

ПОЖАРОВЗРЫВБЕЗОПАСНОСТЬ/FIRE AND EXPLOSION SAFETY. 2024. Т. 33. № 5. С. 5–15
POZHAROVZRYVOBEZOPASNOST/FIRE AND EXPLOSION SAFETY. 2024; 33(5):5-15

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ/RESEARCH PAPER

УДК 614.841.12

<https://doi.org/10.22227/0869-7493.2024.33.05.5-15>

Одномерная гидравлическая модель горения в преградах

Вячеслав Александрович Горев¹, Максим Михайлович Рукавишников²✉

¹ Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, г. Москва, Россия

² Всероссийский ордена «Знак Почета» научно-исследовательский институт противопожарной обороны Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Московская обл., г. Балашиха, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Вопрос влияния конфигурации загроможденного пространства на динамику развития аварийного взрыва, в частности на интенсивность ускорения пламени, исследуется достаточно давно. Во многих работах экспериментальными и численными методами рассматривается горение в преградах при их различном количестве, взаимном расположении, геометрических формах и других параметрах. Тем не менее в большинстве случаев рассматриваются преграды, расположенные упорядоченно, периодически. При этом взрывы газовых облаков могут происходить в условиях, где преграды, представленные строительными конструкциями и технологическим оборудованием, расположены неорганизованно.

Цель. Смоделировать процесс горения в массиве расположенных произвольно преград с учетом конкретных параметров загроможденного пространства (количества преград n_x , их среднего размера d , блокирующего отношения BO и объемной загроможденности θ) с помощью разрабатываемой гидравлической модели развития взрыва.

Метод исследования. Решается задача о горении в закрытой с одного конца трубе заданных геометрических параметров. Приведены выражения для расчета параметров загроможденного пространства, а также принцип, в соответствии с которым данные параметры интегрированы в гидравлическую модель.

Описание физической модели. Представлена система основных дифференциальных и алгебраических уравнений разрабатываемой модели.

Результаты и их обсуждение. Получены зависимости видимой скорости пламени (X_f)' от величины пройденного пламенем пути X_f . Расчет проводился для преград с размером $d = 1-4$ см при разных θ (0,1–0,25) и BO (0,09–0,37), величины которых регулировались изменением n_x .

Выводы. С ростом d или n_x пламя в загроможденном пространстве ускоряется сильнее. Рост BO , как и θ , ведет к увеличению скорости потока газа перед фронтом пламени и эффективной скорости горения. А следовательно, и к более интенсивному ускорению пламени. Полученные результаты позволяют проводить верификацию модели с помощью экспериментальных данных и улучшать ее в дальнейшем.

Ключевые слова: развитие взрыва; загроможденное пространство; дефлаграционное горение; ускорение пламени; аварийные взрывы

Для цитирования: Горев В.А., Рукавишников М.М. Одномерная гидравлическая модель горения в преградах // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2024. Т. 33. № 5. С. 5–15. DOI: 10.22227/0869-7493.2024.33.05.5-15

✉ Рукавишников Максим Михайлович, e-mail.rukavishnikov3.5.1@yandex.ru

One-dimensional hydraulic model of combustion in obstacles

Vyacheslav A. Gorev¹, Maxim M. Rukavishnikov²✉

¹ National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russian Federation

² All-Russian Research Institute for Fire Protection of Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters, Balashikha, Moscow Region, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The question of the influence of the configuration of the obstructed space on the dynamics of the emergency explosion development, in particular on the intensity of flame acceleration, has been studied for quite a long time. In many works by experimental and numerical methods combustion in obstacles at their various quantity, mutual location, geometrical forms and other parameters is considered. Nevertheless, in most cases, obstacles arranged in organized and periodical manner are considered. At the same time, explosions of gas clouds can occur in conditions where obstacles represented by building structures and technological equipment are arranged in an unorganized manner.

Objective. To simulate the combustion process with an array of randomly placed obstacles, taking into account the specific parameters of the confined space (the number of obstacles n_x , their average size d , blocking ratio BO and volumetric clutter θ) using the developed hydraulic model of explosion development.

Research method. The problem of combustion in a pipe closed at one end with specified geometric parameters is solved. Expressions for calculating the parameters of a confined space are given, as well as the principle according to which these parameters are integrated into a hydraulic model.

Description of the physical model. The system of basic differential and algebraic equations of the developed model is presented.

Results and discussion. Functions of the flame speed $(X_f)'$ to the path traversed by flame X_f are obtained. The calculation was carried out for obstacles with a size $d = 1\text{--}4$ cm at different θ (0.1–0.25) and BO (0.09–0.37), which were adjusted by changing n_x .

Conclusion. With the growth of d or n_x , the flame in the obstructed space accelerates more strongly. The growth of BO , like θ , leads to an increasing of the gas flow rate in front of the flame and the effective combustion rate. And, consequently, to more intense flame acceleration. Obtained results are make it possible to verify the model using experimental data and improve it in the future.

Keywords: explosion development; obstructed space; deflagration; flame acceleration; industrial explosions

For citation: Gorev V.A., Rukavishnikov M.M. One-dimensional hydraulic model of combustion in obstacles. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2024; 33(5):5-15. DOI: 10.22227/0869-7493.2024.33.05.5-15 (rus).

✉ Maxim Mikhaylovich Rukavishnikov, e-mail.rukavishnikov3.5.1@yandex.ru

Введение

Аварийные взрывы газов, как правило, происходят в режиме дефлаграционного сгорания. Об этом свидетельствуют многочисленные обзоры реальных взрывов [1–3]. Только взрыв в Порт-Хадсоне (США) иногда обозначают как «квазидетонацию», что на самом деле говорит о реализации быстрой дефлаграции.

Взрывы в открытом пространстве носят волновой характер. И для того, чтобы давление во фронте волны превысило значение в 10 кПа, скорость горения должна возрасти в десятки, иногда в сотни раз по отношению к скорости ламинарного горения большинства углеводородов, равной примерно 0,4 м/с. Такая интенсификация горения может произойти только в турбулентной среде с развитой площадью горения. Похожие условия создаются при взрывах в пространствах, загроможденных различными преградами (наружные технологические установки, коммуникации, строения и другое).

Поток горючей смеси впереди фронта пламени, возникающий под воздействием расширяющихся продуктов горения, взаимодействует с преградами, в результате чего происходит турбулизация среды и увеличение площади горения за счет огибания преград. Такой механизм ускорения горения обсуждался, например, в работах [4, 5].

В частности, в [4] описан порядок, согласно которому в начале процесса скорость газа невелика и уровень турбулентности низкий. Эффективная скорость горения растет в этом случае за счет увеличения площади горения в процессе огибания преград, т.е. действует механизм сдвига скоростей глобального течения. Возмущения в зоне горения при этом длинноволновые. По мере увеличения скорости горения, а следовательно, и скорости потока уровень турбулентности возрастает, и главную роль

в увеличении скорости горения начинают играть возмущения, вызванные этой турбулентностью.

