

Общие принципы защиты объектов от беспилотных летательных аппаратов

Александр Андреевич Комаров ✉, Николай Викторович Громов,
Антон Дмитриевич Корольченко, Павел Сергеевич Ланской

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

АННОТАЦИЯ

Введение. С началом специальной военной операции беспилотные летательные аппараты (БПЛА) используются для нанесения ударов по промышленным, транспортным, энергетическим и гражданским объектам. В настоящее время активно применяется физический метод защиты таких объектов — установка защитных ограждающих конструкций (ЗОК) на основе сетчатых ограждений. Их функция заключается в предотвращении контакта БПЛА и переносимого им заряда с защищаемым объектом.

Методы исследования. В настоящей статье задача по оценке минимальных расстояний от сетчатого экрана до защищаемого объекта была решена с использованием расчетных методов, основанных на эмпирических соотношениях М.А. Садовского.

Цель. Оценка эффективности устройства ЗОК для защиты зданий и сооружений от ВУВ и оценки возможности конструирования и реализации ЗОК на практике.

Задачи. Определение минимального расстояния от элементов, препятствующих контакту заряда, переносимого БПЛА, с защищаемым объектом; анализ возможности технической реализации ЗОК с рассчитанными параметрами.

Результаты. В результате расчетов были получены значения минимальных расстояний от сетчатого ограждения ЗОК до защищаемого объекта при зарядах различной массы.

Выводы. Анализ результатов показал, что применение ЗОК является эффективным способом защиты зданий и сооружений от атак БПЛА. Существующие конструктивные решения и материалы ЗОК позволяют реализовать приемлемую безопасность объектов от атак БПЛА.

Ключевые слова: беспилотный летательный аппарат; воздушная ударная волна; защитная ограждающая конструкция; сетчатое ограждение

Благодарности. Данная работа была реализована в рамках программы развития передовой инженерно-строительной школы НИУ МГСУ.

Для цитирования: Комаров А.А., Громов Н.В., Корольченко А.Д., Ланской П.С. Общие принципы защиты объектов от беспилотных летательных аппаратов // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2024. Т. 33. № 5. С. 51–60. DOI: 10.22227/0869-7493.2024.33.05.51-60

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

Protection of objects from unmanned aerial vehicles

Alexander A. Komarov ✉, Nikolai V. Gromov, Anton D. Korolchenko, Pavel S. Lansky

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

ABSTRACT

Introduction. Since the beginning of a special military operation, unmanned aerial vehicles (UAV) have been used to strike industrial, transport, energy and civilian facilities. Currently, a physical method of protecting such objects is actively used — the installation of protective enclosing structures (PES) based on mesh fences. Their function is to prevent the UAV and the charge it carries from contacting the protected object.

Research methods. The main damaging factor in the attack of the UAV is the effect of an air shock wave from the explosion of a charge (munition) on the enclosing structures of buildings and structures. The intensity of the explosive charge at short distances from the charge decreases in proportion to the distance to the third degree, therefore, it is relevant to solve the problem of estimating the minimum distances from the mesh screen to the protected object. In this paper, this problem was solved using computational methods based on empirical relations of M.A. Sadovsky.

Aim. To evaluate the effectiveness of the PES for the protection of buildings and structures from an air shock wave and to assess the possibility of designing and realization of PES in practice.

Objectives. Determination of the minimum distance from the elements preventing the contact of the charge carried by the UAV with the protected object; analysis of the possibility of technical implementation of the PES with the calculated parameters.

Calculation results. As a result of calculations, the values of the minimum distances from the mesh fence of the PES to the protected object were obtained with charges of different masses.

Conclusions. The analysis of the results showed that the use of PES is an effective way to protect buildings and structures from UAV attacks. The existing design solutions and materials of the PES make it possible to implement acceptable security of objects from UAV attacks.

Keywords: unmanned aerial vehicle; air shock wave; protective fencing structure; mesh fence

Acknowledgments. The research was funded by Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), (MGSU Advanced Civil Engineering School development programme).

For citation: Komarov A.A., Gromov N.V., Korolchenko D.A., Lanskoj P.S. Protection of objects from unmanned aerial vehicles. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2024; 33(5):51-60. DOI: 10.22227/0869-7493.2024.33.05.51-60 (rus).

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

Введение

Современные методы ведения боевых действий внедрились в практику применения одного из наиболее эффективных способов поражения целей противника — использование беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), снаряженных зарядом взрывчатого вещества (ВВ) [1, 2]. По сравнению с консервативными средствами поражения (ракеты, снаряды, бомбы) и пилотируемыми летательными аппаратами, БПЛА обладает рядом преимуществ: относительно низкая стоимость (особенно для FPV-дронов), высокая живучесть и возможность создания малозаметных машин, которые смогут обладать высокой маневренностью [3, 4].

С началом специальной военной операции (СВО) беспилотные летательные аппараты все чаще применяются для атак на российские гражданские, промышленные, энергетические и транспортные объекты, расположенные вне зоны боевых действий: хранилища нефти и нефтепродуктов, трансформаторные подстанции, производственные здания, аэродромы и автовокзалы. Такая тенденция может сохраниться и после окончания СВО в связи с высоким уровнем потенциальной террористической угрозы.

В настоящее время существует несколько основных способов защиты от БПЛА: применение средств ПВО, радиоэлектронная защита, оптическая блокировка и физическая защита [5, 6]. Наиболее простым в изготовлении и эксплуатации методом защиты является физическая защита от дронов в виде защитных ограждающих конструкций (ЗОК). Такие системы уже предлагаются на рынке, описаны в научных изданиях [7, 8] и используются для защиты ведомственных и отраслевых объектов, однако в настоящее время их конструктивные особенности не обоснованы с научной точки зрения. Они не учитывают особенности защищаемого объекта, скорость БПЛА при ударе, массу переносимого заряда ВВ. Нет информации об испытаниях подобных конструкций, как, впрочем, и методики их испытаний на воздействие удара и взрыва.

