

Апробация вычислительной методики определения тепловых нагрузок при авариях, сопровождающихся огневыми шарами

Рустам Рашитович Шангараев ✉

Академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Крупные пожары достаточно часто сопровождаются образованием огневых шаров (ОШ), которые создают значительные тепловые нагрузки. В результате охвата пожаром емкости, содержащей перегретую жидкость, происходит физический взрыв, из-за чего высвобождается значительное количество топлива, образующего огневой шар. Данное явление опасно тем, что при коротком времени жизни оно способно нанести термические травмы на значительных расстояниях. Существующие методы прогнозирования последствий огневого шара, изложенные в различной отечественной нормативной документации и зарубежной литературе, не в полной мере отражают возможные значения тепловых нагрузок. В связи с этим была разработана вычислительная методика определения тепловых нагрузок, учитывающая перемещение огневого шара.

Цели и задачи. Целью настоящего исследования является апробация разработанной вычислительной методики определения тепловых нагрузок, в которой учитываются кинематические характеристики огневого шара. В исследовании решались следующие задачи:

- проверить работоспособность модели подъема огневого шара;
- провести сравнительный анализ тепловых нагрузок по разработанной методике с результатами расчета отечественных и зарубежных методик;
- провести вычислительный эксперимент по влиянию подвижности воздушной среды (влиянию ветра 7 м/с) на тепловые нагрузки.

Методы исследования. Для проверки работоспособности модели подъема ОШ использовались кадры съемки формирования огневого шара. По кадрам съемки отслеживалось положение огневого шара в пространстве и его кинематические характеристики. Используя кинематические параметры, были определены тепловые нагрузки. Для оценки адекватности вычислений тепловых нагрузок использовался сравнительный анализ результатов расчетов разработанной вычислительной методики с результатами расчетов по существующим отечественным и зарубежным методикам. Для обоснования применения разработанной вычислительной методики определения тепловых нагрузок, учитывающей кинематические параметры огневого шара, был проведен вычислительный эксперимент с использованием программно-вычислительного комплекса MATLAB.

Результаты и их обсуждение. Результаты расчета кинематических параметров удовлетворительно коррелируются с результатами математического моделирования. Полученные значения тепловых нагрузок по разработанной вычислительной методике удовлетворительно согласуются с результатами расчетов по существующим отечественным и зарубежным методикам. На основании выполненных в статье расчетов показано, что изменение газодинамических потоков (снос ветром) приводит к значительному изменению поражающих факторов огневых шаров, которые формируются при пожарах в аварийных ситуациях.

Выводы. Результаты проведенных исследований позволили оценить адекватность работоспособности усовершенствованной вычислительной методики определения тепловых нагрузок при авариях, сопровождающихся огневыми шарами, а также обосновать актуальность применения разработанного метода.

Ключевые слова: физический взрыв; диффузионное горение; термическое поражение; численный расчет; перегретая жидкость

Для цитирования: Шангараев Р.Р. Апробация вычислительной методики определения тепловых нагрузок при авариях, сопровождающихся огневыми шарами // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2022. Т. 31. № 4. С. 16–26. DOI: 10.22227/0869-7493.2022.31.04.16-26

✉ Шангараев Рустам Рашитович, e-mail: robson-rus7@yandex.ru

Approval of a computational method for determining thermal loads during accidents accompanied by fireballs

Rustam R. Shangaraev ✉

The State Fire Academy of the Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination on Consequences of Natural Disasters, Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Large fires are quite often accompanied by the formation of fireballs (OSH), which create significant thermal loads. As a result of the fire coverage of a container containing an overheated liquid, a physical explosion occurs, which releases a significant amount of fuel forming a fireball. This phenomenon is dangerous because, with a short lifetime, it is capable of causing thermal injuries over considerable distances. The existing methods of predicting the consequences of a fireball, set out in various domestic regulatory documents and foreign literature, do not fully reflect the possible values of thermal loads. In this regard, a computational method for determining thermal loads was developed, taking into account the movement of the fireball.

Goals and objectives. The purpose of this study is to test the developed computational methodology for determining thermal loads, which takes into account the kinematic characteristics of the fireball. The following tasks were solved in the study:

- check the operability of the fireball lifting model;
- to conduct a comparative analysis of thermal loads according to the developed methodology with the results of calculation of domestic and foreign methods;
- conduct a computational experiment on the effect of air mobility (wind effect of 7 m/s) on thermal loads.

Research methods. To check the operability of the OSH lifting model, footage of the formation of a fireball was used. According to the shooting frames, the position of the fireball in space and its kinematic characteristics were tracked. Using kinematic parameters, thermal loads were determined. To assess the adequacy of calculations of thermal loads, a comparative analysis of the results of calculations of the developed computational methodology with the results of calculations using existing domestic and foreign methods was used. To substantiate the application of the developed computational methodology for determining thermal loads, taking into account the kinematic parameters of the fireball, a computational experiment was conducted using the MATLAB software and computing complex.

Results and their discussion. The results of the calculation of kinematic parameters are satisfactorily correlated with the results of mathematical modeling. The obtained values of thermal loads according to the developed computational methodology are in satisfactory agreement with the results of calculations according to existing domestic and foreign methods. Based on the calculations performed in the article, it is shown that a change in gas dynamic flows (wind demolition) leads to a significant change in the damaging factors of fireballs that are formed during fires in emergency situations.

Conclusions. The results of the research made it possible to assess the adequacy of the performance of the improved computational methodology for determining thermal loads in accidents accompanied by fireballs, as well as to justify the relevance of the application of the developed method.

Keywords: physical explosion; diffusion combustion; thermal empty; numerical calculation; superheated liquid

For citation: Shangaraev R.R. Approval of a computational method for determining thermal loads during accidents accompanied by fireballs. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2022; 31(4):16-26. DOI: 10.22227/0869-7493.2022.31.04.16-26 (rus).

✉ Rustam Rashitovich Shangaraev, e-mail: robson-rus7@yandex.ru

Введение

Нередко происходят аварийные ситуации с возникновением огневых шаров (ОШ). Так, например, 10 августа 2020 г. в городе Волгограде произошел взрыв с образованием ОШ на АЗС. В результате взрыва пострадало 12 человек, 4 из них сотрудники пожарной охраны [1]. Или, например, 14 июня 2021 г. в городе Новосибирске взорвались емкости с топливом. Также по причине аварии сформировался огневой шар. Сообщается, что пострадало 24 человека (в том числе сотрудники МЧС), из них 12 в состоянии средней тяжести, 7 — в тяжелом состоянии, остальные на амбулаторном лечении.