Подавляющее большинство экспериментальных работ, направленных на изучение процесса горения в загроможденных пространствах, сосредоточены на структурах с периодически повторяющимися преградами. Например, прохождение пламени через преграды в виде расположенных периодически перегородок было экспериментально рассмотрено в работах [6, 7]. Основной результат этих исследований заключается в интенсификации горения с увеличением блокирующего отношения, основной характеристики, определяющей ускорение горения, а также с уменьшением расстояния между преградами, т.е. с ростом частоты их расположения. Подобные исследования остаются актуальными и проводятся по сей день [8–11].

Интенсивно развивались и численные методы исследования данного процесса. В частности, в работе [12] систематически изучалось горение в лабораторной установке методом LES (Large Eddy Simulation), в которой преграды располагались также периодически. Результаты вычислений в основном соответствовали экспериментальным данным. В работе [13] численно было получено, что при увеличении количества преград на единицу длины загроможденного канала увеличивается количество возмущений во фронте пламени и, как следствие, площадь горения и скорость пламени возрастают. Похожий эффект можно наблюдать при уменьшении расстояния между преградами [14, 15].

При этом в ряде работ [16, 17] обнаружены условия, когда увеличение блокирующего отношения уменьшает его ускоряющее действие, а увеличение количества преград не влияет на скорость распространения пламени. Дальнейшие исследования показали, что существуют некоторые условия, в том числе соот-

ношение количества преград и их взаимного расположения, которым соответствует максимальное ускорение [18–20]. Причем эти условия могут различаться в зависимости от характеристик исходной смеси [21].

Влияние формы преград на ускорение пламени при взрыве было исследовано, например, в работах [22–25]. В частности, в [22, 23] экспериментально получен вывод о том, что наличие на пути распространения пламени препятствий с острыми вершинами сильнее интенсифицирует турбулизацию среды за ними, усиливая тем самым ускорение пламени. Похожие выводы были получены численно в [24].

Помимо преград с простой геометрической формой, в исследованиях применительно к сферическому пламени были использованы также кубические [25] и сферические сетки [17], а также преграды, имитирующие реальные объекты [26]. В частности, в [25] было получено, что эффект ускорения пламени наблюдается до тех пор, пока на пути распространения пламени будут присутствовать преграды, причем чем меньше их объемная проницаемость в пространстве (размер сеточной ячейки), тем сильнее пламя будет ускоряться.

Обратная ситуация была рассмотрена в работе [27], в которой применялись мелкоячеистые сетки квадратного сечения. При использовании такой сетки в несколько слоев проницаемость преград сильно снижается. Набегающий на сетку поток делится на множество мелкомасштабных вихрей, температура которых слишком мала для поддержания процесса горения. В результате наблюдается гашение пламени.

Отметим, что при горении в трубах при определенных условиях может наблюдаться переход в детонацию. Возможность и причины реализации такого режима горения также активно исследуются на сегодняшний день [13, 24, 28–30].

В данной работе разрабатывается одномерная гидравлическая модель развития горения в массиве преград. При этом предполагается рассматривать преграды, расположенные не только периодически, но и произвольно. Выбор такого подхода обоснован тем, что для гидравлической модели накоплен фактический материал для учета действия различных преград, в том числе и массива преград¹.

Метод исследования

Рассматривается процесс горения в закрытой с одного конца трубе квадратного сечения $D \times D$ и длиной L . Инициирование горения происходит у закрытого конца. Начальная форма пламени полусферическая. Фронт горения относительно горючей смеси движется с заданной скоростью S_L . Обычно

это фундаментальная ламинарная скорость невозмущенного пламени. После касания пламенем стенок трубы вводится экспериментальный множитель K_f , учитывающий увеличение площади горения по сравнению с площадью поперечного сечения канала. В отсутствие преград эффективная скорость горения $U_{eff} = K_f S_L$. В дальнейшем предполагается, что пламя плоское с площадью D^2 . Взаимодействие потока со стенками трубы при этом не учитывается, поскольку данная работа ориентирована, в том числе, на изучение взрыва в открытом пространстве. Турбулизация потока в трубе происходит вследствие наличия на пути распространяющегося пламени произвольно расположенных чередующихся преград. В результате с течением времени масса продуктов горения будет изменяться следующим образом:

$$\frac{dM}{dt} = U_{eff} \rho D^2. \quad (1)$$

Предполагается, что плотность и давление газа связаны соотношением адиабаты:

$$\frac{P_i}{\rho_i^{\gamma_i}} = \frac{P_0}{\rho_0^{\gamma}}. \quad (2)$$

В рассматриваемой модели генерирование турбулентности происходит за счет взаимодействия движущегося перед зоной горения потока и преград, расположенных на его пути. При этом локальные характеристики турбулентности определяются локальным значением скорости этого потока V и локальными характеристиками пространства с преградами.

Пусть на заданном участке трубы поперечно направлению движения потока произвольно расположены цилиндрические преграды со средним диаметром d в количестве n_x . Длину загроможденного участка (далее — контрольный объем) обозначим величиной ΔX , а его объем будет равен $D^2 \cdot \Delta X$.

В данном случае пространство, занятое преградами, помимо среднего размера преград d , характеризуется:

- их объемной долей в контрольном объеме или загроможденностью:

$$\theta = \frac{\sum_{i=1}^{n_x} n_i \frac{\pi}{4} d_i^2 D}{D^2 \Delta X}; \quad (3)$$

- средним расстоянием между преградами:

$$h = \left[\frac{D^2 \Delta X}{n_x} \right]^{\frac{1}{3}}; \quad (4)$$

¹ Sha W.T., Launder B.E. A model for turbulent momentum and heat transport in large rod bundles // Argonne National Labs. 1979. URL: <https://digital.library.unt.edu/ark:/67531/metadc283250>

- площадью поверхности преград в единице контрольного объема:

$$A_w = \frac{\sum_{i=1}^{n_i} n_i \pi d_i D}{D^2 \Delta X}; \quad (5)$$

- средним блокирующим отношением:

$$BO = \frac{d}{h}. \quad (6)$$

В теории турбулентного горения существуют различные выражения для скорости турбулентного горения U_T . Наиболее часто для развитой турбулентности и не подверженного сильному влиянию стретч-эффекта пламени используется зависимость $U_T = C_1 U'$, где коэффициент $C_1 = 2$ для больших масштабов турбулентности, а U' — пульсационная составляющая, которая в широком диапазоне значений BO ($0 \leq BO \leq 0,4$), основываясь на [31], характеризуется следующей зависимостью:

$$U' \approx \frac{BO}{2} V. \quad (7)$$

При этом, если $C_1 = 1$ [32], то $U_T = U'$. Тогда:

$$U_T = \frac{BO}{2} V. \quad (8)$$

Отметим, что возможны и другие определения BO , что уточняется при анализе экспериментальных результатов.

