

Процесс формирования взрывоопасной смеси в экспериментальной камере

Александр Андреевич Комаров ✉, Николай Викторович Громов,
Леонид Валентинович Рядченко

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Для подготовки качественной газовой смеси часто используют вентиляторы, которые не только перемешивают смесь, но и создают потоки со значительными пульсационными составляющими. Это приводит к значительным погрешностям и плохой повторяемости экспериментов.

Цель. Основная цель настоящего исследования заключалась в определении времени, необходимого для качественного смешивания горючего газа и воздуха, находящихся в экспериментальной камере. Пространственная равномерность газовой концентрации горючей смеси оказывает решающее значение на результаты проводимых опытов.

Методы исследования. В статье приводятся результаты расчетов по программам, достоверность вычислений которых проверена на результатах тестовых расчетов задач, имеющих аналитические решения. В качестве исходных уравнений, описывающих распределение концентрации газа по пространству экспериментальной камеры, использовались известные уравнения диффузии. При расчетах использовался коэффициент турбулентной диффузии, численное значение которого соответствует минимальному значению для закрытых помещений: $D = 0,005 \text{ м}^2/\text{с}$. Расчеты осуществлялись по явной разностной схеме в пакете MatLab.

Результаты. В статье приводятся результаты расчетов пространственного распределения концентрации газа в экспериментальной камере для различных моментов времени. Получено минимальное время, которое необходимо для формирования качественной газовой смеси в камере. Приведенные в статье мгновенные фотографии дефлаграционного взрыва показывают, что за счет естественной диффузии сформирована однородная смесь хорошего качества. Временные интервалы, которые были использованы для смешения горючего газа и воздуха в испытательной камере, соответствовали полученным расчетным значениям времени, необходимого для качественной подготовки горючей смеси.

Выводы. В настоящей статье показано, что для подготовки качественной газовой смеси не следует использовать вентиляторы и что с данной проблемой хорошо справляется естественная турбулентная диффузия газов. Расчетным путем получены минимальные интервалы времени, которые необходимы для формирования в кубической камере произвольного размера качественной газовой смеси.

Ключевые слова: коэффициент диффузии; концентрация газа; экспериментальная камера; дефлаграционный взрыв; взрывоопасная смесь; фронт пламени

Для цитирования: Комаров А.А., Громов Н.В., Рядченко Л.В. Процесс формирования взрывоопасной смеси в экспериментальной камере // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2025. Т. 34. № 2. С. 20–31. DOI: 10.22227/0869-7493.2025.34.02.20-31

✉ Комаров Александр Андреевич, e-mail: KomarovAA@mgisu.ru

The process of explosive mixture formation in the experimental chamber

Alexander A. Komarov ✉, Nikolai V. Gromov, Leonid V. Ryadchenko

Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. To prepare a high-quality gas-air mixture, fans are often used, which not only agitate the mixture, but also create flows with significant pulsation components. This leads to significant errors and poor repeatability of experiments.

Aim. The main purpose of this study was to determine the time required for high-quality mixing of combustible gas and air in the experimental chamber. The spatial uniformity of the gas concentration of the combustible mixture is crucial for the results of the experiments.

Research methods. The paper presents the results of calculations for programmes, the reliability of calculations of which is verified by the results of test calculations of problems with analytical solutions. The well-known diffu-

sion equations were used as the initial equations describing the distribution of gas concentration over the space of the experimental chamber. The calculations used the coefficient of turbulent diffusion, the numerical value of which corresponds to the minimum value for enclosed spaces: $D = 0.005 \text{ m}^2/\text{s}$. The calculations were carried out according to an explicit difference scheme in the MatLab package.

Calculation results. The paper presents the results of calculations of the spatial distribution of the gas concentration in the experimental chamber for various time points. The minimum time required for the formation of a high-quality gas-air mixture in the chamber was obtained. The instantaneous photographs of the deflagration explosion shown in the paper show that a homogeneous mixture of good quality has been formed due to natural diffusion. The time intervals that were used to mix the combustible gas and air in the test chamber corresponded to the calculated values of the time required for high-quality preparation of the combustible mixture.

Conclusions. This paper shows that fans should not be used to prepare a high-quality gas-air mixture and that natural turbulent gas diffusion copes well with this problem. The minimum time intervals necessary for the formation of a high-quality gas-air mixture in a cubic chamber of arbitrary size were calculated.

Keywords: diffusion coefficient, gas concentration, experimental chamber, deflagration explosion, explosive mixture, flame front

For citation: Komarov A.A., Gromov N.V., Ryadchenko L.V. The process of explosive mixture formation in the experimental chamber. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2025; 34(2):20-31. DOI: 10.22227/0869-7493.2025.34.02.20-31 (rus).

✉ Alexander Andreevich Komarov, e-mail: KomarovAA@mgsu.ru

Введение

При экспериментальном исследовании процесса взрывного горения (дефлаграционного взрыва) внутри зданий и помещений чаще всего используется смесь стехиометрического состава. Связано это с тем, что для обеспечения взрывоустойчивости строительных объектов в качестве возможной взрывной аварии рассматривается сценарий ее развития, в результате которого создается наиболее высокое взрывное давление. Дефлаграционные взрывы смесей стехиометрического состава характеризуются наибольшей скоростью взрывного горения, поэтому при экспериментальных исследованиях используются, как правило, смеси стехиометрического состава.

Проблема создания внутри модельных установок смесей стехиометрического состава всегда стояла перед исследователями. Для этого могут применяться вентиляторы, например, как это описано в работах [1–3].

При проведении экспериментальных исследований, направленных на изучение дефлаграционных аварийных взрывов, качество смеси (пространственное распределение горючего и его количественный состав) оказывает решающее значение на результаты опытов. Достоверная информация о закономерностях процесса формирования взрывоопасных облаков необходима для качественного проведения экспериментальных исследований в области взрывобезопасности и взрывоустойчивости объектов.

Концентрация, при которой смесь является взрывоопасной, находится между верхним и нижним концентрационными пределами взрываемости. Для большинства смесей взрывоопасная концентрация находится в пределах от 1 до 20 объемных процентов. Поэтому для возникновения взрыва необходимо, чтобы взрывоопасное вещество (газ или пар) было значительно обогащено или разбавлено воздухом.

С учетом данного обстоятельства для подготовки качественной (хорошо перемешанной) газозвдушной смеси исследователи часто используют вентиляторы [4], которые не только перемешивают смесь, но и создают потоки со значительными пульсационными составляющими, затухание которых (особенно для больших объемов испытательных камер) требует значительного времени и плохо поддается контролю со стороны испытателя. Это часто приводит к значительным погрешностям и плохой повторяемости экспериментов.

Целью настоящего исследования является определение времени, необходимого для качественного смешивания горючего газа, помещаемого в замкнутую экспериментальную камеру, с находящимся в камере воздухом.

В настоящей статье утверждается, что для подготовки качественной газозвдушной смеси не нужно использовать вентиляторы и что с данной проблемой достаточно хорошо справляется естественная диффузия газов [5].

Задачей исследования является подтверждение данного утверждения с помощью расчетов.

Методы исследования

Временная зависимость распределения концентрации вещества по объему описывается известным уравнением диффузии:

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

где C — концентрация вещества в смеси (объемная);

D — коэффициент турбулентной диффузии, m^2/s ;

Q — удельный объемный приток вещества (на единицу объема), $1/\text{s}$;

U — скорость воздушной среды, m/s ;

t — время, с;

x, y, z — координаты, м.

Уравнение (1) имеет следующее решение:

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

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;

r — расстояние от источника до точки наблюдения;

t — время;

Q (м³/с) — объемный расход источника;

n — размерность задачи ($n = 1, 2, 3$);

x, y, z — координаты.