Данное явление сопровождается значительным тепловым излучением, которое даже при коротком времени существования приводит к термическим ожогам и гибели людей. Огневые шары возникают при выбросе перегретых углеводородных топлив, в результате чего данная парокапельная смесь с концентрацией выше верхнего концентрационного предела воспламенения начинает прогорать по оболочке по мере поступления кислорода [2–5].

Несомненно, поражающая способность ОШ, в виде теплового излучения, напрямую зависит от его кинематических характеристик.

Существующие нормативные документы, такие как: Национальный стандарт РФ ГОСТ Р 12.3.047–2012 «Система стандартов безопасности труда. Пожарная безопасность технологических процессов. Общие требования. Методы контроля» (далее — ГОСТ); Приказ МЧС России от 10.07.2009 № 404 «Об утверждении методики определения расчетных величин пожарного риска на производственных объектах» (далее — Приказ МЧС), СП 12.13130.2009 «Определение категорий помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности (с Изменением № 1)» (далее — СП 12); Методика анализа риска для опасных производственных объектов газодобывающих предприятий ОАО «Газпром» СТО Газпром 2-2.3-400-2009 (далее — стандарт Газпрома); а также [6–8], в которых изложены методики определения поражающих факторов при возникновении огневых шаров, упрощают схематизацию данного явления, а именно предполагают стационарное развитие аварийной ситуации (огневой шар

неподвижен). При учете особенностей настоящих методик была разработана методика определения тепловых нагрузок при авариях, сопровождаемых огневыми шарами, учитывающая его перемещение, которая изложена в [9].

Таким образом, целью настоящего исследования является апробация разработанной вычислительной методики определения тепловых нагрузок, в которой учитываются кинематические характеристики огневого шара. В исследовании решились следующие задачи:

- произведена проверка работоспособности модели подъема огневого шара;
- проведен сравнительный анализ тепловых нагрузок по разработанной вычислительной методике с результатами расчета отечественных и зарубежных моделей;
- проведен вычислительный эксперимент по влиянию подвижности воздушной среды (влиянию ветра 5 м/с) на тепловые нагрузки.

Методы исследования

Научный и практический интерес настоящего исследования заключался в апробации вычислительной методики определения тепловых нагрузок огневого шара с учетом его перемещения. Ее алгоритм представлен ниже.

1. Определение массы вещества, вовлекаемого в ОШ.
2. Определение диаметра ОШ.
3. Определение времени существования ОШ.
4. Определение высоты подъема, используется уравнение (1).
5. Используя уравнение (2), определяем угловой коэффициент облученности.
6. Находим дозу теплового излучения, используя формулу (3).
7. Находим среднюю по времени интенсивность теплового излучения для произвольно ориентированных площадок путем деления дозы теплового излучения, найденной в пункте 5, на время существования, найденное в пункте 3.
8. Определение условной вероятности поражения тепловым излучением человека, используя уравнение (4).

Для этого по кадрам съемки формирования огневого шара в результате разрыва 80-литровой емкости, нагретой до температуры, при которой достигается давление в 3 атмосферы, наблюдались положение огневого шара в пространстве и его кинематические параметры. После этого проводился сравнительный анализ полученных результатов.

На основании расчетов кинематических параметров огневого шара были рассчитаны тепловые потоки. После чего проводился сравнительный анализ

вычисленных тепловых потоков с результатами вычислений отечественных и зарубежных методик.

Проводился вычислительный эксперимент по влиянию сноса огневого шара за счет подвижности воздушной среды с применением программного комплекса MATLAB.

Проверка адекватности показаний вычислительной методики

Для рассмотрения движения огневого шара решалась система дифференциальных уравнений, которая описывает силовое воздействие среды на огневого шар.

$$\begin{cases} \frac{dZ}{dt} = v; \\ \left(m_{\text{пр}} + V_{\text{ш}} \rho_{\text{ш}} \right) \frac{dv}{dt} = \rho_{\text{ср}} V_{\text{ш}} g - \rho_{\text{ш}} V_{\text{ш}} g - C_x S_{\text{ш}} \rho_{\text{ср}} \frac{v^2}{2}, \end{cases} \quad (1)$$

где Z — координата центра ОШ;

v — скорость центральной точки ОШ;

$m_{\text{пр}}$ — присоединенная масса;

$V_{\text{ш}}$ и $S_{\text{ш}}$ — объем и площадь сечения ОШ;

$\rho_{\text{ш}}$ — плотность ОШ;

$\rho_{\text{ср}}$ — плотность среды;

g — ускорение свободного падения;

C_x — коэффициент лобового сопротивления.

Второе уравнение системы (1) представляет собой уравнение Ньютона, примененное к ОШ, на который действуют сила тяжести, сила Архимеда и сила сопротивления движению ОШ со стороны воздуха. Необходимость учета присоединенной массы вытекает из условия малости плотности ОШ и нестационарности задачи на начальном этапе движения ОШ [10–13].

На рис. 1 представлена покадровка процесса формирования огневого шара в результате разрыва 80-литровой бочки с бензином, нагретой до температуры, при которой достигается давление в 3 атмосферы. В результате разрушения образовался огневой шар с максимальным диаметром 21 м.

По данным кадрам отслеживалось положение ОШ в пространстве. Примером обработки кадров является рис. 2.

После чего строились зависимости (рис. 3), характеризующие процесс движения ОШ, а именно координаты центра ОШ от времени, скорости движения центра ОШ от времени и скорости движения центра ОШ от расстояния. Данные зависимости представлены на рис. 3. Полученные данные аппроксимировались полиномом 3-й степени [14–16].