Анализ открытых источников^{1,2}, в которых указаны основные объекты атаки БПЛА и их технические характеристики, позволил разработать классификацию ЗОК по некоторым конструктивным особенностям и применяемым для их изготовления материалам. По расположению относительно защищаемого объекта ЗОК классифицируются по следующим типам:

- на независимой опорной конструкции (рис. 1);
 - на зависимой опорной конструкции (рис. 2).
- По типу инженерных сооружений:
- капитальные сооружения;
 - быстровозводимые сооружения (временные конструкции).

По типу элементов, препятствующих контакту БПЛА с защищаемым объектом:

- на основе стальных канатов;
- металлических сеток;
- полимерных сеток;
- ж/б и габионных конструкций;

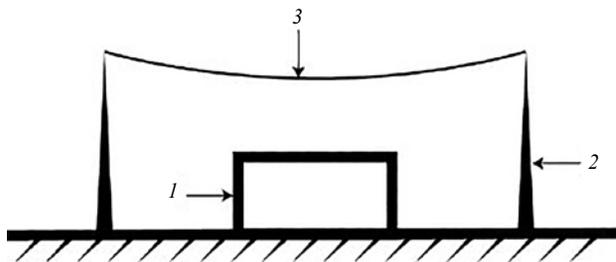


Рис. 1. Схема ЗОК на независимой опорной конструкции (без опоры на защищаемый объект): 1 — защищаемое сооружение; 2 — независимая опорная конструкция; 3 — защитная сетка

Fig. 1. Diagram of a protective enclosing structure on an independent support structure (without support on the protected object): 1 — protected structure; 2 — independent support structure; 3 — safety net

¹ Электронная библиотека «Арсенал-Инфо». URL: <http://arsenal-info.ru/>

² Skylogic Reseach Drone Analyst — UAS/UAV Advisors (исследования и аналитика в области дронов компании Skylogic). URL: <http://droneanalyst.com/>

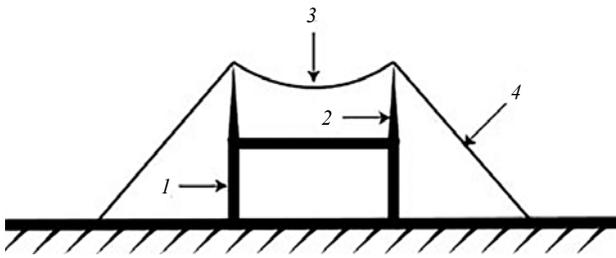


Рис. 2. Схема ЗОК на зависимой опорной конструкции (с опорой на защищаемый объект): 1 — защищаемое сооружение; 2 — зависимая опорная конструкция; 3 — защитная сетка; 4 — растяжка

Fig. 2. Diagram of a protective enclosing structure on a dependent support structure (based on the protected object): 1 — protected structure; 2 — dependent support structure; 3 — protective mesh; 4 — stretching

- комбинированные.

В настоящее время широкое распространение получили ЗОК на основе улавливающих сетчатых конструкций и стальных канатов [9, 10]. Такие конструкции должны обладать рядом функциональных характеристик:

- обеспечить реализацию бесконтактного (по отношению к защищаемому объекту) взрыва ВВ с заданной вероятностью не разрушения здания или сооружения путем предотвращения подлета БПЛА к защищаемому объекту;
- предотвратить поражение защищаемого объекта и людей, находящихся внутри него, осколками или поражающими элементами заряда;
- обеспечить защиту объекта от воздействия контактного взрыва с недопущением обратного откола элементов ЗОК (бетонных блоков, кирпичных стен).

Основным поражающим фактором, приводящим к разрушению защищаемого здания или сооружения при атаке БПЛА, является воздушная ударная волна (ВУВ), которая образуется в результате взрыва заряда, переносимого дроном.

С целью оценки эффективности устройства ЗОК для защиты зданий и сооружений от ВУВ и оценки возможности конструирования и реализации ЗОК на практике актуальным является решение задачи по определению минимального расстояния от элементов, препятствующих контакту заряда, переносимого БПЛА, с защищаемым объектом. В качестве таких элементов наиболее часто используются сетчатые ограждения, расположенные на несущем каркасе.

Для достижения поставленной цели в настоящей статье приведено решение задачи по определению минимальных расстояний от сетчатых ограждений до защищаемого объекта и оценке эффективности ЗОК на основе сетчатых конструкций.

Методы

Соотношения, используемые для расчета минимальных расстояний от сетчатого ограждения до защищаемого объекта

Для определения минимального расстояния от сетчатого ограждения до границы защищаемого объекта необходимо в качестве начального условия принять максимальную массу переносимого летательным аппаратом заряда, приведенную к массе тротила (ТНТ). Минимальное расстояние от заряда до границы защищаемого объекта определяется исходя из разрушающей способности, создаваемой ВУВ, которая возникает при подрыве заряда заданной массы.

Возможность значительного ослабления поражающей способности заряда при достаточно незначительном удалении от него вытекает из следующей особенности детонационных взрывов конденсированных взрывчатых веществ (ВВ). Давление в детонационной волне пропорционально плотности ВВ и квадрату скорости детонации. Поэтому конденсированные ВВ, которые отличаются большой плотностью и высокой скоростью детонации, обладают сильным бризантным (дробящим) действием. Например, при взрыве ТНТ (тротила), имеющего плотность, равную 1600 кг/м³, и скорость детонации 7000 м/с, давление взрыва составляет около 20 000 000 кПа. При взрывах конденсированных ВВ на грунте всегда образуется воронка взрыва, а от границы заряда уходит воздушная ударная волна (ВУВ) с очень высоким давлением, интенсивность которой резко падает с удалением от заряда. Поэтому, несмотря на высокие поражающие свойства конденсированных взрывчатых веществ в непосредственной близости от них, их эффективность или поражающие свойства резко падают с удалением от заряда. Интенсивность ВУВ, являющейся основным поражающим фактором при взрыве ВВ, на ближних расстояниях от заряда уменьшается пропорционально расстоянию в третьей степени.