Эффективная скорость горения в турбулентной зоне определяется площадью пламени A_f , а также суммой ламинарной и турбулентной скоростей, и с учетом выражения (8) записывается следующим образом:

$$U_{eff} = A_f \left(S_L + \frac{BO}{2} V \right). \quad (9)$$

Описание физической модели

Из уравнения состояния идеального газа для продуктов сгорания выводится уравнение для описания изменения их давления по времени. Продукты горения предполагаются неподвижными вследствие граничных условий на закрытом конце трубы. Кроме того скорость движения зоны горения относительно продуктов горения меньше скорости звука в них, т.е. дефлаграция Чэпмена–Жуге не достигается. При переходе через зону горения давление в продуктах сгорания связывается с давлением несгоревшего газа

впереди фронта пламени с помощью соотношения Рэлея – Михельсона. Скорость движения пламени выражается как $X_f' = U_{eff} + V_1$, где скорость газа перед фронтом горения V_1 связывается с давлением перед фронтом пламени выражением для простой волны с учетом сопротивления потоку на преградах.

В результате получается замкнутая система, которая позволяет определить все характеристики взрывного процесса через скорость горения. Данная система представлена в безразмерном виде:

$$\begin{aligned} \frac{d\overline{\Delta P_2}}{dt} = \frac{\gamma_2(1 + \overline{\Delta P_2})}{X_f(1 - \theta)} \cdot \left[\frac{1}{A_f} \left(1 + \right. \right. \\ \left. \left. + \frac{\frac{BO}{2} \overline{V}_1}{1 + 0,06 \frac{BO}{2} \overline{V}_1 (\bar{t} - \bar{t}_k) \overline{A}_w} \right) \sigma - (1 - \theta) \frac{d\overline{X}_f}{dt} + \right. \\ \left. + \overline{X}_f \frac{d\overline{X}_f}{dt} \frac{d\theta}{d\overline{X}_f} \right]; \end{aligned} \quad (10)$$

$$\frac{d\overline{X}_f}{dt} = \overline{U}_{eff} + \overline{V}_1; \quad (11)$$

$$\overline{\Delta P_1} = \overline{\Delta P_2} + (\sigma - 1)(1 + \overline{\Delta P_1})^{\frac{1}{\gamma_1}} \overline{U}_{eff}^2 \overline{S}_L^2; \quad (12)$$

$$\begin{aligned} 1 + \overline{\Delta P_1} = \left(1 + \frac{\gamma_1 - 1}{2} \frac{\overline{V}_1 \overline{S}_L}{\gamma_1^{\frac{1}{2}}} \right)^{\frac{2\gamma_1}{\gamma_1 - 1}} + \\ + \overline{\Lambda}(1 + \overline{\Delta P_1})^{\frac{1}{\gamma_1}} \frac{\overline{V}_1^2}{2} \overline{S}_L^2 \left[\frac{\overline{X}_k - \overline{X}_f}{2} \right]. \end{aligned} \quad (13)$$

Турбулентная скорость горения в данной модели выражается через дробь, где числитель принимается аналогичным выражению (8), а знаменатель качественно описывает диссипацию турбулентной энергии ϵ за преградами, исходя из $\epsilon = 0,36 U'^3 / L$, где масштаб турбулентности $L = C_l / A_w$ ($C_l = 0,1 - 0,4$)¹.

Степень расширения продуктов горения здесь зависит от плотности свежей смеси и продуктов: $\sigma = (\rho_1 / \rho_2)$.

Переменная Λ в выражении (13) описывает характер сопротивления распространяющемуся в трубе потоку, вызванному возникновением сил трения при его взаимодействии с преградами, и в безразмерном виде определяется как:

$$\overline{\Lambda} = f \overline{A}_w. \quad (14)$$

Здесь параметр f представляет собой функцию, вид которой зависит от геометрических параметров преград и от геометрии свободного пространства между ними. В случае, рассматриваемом в данной задаче, поток распространяется поперечно цилиндрическим стержням, поэтому в соответствии с [31] параметр f может быть определен следующим образом:

$$f = \left\{ 0,23 + \frac{0,11}{\left[\left(3 \frac{h}{d} \right)^{0,5} - 1 \right]^{1,08}} \right\} \text{Re}^{-0,15}, \quad (15)$$

где $\text{Re} = V_1 d / \nu$ — число Рейнольдса, которое зависит от скорости потока, среднего диаметра стержней, а также от коэффициента вязкости ν , значение которого принято равным $1,6 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{сек}$.

Здесь и далее в работе используются следующие обозначения величин: t — время, с; t_k — время выхода пламени из загроможденного преградами контрольного объема, с; ΔP_1 — изменение давления свежей смеси, Па; ΔP_2 — изменение давления продуктов сгорания, Па; γ_1 — показатель адиабаты свежей смеси; γ_2 — показатель адиабаты продуктов сгорания; σ — физическая степень расширения продуктов сгорания; ρ_1 — плотность свежей смеси, $\text{кг}/\text{м}^3$; ρ_2 — плотность продуктов сгорания, $\text{кг}/\text{м}^3$; X_f — положение фронта пламени относительно начала координатной оси (закрытого конца трубы), м; X_k — положение фронта пламени при $t = t_k$ (в момент времени выхода пламени из контрольного объема), м; θ — объемная загроможденность контрольного объема преградами, %, доли; BO — блокирующее отношение, %, доли; A_f — площадь поверхности фронта пламени, м^2 ; A_w — общая площадь преград на единицу контрольного объема, $\text{м}^2/\text{м}^3$; U_{eff} — эффективная скорость горения, $\text{м}/\text{с}$; V_1 — скорость движения свежей смеси, $\text{м}/\text{с}$; S_L — ламинарная скорость пламени, $\text{м}/\text{с}$; $n_{i(x)}$ — порядковый номер преграды (количество преград); d — средний диаметр преграды, м; h — среднее расстояние между преградами, м; ΔX — длина загроможденного преградами участка трубы, м; D — высота/ширина трубы, м; L — длина трубы, м.