На рис. 3 кривая 1 описывает параметры движения ОШ по кадрам, представленным на рис. 1. Кривая 2 является результатом решения уравнения (1). Видно, что кривые 1 и 2 имеют

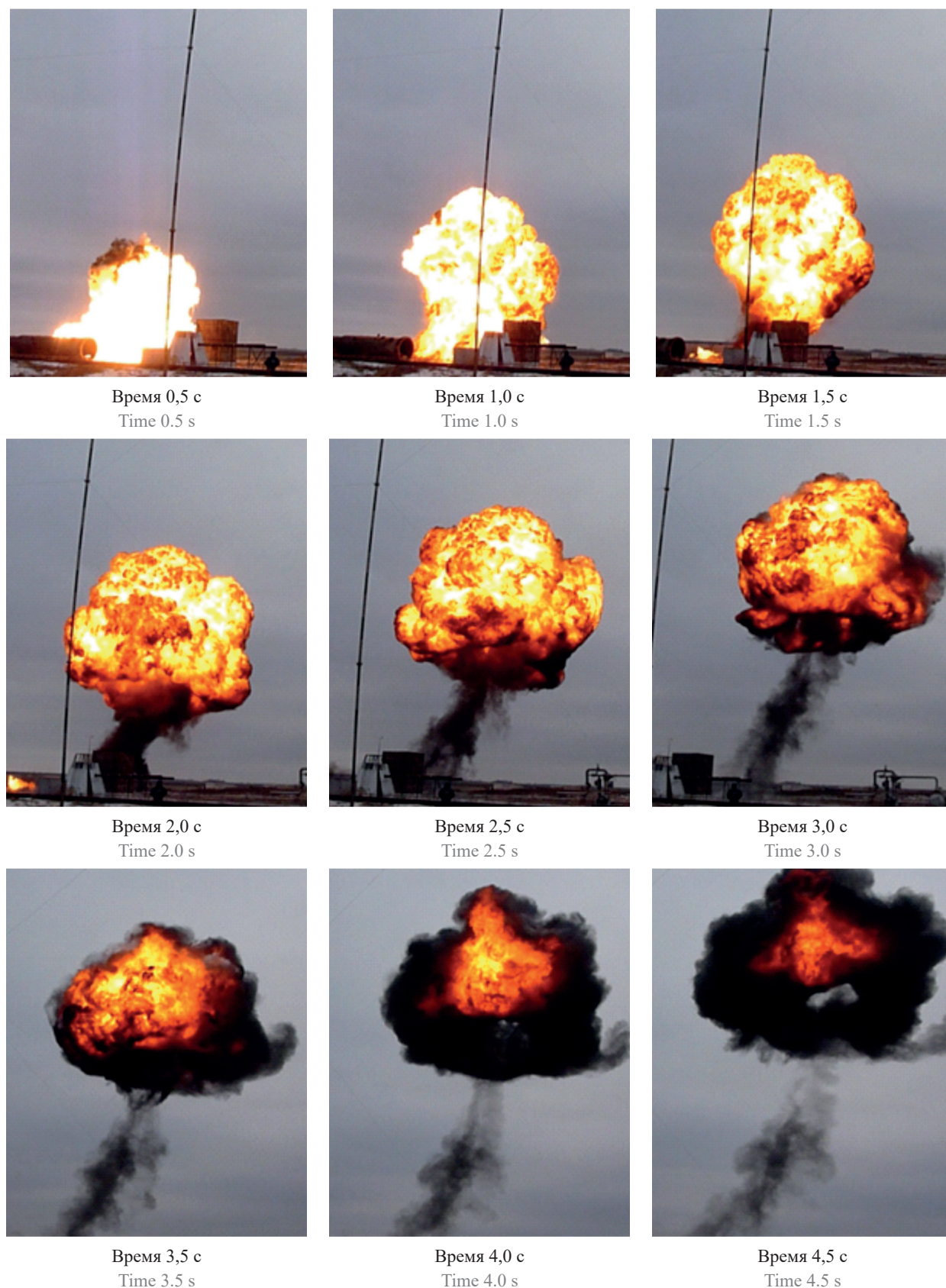


Рис. 1. Образование огневого шара при разрушении емкости с бензином, нагретой до температуры, при которой достигается давление в 3 атмосферы

Fig. 1. The formation of a fireball during the destruction of a container with gasoline heated to a temperature at which a pressure of 3 atmospheres is reached

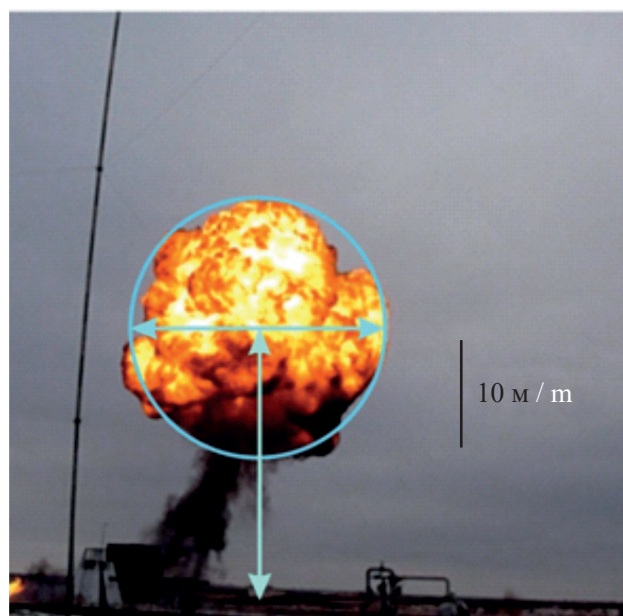


Рис. 2. Обработка кадра съемки процесса формирования огневого шара

Fig. 2. Processing of the shooting frame of the fireball formation process

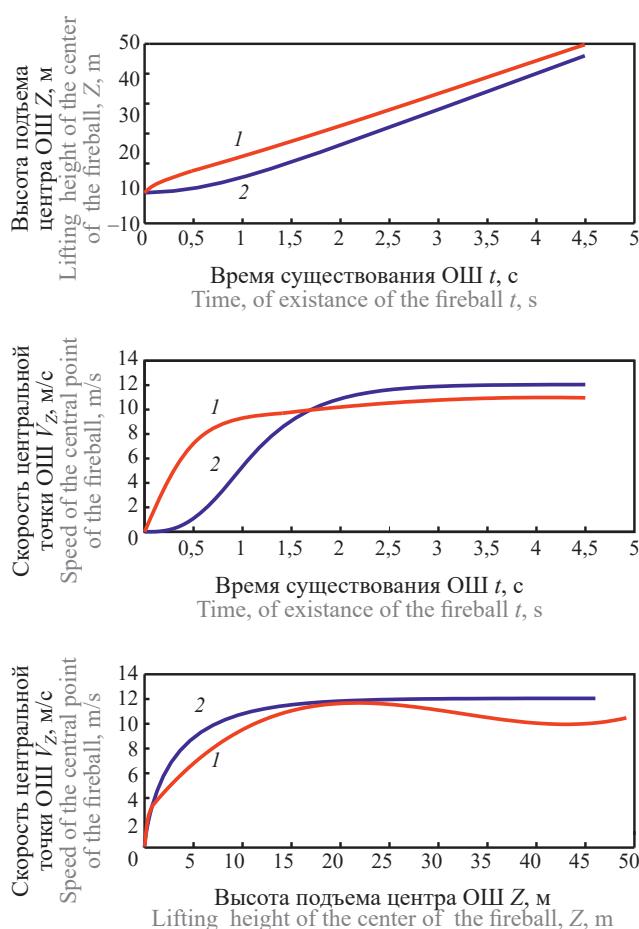


Рис. 3. Зависимости кинематических параметров от времени и высоты подъема ОШ

Fig. 3. Dependences of the kinematic parameters on the time and height of the rise of the fireball