Для случая мгновенного выброса вещества выражение (2) приобретает следующий вид:

$$C(r, t) = \frac{X_0^n}{2^n \cdot (\pi D \cdot \tau)^{n/2}} \cdot \exp\left(-\frac{r^2}{4D \cdot \tau}\right), \quad (3)$$

где X_0^n — объем мгновенного выброса (м³).

При решении практических задач, связанных с диффузионными процессами, применяются численные методы. В нашем случае численное интегрирование уравнения (1) проводилось явным образом, а временной шаг выбирался из устойчивости схемы, скорость потока в камере принимается равной нулю.

На твердых границах принимается условие непротекания вещества, т.е. условие $\partial C / \partial x = 0$. На границе, где задана концентрация (например, нулевая концентрация на открытом проеме объема), во внешних ячейках принимается заданная заранее концентрация.

Авторами при проведении расчетов использовались уравнения, записанные в безразмерном виде. Для приведения уравнения диффузии к безразмерному виду в качестве единицы длины будем использовать характерный линейный размер объема L : радиус для сферы, половину ребра куба для кубического объема, а в качестве единицы времени будем использовать величину $t_0 = L^2 / D$. Тогда одномерное уравнение диффузии примет вид:

$$\frac{\partial C}{\partial \bar{t}} = \frac{\partial^2 C}{\partial \bar{x}^2}, \quad (4)$$

где $\bar{t} = t / t_0$, $\bar{x} = x / L$.

Для перехода к цилиндрическим или сферическим координатам уравнение (4) должно быть записано в виде:

$$\frac{\partial}{\partial \bar{t}} (Q \cdot C) = \frac{\partial}{\partial \bar{x}} \left(Q \cdot \frac{\partial C}{\partial \bar{x}} \right), \quad (5)$$

где $Q = 1$ для одномерного варианта расчета, $Q = \bar{x}$ для цилиндрической симметрии, $Q = \bar{x}^2$.

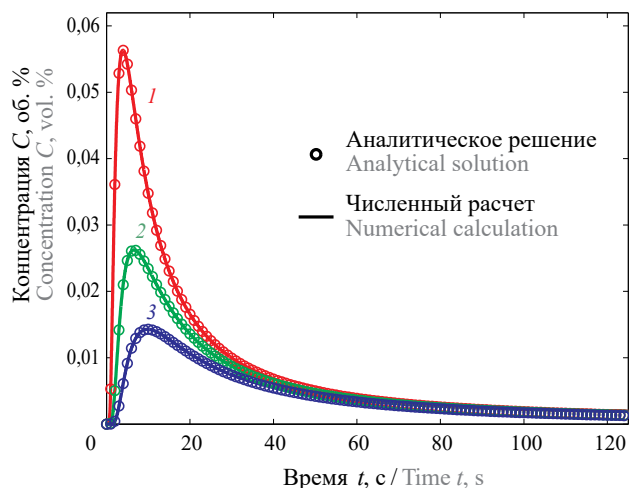


Рис. 1. Зависимости от времени концентрации вещества в трех точках пространства. Результаты численных и аналитических расчетов

Fig. 1. Time dependences of the concentration of a substance at three points in space. Results of numerical and analytical calculations

Тогда уравнение (5) для цилиндрической симметрии примет вид:

$$\frac{\partial C}{\partial \bar{t}} = \frac{\partial^2 C}{\partial \bar{x}^2} + \frac{1}{\bar{x}} \cdot \frac{\partial C}{\partial \bar{x}}, \quad (6)$$

а для сферической симметрии уравнение (5) примет вид:

$$\frac{\partial C}{\partial \bar{t}} = \frac{\partial^2 C}{\partial \bar{x}^2} + \frac{2}{\bar{x}} \cdot \frac{\partial C}{\partial \bar{x}}. \quad (7)$$

Рассмотрим результаты расчета распространения под действием диффузии вещества по объему применительно к кубической камере, используемой авторами при проведении опытов.

Линейный размер камеры (ее ребро) составляет 2,15 м, объем камеры равен 10 м³. Характерный линейный размер камеры равен: $L = 2,15 / 2 = 1,075$ м.

На рис. 1 приведены результаты численного расчета уравнения (7), описывающего временную зависимость концентрации для сферической симметрии, и приведены результаты расчета, выполненного по соотношению (3), описывающему аналитическое решение задачи в сферической симметрии. Удовлетворительное согласие между результатами численных расчетов и аналитическим решением говорит об адекватности расчетной схемы.

Расчет выполнен для трех точек пространства, положение которых и начальные условия задачи показаны на рис. 2.

Расчетная область была разбита на 107 расчетных ячеек, размер которых составлял 0,01 м = 1 см. В двух центральных ячейках находился газ с концентрацией 100 об. %. Расположение точек вывода временной

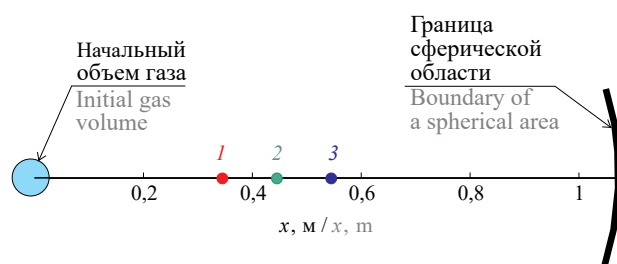


Рис. 2. Начальные и граничные условия с указанием точек вывода временных зависимостей концентрации
Fig. 2. Initial and boundary conditions with indication of points of derivation of time dependences of concentrations

зависимости концентрации, показанных на рис. 1, приведено на рис. 2. Вывод временных зависимостей концентрации производился в 35, 45 и 55-й расчетных ячейках. При расчетах использовалось следующее значение коэффициента турбулентной диффузии: $D = 0,005 \text{ м}^2/\text{с}$. Данная величина соответствует минимальному значению турбулентной диффузии [6–8], экспериментально полученной для пропана при его распространении по помещению типовой кухни.

Используемое авторами в расчетах значение коэффициента турбулентной диффузии ($D = 0,005 = 5,0 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2/\text{с}$) значительно превышает значение коэффициента ламинарной диффузии, который приводится в справочниках. Например, коэффициент ламинарной диффузии метана в воздух составляет около $D = 2,0 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$, а коэффициент ламинарной диффузии пропана составляет около $D = 1,2 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$. Связано это с тем, что коэффициенты ламинарной диффузии не соответствуют физической картине смешения газов в реальных помещениях или экспериментальной камере.

Значительное превышение коэффициента турбулентной диффузии, который реализуется в реальных помещениях, над коэффициентом ламинарной диффузии подтверждают результаты экспериментов. Экспериментальные исследования, приведенные в работах [9–11], показывают, что коэффициент турбулентной диффузии составляет не менее $D = 0,0058 = 5,8 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2/\text{с}$. Коэффициент диффузии экспериментально определялся в трубе с диаметром 100 мм, длина которой составляла около 4,5 м. Эксперименты показали, что коэффициент турбулентной диффузии не превышает значения $D = 5,8 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2/\text{с}$. Используемая автором [9–11] схема проведения эксперимента позволяет говорить, что в этом случае реализуется минимальное значение турбулентной диффузии [12].

Кроме этого, исследования, результаты которых приведены в работах [6, 7, 13], показали, что коэффициент турбулентной диффузии при формировании взрывоопасных смесей в аварийных ситуациях и в реальных помещениях составляет не менее $D = 4,0 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2/\text{с}$.