Параметры с размерностью, м, были обезразмерены на характерный размер D :

$$\bar{X}_f = \frac{X_f}{D}; \bar{A}_w = A_w D; \bar{t} = \frac{t S_L}{D}; \bar{V}_1 = \frac{V_1}{S_L};$$

$$\bar{\Delta P} = \frac{\Delta P}{P_0}; \bar{\rho} = \frac{\rho}{\rho_0}; \bar{S}_L = \frac{S_L}{\left(\frac{P_0}{\rho_0} \right)^{\frac{1}{2}}}.$$

Исходные данные для проведения расчета
The initial data for the calculation

Показатель Indicator	Значение Value
Показатель адиабаты исходной смеси γ_1 Heat capacity ratio of unburned gas γ_1	1,4
Показатель адиабаты исходной смеси γ_2 Heat capacity ratio of combustion products γ_2	1,27
Начальная степень расширения продуктов горения σ Combustion product's degree of expansion σ	7
Безразмерная ламинарная скорость пламени $\bar{S}_L$ Dimensionless laminar burning velocity $\bar{S}_L$	$1,37 \cdot 10^{-3}$
Безразмерная максимальная площадь пламени (задается через экспериментальный множитель K_f) Dimensional maximum flame area (set using an experimental multiplier K_f)	1,2
Количество преград в контрольном объеме n_x The number of obstacles in a confined volume n_x	Var
Средний диаметр преград d Average obstacles diameter d	1–4 см 1–4 cm
Длина трубы L Pipe length L	2 м 2 m

Исходные данные для проведения моделирования

Ниже представлены исходные данные (см. табл.), которые были использованы при решении уравнений физической модели, описанной выше.

При моделировании было принято, что участок с преградами начинается сразу после места, где происходит соприкосновение пламени с боковыми стенками трубы, а площадь пламени выходит на свое максимальное значение, т.е. завершается сферический режим горения. Размерная длина участка с преградами ΔX принимается равной 120 см. Характерный размер трубы D принимается 20 см. Начальная размерная координата X_f , при которой пламя входит в контрольный объем, загроможденный преградами, принимается равной 5,2 см.

Величины θ , h и BO определяются в зависимости от n_x и d в соответствии с выражениями (3), (4), (6).

Начальные условия для определяемых параметров взрыва принимались нулевыми.

Результаты моделирования и их обсуждение

На рис. 1–7 ниже представлены безразмерные зависимости скорости пламени от его положения относительно начала трубы (источника зажигания).

Отмечены соответствующие значения блокирующего отношения, объемной загроможденности, среднего диаметра преград. Точка «А» на рис. 1 соответствует окончанию полусферического режима горения, точка «В» – началу горения в контрольном объеме с преградами, «С» – выходу пламени из контрольного объема. Расположение указанных точек соответствует рис. 2–7.

Для преград со средним диаметром $d = 1$ см их количество в контрольном объеме было подобрано таким образом, чтобы загроможденность θ была равна 0,01; 0,05; 0,1; 0,15 и 0,2. Тот же принцип использовался при исследовании преград с другими размерами (рис. 2–4).

В начальный момент времени (до точки «А») форма фронта горения предполагается полусферической. Видимая скорость пламени, соответствующая эффективной скорости горения, зависит от развития фронта горения и выходит на установившееся значение (плато) примерно в один момент времени ($\bar{X}_f = 0,2$), где пламя достигает стенок трубы, а его площадь выходит на свою максимальную величину.

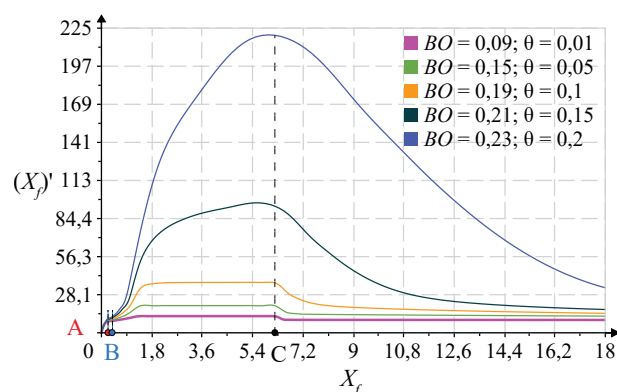


Рис. 1. Зависимости безразмерной видимой скорости пламени $(X_f)'$ от безразмерного положения X_f при $d = 1$ см
Fig. 1. Dependences of dimensionless apparent flame speed $(X_f)'$ on dimensionless position X_f at $d = 1$ cm

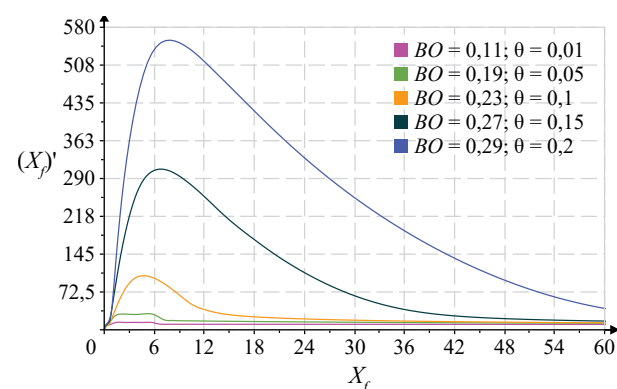


Рис. 2. Зависимости безразмерной видимой скорости пламени $(X_f)'$ от безразмерного положения X_f при $d = 2$ см
Fig. 2. Dependences of dimensionless apparent flame speed $(X_f)'$ on dimensionless position X_f at $d = 2$ cm

Далее, по достижении зоны, загроможденной преградами (точка «В», $\bar{X}_f = 0,26$), вводится механизм турбулизации потока. Пламя, обтекая преграды, ускоряется, а рост эффективной скорости горения U_{eff} определяется выражением (9). При этом с ростом загроможденности θ величина BO также возрастала, в результате чего пламя ускорялось сильнее.

Стоит отметить, что при относительно малых значениях BO (приблизительно до 0,2) скорость пламени в преградах выходила на установившиеся значения (плато). При этом в случаях, где плато отсутствует, можно сделать предположение о том, что пламя выходит из контрольного объема быстрее, чем успевает достичь своей максимальной скорости в нем.

После достижения пламенем крайней точки контрольного объема (точка «С», $\bar{X}_k = 6,26$) преграды отсутствуют, поэтому параметрам θ и BO присваиваются нулевые значения. При этом начальное условие для движения за преградами для скорости $V_1(t_k)$ сохраняется. Начиная с этой точки, знаменатель турбулентной скорости горения в уравнениях (10)–(12) с увеличением времени растет моделируя диссипа-

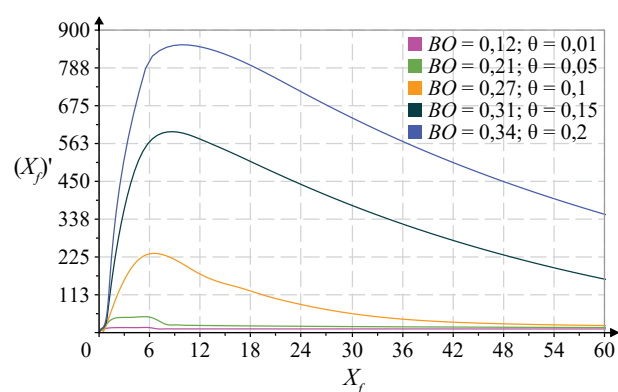


Рис. 3. Зависимости безразмерной видимой скорости пламени $(X_f)'$ от безразмерного положения X_f при $d = 3$ см
Fig. 3. Dependences of dimensionless apparent flame speed $(X_f)'$ on dimensionless position X_f at $d = 3$ cm