удовлетворительную сходимость, таким образом, кинематические характеристики огневого шара (рис. 1) удовлетворительно согласуются с результатами расчета системы дифференциального уравнения (1). Данное утверждение дает основание полагать что уравнение (1), основанное на классических законах механики, удовлетворительно описывает процесс передвижения огневого шара.

Владея кинематическими характеристиками, описывающими движение ОШ, можно прогнозировать возможные тепловые нагрузки. Для этого необходимо использовать известное соотношение [17–20], описывающее значение углового коэффициента переноса диффузного излучения (F_q) от сферы с радиусом R_S на элементарную площадку, находящуюся от излучателя на расстоянии R :

$$F_q = \frac{\cos \varphi}{R^2} \cdot R_S^2, \quad (2)$$

где φ — угол между нормалью к площадке и вектором, соединяющим центр шара и центр площадки.

Для определения интенсивности теплового излучения необходимо знать среднеповерхностную тепловую мощность излучения. В ряде нормативных документов предлагают использовать постоянные значения среднеповерхностной тепловой мощности излучения для всех видов топлива. Например, в СП 12 используется постоянное значение 450 кВт/м², в ГОСТ и приказе МЧС используется значение 350 кВт/м², а в [7] предлагают применять 400 кВт/м². Для бензина плотность теплового излучения не превышает значения в 275 кВт/м² [10].

Следующим немаловажным параметром, определяющим степень теплового поражения, является доза теплового излучения (Q , кДж/м²), которая определяется как интеграл от интенсивности теплового излучения по времени существования огневого шара.

$$Q = \int_0^t q dt, \quad (3)$$

где q — интенсивность теплового излучения, кВт/м²; t — время существования ОШ, с.

Условная вероятность поражения тепловым излучением рассчитывалась в соответствии с нормативными документами [1, 2], по формуле:

$$Pr = -12,8 + 2,56 \cdot \ln(t \cdot q^{4/3}). \quad (4)$$

Проведем расчеты теплового излучения при разрушении емкости с бензином, нагретой до температуры, при которой достигается давление в 3 атмосферы (рис. 1). На рис. 4 представлена схема подъема огневого шара, точками 1–5 отмечены точки

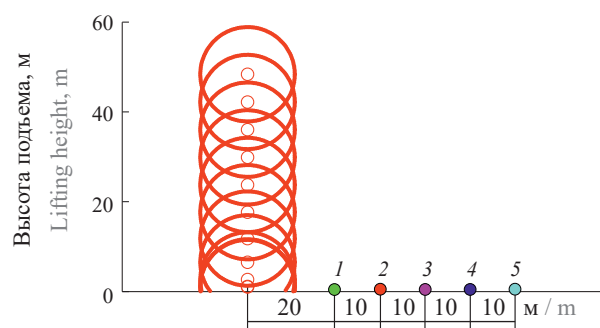


Рис. 4. Схема подъема огневого шара

Fig. 4. Scheme of lifting the fireball

замеров теплового излучения. Точка 1 соответствует расстоянию 20 м от проекции центра огневого шара на земле, остальные точки (2–5) соответственно равны расстояниям 30, 40, 50 и 60 м.

Из соотношения (2) следует, что распространение излучения напрямую зависит от положения объекта. Поэтому на рис. 5 представлено изменение теплового излучения в зависимости от времени для точек 1–5 для вертикально и горизонтально ориентированных площадок.

Поражающие параметры, такие как максимальная ($q_{\max}$) и средняя интенсивность теплового излучения для вертикально ($q_{m,x}$) и горизонтально ($q_{m,z}$) ориентированной площадки, средняя интенсивность

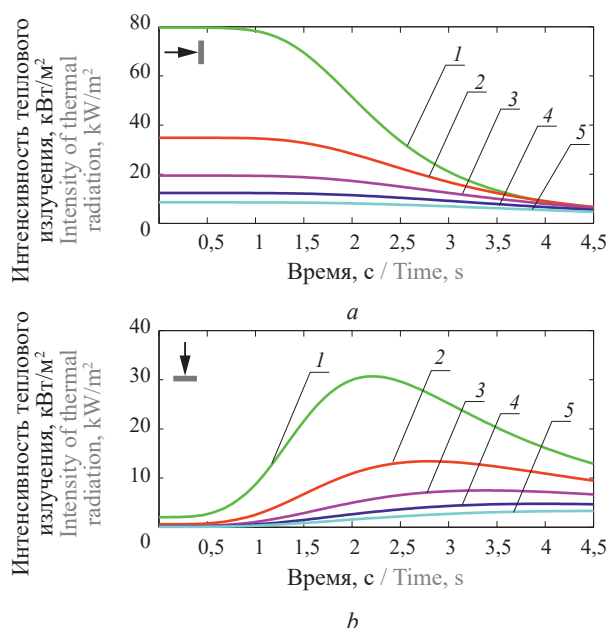


Рис. 5. Зависимости изменения теплового излучения от времени: а — для вертикально ориентированной площадки; б — для горизонтально ориентированной площадки

Fig. 5. Dependences of the change in thermal radiation on time: а — for a vertically oriented site; б — for a horizontally oriented site

теплового излучения при среднем положении к излучателю (q_m), доза теплового излучения (Q) и условная вероятность поражения тепловым излучением занесены в табл. 1.