Методы определения параметров ВУВ при взрывах ВВ описаны во многих источниках (например, [11, 12] и др.), в которых избыточное давление во фронте ВУВ определяется по эмпирическим формулам, имеющим структуру формулы М.А. Садовского [11]:

$$\Delta P_F = \frac{A}{\bar{R}} + \frac{B}{\bar{R}^2} + \frac{D}{\bar{R}^3}, \text{ кПа}, \quad (1)$$

где A , B и D — эмпирические коэффициенты; \bar{R} — приведенное расстояние до центра взрыва, определяемое по формуле:

$$\bar{R} = \frac{R}{\sqrt[3]{K \cdot M \cdot Z}}, \text{ м/кг}^{1/3}, \quad (2)$$

где K — коэффициент эффективности заряда ВВ по образованию ВУВ, применительно к нашим расчетам принимается, что $K = 1$;

M — масса заряда, кг;

Z — коэффициент, учитывающий отношение теплоты взрывчатого превращения ВВ к теплоте взрывчатого превращения тротила (ТНТ).

Значения коэффициента Z для некоторых видов ВВ приведены в табл. 1.

Ниже коротко описана используемая авторами методика, которая построена на основе эмпирической формулы М.А. Садовского, с некоторыми уточнениями и дополнениями.

Избыточное давление во фронте ВУВ определяется по формуле:

$$P = \frac{1}{R} \left[82,4 + \frac{1}{R} \left(265 + \frac{1}{R} 687 \right) \right], \text{ кПа.} \quad (3)$$

Закон изменения избыточного давления во времени определяется:

$$\Delta P(t) = P \cdot \left(1 - \frac{t}{\tau_+} \right)^n, \text{ кПа,} \quad (4)$$

где τ_+ — длительность положительной фазы, определяемая как:

$$\tau_+ = \bar{\tau}_+ \sqrt[3]{K \cdot M}, \quad (5)$$

где $\bar{\tau}_+$ — приведенное время длительности положительной фазы ВУВ:

$$\bar{\tau}_+ = 1,5 \cdot 10^{-3} \sqrt{R}, \text{ с/кг}^{1/3}, \quad (6)$$

Таблица 1. Значение Z для некоторых видов ВВ [13, 14]

Table 1. The Z value for some types of explosives [13, 14]

Виды ВВ Types of explosives	Z	Виды ВВ Types of explosives	Z
Тротил TNT	1	Тринитроанилин Trinitroaniline	0,981
Динитробензол Dinitrobenzene	0,86	Пикрат аммония Ammonium picrate	0,792
Тринитробензол Trinitrobenzene	1,066	Аммонийная селитра Ammonium nitrate	0,396
Октоген Octogen	1,278	Аммотол 80/20 Ammotol 80/20	0,991
Тэн Penthrite	1,378	Пироксилин Pyroxylin	1,03
Дымный порох Smoke unpowder	0,658	Гексоген Hexogen	1,306
Тринитро-хлорбензол Trinitrochloro-benzene	1	Оксиликвиты (поглотители) Oxylquites (absorbents)	0,991

где n — показатель спада избыточного давления, вычисляемый по зависимости:

$$n = 1 + \left(\frac{\Delta P_F}{P_0} \right)^\gamma, \quad (7)$$

где γ — показатель степени, равный (при $5 \leq \Delta P_F \leq 1000$ кПа):

$$\gamma = \begin{cases} 0,6 & \Delta P_F > P_0, \\ 0,4 & \Delta P_F < P_0, \end{cases} \quad (8)$$

где P_0 — атмосферное давление ($P_0 = 101,3$ кПа).

Из приведенных выше соотношений следует, что критерием подобия при детонационных взрывах ВВ является приведенное расстояние до центра взрыва, определяемое по формуле (2).

Импульс положительной фазы сжатия ВУВ, создаваемой взрывом ВВ, определяется по выражению:

$$I = \frac{P \cdot \tau_+}{n + 1}. \quad (9)$$

Разрушающая способность воздушной ударной волны, которая возникает при детонационном взрыве ВВ, зависит от интенсивности ВУВ и импульса положительной фазы сжатия [15, 16]^{3,4}.

Вероятность средних разрушений типовых промышленных зданий определяется по величине пробит-функции [17, 18]:

$$Pr_1 = 5 - 0,26 \ln V_1, \quad (10)$$

где $V_1 = \left(\frac{17500}{P} \right)^{8,4} + \left(\frac{260}{I} \right)^{9,3}$; P задано в Па, а I

задается в Па·с.

Вероятность полных разрушений типовых промышленных зданий определяется по величине пробит-функции [17, 18]:

$$Pr_2 = 5 - 0,22 \ln V_2, \quad (11)$$

где $V_2 = \left(\frac{40000}{P} \right)^{7,4} + \left(\frac{460}{I} \right)^{11,3}$; P задано в Па, а I

задается в Па·с.

Для полученных значений пробит-функций Pr_1 и Pr_2 находятся вероятности реализации данных событий.

Располагая данными о вероятностях разрушений типовых промышленных зданий, которые реализуются на определенных расстояниях от заряда,

³ Методика оценки последствий аварийных взрывов топливно-воздушных смесей (РД 03-409-01). Сборник документов Госгортехнадзор России, НТЦ «Промышленная безопасность», серия 27, выпуск 2. М., 2001. 224 с.