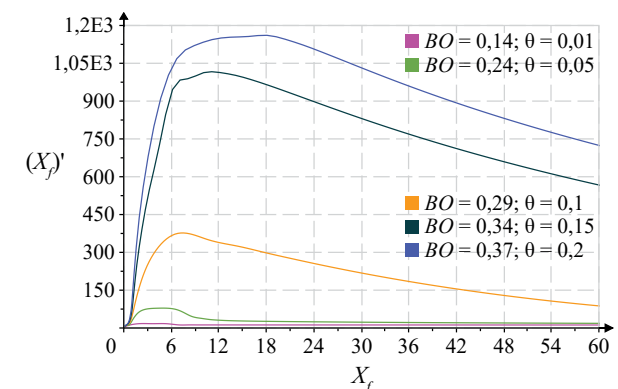


Рис. 4. Зависимости безразмерной видимой скорости пламени $(X_f)'$ от безразмерного положения X_f при $d = 4$ см
Fig. 4. Dependences of dimensionless apparent flame speed $(X_f)'$ on dimensionless position X_f at $d = 4$ cm

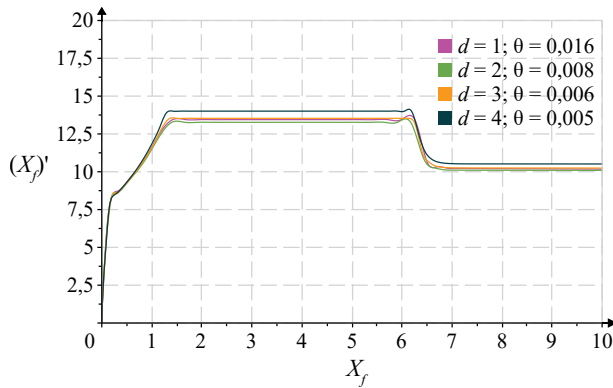


Рис. 5. Зависимости безразмерной видимой скорости пламени $(X_f)'$ от безразмерного положения X_f при $BO = 0,1$

Fig. 5. Dependences of dimensionless apparent flame speed $(X_f)'$ on dimensionless position X_f at $BO = 0.1$

цию кинетической турбулентной энергии. В результате скорость пламени при дальнейшем движении вдоль трубы снижалась.

Максимальная размерная скорость пламени, полученная при заданной конфигурации преград ($d = 1$ см и $\theta = 0,2$), в соответствии с рис. 1 приблизительно равна 88 м/с. При таких параметрах значение блокирующего отношения оказалось самым большим из исследованных для указанного диаметра. Можно утверждать, что при дальнейшем увеличении загроможденности контрольного объема (т.е. при увеличении количества преград в контрольном объеме) скорость будет возрастать сильнее, за исключением тех случаев, где достигнуто плато.

Похожую картину можно видеть также на рис. 2–4.

Наибольшие значения скорости пламени были получены при $d = 2$ см, $\theta = 0,2$ (рис. 2); $d = 3$ см, $\theta = 0,2$ (рис. 3); $d = 4$ см, $\theta = 0,2$ (рис. 4). Значения размерной скорости пламени составили приблизительно 207, 342 и 465 м/с соответственно.

При относительно больших значениях BO (0,27–0,34) можно наблюдать достаточно сильное ускорение пламени. Предположительно, в таких случаях скорость пламени далека от своего максимального значения и слишком быстро достигает конца участка с преградами.

При выбранных аналогично рис. 1 значениях θ , но разных d , меняются и величины BO . Поэтому целесообразно оценить исследуемую зависимость при различных размерах преград в пределах одной величины блокирующего отношения. Как и в предыдущем случае, регулирование значения BO производилось посредством изменения количества преград в контрольном объеме.

На рис. 5 картина перемещения пламени вдоль трубы аналогична предыдущим рассматриваемым случаям.

При этом здесь блокирующее отношение невелико, а увеличение диаметра преград не приводит к сильному росту загроможденности и, следова-

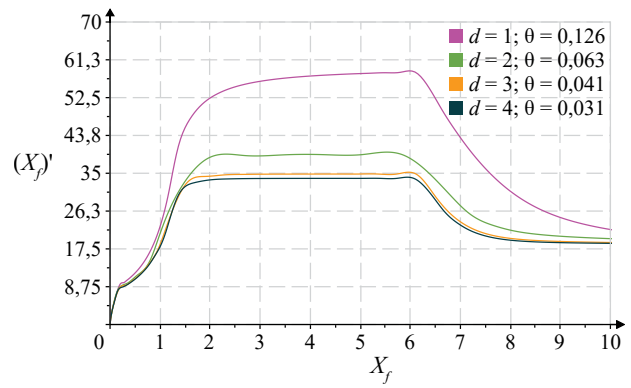


Рис. 6. Зависимости безразмерной видимой скорости пламени $(X_f)'$ от безразмерного положения X_f при $BO = 0,2$

Fig. 6. Dependences of dimensionless apparent flame speed $(X_f)'$ on dimensionless position X_f at $BO = 0.2$

тельно, к сильному ускорению пламени. Поэтому в рассматриваемых случаях максимальную размерную скорость пламени при любом размере преград можно считать приблизительно равной 5,5 м/с.

Значительные изменения можно наблюдать при $BO = 0,2$ (рис. 6). В этом случае сильно выделяется кривая при $d = 1$ см. Здесь количество преград, необходимое для того, чтобы обеспечить требуемое значение BO , составило 385, когда при $d = 2$ см для заданного блокирующего отношения необходимо 48 преград. В первом случае загроможденность контрольного объема оказалась больше, а следовательно, и ускорение пламени в таком объеме будет сильнее.

Максимальная размерная скорость пламени в зоне с преградами при $d = 1$ см приблизительно равна 24 м/с.

В соответствии с рис. 7, наибольшее ускорение также достигается при наименьшем диаметре преград ($d = 1$ см) за счет наибольшего количества преград, необходимых для обеспечения заданного BO и, как следствие, наибольшей загроможденности $\theta = 0,25$.