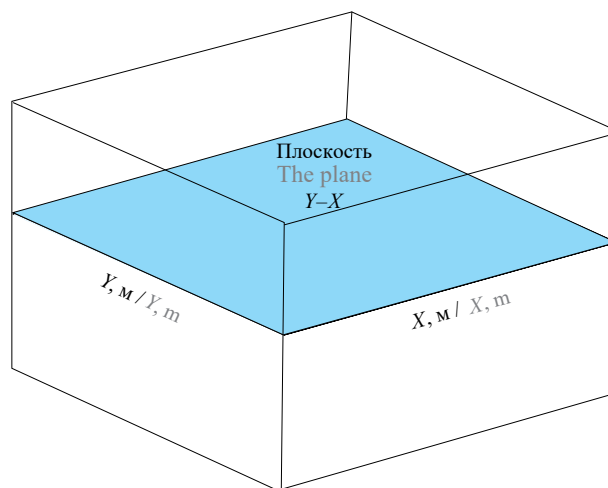


Рис. 3. Схема расчетной области
Fig. 3. Schematic of the design area

Поэтому при дальнейших расчетах значение коэффициента турбулентной диффузии авторами будет приниматься равным $D = 0,005 \text{ м}^2/\text{с}$. Это позволяет определить время, за которое гарантированно происходит качественное перемешивание смеси за счет диффузионных процессов.

Ниже приведены численные расчеты распространения газа по экспериментальной камере, выполненные для трехмерной задачи. Расчетная схема в этом случае аппроксимирует уравнение (1). Аналитическое решение для сферической симметрии описывается уравнением (3) при $n = 3$.

На рис. 3 приведена схема расчетной области и показана плоскость, в которой осуществлялся вывод результатов расчета.

Расчетная трехмерная область разбивалась на 43 ячейки по каждому направлению. Размер ячейки составлял $0,05 \text{ м} = 5 \text{ см}$. Ребро куба имело размер 2,15 см.

При проведении данного расчета было задано, что в центральных ячейках куба (ячейки 21, 22 и 23 по всем направлениям) находится газ. Точки вывода временной зависимости концентрации находились в ячейках $X = 10, 12, 14$; $Y = 22, 22, 22$; $Z = 22, 22, 22$.

На рис. 4 приведены результаты численного расчета и результаты расчета по аналитическому соотношению (3). Коэффициент турбулентной диффузии был принят равным $D = 0,005 \text{ м}^2/\text{с}$.

Удовлетворительное согласие между расчетом и аналитическим решением говорит об адекватности численной расчетной схемы, описывающей распространение газа в трехмерной области.

На рис. 5 приведены изолинии равной концентрации газа через 7,5 с после выброса. Численные значения изолиний концентрации: внешняя изолиния — 2 %, далее — 3, 4, 6 и 8 об. %. На рис. 5 указаны точки вывода временных зависимостей концентрации, приведенных на рис. 4.

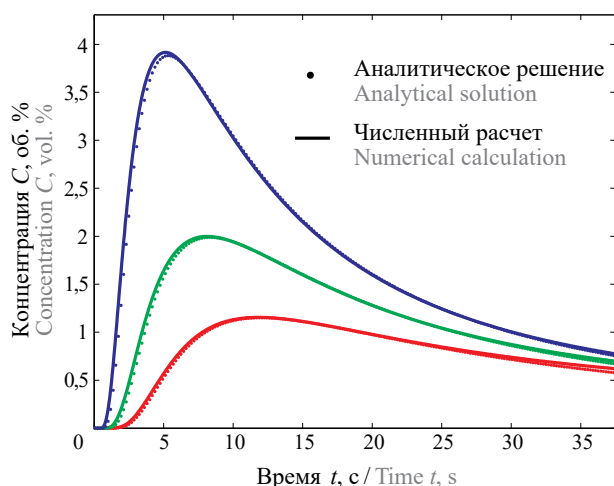


Рис. 4. Результаты расчетов по трехмерной численной схеме. Зависимости концентрации вещества от времени в трех точках пространства. Сравнение численных и аналитических решений
Fig. 4. Results of calculations by three-dimensional numerical scheme. Dependences of substance concentration on time in three points of space. Comparison of numerical and analytical solutions

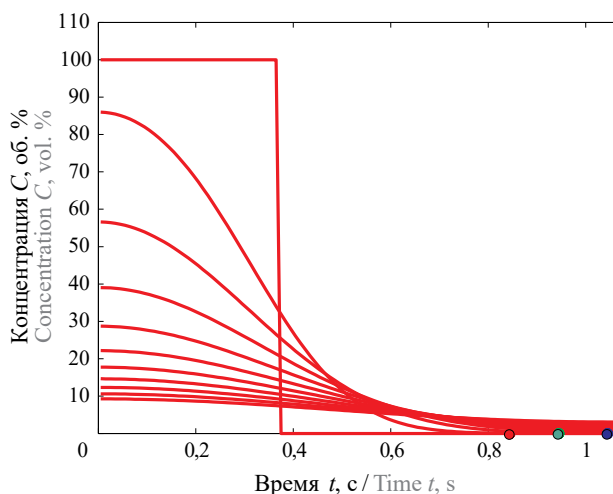


Рис. 6. Мгновенные профили концентрации газа в сфере с радиусом 1,075 м, которая схематизирует экспериментальную камеру с ребром 2,15 м
Fig. 6. Instantaneous gas concentration profiles in a sphere with a radius of 1.075 m, which schematizes an experimental chamber with a 2.15 m rib

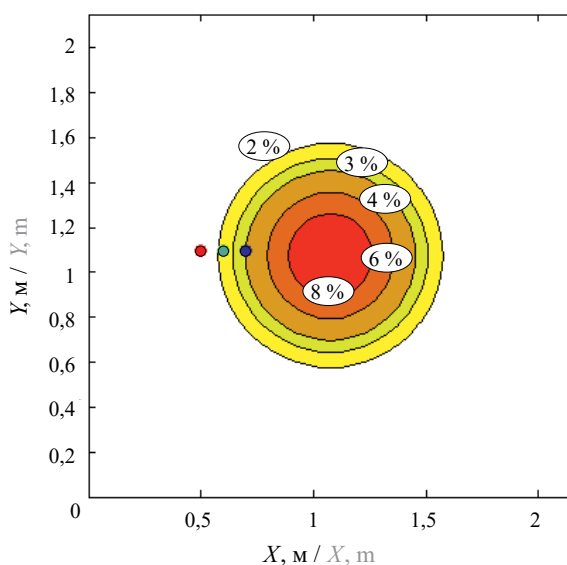


Рис. 5. Изолинии равных концентраций газа через 7,5 с после выброса. Внешняя изолиния — 2 %, далее — 3, 4, 6 и 8 об. %
Fig. 5. Isolines of equal gas concentrations 7.5 seconds after release. External isolation — 2 %, then — 3, 4, 6 and 8 vol. %

Результаты

Учитывая приведенное выше удовлетворительное согласие между результатами численных расчетов по разработанным программам и аналитическими решениями, рассмотрим процесс распространения газа по экспериментальной кубической камере с линейным размером ребра 2,15 м. Необходимость детального изучения дефлаграционных взрывов, реализующихся при аварийных ситуациях, достаточно подробно обоснована в публикациях [8, 14, 15].

Сначала рассмотрим результаты расчета по программе, аппроксимирующей уравнение (7), описывающее диффузию газов в сферической симметрии.

Расчетная область (аналогично предыдущей задаче в сферической симметрии) была разбита на 107 расчетных ячеек, размер которых составлял 0,01 м = 1 см. В 37 центральных ячейках находился газ с концентрацией 100 об. %. Расположение точек вывода временной зависимости концентрации приведено на рис. 6. Вывод временных зависимостей концентрации производился в 85, 95 и 105-й расчетных ячейках. Коэффициент турбулентной диффузии в графиках, где приведено размерное время, был принят равным $D = 0,005 \text{ м}^2/\text{с}$. В графиках, где используется безразмерное время, за единицу времени принята величина: $t_0 = L^2/D = 231,0 \text{ с}$, где $L = 1,075 \text{ м}$.

На рис. 6 приведены мгновенные профили концентрации газа через каждые 2,5 с.

На рис. 7 приведены результаты численного расчета уравнения (7), описывающего временную зависимость концентрации в трех точках сферы, схематизирующей экспериментальную камеру.