⁴ ГОСТ Р 12.3.047-2012. ССБТ «Пожарная безопасность технологических процессов». М.: Госстандарт России. 61 с.

назначаются минимальные расстояния установки сетчатых экранов от границы защищаемого объекта.

Результаты расчетов

Расчет минимального расстояния от границы защищаемого объекта, на котором должно располагаться ограждение без учета его прогиба

Для определения параметров сетчатого ограждения и расстояний от ограждения до границы защищаемого объекта необходимо в качестве начальных условий принять максимальные характеристики БПЛА (габариты, вес и скорость БПЛА), а также максимальную массу переносимого аппаратом заряда, приведенную к массе ТНТ.

Анализ имеющейся информации по БПЛА^{5, 6} показывает, что в качестве возможного заряда, который способен нести летательный аппарат, следует принять три возможных варианта: малый БПЛА с массой заряда $M = 2 \text{ кг}$ ⁷ [19] (вариант защиты 1); средний БПЛА с массой заряда $M = 10 \text{ кг}$ ⁸ [20] (вариант защиты 2) и большой БПЛА с массой заряда $M = 50 \text{ кг}$ [21, 22] (вариант защиты 3).

Применительно к указанным массам зарядов на рис. 3–11 приведены параметры воздушной ударной волны (ВУВ), генерируемой при их детонации, и условные вероятности разрушений, создаваемые данными ВУВ.

На рис. 3 приведена временная зависимость ВУВ, генерируемой зарядом ТНТ с массой $M = 2 \text{ кг}$, на расстоянии $R = 4 \text{ м}$ от заряда.

Воздушная ударная волна имеет следующие интегральные характеристики: максимальное давление в ВУВ $P_{\max} = 73,7 \text{ кПа}$; минимальное давление в волне разрежения $P_{\min} = -10,1 \text{ кПа}$; импульс положительной фазы давления $I = 86,2 \text{ Па}\cdot\text{с}$; T_F — время действия фазы сжатия, приведенной к треугольной форме: $T_F = (2 \cdot I) / P_{\max} = 2,34 \text{ мс}$; давление отражения ВУВ от вертикальной преграды составляет $P_{\text{отр}} = 189,1 \text{ кПа}$.

На рис. 4 приведены зависимости от расстояния R до места взрыва максимального давления в ВУВ и давления отражения ВУВ от вертикальной преграды, генерируемой зарядом ТНТ с массой $M = 2 \text{ кг}$.

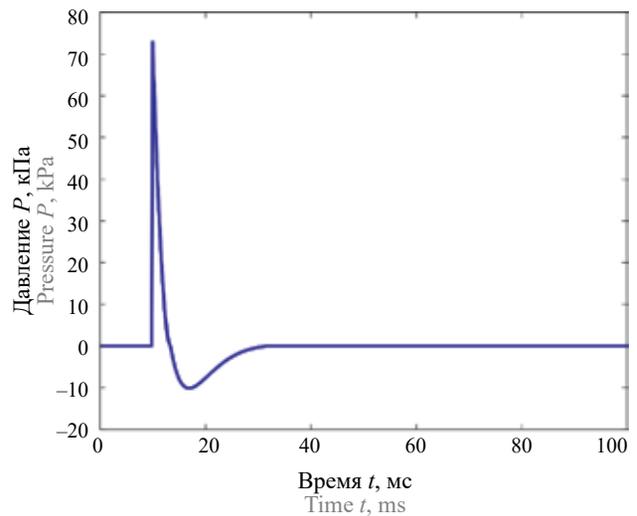


Рис. 3. Зависимость избыточного давления ВУВ от времени на расстоянии $R = 4 \text{ м}$ от заряда ТНТ с массой $M = 2 \text{ кг}$
 Fig. 3. Time dependence of an air shock wave overpressure on distance $R = 4 \text{ m}$ from a TNT charge with a mass of $M = 2 \text{ kg}$

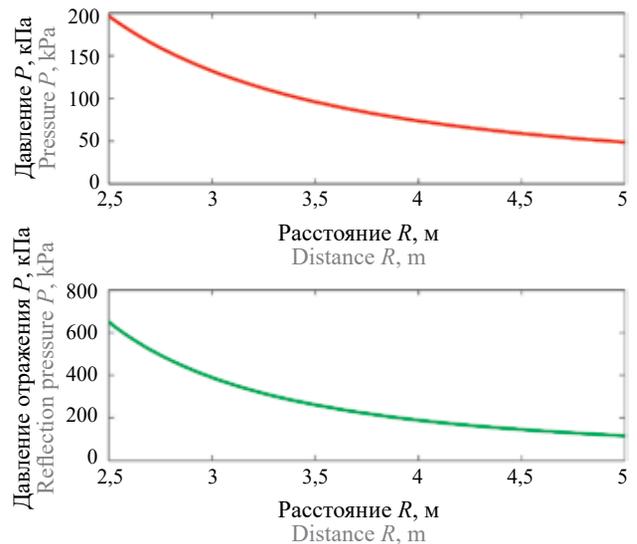


Рис. 4. Зависимость максимальных параметров ВУВ от расстояния ($R = 2,5 - 5,0 \text{ м}$) для заряда ТНТ с массой $M = 2 \text{ кг}$
 Fig. 4. Dependence of maximum parameters of an air shock wave on distance ($R = 2.5 - 5.0 \text{ m}$) from a TNT charge with a mass of $M = 2 \text{ kg}$

На рис. 5 приведены зависимости от расстояния условных вероятностей разрушений и повреждений, создаваемых ВУВ, генерируемой зарядом ТНТ с массой $M = 2 \text{ кг}$. На первом графике рис. 5 приведены условные вероятности полных разрушений типовых зданий ($V_1 = 0$); на втором графике приведены условные вероятности средних разрушений типовых зданий и вероятности гибели человека под действием ВУВ (V_2); на третьем графике приведены условные вероятности разрыва барабанных перепонок у человека (V_4); на нижнем графике рис. 5 приведены зависимости от расстояния максимального давления в ВУВ.