Таблица 1. Поражающие параметры для «всплывающего» огневого шара (рис. 1)

Table 1. Striking parameters for a “lifting” fireball (Fig. 1)

Параметры поражающих факторов Parameters of damaging factors	Расстояние от центра взрыва, м Distance from the center of the explosion, m				
	20	30	40	50	60
Интенсивность теплового излучения $q_{m,z}$, кВт/м ² (горизонтальная ориентация) Thermal radiation intensity $q_{m,z}$, kW/m ² (horizontal orientation)	17,7	8,74	4,97	3,06	2,007
Интенсивность теплового излучения $q_{m,x}$, кВт/м ² (вертикальная ориентация) Thermal radiation intensity $q_{m,x}$, kW/m ² (vertical orientation)	29,5	13,1	7,3	4,7	3,2
Интенсивность теплового излучения q_m , кВт/м ² (среднее положение к излучателю) Thermal radiation intensity q_m , kW/m ² (middle position to the emitter)	40,3	22,5	14,3	9,9	7,2
Доза теплового излучения, кДж/м ² Dose of thermal radiation, kJ/m ²	184,05	39,7	22,6	13,9	9,1
Вероятность поражения человека, % Probability of human injury, %	9	0	0	0	0

Для проверки адекватности работы вычислительной методики [9] сравним параметры теплового излучения с показателями теплового излучения по существующим методикам. В существующих отечественных нормативных документах — ГОСТ и СП 12 — предполагается, что объект, принимающий тепловое излучение, находится на земле и имеет среднее положение к излучателю. На рис. 6 изображены зависимости интенсивности теплового излучения от расстояния по существующим отечественным и зарубежным методикам: ГОСТ, СП 12, Приказ МЧС, стандарт Газпрома, [6–8].

На зависимости, представленной на рис. 6, изображена кривая разработанной вычислительной методики [9], которая строилась по вычислениям интенсивности теплового излучения для среднего положения к излучателю. Из рис. 6 видно, что приблизительно на расстоянии до 20 м все методики дают разные показатели теплового излучения, после 20 м значения теплового излучения практически схожи. Показатели теплового излучения по различным методикам занесены в табл. 2.

По табл. 1 можно понять, что разработанная методика дает адекватные показатели тепловой мощности. Напомним, что методики ГОСТ, СП 12, Приказ МЧС, стандарт Газпрома, [6–8] предполагают, что огневой шар неподвижен, но на рис. 1 хорошо видно, что воздушные потоки сносят огневой шар.

При обработке кадров (рис. 1 и 2) было выявлено, что снос ветром огневого шара происходил со средней скоростью 7 м/с. Исходя из этого рассмотрим влияние бокового ветра со скоростью 7 м/с на показатели теплового излучения при «всплывающем» огневом шаре (рис. 7).

Таблица 2. Показания теплового излучения по существующим методикам

Table 2. Indications of thermal radiation according to existing methods

Методика Methodology	Интенсивность теплового излучения, кВт/м ² Intensity of thermal radiation, kW/m ²				
	20 м / m	30 м / m	40 м / m	50 м / m	60 м / m
1, 2	35,9	22,3	14,5	10,04	7,2
3	25,9	12,8	6,7	3,8	2,3
4	47,9	23,5	13,6	8,8	6,1
5	39,56	21,4	12,9	8,4	5,9
6	57,85	27,8	15,6	9,5	6,1
7	49,4	23,8	13,7	8,8	6,1
Разработанная методика Developed methodology	40,3	22,5	14,3	9,9	7,2

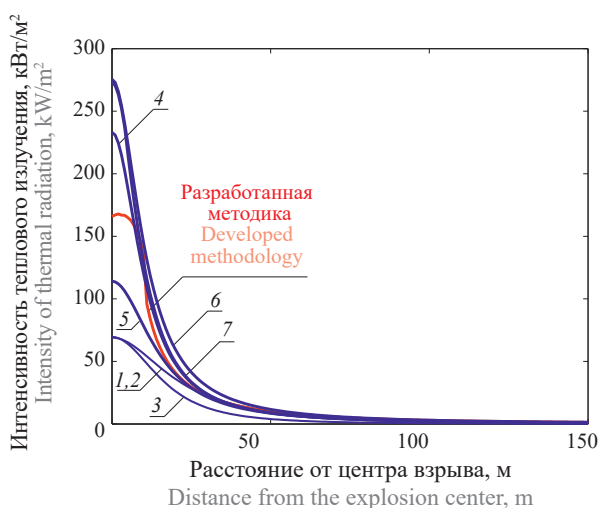


Рис. 6. Зависимость изменения интенсивности теплового излучения от расстояния по существующим методикам: 1 — Национальный стандарт РФ ГОСТ Р 12.3.047–2012 «Система стандартов безопасности труда. Пожарная безопасность технологических процессов. Общие требования. Методы контроля»; 2 — Приказ МЧС России от 10.07.2009 № 404 «Об утверждении методики определения расчетных величин пожарного риска на производственных объектах»; 3 — СП 12.13130.2009 Определение категорий помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности (с Изменением № 1); 4 — Методика анализа риска для опасных производственных объектов газодобывающих предприятий ОАО «Газпром» СТО Газпром 2-2.3-400-2009; 5 — J. Casal, J. Arnaldos, H. Montiel, E. Planas-Cuchi, J.A. Vilchez. Modeling and understanding BLEVEs. Centre d'Estudis del Risc Tecnologic (CERTEC), Universitat Politècnica de Catalunya — Institut d'Estudis Catalans, Barcelona, Catalonia, Spain; 6 — William E. Martinsen and Jeffrey D. Marx. An improved model for the prediction of radiant heat from fireballs. 1999 International Conference and Workshop on Modeling Consequences of Accidental Releases of Hazardous Materials San Francisco, California September 28 — October 1, 1999; 7 — Guidelines for evaluating the characteristics of vapor cloud explosions, flash fires, and BLEVES. New York: American Institute of Chemical Engineers, 1994

Fig. 6. Dependence of the change in the intensity of thermal radiation on the distance according to existing methods: 1 — GOST R 12.3.047—2012. Occupational safety standards system. Fire safety of technological processes. General requirements. Methods of control. (rus.); 2 — Order of the EMERCOM of Russia dated July 10, 2009 No. 404 “On approval of the methodology for determining the estimated values of fire risk at production facilities” (rus.); 3 — SP 12.13130.2009. Determination of categories of rooms, buildings and external installations on explosion and fire hazard. (rus.); 4 — Risk Analysis Methodology for Hazardous Production Facilities of Gas Production Enterprises of OAO Gazprom STO Gazprom 2-2.3-400-2009 (rus.); 5 — J. Casal, J. Arnaldos, H. Montiel, E. Planas-Cuchi, J.A. Vilchez. Modeling and understanding BLEVEs. Centre d'Estudis del Risc Tecnologic (CERTEC), Universitat Politècnica de Catalunya — Institut d'Estudis Catalans, Barcelona, Catalonia, Spain; 6 — William E. Martinsen and Jeffrey D. Marx. An improved model for the prediction of radiant heat from fireballs. 1999 International Conference and Workshop on Modeling Consequences of Accidental Releases of Hazardous Materials San Francisco, California September 28 — October 1, 1999; 7 — Guidelines for evaluating the characteristics of vapor cloud explosions, flash fires, and BLEVES. New York: American Institute of Chemical Engineers, 1994