Из расчетов следует, что при центральной подаче газа в камеру пространственное выравнивание концентрации происходит примерно через 60 с после подачи газа. В безразмерном виде это соответствует примерно моменту времени $t/t_0 = 0,3$. Соответственно, при подаче газа в верхнюю часть камеры время выравнивания концентрации увеличивается в 4 раза, так как линейный размер объема увеличивается в 2 раза, а единица времени в данной задаче зависит от квадрата линейного размера области — $t_0 = L^2/D$.

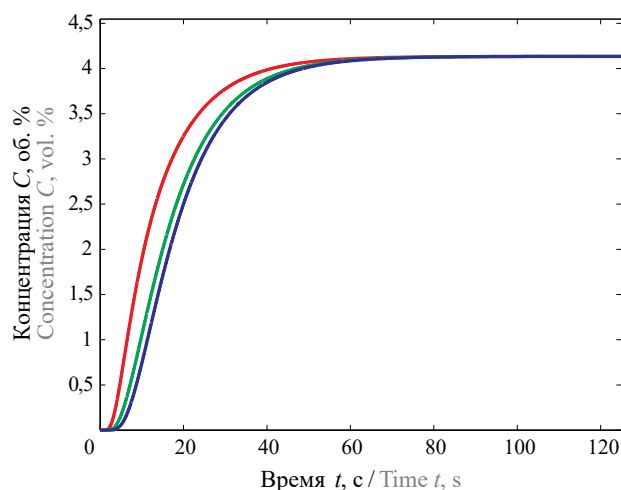


Рис. 7. Временные зависимости концентрации в трех точках
Fig. 7. Time dependences of concentrations at three points

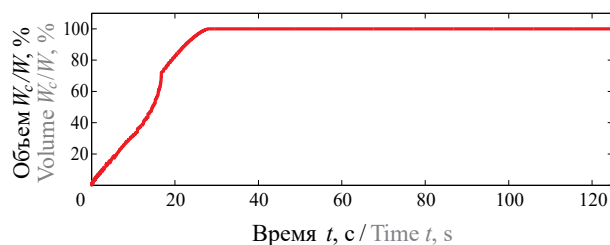


Рис. 8. Временные зависимости, описывающие процесс формирования в сферической камере взрывоопасной смеси
Fig. 8. Time dependences describing the process of explosive mixture formation in a spherical chamber

На рис. 8 приведены временные зависимости, описывающие процесс формирования взрывоопасной смеси в камере.

На рис. 8 показано отношение (в процентах) объема смеси, находящейся во взрывоопасной концентрации (концентрация смеси от 2 до 8 об. %), к общему объему камеры.

На рис. 8 видно, что уже через 30 с после центральной подачи газа в камеру (при верхней подаче через $30 \cdot 4 = 120$ с) в камере формируется взрывоопасная смесь, но ее пространственная равномерность достигается только через 60 с (при верхней подаче через $60 \cdot 4 = 240$ с). Необходимо учесть, что это относится к сферической камере, у которой отсутствуют угловые элементы.

Аналогичные расчеты были проведены для трехмерной задачи.

Рассмотрим результаты расчета по программе, аппроксимирующей уравнение (1), описывающее диффузию газов в трехмерном пространстве. На рис. 3 была приведена схема расчетной области и показана плоскость, в которой осуществляется вывод результатов расчета. На рис. 9 приведены начальные условия расчетной задачи в плоскости, изображенной на рис. 3. Там же указаны точки вывода временных зависимостей концентраций. Точки вывода временной зависи-

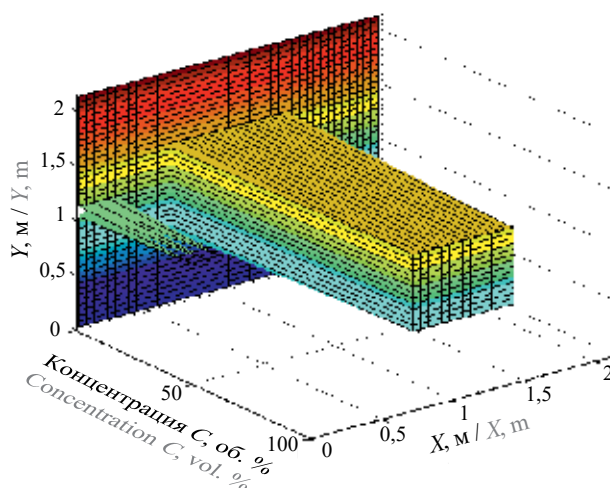


Рис. 9. Начальное состояние системы, принятое в расчетах
Fig. 9. Initial state of the system assumed in calculations

мости концентрации находились в ячейках $X = 1, 3, 5$; $Y = 22, 22, 22$; $Z = 22, 22, 22$.

На рис. 10 приведены изолинии равной концентрации газа для двух моментов времени: через 5,0 и 10,0 с после выброса. На рис. 10 указаны точки вывода временных зависимостей концентрации, приведенных на рис. 11.

На рис. 11 приведены результаты численного расчета уравнения (1), описывающего временную зависимость концентрации в трех точках экспериментальной камеры. Вывод временных зависимостей концентрации производился в ячейках $X = 1, 3, 5$; $Y = 22, 22, 22$; $Z = 22, 22, 22$. Коэффициент турбулентной диффузии в графиках, где приведено размерное время, был принят равным $D = 0,005 \text{ м}^2/\text{с}$. При использовании безразмерного времени за единицу времени следует принять величину $t_0 = L^2/D = 231,0 \text{ с}$, где $L = 1,075 \text{ м}$.

Из расчетов, приведенных на рис. 11, следует, что при центральной подаче газа в камеру пространственное выравнивание концентрации происходит примерно через 100 с после подачи газа. В безразмерном виде это соответствует примерно моменту времени $t/t_0 = 0,4$. Соответственно, при подаче газа в верхнюю часть камеры время выравнивания концентрации увеличивается в 4 раза. Полученное время несколько больше, чем было получено для камеры сферической формы, что объясняется наличием угловых полостей у кубической камеры.

На рис. 12 приведены временные зависимости, описывающие процесс формирования взрывоопасной смеси в камере. На рис. 12 показано отношение (в процентах) объема смеси, находящейся во взрывоопасной концентрации (концентрация смеси от 2 до 8 об. %), к общему объему камеры. Из приведенного рисунка видно, что через 45 с после подачи газа в центр камеры (при подаче в верхнюю часть камеры через $45 \cdot 4 = 180$ с) в камере возникает