⁵ Литвиненко В.И., Герасимов В. Организация, вооружение и тактика иностранных армий : учеб. пос. М. : Кнорос, 2020. 240 с.

⁶ Литвиненко В.И. Беспилотники — применение и борьба с ними : учеб. пос. М. : Кнорос, 2022.

⁷ Michel A.H. Counter-drone systems. Center Study Drone Bard College, Bard College, NY, USA, Tech. Rep., Dec. 2019. URL: <https://dronecenter.bard.edu/files/2019/12/CSD-CUAS-2ndEdition-Web.pdf>

⁸ Drone Deploy. The Rise of Drones in Construction. 2018. URL: <https://www.dronedeploy.com/blog/rise-drones-construction>

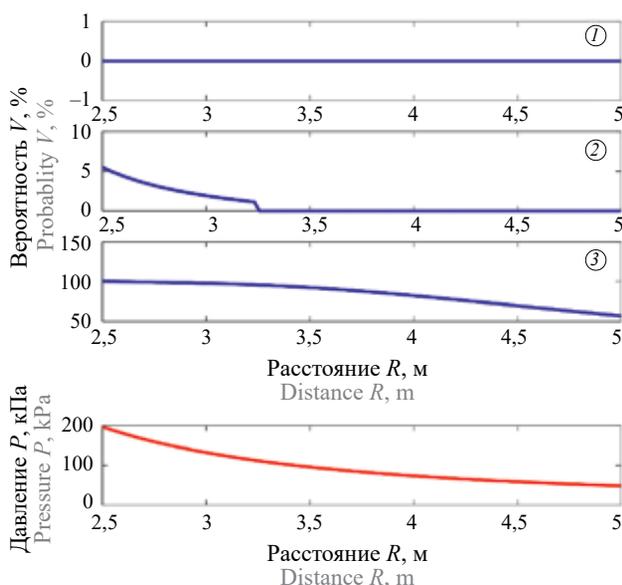


Рис. 5. Зависимость условной вероятности разрушений и повреждений, создаваемых ВУВ, и максимальных параметров ВУВ от расстояния ($R = 2,5 - 5,0$ м) для заряда ТНТ с массой $M = 2$ кг; 1, 2, 3 — вероятности V_1, V_2, V_4 соответственно
Fig. 5. Dependence of conditional probability of destruction and damage caused by an air shock wave and maximum parameters of an air shock wave on distance ($R = 2.5 - 5.0$ m) from a TNT charge with a mass $M = 2$ kg; 1, 2, 3 are probabilities V_1, V_2, V_4 , respectively

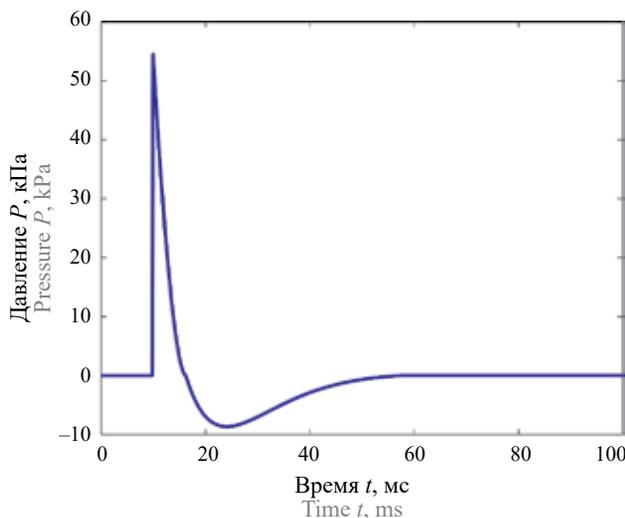


Рис. 6. Зависимость избыточного давления ВУВ от времени на расстоянии $R = 8$ м от заряда ТНТ с массой $M = 10$ кг
Fig. 6. Time dependence of an air shock wave overpressure on distance $R = 8$ m from a TNT charge with a mass $M = 10$ kg

На рис. 6–8 приведены аналогичные зависимости для заряда ТНТ с массой $M = 10$ кг.

На рис. 6 приведена временная зависимость ВУВ, генерируемой зарядом ТНТ с массой $M = 10$ кг, на расстоянии $R = 8$ м от заряда.

ВУВ имеет следующие интегральные характеристики: максимальное давление в ВУВ $P_{\max} = 54,8$ кПа; минимальное давление в волне разрежения $P_{\min} = -8,7$ кПа; импульс положительной

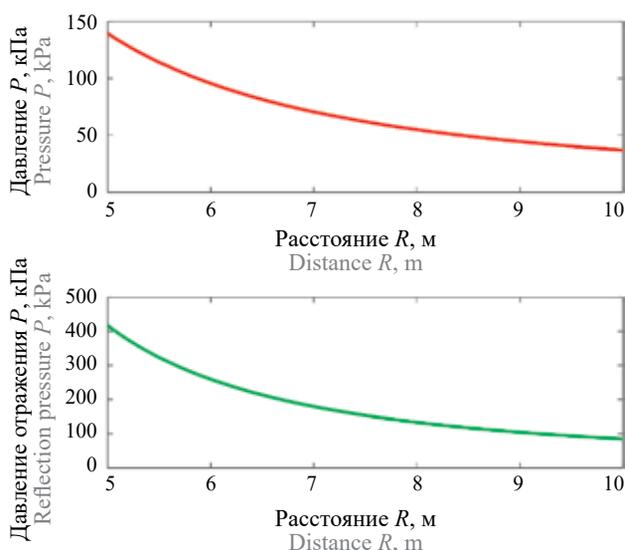


Рис. 7. Зависимость максимальных параметров ВУВ от расстояния ($R = 5,0 - 10,0$ м) для заряда ТНТ с массой $M = 10$ кг
Fig. 7. Dependence of maximum parameters of an air shock wave on distance ($R = 5.0 - 10.0$ m) from a TNT charge with a mass of $M = 10$ kg

фазы давления $I = 122,7$ Па·с; T_F — время действия фазы сжатия, приведенной к треугольной форме: $T_F = 2 \cdot I / P_{\max} = 4,48$ мс; давление отражения ВУВ от вертикальной преграды составляет $P_{otr} = 133,3$ кПа.