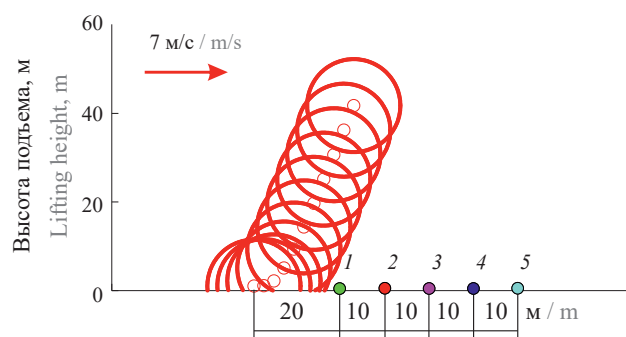


Рис. 7. Схема подъема огневого шара с влиянием бокового ветра со скоростью 7 м/с

Fig. 7. Scheme of lifting a fireball with the influence of a side wind at a speed of 7 m/s

Моментальные тепловые нагрузки, возникаемые при «всплытии» и перемещении огневого шара, представлены на рис. 8. Числовые значения поражающих параметров занесены в табл. 3.

Из представленных расчетов видно, что при смещении огневого шара в сторону расчетных точек (1–5) увеличиваются поражающие параметры, данная закономерность обусловлена тем, что при увеличении интенсивности теплового излучения увеличивается доза теплового излучения, в свою очередь и увеличивается условная вероятность поражения тепловым излучением. Из этого следует, что при авариях с образованием огневого шара необходимо учитывать влияние газодинамических потоков. Подробно влияние газодинамических потоков на тепловые и взрывные нагрузки представлено в работах [10, 21–24].

Таблица 3. Поражающие параметры ОШ при «всплытии» и смещении

Table 3. The striking parameters of the fireball during the “lifting” and displacement

Параметры поражающих факторов Parameters of damaging factors	Расстояние от центра взрыва, м Distance from the center of the explosion, m				
	20	30	40	50	60
Интенсивность теплового излучения $q_{m,z}$, кВт/м ² (горизонтальная ориентация) Thermal radiation intensity $q_{m,z}$, kW/m ² (horizontal orientation)	45,7	22,6	12,8	7,7	4,8
Интенсивность теплового излучения $q_{m,x}$, кВт/м ² (вертикальная ориентация) Thermal radiation intensity $q_{m,x}$, kW/m ² (vertical orientation)	50,7	27,5	18,4	13,2	9,8
Интенсивность теплового излучения q_m , кВт/м ² (среднее положение к излучателю) Thermal radiation intensity q_m , kW/m ² (middle position to the emitter)	68,2	35,5	22,4	15,28	10,91
Доза теплового излучения, кДж/м ² Dose of thermal radiation, kJ/m ²	306,9	159,7	100,8	68,76	49,05
Вероятность поражения человека, % Probability of human injury, %	67,5	3,9	0	0	0

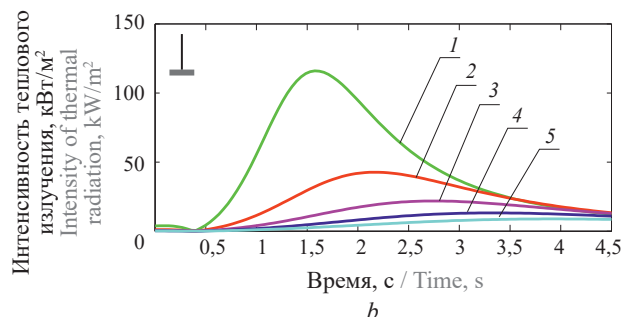
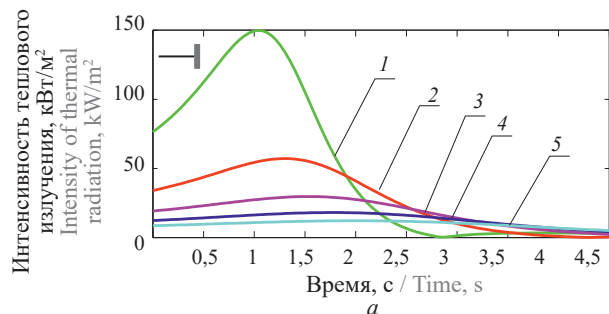


Рис. 8. Зависимость изменения теплового излучения от времени с влиянием бокового ветра со скоростью 7 м/с: а — для вертикально ориентированной площадки; б — для горизонтально ориентированной площадки

Fig. 8. Dependence of the change in thermal radiation on time with the influence of a side wind at a speed of 7 m/s: а — for a vertically oriented site; б — for a horizontally oriented site

Также разработанная вычислительная методика позволяет измерять тепловое поражение не только на поверхности земли, в отличие от методик ГОСТ, СП 12, Приказ МЧС, стандарт Газпрома, [6–8], но и в любой точке пространства. Основным пре-

имуществом разработанной вычислительной методики является учет передвижения огневого шара, а в условиях плотной застройки, вблизи уникальных (атомные электростанции, объекты культурного наследия и т.п.) объектов данное преимущество является достаточно востребованным.

Выводы

Сравнительный анализ кинематических параметров огневого шара в случае разрыва емкости с бензином и результаты математического моделирования подъема огневого шара показали удовлетворительную сходимость сравниваемых параметров.

Сравнительный анализ рассчитанных значений тепловых нагрузок огневого шара разработанной методики и результаты расчетов по существующим отечественным и зарубежным методикам показали адекватность значений теплового излучения разработанной вычислительной методики.

Вычислительный эксперимент по влиянию газодинамических потоков на тепловые нагрузки позволил оценить вероятные тепловые нагрузки в случае сноса огневого шара. Также дал возможность выявить очевидную закономерность, что в случае смещения воздушной среды параметры поражающих факторов существенно изменяются.

Результаты проведенных исследований позволили апробировать разработанную методику определения тепловых нагрузок при авариях, сопровождаемых огневыми шарами.

