длине существования зоны корреляции вихревой структуры. В этом случае численный прямой расчёт диффузионного уравнения даст решение с учётом диффузионных процессов, связанных с движением атмосферы.

Для подтверждения изложенной мысли приведём некоторые результаты численных расчётов. На рис. 3 приведены результаты численных расчётов уравнения (4) при полном отсутствии диффузии ($D = 0$) и постоянной скорости движения среды ($W = 0,1 \text{ м/с}$). На рис. 4 приведены результаты численных расчётов уравнения (4) при условии, что скорость потока отсутствует и при коэффициенте диффузии, равном $D = K \cdot W \cdot \Delta x = (3/8) \cdot 0,1 \cdot 10 = 0,375 \text{ м}^2/\text{с}$:

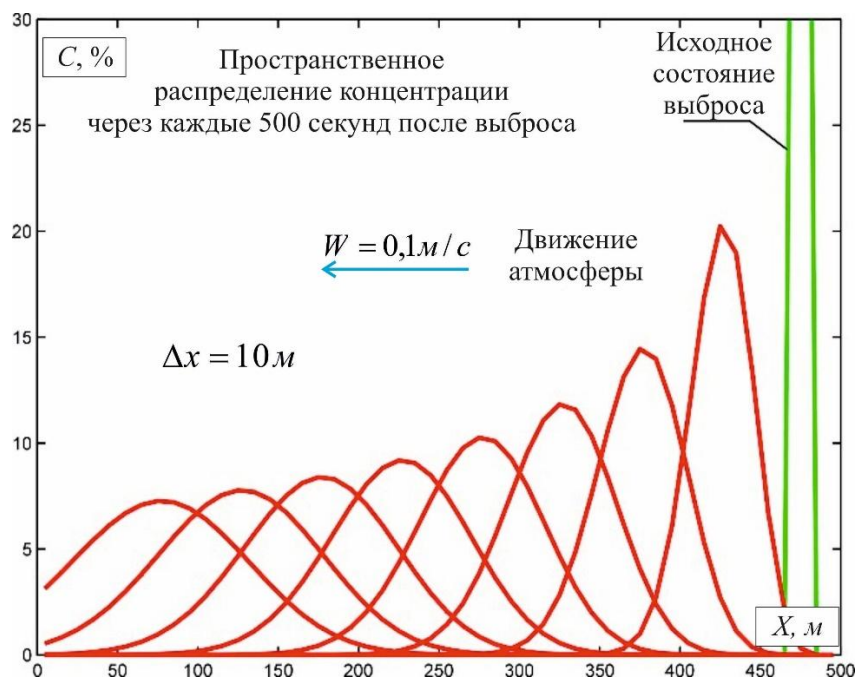


Рис. 3. Результаты расчётов с учётом только ветра без диффузии

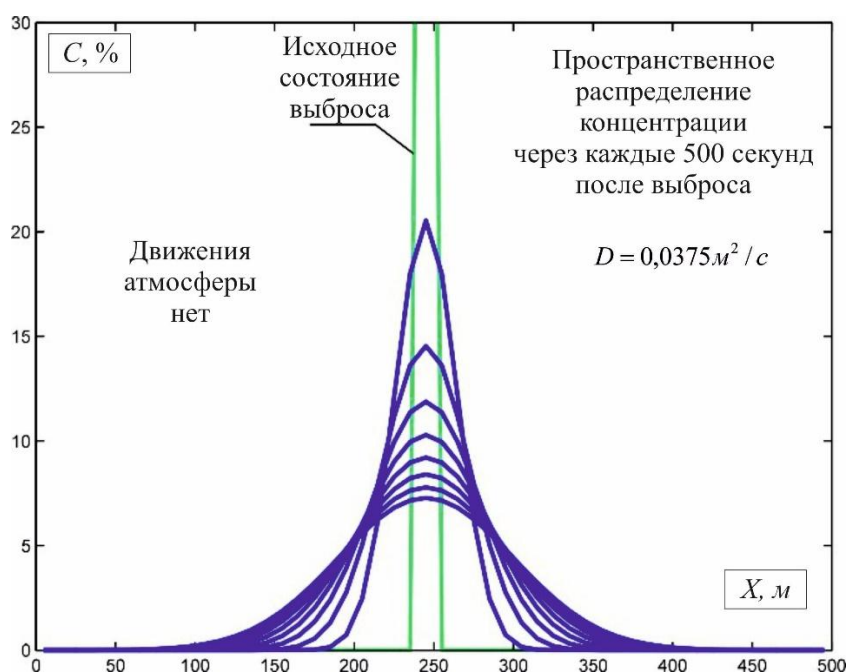