На рис. 7 приведены зависимости от расстояния R до места взрыва максимального давления в ВУВ и давления отражения ВУВ от вертикальной преграды, генерируемой зарядом ТНТ с массой $M = 10$ кг.

На рис. 8 приведены зависимости от расстояния условных вероятностей разрушений и повреждений, создаваемых ВУВ, генерируемой зарядом ТНТ с массой $M = 10$ кг, и максимальные параметры ВУВ в зависимости от расстояния R до заряда.

На рис. 9–11 приведены аналогичные зависимости для заряда ТНТ с массой $M = 50$ кг.

На рис. 9 приведена временная зависимость ВУВ, генерируемой зарядом ТНТ с массой $M = 50$ кг, на расстоянии $R = 16$ м от заряда.

ВУВ имеет следующие интегральные характеристики: максимальное давление в ВУВ $P_{\max} = 41,4$ кПа; минимальное давление в волне разрежения $P_{\min} = -7,4$ кПа; импульс положительной фазы давления $I = 176,7$ Па·с; T_F — время действия фазы сжатия, приведенной к треугольной форме: $T_F = 2 \cdot I / P_{\max} = 8,53$ мс; давление отражения ВУВ от вертикальной преграды составляет $P_{otr} = 96,5$ кПа.

На рис. 10 приведены зависимости от расстояния R до места взрыва максимального давления в ВУВ и давления отражения ВУВ от вертикальной преграды, генерируемой зарядом ТНТ с массой $M = 50$ кг.

На рис. 11 приведены зависимости от расстояния условных вероятностей разрушений и поврежде-

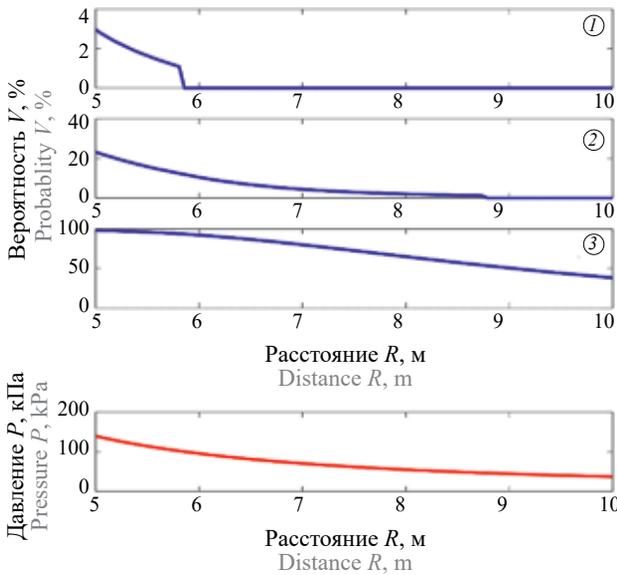


Рис. 8. Зависимость условной вероятности разрушений и повреждений, создаваемых ВУВ, и максимальных параметров ВУВ от расстояния ($R = 5,0 - 10,0$ м) для заряда ТНТ с массой $M = 10$ кг; 1, 2, 3 — вероятности V_1, V_2, V_4 соответственно
Fig. 8. Dependence of conditional probability of destruction and damage caused by an air shock wave and maximum parameters of an air shock wave on distance $R = 5.0 - 10.0$ m from a TNT charge with a mass $M = 10$ kg; 1, 2, 3 are probabilities V_1, V_2, V_4 , respectively

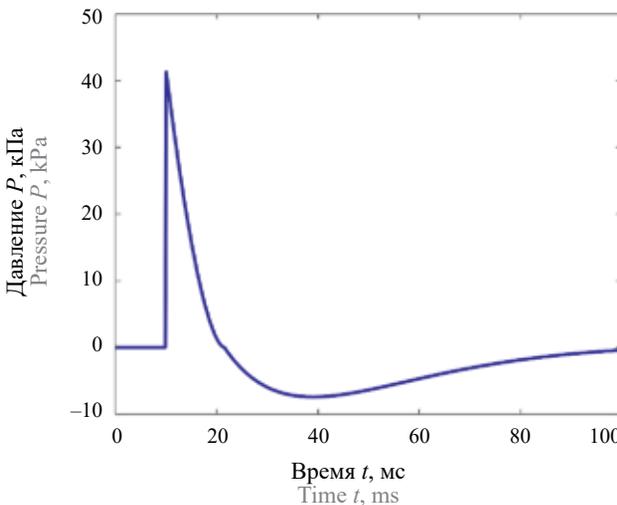


Рис. 9. Зависимость избыточного давления ВУВ от времени на расстоянии $R = 16$ м от заряда ТНТ с массой $M = 50$ кг
Fig. 9. Time dependence of an air shock wave overpressure on distance $R = 16$ m from a TNT charge with a mass of $M = 50$ kg
 дений, создаваемых ВУВ, генерируемой зарядом ТНТ с массой $M = 50$ кг, и максимальные параметры ВУВ в зависимости от расстояния R до заряда.