Известные отечественные и зарубежные методики расчета тепловых нагрузок не учитывают движение огневого шара и, по сути, рассматривают статическую задачу. Разработанная вычислительная методика позволяет учитывать перемещение в отличие от отечественных и зарубежных аналогов, что наиболее актуально в случаях плотной городской застройки, вблизи уникальных объектов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Комаров А.А., Шангараев Р.Р., Бегишев И.Р. Верификация методики определения тепловых нагрузок при формировании огневых шаров // Безопасность труда в промышленности. 2022. № 5. С. 15–21. DOI: 10.24000/0409-2961-2022-5-15-21
2. Елизарьев А.Н., Ахтямов Р.Г., Киселева М.А., Тараканов Д.А., Тараканов Дм.А., Яковлев Д.О. и др. Развитие методических основ оценки возникновения эффекта BLEVE при авариях на объектах хранения топлив // Известия Петербургского университета путей сообщения. 2019. Т. 16. № 1. С. 157–167. DOI: 10.20295/1815-588X-2019-1-157-167 URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=38032989>
3. Davidy A. CFD simulation and mitigation with Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion (BLEVE) Caused by Jet Fire // ChemEngineering. 2018. Vol. 3. Issue 1. P. 1. DOI: 10.3390/chemengineering3010001
4. Sellami I., Manescau B., Chetehouna K., de Izarra C., Nait-Said R., Zidani F. BLEVE fireball modeling using Fire Dynamics Simulator (FDS) in an Algerian gas industry // Journal of Loss Prevention in the Process Industries. 2018. Vol. 54. Pp. 69–84. DOI: 10.1016/j.jlp.2018.02.010
5. Wang Y., Gu X., Xia L., Pan Y., Ni Y., Wang S. et al. Hazard analysis on LPG fireball of road tanker BLEVE based on CFD simulation // Journal of Loss Prevention in the Process Industries. 2020. Vol. 68. P. 104319. DOI: 10.1016/j.jlp.2020.104319
6. Casal J., Arnaldos J., Montiel H., Planas-Cuchi E., Vi'chez J.A. Modelling and understanding BLEVEs // Chapter 22 of The handbook of hazardous materials spills technology. Edited by Merv Fingas. Mc-Graw Hill, USA, 2001.
7. Martinsen W.E., Marx J.D. An improved model for the prediction of radiant heat flux from fireballs // International Conference and Workshop on Modeling the Consequences of Accidental Releases of Hazardous Materials. Center for Chemical Process Safety of the American Institute of Chemical Engineers, 1999. Pp. 605–621.
8. Guidelines for evaluating the characteristics of vapor cloud explosions, flash fires, and BLEVES. New York : American Institute of Chemical Engineers, 1994. 8 p.
9. Шангараев Р.Р. Математическая модель определения тепловых нагрузок при авариях, сопровождаемых огневыми шарами // Гражданская оборона на страже мира и безопасности : мат. VI Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. всемирному дню гражданской обороны. М., 2022. С. 277–282.
10. Комаров А.А. Газодинамические потоки при авариях, сопровождаемых огневыми шарами // Современные проблемы гидравлики и гидротехнического строительства : сб. тезисов докладов IV Всеросс. науч.-практ. семинара. М., 2021. С. 79.
11. Sovran G., Morel T., Mason W.T. Aerodynamic drag mechanisms of bluff bodies and road vehicles. New York : Plenum Press, 1978. 360 p.
12. Блинков Ю.А., Панкратов И.А., Симонова К.Р. Расчет обтекания шара с помощью стандартных решателей OpenFOAM // Математика. Механика. 2018. № 20. С. 94–96. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=36930621>
13. Komarov A.A., Gromov N.V., Korolchenko O.N. Ensuring blast resistance of critically important

- buildings and constructions in case of Air Crash // IOP Conference Series : Materials Science and Engineering. 2021. Vol. 1066. Issue 1. P. 012005. DOI: 10.1088/1757-899X/1066/1/012005
14. Данилов А.М., Гарькина И.А. Интерполяция, аппроксимация, оптимизация: анализ и синтез сложных систем : монография. Пенза : ПГУАС, 2014. 168 с.
 15. Гребенникова И.В. Методы математической обработки экспериментальных данных : учеб.-метод. пос. Екатеринбург, 2015. 124 с.
 16. Дьяконов В.П. MATLAB. Полный самоучитель. М. : Профобразование, 2019. 768 с.
 17. Sam Mannan. PE, CSP Lee's loss prevention in the process industries hazard identification // Assessment and Control. Volume 1 Third edition. Texas, USA : Department of Chemical Engineering, 2005. 172 p.
 18. Комаров А.А. Прогнозирование нагрузок от аварийных дефлаграционных взрывов и оценка последствий их воздействия на здания и сооружения : автореф. дис. ... д-ра тех. наук. М. : МГСУ, 2001. 42 с.
 19. Кошмаров Ю.А., Башкирцев М.П. Термодинамика и теплопередача в пожарном деле. М. : Высшая инженерная и пожарно-техническая школа МВД СССР, 1987. 440 с.
 20. Башкирцев М.П. Основы пожарной теплофизики. М. : Стройиздат, 1978. 198 с.
 21. Шангареев Р.Р. Численный эксперимент по влиянию газодинамических потоков на тепловые нагрузки при образовании огневых шаров // Системы безопасности — 2021 : мат. тридцатой Междунар. науч.-техн. конф. М. : Академия ГПС МЧС России, 2021. С. 205–208.
 22. Комаров А.А., Бузаев Е.В., Васюков Г.В., Загуменников Р.А. Моделирование аварийных выбросов взрывоопасных веществ в помещении // Вестник МГСУ. 2014. № 10. С. 132–140. DOI: 10.22227/1997-0935.2014.10.132-140
 23. Komarov A.A., Bazhina E.V., Bobrov Yu. Relationship between gas-dynamic flows and impacts of emergency explosions indoors // MATEC Web of Conferences. 2016. Vol. 86. P. 04048. DOI: 10.1051/mateconf/20168604048
 24. Komarov A.A., Gromov N.V. Experimental observation of visible flame propagation rate in accidental deflagration explosions and explosive load reduction // MATEC Web of Conferences. 2018. Vol. 251. P. 02024. DOI: mateconf/201825102024