Максимальная размерная скорость при $d = 1$ см составила примерно 178 м/с, а закономерность

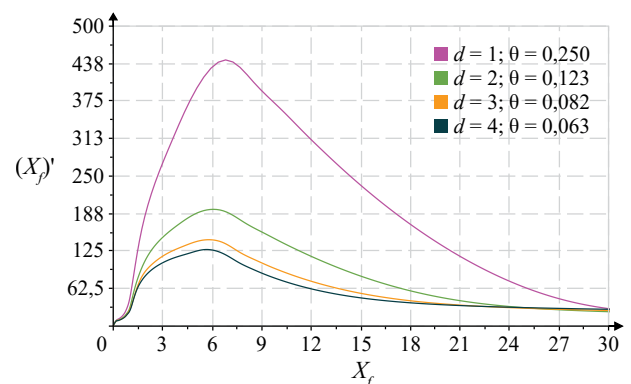


Рис. 7. Зависимости безразмерной видимой скорости пламени $(X_f)'$ от безразмерного положения X_f при $BO = 0,25$

Fig. 7. Dependences of dimensionless apparent flame speed $(X_f)'$ on dimensionless position X_f at $BO = 0.25$

роста интенсивности ускорения с ростом размера преград осталась аналогичной рис. 6.

Выводы

Преимуществом разработанной гидравлической модели турбулентного горения в преградах является возможность использовать экспериментальные данные при проведении расчета, в том числе для случая массива преград [31].

Модель позволила адекватно рассчитать для различных конфигураций массива преград значения скорости и давления, выявить влияние разных факторов (BO , θ , d) на скорость горения в этом массиве.

Было качественно показано, что размер преград (средний диаметр стержня d), как и их количество, напрямую влияют на интенсивность ускорения пла-

мени при его прохождении через эти преграды в заданном контрольном объеме.

С увеличением размера или количества преград на единицу объема увеличивается их блокирующее отношение, а также объемная загроможденность свободного пространства. В свою очередь, величина блокирующего отношения напрямую связана с эффективной скоростью горения, т.е. с увеличением BO увеличивается скорость потока V_1 , за счет чего растет турбулентная составляющая эффективной скорости горения, а следовательно, и видимая скорость пламени.

Полученные результаты не противоречат имеющимся экспериментальным данным, представленным в других работах, и позволяют верифицировать полученную модель результатами экспериментов в будущем, а простота структуры модели – совершенствовать ее (учитывать различные факторы).

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Bradley D., Chamberlain G.A., Drysdale D.D. Large vapour cloud explosions, with particular reference to that at Buncefield // *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. 2012. Vol. 370. Pp. 544–566. DOI: 10.1098/rsta.2011.0419
2. Strehlow R.A. Unconfined vapour-cloud explosions : an overview // 14th Symp. (Int.) on Combustion. The Combustion Institute. 1973. Pp. 1189–1200. DOI: 10.1016/S0082-0784(73)80107-9
3. Chamberlain G., Oran E., Pekalski A. Detonations in industrial vapour cloud explosions // *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2019. Vol. 62. DOI: 10.1016/j.jlp.2019.103918
4. Moen I.O., Donato M., Knystautas R., Lee J.H. Flame acceleration due to turbulence produced by obstacles // *Combustion and Flame*. 1980. Vol. 3. Issue 1. Pp. 21–32. DOI: 10.1016/0010-2180(80)90003-6
5. Moen I.O., Donato M., Knystautas R., Lee J.H., Wagner H.Gg. Turbulent flame propagation and acceleration in the presence of obstacles // *Prog. Astronautics and Aeronautics*. 1981. Vol. 75. Pp. 33–47.
6. Chan C., Moen I.O., Lee J.H.S. Influence of confinement on flame acceleration due to repeated obstacles // *Combustion and Flame*. 1983. Vol. 49. Issues 1–3. Pp. 27–39. DOI: 10.1016/0010-2180(83)90148-7
7. Teodorczyk A., Lee J.H.S., Knystautas R. The structure of fast turbulent flames in very rough, obstacle-filled channels // *Symposium (International) on Combustion*. 1991. Vol. 23. Issue 1. Pp. 735–741. DOI: 10.1016/S0082-0784(06)80324-3
8. Li R., Luo Zh., Cheng F., Wang T., Lin H., Liu H. A comparative investigation of premixed flame propagating of combustible gases-methane mixtures across an obstructed closed tube // *Fuel*. 2021. Vol. 289. DOI: 10.1016/j.fuel.2020.119766
9. Xing H., Qiu Ya., Sun S., Wang M., Li B., Xie L. Experimental study of overpressure and temperature field behaviors of a methane-air mixture with different ignition positions, solid structure obstacles and initial turbulence levels // *Fuel*. 2020. Vol. 287. DOI: 10.1016/j.fuel.2020.119446
10. Yakush S., Semenov O., Alexeev M. Premixed propane — air flame propagation in a narrow channel with obstacles // *Energies*. 2023. Vol. 16. Issue 3. P. 1516. DOI: 10.3390/en16031516. EDN KLWHDW.
11. Du Ya., Li G., Wang Sh., Qi Sh., Li Ya., Wang B. Effects of obstacle number on characteristics of vented gasoline-air mixture explosions // *CIESC Journal*. 2017. Vol. 68. Issue 7. Pp. 2946–2955. URL: <https://hgxb.cip.com.cn/EN/10.11949/j.issn.0438-1157.20161612>
12. Gubba S.R., Ibrahim S.S., Malalasekera W., Masri A.R. LES Modeling of premixed deflagrating flames in a small-scale vented explosion chamber with a series of solid obstructions // *Combustion Science and Technology*. 2008. Vol. 180. Issues 10–11. Pp. 1936–1955. DOI: 10.1080/00102200802261852
13. Gamezo V.N., Ogawa T., Oran E.S. Flame acceleration and DDT in channels with obstacles: Effect of obstacle spacing // *Combustion and Flame*. 2008. Vol. 155. Issues 1–2. Pp. 302–315. DOI: 10.1016/j.combustflame.2008.06.004
14. Elshimy M., Ibrahim S., Malalasekera W. LES — DFSD modelling of vented hydrogen explosions in a small-scale combustion chamber // *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2021. Vol. 72. DOI: 10.1016/j.jlp.2021.104580