Рис. 4. Результаты расчётов диффузии без движения атмосферы

На рис. 5 выполнено наложение на рис. 3 результатов расчёта, приведённых на рис. 4, но с учётом смещения облака влево со скоростью $W = 0,1 \text{ м/с}$.

Из рис. 5 следует, что действительно численный расчёт диффузии облака с учётом подвижности атмосферы приводит к дополнительной диффузии облака. При этом коэффициент диффузии имеет численное значение, равное $D_W = K \cdot W \cdot \Delta x$.

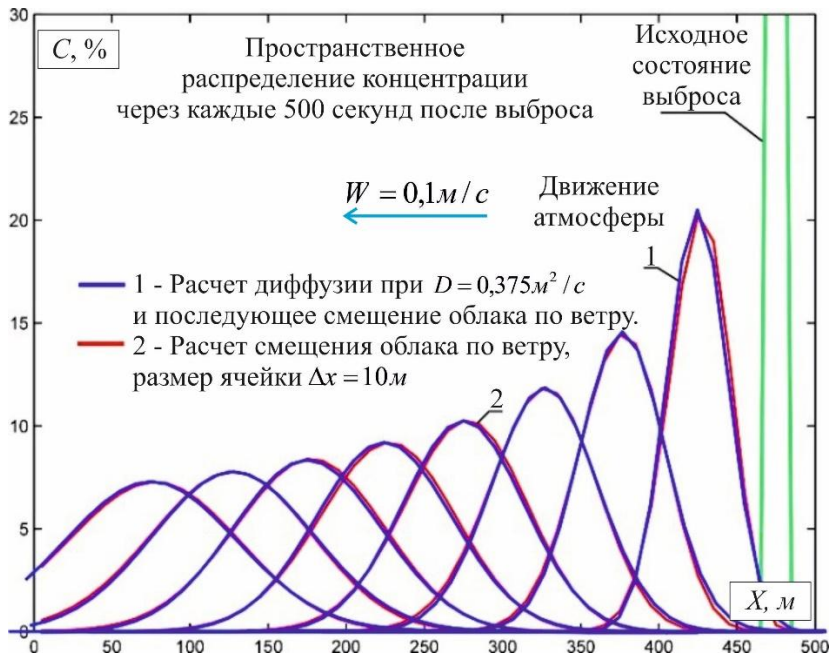


Рис. 5. Наложение результатов расчётов, учитывающих только ветер и диффузию без ветра

Уменьшение размеров расчётной ячейки приводит к уменьшению коэффициента диффузии, связанного с подвижностью атмосферы. Это иллюстрирует рис. 6, где приведены результаты аналогичных расчётов, но выполненные на расчётной сетке с размером ячейки 1 м.