Выводы

С целью оценки эффективности, технической возможности конструирования и применения ЗОК был рассмотрен вариант защиты объектов, подвергаемых атакам БПЛА, основанный на примене-

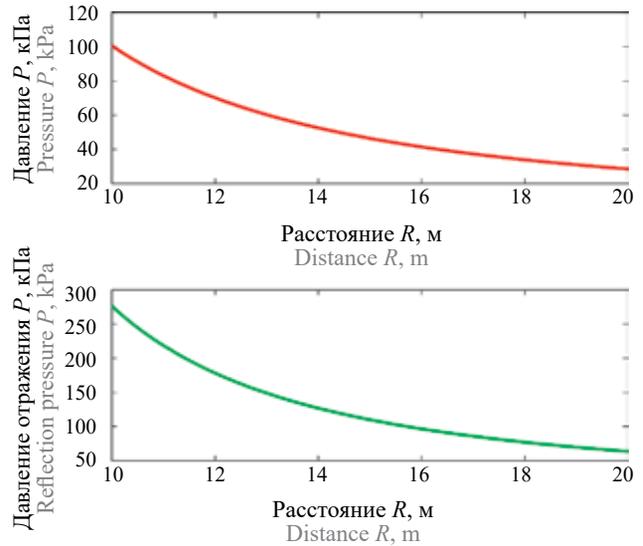


Рис. 10. Зависимость максимальных параметров ВУВ от расстояния ($R = 10,0 - 20,0$ м) для заряда ТНТ с массой $M = 50$ кг
Fig. 10. Dependence of maximum parameters of an air shock wave on distance ($R = 10.0 - 20.0$ m) from a TNT charge with a mass of $M = 50$ kg

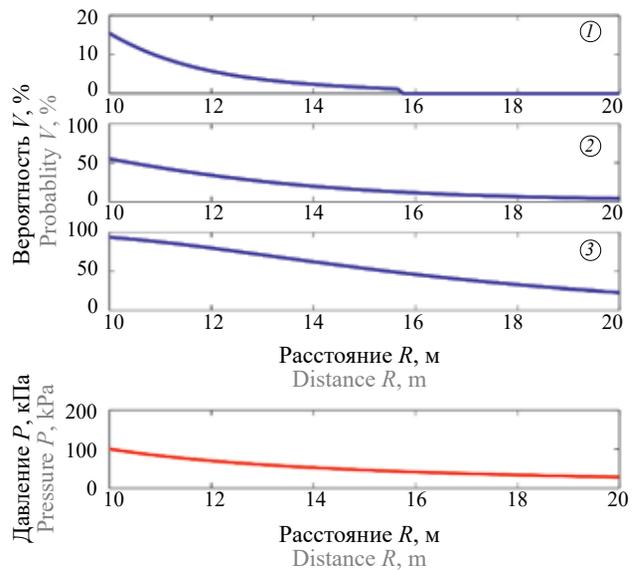


Рис. 11. Зависимость условной вероятности разрушений и повреждений, создаваемых ВУВ, и максимальных параметров ВУВ от расстояния ($R = 10,0 - 20,0$ м) для заряда ТНТ с массой $M = 50$ кг; 1, 2, 3 — вероятности V_1, V_2, V_4 соответственно
Fig. 11. Dependence of conditional probability of destruction and damage caused by an air shock wave and maximum parameters of an air shock wave on distance ($R = 10.0 - 20.0$ m) from a TNT charge with a mass $M = 50$ kg; 1, 2, 3 are probabilities V_1, V_2, V_4 , respectively

нии сетчатых ограждающих конструкций. Основной задачей был расчет минимальных расстояний от сеток до ограждающих конструкций зданий и сооружений, на основе которого возможно дать качественную и количественную оценку применимости данного способа защиты от БПЛА.

Из приведенных расчетов можно сделать вывод, что для объектов, которые могут подвергаться атакам малых БПЛА, способных нести заряды с массой до $M = 2$ кг, расстояние от сетки до ближайшей границы объекта должно быть не менее чем $R = 4$ м. При таком расположении защитной сетки воздушная ударная волна, создаваемая зарядом ВВ, который может доставить БПЛА, не будет представлять опасности для защищаемого объекта.

Для объектов, которые могут подвергаться атакам средних БПЛА, способных нести заряды с массой до $M = 10$ кг, расстояние от сетки до ближайшей границы объекта должно быть не менее чем $R = 8$ м.

Для объектов, которые могут подвергаться атакам больших БПЛА, способных нести заряды с массой до $M = 50$ кг, расстояние от сетки до ближайшей границы объекта должно быть не менее чем $R = 16$ м.

Указанные минимальные расстояния приведены без учета прогиба сетчатого экрана при ударе БПЛА. Полученные минимальные расстояния дол-

жны быть увеличены на значение максимального прогиба сетки при ударе. Оценка максимального прогиба сетки может быть осуществлена как аналитическими, так и численными методами, доступными проектировщикам [23, 24], и поэтому не создает проблем в области проектирования ЗОК.

Таким образом можно сделать вывод, что современные технические решения и материалы: сетки^{9, 10} и стальные канаты^{11, 12}, используемые при проектировании ЗОК, позволяют обеспечить указанные выше расстояния от сетчатых конструкций до защищаемого объекта, что говорит об эффективности подобных конструкций.

⁹ ГОСТ Р 51285–99. Сетки проволочные крученые с шестиугольными ячейками для габионных конструкций. Технические условия.

¹⁰ ГОСТ 5336–80. Сетки стальные плетеные одинарные. Технические условия.

¹¹ ГОСТ 2172–80. Канаты стальные авиационные. Технические условия.