15. Li J., Hao H., Shi Ya., Fang Q., Li Zh., Chen L. Experimental and computational Fluid Dynamics study of separation gap effect on gas explosion mitigation for methane storage tanks // *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2018. Vol. 55. Pp. 359–380. DOI: 10.1016/j.jlp.2018.07.008
16. Горев В.А., Мирошников С.Н. Ускоряющееся горение в газовых объемах // *Химическая физика*. 1982. № 6. С. 854–858.
17. Dörge K.J., Pangritz D., Wagner H.Gg. Experiments on velocity augmentation of spherical flames by grids // *Acta Astroautica*. 1976. Vol. 3. Issues 11–12. Pp. 1067–1076. DOI: 10.1016/0094-5765(76)90013-8
18. Na'inna A.M., Phylaktou H.N., Andrews G.E. The acceleration of flames in tube explosions with two obstacles as a function of the obstacle separation distance // *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2013. Vol. 26. Issue 6. Pp. 1597–1603. DOI: 10.1016/j.jlp.2013.08.003
19. Na'inna A.M., Somuano G.B., Phylaktou H.N., Andrews G.E. Flame acceleration in tube explosions with up to three flat-bar obstacles with variable obstacle separation distance // *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2015. Vol. 38. Pp. 119–124. DOI: 10.1016/j.jlp.2015.08.009
20. Li G., Du Ya., Liang J., Wang Sh., Wang B., Qi Sh. Characteristics of gasoline — air mixture explosions with different obstacle configurations // *Journal of the Energy Institute*. 2017. Vol. 91. Issue 2. Pp. 194–202. DOI: 10.1016/j.joei.2017.01.001
21. Na'inna A.M., Phylaktou H.N., Andrews G.E. Acceleration of flames in tube explosions with two obstacles as a function of the obstacle separation distance: the influence of mixture reactivity // *Proc. of the Seventh International Seminar on Fire & Explosion Hazards (ISFEH7)*. 2013. Pp. 627–636. DOI: 10.3850/978-981-07-5936-0_10-02
22. Masri A.R., Ibrahim S.S., Nehzat N., Green A.R. Experimental study of premixed flame propagation over various solid obstructions // *Experimental Thermal and Fluid Science*. 2000. Vol. 21. Issues 1–3. Pp. 109–116. DOI: 10.1016/S0894-1777(99)00060-6
23. Xiao G., Wang Sh., Mi H., Khan F. Analysis of obstacle shape on gas explosion characteristics // *Process Safety and Environmental Protection*. 2022. Vol. 161. Pp. 78–87. DOI: 10.1016/j.psep.2022.03.019
24. Xiao H., Oran E.S. Flame acceleration and deflagration-to-detonation transition in hydrogen-air mixture in a channel with an array of obstacles of different shapes // *Combustion and Flame*. 2020. Vol. 220. Pp. 378–393. DOI: 10.1016/j.combustflame.2020.07.013
25. Горев В.А., Федотов В.Н. Экспериментальное изучение влияния загроможденности пространства на скорость горения газов // *Физика горения и взрыва*. 1986. № 6 (22). С. 79–83.
26. Чуда В.К. Экспериментальное исследование структуры течения и характеристик пламени в потоке с двухрядной системой препятствий // *Физика горения и взрыва*. 2021. № 3 (57). С. 34–48. DOI: 10.15372/FGV20210303
27. Feng X., Zhang H., Si F., Dou J., Li M., Wu L., et al. Suppression characteristics of multi-layer metal wire mesh on premixed methane-air flame propagation // *Front. Mater.* 2023. Vol. 10. DOI: 10.3389/fmats.2023.1107133
28. Huang J., Gao X., Wang Ch. Flame acceleration and deflagration-to-detonation transition in narrow channels with thin obstacles // *Modern Physics Letters B*. 2018. Vol. 32. Issue 29. DOI: 10.1142/S0217984918503542
29. Lu X., Kaplan C.R., Oran E.S. Predictions of flame acceleration, transition to detonation, and detonation propagation using the Chemical-Diffusive Model // *Combustion and Flame*. 2022. Vol. 235. DOI: 10.1016/j.combustflame.2021.111705
30. Wang J., Zhao X., Fan L., Pan J., Zhu Yu. Effects of the quantity and arrangement of reactive jet obstacles on flame acceleration and transition to detonation : a numerical study // *Aerospace Science and Technology*. 2023. Vol. 137. DOI: 10.1016/j.ast.2023.108269
31. Phylaktou H., Andrews G.E. The acceleration of flame propagation in a tube by an obstacle // *Combustion and Flame*. 1991. Vol. 85. Issues 3–4. Pp. 363–379. DOI: 10.1016/0010-2180(91)90140-7
32. Bradley D. How fast can we burn? // *Symposium (International) on Combustion*. 1992. Vol. 24. Issue 1. Pp. 247–262. DOI: 10.1016/S0082-0784(06)80034-2

REFERENCES

1. Bradley D., Chamberlain G.A., Drysdale D.D. Large vapour cloud explosions, with particular reference to that at Buncefield. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. 2012; 370:544–566. DOI: 10.1098/rsta.2011.0419
2. Strehlow R.A. Unconfined vapour-cloud explosions : an overview. *14th Syrup. (Int.) on Combustion. The Combustion Institute*. 1973; 1189–1200. DOI: 10.1016/S0082-0784(73)80107-9
3. Chamberlain G., Oran E., Pekalski A. Detonations in industrial vapour cloud explosions. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2019; 62. DOI: 10.1016/j.jlp.2019.103918
4. Moen I.O., Donato M., Knystautas R., Lee J.H. Flame acceleration due to turbulence produced by obstacles. *Combustion and Flame*. 1980; 3(1):21–32. DOI: 10.1016/0010-2180(80)90003-6