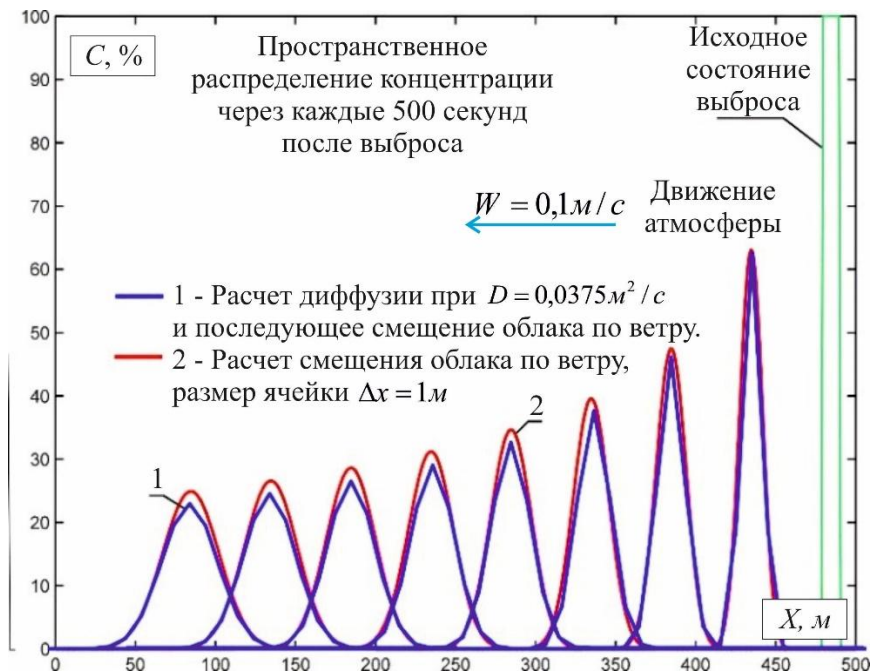


Рис. 6. Наложение результатов расчёта, полученных в результате моделирования. Размер ячейки $\Delta x = 1 \text{ м}$

Например, результаты расчёта, приведённые на рис. 5, соответствуют распространению облака с вихревой структурой, размеры которой составляют $l = 10$ м. А результаты расчёта, приведённые на рис. 6 соответствуют распространению облака с мелкомасштабной вихревой структурой размерами около $l = 1$ м.

Таким образом, прямое численное интегрирование уравнения диффузии, учитывающее подвижность среды, приводит к косвенному учёту процесса диффузии, связанного с перемещением выброса по потоку. Оптимальные размеры расчётных ячеек, обеспечивающие получение наиболее корректных результатов расчёта динамики взрывоопасного облака, зависят от линейного размера корреляционной области вихревой структуры.

Литература

1. **Васюков Г.В., Корольченко А.Я., Рубцов В.В., Возман Л.П.** Пожарная опасность газобаллонных автомобилей // Пожаровзрывобезопасность. 2005. Т. 14. № 1. С. 33-37.
2. **Васюков Г.В., Корольченко А.Я., Рубцов В.В.** К вопросу о категорировании помещений для хранения и технического обслуживания газобаллонных автомобилей // Пожаровзрывобезопасность. 2006. Т. 15, № 1. С. 25-29.
3. **Комаров А.А.** Прогнозирование нагрузок от аварийных дефлаграционных взрывов и оценка последствий их воздействия на здания и сооружения // Автореф. дис. ... д-ра техн. наук по спец. 05.26.03. М.: МГСУ, 2001. 42 с.
4. **Абросимов А.А., Комаров А.А.** Механизмы формирования взрывных нагрузок на территории нефтеперерабатывающих комплексов // Нефть, газ и бизнес. № 6 (50). 2002. С. 58-61.
5. **Комаров А.А.** Расчёт газодинамических характеристик потоков при аварийных дефлаграционных взрывах на наружных установках // Пожаровзрывобезопасность. 2002. Т. 11. № 5. С. 15-18.
6. **Абросимов А.А., Комаров А.А.** Мероприятия, обеспечивающие безопасные нагрузки при аварийных взрывах в зданиях со взрывоопасными технологиями // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2002. № 4. С. 48-51.
7. **Комаров А.А.** Разрушение зданий при аварийных взрывах бытового газа // Пожаровзрывобезопасность. 2004. Т. 13. № 5. С. 15-23.
8. **Комаров А.А., Васюков Г.В., Загуменников Р.А., Бузаев Е.В.** Взрыв газа на газонаполнительной станции в посёлке Чагода. Причины и последствия // Пожаровзрывобезопасность. 2014. Т. 23. № 7. С. 58-64.
9. **Adolf Fick.** Ueber Diffusion. Pogg. Ann. Phys. Und Chem., 1855. № 1. Pp. 59-86.
10. **Математическая** теория диффузии в приложениях Райченко А.И. Киев: Наук. думка, 1981. 396 с.