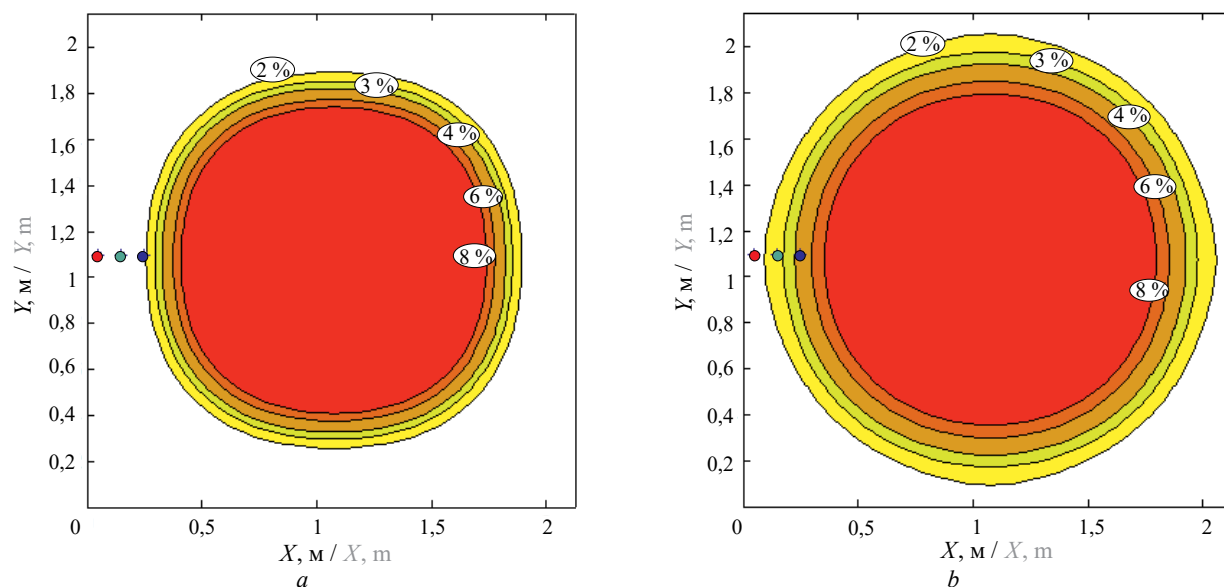


Рис. 10. Изолинии равных концентраций газа: *a* — через 5,0 с; *b* — через 10,0 с после выброса. Внешняя изолиния — 2 %, далее — 3, 4, 6 и 8 об. %

Fig. 10. Isolines of equal gas concentrations: *a* — 5.0 seconds later; *b* — 10.0 seconds after release. External isolation — 2 %, then — 3, 4, 6 and 8 vol. %

взрывоопасная смесь, хотя ее удовлетворительная равномерность по пространству (см. рис. 11) создается только через 100 с. Соответственно, при верх-

ней подаче газа пространственная равномерность достигается только через $100 \cdot 4 = 400$ с или через 6,7 мин, т.е. почти через 7 мин.

Рассмотрим вариант подачи газа в верхнюю часть камеры. Расчетная схема в этом случае аппроксимирует уравнение (1), т.е. расчеты были проведены для трехмерной задачи. Коэффициент турбулентной диффузии был принят равным $D = 0,005 \text{ м}^2/\text{с}$.

На рис. 13 приведена схема расчетной области и показана плоскость, в которой осуществляется вывод результатов расчета.

Расчетная трехмерная область разбивалась на 43 ячейки по каждому направлению. Размер ячейки составлял $0,05 \text{ м} = 5 \text{ см}$. Ребро куба имело размер 2,15 см.

При проведении расчета было задано, что в верхних ячейках куба (ячейки с номерами 15...29 по направлениям X и Y и с номерами 29...43 по направлению Z) находится газ.

На рис. 14 приведены начальные условия расчетной задачи в плоскости, изображенной на рис. 13. Там же указаны точки вывода временных зависимостей концентраций. Точки вывода временной зависимости концентрации находились в ячейках $X = 22, 22, 22$; $Y = 22, 22, 22$; $Z = 1, 3, 5$.

На рис. 15 приведены результаты численного расчета уравнения (1), описывающего временную зависимость концентрации в трех точках экспериментальной камеры. Вывод временных зависимостей концентрации производился в ячейках $X = 22, 22, 22$; $Y = 22, 22, 22$; $Z = 1, 3, 5$. Коэффициент турбулентной диффузии принят равным $D = 0,005 \text{ м}^2/\text{с}$. В расчетах за единицу времени принята величина $t_0 = L^2/D = 231,0 \text{ с}$, где $L = 1,075 \text{ м}$.

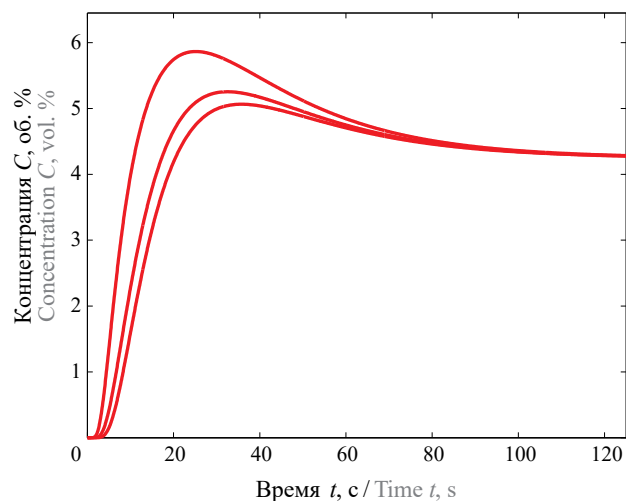


Рис. 11. Временные зависимости концентрации в трех точках экспериментальной камеры

Fig. 11. Time dependences of concentration at three points of the experimental chamber

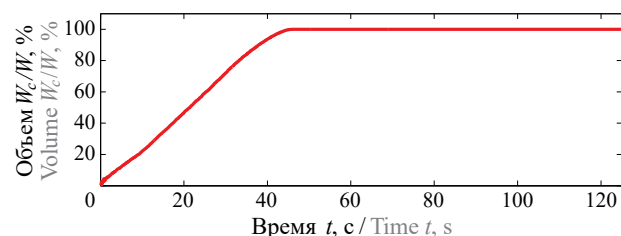


Рис. 12. Временные зависимости, описывающие процесс формирования в экспериментальной камере взрывоопасной смеси

Fig. 12. Time dependences describing the process of explosive mixture formation in the experimental chamber

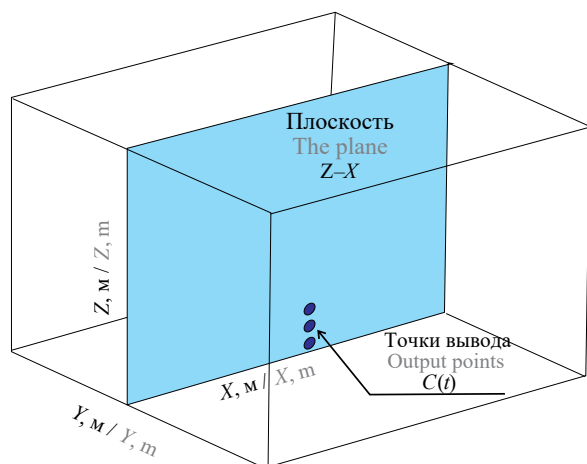


Рис. 13. Схема расчетной области
Fig. 13. Schematic of the design area

На рис. 16 приведены временные зависимости, описывающие процесс формирования взрывоопасной смеси в камере. На рис. 16 приведено отношение (в процентах) объема взрывоопасной смеси, т.е. смеси с концентрацией от 2 до 8 об. %, к общему объему камеры.

Из приведенного рисунка видно, что взрывоопасная смесь формируется через 100 с после начала подачи газа в камеру, но ее равномерность по пространству (см. рис. 15) достигается только через 400–500 с или через 7–8 мин.