REFERENCES

1. Komarov A.A., Shangaraev R.R., Begishev I.R. Verification of the methodology for determining thermal loads during fireballs formation. *Occupational Safety in Industry*. 2022; 5:15-21. DOI: 10.24000/0409-2961-2022-5-15-21 (rus).
2. Elizarev A.N., Akhtyamov R.G., Kiseleva M.A., Tarakanov D.A., Tarakanov Dm.A., Yakovlev D.O. et al. Development of basic procedures for evaluation of occurrence of BLEVE effect in accidents at fuel storage facilities. *Proceedings of Petersburg Transport University*. 2019; 16(1):157-167. DOI: 10.20295/1815-588X-2019-1-157-167 URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=38032989> (rus).
3. Davidy A. CFD simulation and mitigation with Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion (BLEVE) Caused by Jet Fire. *ChemEngineering*. 2018; 3(1):1. DOI: 10.3390/chemengineering3010001
4. Sellami I., Manescau B., Chetehouna K., de Izarra C., Nait-Said R., Zidani F. BLEVE fireball modeling using Fire Dynamics Simulator (FDS) in an Algerian gas industry. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2018; 54:69-84. DOI: 10.1016/j.jlp.2018.02.010
5. Wang Y., Gu X., Xia L., Pan Y., Ni Y., Wang S. et al. Hazard analysis on LPG fireball of road tanker BLEVE based on CFD simulation. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2020; 68. DOI: 10.1016/j.jlp.2020.104319
6. Casal J., Arnaldos J., Montiel H., Planas-Cuchi E., Viñchez J.A. Modelling and understanding BLEVEs. Chapter 22 of the handbook of hazardous materials spills technology. Merv Fingas (ed). Mc-Graw Hill, USA, 2001.
7. Martinsen W.E., Marx J.D. An improved model for the prediction of radiant heat from fireballs. *International Conference and Workshop on Modeling the Consequences of Accidental Releases of Hazardous Materials*. Center for Chemical Process Safety of the American Institute of Chemical Engineers, 1999; 605-621.
8. *Guidelines for evaluating the characteristics of vapor cloud explosions, flash fires, and BLEVES*. New York, American Institute of Chemical Engineers, 1994; 8.
9. Shangaraev R.R. Mathematical model for determining thermal loads in accidents accompanied by fireballs. *Civil Defense on Guard of Peace and Safety : materials of the Sixth International Scientific and practical conference dedicated to the world civil defense day*. Moscow, Akademiya GPS MChS Rossii, 2022; 277-282. (rus).
10. Komarov A.A. Gas-dynamic flows during accidents accompanied by fireballs. *Modern Problems of Hydraulics and Hydraulic Engineering Construction : collection of abstracts of the IV All-Russian scientific and practical seminar*. Moscow, 2021; 79. (rus).
11. Sovran G., Morel T., Mason W.T. *Aerodynamic drag mechanisms of bluff bodies and road vehicles*. New York, Plenum Press, 1978; 360.
12. Blinkov Yu.A., Pankratov I.A., Simonova K.R. Calculation of the flow around a ball using standard OpenFOAM solvers. *Mathematics. Mechanics*.

- 2018; 20:94-96. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=36930621> (rus).
13. Komarov A.A., Gromov N.V., Korolchenko O.N. Ensuring blast resistance of critically important buildings and constructions in case of air crash. *IOP Conference Series : Materials Science and Engineering*. 2021; 1066(1):012005. DOI: 10.1088/1757-899X/1066/1/012005
14. Danilov A.M., Gar'kina I.A. *Interpolation, approximation, optimization: analysis and synthesis of complex systems : monograph*. Penza, PGUAS, 2014; 168. (rus).
15. Grebennikova I.V. *Methods of mathematical processing of experimental data : teaching aid*. Ekaterinburg, 2015; 124. (rus).
16. D'yakov V.P. *MATLAB. Complete tutorial*. Moscow, Profobrazovanie Publ., 2019; 768. (rus).
17. Mannan S. PE, CSP Lee's loss prevention in the process industries hazard identification. *Assessment and Control. Volume 1 Third edition*. Texas, USA, Department of Chemical Engineering, 2005; 172.
18. Komarov A.A. *Forecasting loads from emergency deflagration explosions and assessing the consequences of their impact on buildings and structures : Abstract of the dissertation for the degree of Dr of Tech. Sci*. Moscow, 2001; 42. (rus).
19. Koshmarov Yu.A., Bashkirtsev M.P. *Thermodynamics and heat transfer in fire fighting*. Moscow, Higher Engineering and Fire-Technical School of the Ministry of Internal Affairs of the USSR, 1987; 440. (rus).
20. Bashkirtsev M.P. *Fundamentals of fire thermophysics*. Moscow, Stroyizdat Publ., 1978; 198. (rus).
21. Shangaraev R.R. *Numerical experiment on the influence of gas-dynamic flows on thermal loads during the formation of fireballs : Proceedings of the thirtieth international scientific and technical conference "Security Systems-2021"*. Moscow, Academy of the State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia, 2021; 205-208. (rus).
22. Komarov A.A., Buzaev E.V., Vasyukov G.V., Zagumennikov R.A. Simulation of Accidental Emissions of Explosive Substances in Premises. *Vestnik MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture]*. 2014; 10:132-140. DOI: 10.22227/1997-0935.2014.10.132-140 (rus).
23. Komarov A.A., Bazhina E.V., Bobrov Yu. Relationship between gas-dynamic flows and impacts of emergency explosions indoors. *MATEC Web of Conferences*. 2016; 86:04048. DOI: 10.1051/matecconf/20168604048
24. Komarov A.A., Gromov N.V. Experimental observation of visible flame propagation rate in accidental deflagration explosions and explosive load reduction. *MATEC Web of Conferences*. 2018; 251:02024. DOI: 10.1051/matecconf/201825102024

Поступила 01.06.2022, после доработки 20.06.2022;
принята к публикации 11.07.2022

Received June 1, 2022; Received in revised form June 20, 2022;
Accepted July 11, 2022

Информация об авторе

ШАНГАРАЕВ Рустам Рашитович, адъюнкт, Академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Россия, 129366, г. Москва, ул. Бориса Галушкина, 4; РИНЦИД: 1064932; ORCID: 0000-0002-4300-8366; e-mail: robson-rus7@yandex.ru

Information about the author

Rustam R. SHANGARAEV, Postgraduate Student, the State Fire Academy of the Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination on Consequences of Natural Disasters, Borisa Galushkina St., 4, Moscow, 129366, Russian Federation; ID RISC: 1064932; ORCID: 0000-0002-4300-8366; e-mail: robson-rus7@yandex.ru