5. Moen I.O., Donato M., Knystautas R., Lee J.H., Wagner H.Gg. Turbulent flame propagation and acceleration in the presence of obstacles. *Prog. Astronautics and Aeronautics*. 1981; 75:33-47.
6. Chan C., Moen I.O., Lee J.H.S. Influence of confinement on flame acceleration due to repeated obstacles. *Combustion and Flame*. 1983; 49(1-3):27-39. DOI: 10.1016/0010-2180(83)90148-7
7. Teodorczyk A., Lee J.H.S., Knystautas R. The structure of fast turbulent flames in very rough, obstacle-filled channels. *Symposium (International) on Combustion*. 1991; 23(1):735-741. DOI: 10.1016/S0082-0784(06)80324-3
8. Li R., Luo Zh., Cheng F., Wang T., Lin H., Liu H. A comparative investigation of premixed flame propagating of combustible gases-methane mixtures across an obstructed closed tube. *Fuel*. 2021; 289. DOI: 10.1016/j.fuel.2020.119766
9. Xing H., Qiu Ya., Sun S., Wang M., Li B., Xie L. Experimental study of overpressure and temperature field behaviors of a methane-air mixture with different ignition positions, solid structure obstacles and initial turbulence levels. *Fuel*. 2020; 287. DOI: 10.1016/j.fuel.2020.119446
10. Yakush S., Semenov O., Alexeev M. Premixed propane — air flame propagation in a narrow channel with obstacles. *Energies*. 2023; 16(3):1516. DOI: 10.3390/en16031516. EDN KLWHDW.
11. Du Ya., Li G., Wang Sh., Qi Sh., Li Ya., Wang B. Effects of obstacle number on characteristics of vented gasoline-air mixture explosions. *CIESC Journal*. 2017; 68(7):2946-2955. URL: <https://hgxb.cip.com.cn/EN/10.11949/j.issn.0438-1157.20161612>
12. Gubba S.R., Ibrahim S.S., Malalasekera W., Masri A.R. LES Modeling of premixed deflagrating flames in a small-scale vented explosion chamber with a series of solid obstructions. *Combustion Science and Technology*. 2008; 180(10-11):1936-1955. DOI: 10.1080/00102200802261852
13. Gamezo V.N., Ogawa T., Oran E.S. Flame acceleration and DDT in channels with obstacles: Effect of obstacle spacing. *Combustion and Flame*. 2008; 155(1-2):302-315. DOI: 10.1016/j.combustflame.2008.06.004
14. Elshimy M., Ibrahim S., Malalasekera W. LES – DFSD modelling of vented hydrogen explosions in a small-scale combustion chamber. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2021; 72. DOI: 10.1016/j.jlp.2021.104580
15. Li J., Hao H., Shi Ya., Fang Q., Li Zh., Chen L. Experimental and computational Fluid Dynamics study of separation gap effect on gas explosion mitigation for methane storage tanks. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2018; 55:359-380. DOI: 10.1016/j.jlp.2018.07.008
16. Gorev V.A., Miroshnikov S.N. The accelerating combustion in gas volumes. *Chemical Physics*. 1982; 854-858 (rus).
17. Dörge K.J., Pangritz D., Wagner H.Gg. Experiments on velocity augmentation of spherical flames by grids. *Acta Astroautica*. 1976; 3(11-12):1067-1076. DOI: 10.1016/0094-5765(76)90013-8
18. Na'inna A.M., Phylaktou H.N., Andrews G.E. The acceleration of flames in tube explosions with two obstacles as a function of the obstacle separation distance. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2013; 26(6):1597-1603. DOI: 10.1016/j.jlp.2013.08.003
19. Na'inna A.M., Somuano G.B., Phylaktou H.N., Andrews G.E. Flame acceleration in tube explosions with up to three flat-bar obstacles with variable obstacle separation distance. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2015; 38:119-124. DOI: 10.1016/j.jlp.2015.08.009
20. Li G., Du Ya., Liang J., Wang Sh., Wang B., Qi Sh. Characteristics of gasoline-air mixture explosions with different obstacle configurations. *Journal of the Energy Institute*. 2017; 91(2):194-202. DOI: 10.1016/j.joei.2017.01.001
21. Na'inna A.M., Phylaktou H.N., Andrews G.E. Acceleration of flames in tube explosions with two obstacles as a function of the obstacle separation distance: the influence of mixture reactivity. *Proc. Of the Seventh International Seminar on Fire & Explosion Hazards (ISFEH7)*. 2013; 627-636. DOI: 10.3850/978-981-07-5936-0_10-02
22. Masri A.R., Ibrahim S.S., Nehzat N., Green A.R. Experimental study of premixed flame propagation over various solid obstructions. *Experimental Thermal and Fluid Science*. 2000; 21(1-3):109-116. DOI: 10.1016/S0894-1777(99)00060-6
23. Xiao G., Wang Sh., Mi H., Khan F. Analysis of obstacle shape on gas explosion characteristics. *Process Safety and Environmental Protection*. 2022; 1616:78-87. DOI: 10.1016/j.psep.2022.03.019
24. Xiao H., Oran E.S. Flame acceleration and deflagration-to-detonation transition in hydrogen-air mixture in a channel with an array of obstacles of different shapes. *Combustion and Flame*. 2020; 220:378-393. DOI: 10.1016/j.combustflame.2020.07.013
25. Gorev V.A., Fedotov V.N. Experimental study of the effect of overloading of a space on the rate of combustion of gases. *Combustion, Explosion and Shock Waves*. 1986; 22(6):713-717. DOI: 10.1007/BF00751878
26. Cheeda V.K. Experimental investigation of flame propagation caused by interfaces of the flame, turbulence eddies, and negative shock waves. *Combustion, Explosion and Shock Waves*. 2021; 57(3):285-298. DOI: 10.1134/S0010508221030035
27. Feng X., Zhang H., Si F., Dou J., Li M., Wu L., et al. Suppression characteristics of multi-layer metal wire mesh on premixed methane-air flame propagation. *Front. Mater*. 2023; 10. DOI: 10.3389/fmats.2023.1107133
28. Huang J., Gao X., Wang Ch. Flame acceleration and deflagration-to-detonation transition in narrow channels with thin obstacles. *Modern Physics Letters B*. 2018; 32(29). DOI: 10.1142/S0217984918503542
29. Lu X., Kaplan C.R., Oran E.S. Predictions of flame acceleration, transition to detonation, and detonation propagation using the Chemical-Diffusive Model. *Combustion and Flame*. 2022; 235. DOI: 10.1016/j.combustflame.2021.111705

30. Wang J., Zhao X., Fan L., Pan J., Zhu Yu. Effects of the quantity and arrangement of reactive jet obstacles on flame acceleration and transition to detonation : a numerical study. *Aerospace Science and Technology*. 2023; 137. DOI: 10.1016/j.ast.2023.108269
31. Phylaktou H., Andrews G.E. The acceleration of flame propagation in a tube by an obstacle. *Combustion and Flame*. 1991; 85(3-4):363-379. DOI: 10.1016/0010-2180(91)90140-7
32. Bradley D. How fast can we burn? *Symposium (International) on Combustion*. 1992; 24(1):247-262. DOI: 10.1016/S0082-0784(06)80034-2

Поступила 04.07.2024, после доработки 18.07.2024;

принята к публикации 29.07.2024

Received July 4, 2024; Received in revised form July 18, 2024;

Accepted July 29, 2024

Информация об авторах

ГОРЕВ Вячеслав Александрович, д-р физ.-мат. наук, профессор, профессор кафедры комплексной безопасности в строительстве, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26; РИНЦ ID: 690901; Scopus AuthorID: 7003846069; ResearcherID: AAD-7691-2022; ORCID: 0000-0002-5096-6722; e-mail: va.gorev@yandex.ru

РУКАВИШНИКОВ Максим Михайлович, научный сотрудник, Всероссийский ордена «Знак Почета» научно-исследовательский институт противопожарной обороны Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Россия, 143903, Московская обл., г. Балашиха, мкр. ВНИИПО, 12; ID RISC: 1128857, ORCID: 0009-0001-3510-9298; e-mail: rukavishnikov3.5.1@yandex.ru

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about the authors

Vyacheslav A. GOREV, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor, Professor of Department of Integrated Safety in Civil Engineering, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Yaroslavl'shoss, 26, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RISC: 690901; Scopus AuthorID: 7003846069; ResearcherID: AAD-7691-2022; ORCID: 0000-0002-5096-6722; e-mail: va.gorev@yandex.ru

Maxim M. RUKAVISHNIKOV, Researcher, All-Russian Research Institute for Fire Protection of Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters, VNIPO, 12, Balashikha, Moscow Region, 143903, Russian Federation; ID RISC: 1128857, ORCID: 0009-0001-3510-9298; e-mail: rukavishnikov3.5.1@yandex.ru

Contribution of the authors: all authors have made an equivalent contribution to the preparation of the publication.

The authors declare that there is no conflict of interest.