При меньшем времени выдержки качество смеси по пространству камеры может значительно отличаться от опыта к опыту, что обусловлено несколькими факторами. Во-первых, различием в объеме газа, подаваемого в камеру, который зависит от температуры окружающей среды. Во-вторых, коэффициентом турбулентной диффузии, от которого

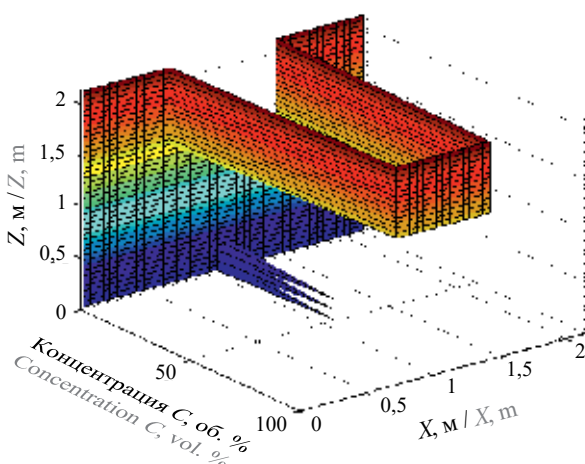


Рис. 14. Начальное состояние системы, принятое в расчетах при заполнении газом камеры в верхней ее части
Fig. 14. Initial state of the system assumed in calculations when the chamber is filled with gas in its upper part

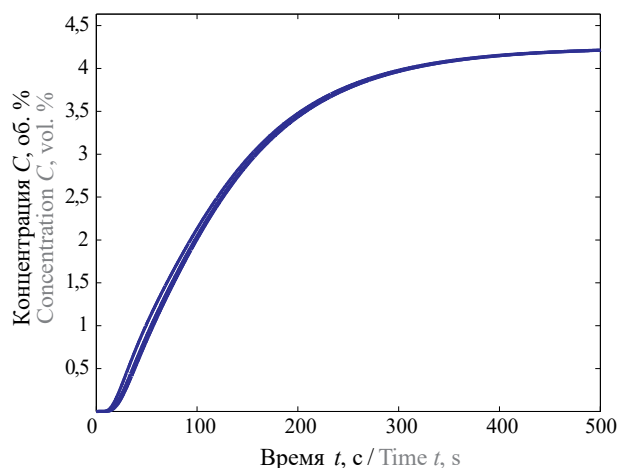


Рис. 15. Временные зависимости концентрации в трех точках экспериментальной камеры при ее заполнении в верхней части
Fig. 15. Time dependences of the concentration at three points of the experimental chamber when it is filled in the upper part

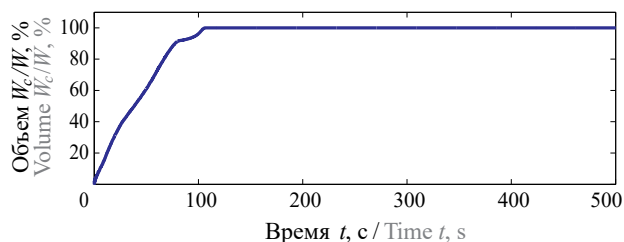


Рис. 16. Временные зависимости, описывающие процесс формирования взрывоопасной смеси при заполнении камеры в верхней части
Fig. 16. Time dependencies describing the process of explosive mixture formation when the chamber is filled in the upper part

зависит процесс формирования смеси и который меняется в широком диапазоне.

В-третьих, наличием вентилятора, используемого для смешения газа с воздухом и создающего значительные пульсационные скорости в смеси, что приводит к значительному изменению видимой скорости пламени. Например, наличие пульсаций скорости в 1 м/с приводит к увеличению скорости горения смеси в два раза, а взрывного давления в четыре раза.

Для лучшего понимания процесса формирования смеси в камере при ее заполнении в верхней части на рис. 17 приведены изолинии равной концентрации газа для двух моментов времени: через 5,0 и 10,0 с после выброса. На рис. 17 указаны точки вывода временных зависимостей концентрации, приведенных на рис. 15.

Расчеты показывают, что процесс смешения газа с воздухом значительно замедляется с течением времени. Поэтому смесь может быть взрывоопасной, но плохого качества. Об этом говорят и данные, приведенные на рис. 16, которые иллюстрируют процесс формирования взрывоопасной смеси в камере.

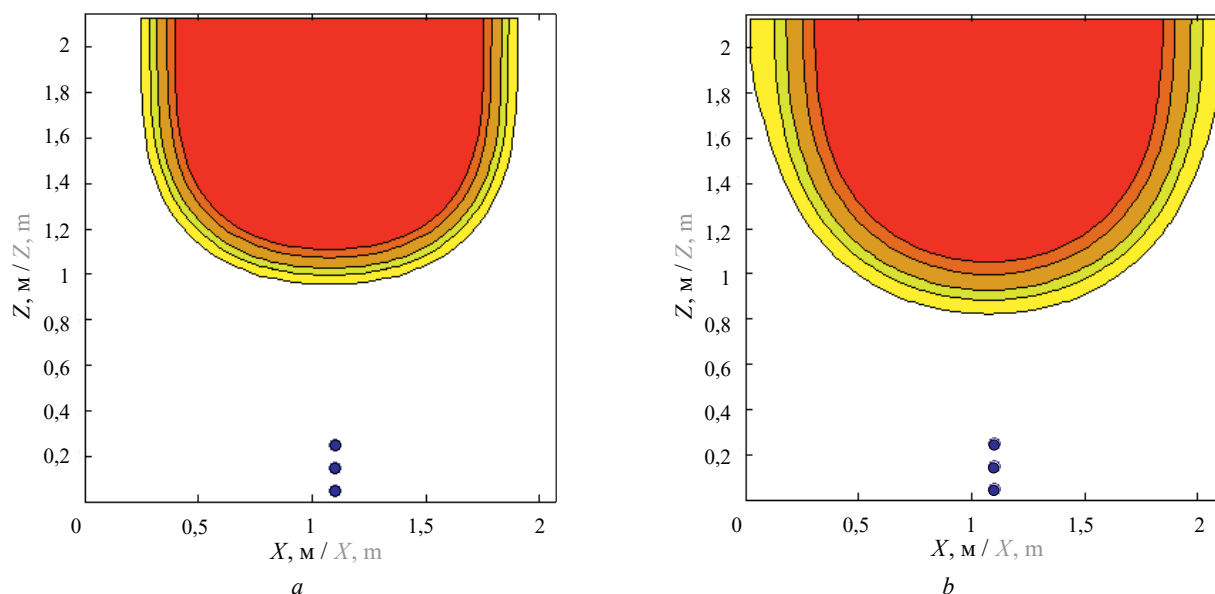


Рис. 17. Изолинии равных концентраций газа в экспериментальной камере при ее заполнении в верхней части: *a* — через 5,0 с; *b* — через 10,0 с после выброса. Внешняя изолиния — 2 %, далее — 3, 4, 6 и 8 об. %

Fig. 17. Isolines of equal gas concentrations in the experimental chamber when it is filled in the upper part: *a* — 5.0 seconds; *b* — 10.0 seconds after ejection. External isolation — 2 %, then — 3, 4, 6 and 8 vol. %

Анализ данных, приведенных на рис. 16, и данных рис. 15 показывает, что, например, на 100-й с во всей камере сформировалась взрывоопасная смесь (см. рис. 16), но при этом в нижних точках камеры концентрация смеси находится на нижнем концентрационном пределе и составляет всего 2 об. % (см. рис. 15). Другими словами, пространственное качество взрывоопасной смеси в камере на 100-й с достаточно плохое и оставляет желать лучшего. И только на 500-й с происходит выравнивание смеси по всему пространству камеры (см. рис. 15), т.е. смесь становится стехиометрической по всей камере.

На рис. 18 приведены фотографии взрыва смеси, сформированной указанным выше способом. Приведенные мгновенные фотографии дефлаграционного взрыва показывают, что за счет диффузии сформирована достаточно однородная смесь. На это указывает сферическая форма пламени. При

наличии неоднородности смеси фронт пламени принимает форму, которая значительно отличается от сферы, что связано с зависимостью скорости пламени от качества смеси.

Диффузия, приводящая к формированию взрывоопасной смеси, играет существенную роль не только при проведении экспериментальных исследований, но и при развитии взрывных аварий. В частности, на это указывается в публикациях [16–18]. Кроме этого, на сценарий развития аварии оказывают существенное влияние и другие факторы, например, начальная турбулизация смеси, которая вызвана струйным истечением газа из аварийного отверстия, или перемещение людей в аварийной квартире. На первую причину указывают публикации [19–21], а вторая указанная выше причина достаточно часто встречалась авторам данной статьи при расследовании аварийных ситуаций [1, 14].



Рис. 18. Мгновенные фотографии фронта пламени однородной смеси, сформировавшейся за счет диффузии

Fig. 18. Instantaneous photographs of the flame front of a homogeneous mixture formed by diffusion

Выводы

Показано, что для подготовки качественной газозвдушной смеси не следует использовать вентиляторы и что с данной проблемой хорошо справляется естественная турбулентная диффузия газов.

Расчетным путем получены минимальные интервалы времени, которые необходимы для формирования в кубической камере произвольного размера качественной газозвдушной смеси.

Использование при экспериментальных исследованиях естественной диффузии вместо вентиляторов, перемешивающих смесь, значительно сокращает время проведения экспериментов и значительно повышает точность и повторяемость опытов.

Для подготовки качественной (хорошо перемешанной) газозвдушной смеси исследователи, проводящие экспериментальные работы по изучению дефлаграционных внутренних взрывов, часто используют вентиляторы, которые не только перемешивают смесь, но и создают потоки со значительными пульсационными составляющими, затухание которых

(особенно для больших объемов испытательных камер) требует значительного времени и плохо поддается контролю со стороны испытателей. Это часто приводит к значительным погрешностям и плохой повторяемости экспериментов.

В настоящей статье показано, что для подготовки качественной газозвдушной смеси не нужно использовать вентиляторы и что с данной проблемой достаточно хорошо справляется естественная диффузия газов.

Для подтверждения данного утверждения в статье приводятся результаты расчетов по программам, достоверность вычислений которых проверена на результатах тестовых расчетов задач, имеющих аналитические решения.

Кроме этого, в статье приводятся фотографии взрыва смеси, сформированной за счет диффузии. Приведенные в статье мгновенные фотографии дефлаграционного взрыва показывают, что за счет диффузии сформирована достаточно однородная смесь, на что указывает сферичность фронта пламени.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Громов Н.В. Совершенствование технической системы обеспечения взрывоустойчивости зданий при взрывах газопаровоздушных смесей : дис. ... канд. техн. наук. М. : МГСУ, 2007. 134 с.
2. Шлег А.М. Определение параметров легкобрасываемых конструкций : дис. ... канд. техн. наук. М. : МГСУ, 2002. 201 с.
3. Казеннов В.В. Динамические процессы дефлаграционного горения во взрывоопасных зданиях и помещениях : дис. ... д-ра техн. наук. М. : МГСУ, 1997. 445 с.
4. Азамов Ж.М. Общие принципы проведения экспериментальных исследований внутренних дефлаграционных взрывов // Пожары и чрезвычайные ситуации: предупреждение, ликвидация. 2023. № 4. С. 79–86. DOI: 10.25257/FE.2023.4.79-86
5. Shamsadin Saeid M.H., Khadem J., Emami S., Ghodrat M. Effect of diffusion time on the mechanism of deflagration to detonation transition in an inhomogeneous mixture of hydrogen-air // International Journal of Hydrogen Energy. 2022. Vol. 47 (55). Pp. 23411–23426. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2022.05.116
6. Комаров А.А., Тимохин В.В. Экспериментальное исследование и моделирование процесса формирования взрывоопасных концентраций // Безопасность труда в промышленности. 2023. № 1. С. 84–88. DOI: 10.24000/0409-2961-2023-1-84-88
7. Бузаев Е.В., Загуменников Р.А. Косвенный метод определения коэффициента турбулентной диффузии при формировании взрывоопасных облаков // Пожаротушение: проблемы, технологии, инновации : сб. мат. III Междунар. науч.-практ. конф., в 2 ч. Ч. 1. М. : Академия ГПС МЧС России, 2014. С. 133–135.
8. Тимохин В.В. Особенности физической картины развития аварийных взрывов в изолированных помещениях // Пожары и чрезвычайные ситуации: предупреждение, ликвидация. 2022. № 2. С. 60–66. DOI: 10.25257/FE.2022.2.60-66
9. Комаров А.А., Васюков Г.В., Загуменников Р.А., Бузаев Е.В. Экспериментальное исследование и численное моделирование процесса образования взрывоопасной метановоздушной смеси в помещениях // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2015. № 24 (4). С. 30–38. EDN TVFFRH.
10. Загуменников Р.А. Параметры формирования взрывоопасных метановоздушных смесей в производственных помещениях : автореф. дис. ... канд. техн. наук. М. : Акад. гос. противопожарной службы МЧС России, 2016. 24 с.
11. Chengjun Yue, Li Chen, Zhan Li, Yuanchao Mao, Xiaohu Yao. Experimental study on gas explosions of methane-air mixtures in a full-scale residence building // Fuel. 2023. Vol. 353. P. 129166. DOI: 10.1016/j.fuel.2023.129166
12. Бузаев Е.В. Разработка методов прогнозирования параметров взрывоопасных зон при аварийных выбросах горючих веществ : дис. ... канд. техн. наук. М. : МГСУ, 2015. 124 с.
13. Komarov A., Korolchenko D., Gromov N., Korolchenko A., Jafari M., Gravit M. Specific Aspects of Modeling Gas Mixture Explosions in the Atmosphere // Fire. 2023. Vol. 6. No. 5. P. 201. DOI: 10.3390/fire6050201

14. Комаров А.А. Прогнозирование нагрузок от аварийных дефлаграционных взрывов и оценка последствий их воздействия на здания и сооружения : дис. ... д-ра техн. наук. М. : МГСУ, 2001. 460 с.
15. Комаров А.А., Корольченко Д.А., Громов Н.В. Экспериментальное определение эффективности остекления при аварийных взрывах внутри зданий // *Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety*. 2022. № 31 (6). С. 78–90. DOI: 10.22227/0869-7493.2022.31.06.78-90
16. Zihao Xiu, Zhenyi Liu, Pengliang Li, Mingzhi Li, Jianbo Ma, Tao Fan *et al.* Research on the dynamics of flame propagation and overpressure evolution in full-scale residential gas deflagration // *Case Studies in Thermal Engineering*. 2024. No. 62 (1). P. 105204. DOI: 10.1016/j.csite.2024.105204
17. Поландов Ю.Х., Корольченко Д.А., Евич А.А. Условия возникновения пожара в помещении при газовом взрыве. Экспериментальные данные // *Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety*. 2020. Т. 29. № 1. С. 9–21. DOI: 10.18322/PVB.2020.29.01.9-21. EDN CLTXKY.
18. Xu Ying, Yimiao Huang, Guowei Ma. A review on effects of different factors on gas explosions in underground structures // *Underground Space*. 2019. No. 5 (4). Pp. 298–314. DOI: 10.1016/j.undsp.2019.05.002
19. Cen K., Kang, Bin Song, Ruiqing Shen, Yidong Zhang, Wuge Yu, Qingsheng Wang. Dynamic Characteristics of Gas Explosion and Its Mitigation Measures inside Residential Buildings // *Mathematical Problems in Engineering*. 2019. No. 5. Pp. 1–15. DOI: 10.1155/2019/2068958
20. Bao Q., Fang Q., Zhang Y., Chen L., Yang S., Li Z. Effects of gas concentration and venting pressure on overpressure transients during vented explosion of methane-air mixtures // *Fuel*. 2016. Vol. 175. Pp. 40–48. DOI: 10.1016/j.fuel.2016.01.084
21. Korolchenko D., Polandov Iu.K., Evich A. Dynamic effects at internal deflagration explosions // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019. Vol. 603. P. 052008. DOI: 10.1088/1757-899X/603/5/052008

REFERENCES

1. Gromov N.V. *Improving the technical system for ensuring the explosion resistance of buildings during explosions of gas-steam-air mixtures : dissertation for the degree of candidate of technical sciences*. Moscow, MGSU, 2007; 134. (rus).
2. Schleg A.M. *Determination of the parameters of easily removable structures : dissertation for the degree of candidate of technical sciences*. Moscow, MGSU, 2002; 201. (rus).
3. Kazennov V.V. *Dynamic processes of deflagration combustion in explosive buildings and rooms : dissertation for the degree of doctor of technical sciences*. Moscow, MGSU, 1997; 445. (rus).
4. Azamov J.M. General principles for conducting experimental studies of internal deflagration explosions. *Fire and emergencies: prevention, elimination*. 2023; 4:79-86. DOI: 10.25257/FE.2023.4.79-86 (rus).
5. Shamsadin Saeid M.H., Khadem J., Emami S., Ghodrat M. Effect of diffusion time on the mechanism of deflagration to detonation transition in an inhomogeneous mixture of hydrogen-air. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2022; 47(55):23411-23426. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2022.05.116
6. Komarov A.A., Timokhin V.V. Experimental investigation and modeling of the formation of explosive concentrations. *Occupational Safety in Industry*. 2023; 1:84-88. DOI: 10.24000/0409-2961-2023-1-84-88 (rus).
7. Buzaev E.V., Zagumennikov R.A. An indirect method for determining the coefficient of turbulent diffusion in the formation of explosive clouds. *Firefighting: problems, technologies, innovations : collection of materials of the III International Scientific and Practical Conference, at 2 p.m. Part 1*. Moscow, Academy of GPS of the Ministry of Emergency Situations of Russia, 2014; 133-135. (rus).
8. Timokhin V.V. Peculiarities of the physical picture of the crash explosions development in isolated rooms. *Fire and emergencies: prevention, elimination*. 2022; 2:60-66. DOI: 10.25257/FE.2022.2.60-66 (rus).
9. Komarov A.A., Vasyukov G.V., Zagumennikov R.A., Buzaev E.V. Experimental study and numerical simulation of methane-air mixture formation process in premises. *Pozharovzryvobezопасnost/Fire and Explosion Safety*. 2015; 24(4):30-38. EDN TVFFRH. (rus).
10. Zagumennikov R.A. *Parameters of formation of explosive methane-air mixtures in industrial premises : abstract of the dissertation for the degree of candidate of technical sciences*. Moscow, Academy of the State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia, 2016; 24. (rus).
11. Chengjun Yue, Li Chen, Zhan Li, Yuanhao Mao, Xiaohu Yao. Experimental study on gas explosions of methane-air mixtures in a full-scale residence building. *Fuel*. 2023; 353:129166. DOI: 10.1016/j.fuel.2023.129166
12. Buzaev E.V. *Development of methods for predicting the parameters of explosive zones in case of accidental releases of combustible substances : dissertation for the degree of candidate of technical sciences*. Moscow, MGSU, 2015; 124. (rus).
13. Komarov A., Korolchenko D., Gromov N., Korolchenko A., Jafari M., Gravit M. Specific Aspects of Modeling Gas Mixture Explosions in the Atmosphere. *Fire*. 2023; 6(5):201. DOI: 10.3390/fire6050201
14. Komarov A.A. *Forecasting loads and estimating consequences of their impact on buildings and structures : dissertation for the degree of doctor of technical sciences*. Moscow, MGSU, 2001; 460. (rus).
15. Komarov A.A., Korolchenko D.A., Gromov N.V. Experimental determination of glazing efficiency in case of indoor explosions caused by accidents. *Pozharovzryvobezопасnost/Fire and Explosion Safety*. 2022; 31(6):78-90. DOI: 10.22227/0869-7493.2022.31.06.78-90 (rus).

16. Zihao Xiu, Zhenyi Liu, Pengliang Li, Mingzhi Li, Jianbo Ma, Tao Fan et al. Research on the dynamics of flame propagation and overpressure evolution in full-scale residential gas deflagration. *Case Studies in Thermal Engineering*. 2024; 62(1):105204. DOI: 10.1016/j.csite.2024.105204
17. Polandov Yu.K., Korolchenko D.A., Evich A.A. Conditions of occurrence of fire in the room with a gas explosion. Experimental data. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2020; 29(1):9-21. DOI: 10.18322/PVB.2020.29.01.9-21. EDN CLTXYK. (rus).
18. Xu Ying, Yimiao Huang, Guowei Ma. A review on effects of different factors on gas explosions in underground structures. *Underground Space*. 2019; 5(4):298-314. DOI: 10.1016/j.undsp.2019.05.002
19. Cen K., Kang, Bin Song, Ruiqing Shen, Yidong Zhang, Wuge Yu, Qingsheng Wang. Dynamic Characteristics of Gas Explosion and Its Mitigation Measures inside Residential Buildings. *Mathematical Problems in Engineering*. 2019; 5:1-15. DOI: 10.1155/2019/2068958
20. Bao Q., Fang Q., Zhang Y., Chen L., Yang S., Li Z. Effects of gas concentration and venting pressure on overpressure transients during vented explosion of methane-air mixtures. *Fuel*. 2016; 175:40-48. DOI: 10.1016/j.fuel.2016.01.084
21. Korolchenko D., Polandov Iu.K., Evich A. Dynamic effects at internal deflagration explosions. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019; 603:052008. DOI: 10.1088/1757-899X/603/5/052008

Поступила 26.02.2025, после доработки 21.03.2025;

принята к публикации 28.03.2025

Received February 26, 2025; Received in revised form March 21, 2025;

Accepted March 28, 2025

Информация об авторах

КОМАРОВ Александр Андреевич, д.т.н., профессор кафедры комплексной безопасности в строительстве, руководитель НИЦ «Взрывобезопасность» ИКБС, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26; РИНЦ ID: 155673; Scopus AuthorID: 57192380312; ResearcherID: AAC-8725-2022; ORCID: 0000-0003-2764-639X; e-mail: KomarovAA@mgsu.ru

ГРОМОВ Николай Викторович, к.т.н., заведующий лабораторией газодинамики и взрыва НИЦ «Взрывобезопасность» ИКБС, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26; РИНЦ ID: 550242; Scopus AuthorID: 57192376754; ResearcherID: AAO-5120-2021; ORCID: 0000-0002-9685-0880; e-mail: N.Gromov@ikbs-mgsu.ru

РЯДЧЕНКО Леонид Валентинович, студент, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26; ORCID: 0009-0002-8651-6624; e-mail: l.ryadchenko@ikbs-mgsu.ru

Вклад авторов:

Комаров А.А. — идея; научное руководство; выбор методов исследования; написание исходного текста статьи; итоговые выводы.

Громов Н.В. — сбор материала; обработка результатов; доработка текста; научное редактирование статьи.

Рядченко Л.В. — оформление результатов расчетов; построение графиков; оформление статьи.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about the authors

Alexander A. KOMAROV, Dr. Sci. (Eng.), Professor of Department of Integrated Safety in Civil Engineering, Head of the Explosion Safety Research Center of Institute of Complex Safety in Construction, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Yaroslavskoe Shosse, 26, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RSCI: 155673; Scopus AuthorID: 57192380312; ResearcherID: AAC-8725-2022; ORCID: 0000-0003-2764-639X; e-mail: KomarovAA@mgsu.ru

Nikolay V. GROMOV, Cand. Sci. (Eng.), Head of the Laboratory of Gas Dynamics and Explosion of the Explosion Safety Research Center of Institute of Complex Safety in Construction, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Yaroslavskoye Shosse, 26, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RSCI: 550242; Scopus AuthorID: 57192376754; ResearcherID: AAO-5120-2021; ORCID: 0000-0002-9685-0880; e-mail: N.Gromov@ikbs-mgsu.ru

Leonid V. RYADCHENKO, Student, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Yaroslavskoye Shosse, 26, Moscow, 129337, Russian Federation; ORCID: 0009-0002-8651-6624; e-mail: l.ryadchenko@ikbs-mgsu.ru

Contribution of the authors:

Komarov A.A. — idea; scientific guidance; selection of research methods; writing the original text of the article; final conclusions.

Gromov N.V. — collection of material; processing of results; follow on revision of the text; scientific editing of the article.

Ryadchenko L.V. — design of calculation results; plotting, design of the article.

The authors declare no conflicts of interests.