¹² ГОСТ 3063–80. Канат одинарной свивки типа ТК конструкции $1 \times 19 (1 + 6 + 12)$. Сортамент.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Мантула А.Ю., Ромащенко М.А. Классификация типов БПЛА и возможных технических способов противодействия : сб. тр. победителей конкурса науч.-исслед. работ студентов и аспирантов ВГТУ по приоритетным направлениям развития науки и технологий. Воронеж, 2024.
2. Honggu Kang, Jingon Joung, Jinyoung Kim, Joonhyuk Kang, Yong Soo Cho. Protect your sky : a survey of counter unmanned aerial vehicle systems // IEEE Access. 2020. Vol. 8. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3023473
3. Butt A., Shah S.I.A., Zaheer Q. Weapon launch system design of anti-terrorist UAV // International Conference on Engineering and Emerging Technologies (ICEET). 2019. Pp. 1–8. DOI: 10.1109/CEET1.2019.8711832
4. Asnafi M., Dastgheibifard S. A review on potential applications of unmanned aerial vehicle for construction industry. Sustainable structures and materials // An International Journal. 2018. No. 1 (2). Pp. 44–53. DOI: 10.26392/SSM.2018.01.02.044
5. Черненко А.А., Земляной В.Е. Направления развития форм и способов противодействия беспилотным воздушным судам : сб. науч. ст. III Межведомств. науч.-практ. конф. Новосибирск, 2024.
6. Лопатко С.В., Киселев А.Я. К вопросу об организации противодействия малым беспилотным летательным аппаратам : сб. науч. ст. III Межведомств. науч.-практ. конф. Новосибирск, 2024.
7. Protecting Against the Threat of Unmanned Aircraft Systems (UAS). U.S. Department of Homeland Security Cybersecurity and Infrastructure Security Agency Interagency Security Committee. November 2020 Edition.
8. Brust M.R., Danoy G., Bouvry P., Gashi D., Pathak H., Gonc M.P. Defending against Intrusion of Malicious UAVs with Networked UAV Defense Swarms. 2017 IEEE 42nd Conference on Local Computer Networks Workshops. DOI: 10.1109/LCN.Workshops.2017.71
9. Jeelani I., Gheisari M. Safety challenges of UAV integration in the construction industry: Focusing on workers at height. University of Florida, October 2022.
10. Mutis I., Romero A.F. Thermal performance assessment of curtain walls of fully operational buildings using infrared thermography and unmanned aerial vehicles // Proceedings of the 35th CIB W78 2018 Conference: IT in Design, Construction, and Management. Springer, 2019. Pp. 703–709. DOI: 10.1007/978-3-030-00220-6_84
11. Беляев А.Ф., Садовский М.А. Механическое действие воздушных ударных волн взрыва по данным экспериментальных исследований // Физика взрыва. № 1. М. : АН СССР, 1952.
12. Бейкер У., Кокс П., Уэстайн П., Кулеш Дж., Стрелов Р. Взрывные явления. Оценка и последствия : в 2 кн. / пер. с англ. под ред. Я.Б. Зельдовича, Б.Е. Гельфанда. М. : Мир, 1986. 319 с.
13. Андреев К.К., Беляев А.Ф. Теория взрывчатых веществ. М. : Оборонгиз, 1960. 595 с.
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. Котляревский В.А. и др. Убежища гражданской обороны. Конструкция и расчет. М. : Стройиздат, 1989.
16. Хуснутдинов Д.З. и др. Аварийные взрывы газоздушных смесей в атмосфере. М. : НИУ МГСУ, 2014. 80 с.

17. Расторгуев Б.С. и др. Проектирование зданий и сооружений при аварийных взрывных воздействиях. М. : Изд-во Ассоциации строительных вузов, 2007. 152 с.
18. Бирбраер А.Н., Роледер А.Ю. Экстремальные воздействия на сооружения. СПб. : Изд-во Политехнического университета, 2009. 594 с.
19. Литвиненко В.И. Барражирующие беспилотники — боеприпасы // Армейский сборник. 2023. № 4. URL: <https://army.ric.mil.ru/Stati/item/481638/>
20. Сосницкий В. Поле боя на земле и в эфире // Армейский сборник. 2018. № 11.
21. Гумелев В.Ю. и др. Иранские беспилотные летательные аппараты «Мохаджер» и «Абабиль» // Армейский сборник. 2021. № 10.
22. Irizarry J., Costa D.B. Exploratory study of potential applications of unmanned aerial systems for construction management tasks // Journal of Engineering, Management and Information Technology. 2016. Vol. 32. Issue 3. DOI: 10.1061/(ASCE)ME.1943-5479.0000422
23. Кошляков Н.С., Глинер Э.Б., Смирнов М.М. Уравнения в частных производных математической физики. М. : Высшая школа, 1970. 710 с.
24. Справочник проектировщика. Динамический расчет сооружений на специальные воздействия. М. : Стройиздат, 1981. 248 с.

REFERENCES

1. Mantula A.Yu., Romashchenko M.A. *Classification of UAV types and possible technical methods of counteraction : a collection of works by the winners of the competition of research works by students and postgraduates of VSTU in priority areas of science and technology development*. Voronezh, 2024. (rus).
2. Honggu Kang, Jingon Joung, Jinyoung Kim, Joonhyuk Kang, Yong Soo Cho. *Protect Your Sky : a Survey of Counter Unmanned Aerial Vehicle Systems*. *IEEE Access*. 2020; 8. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3023473
3. Butt A., Shah S.I.A., Zaheer Q. Weapon launch system design of anti-terrorist UAV. *International Conference on Engineering and Emerging Technologies (ICEET)*. 2019; 1-8. DOI: 10.1109/CEET1.2019.8711832
4. Asnafi M., Dastgheibifard S. A review on potential applications of unmanned aerial vehicle for construction industry. *Sustainable structures and materials*. *An International Journal*. 2018; 1(2):44-53. DOI: 10.26392/SSM.2018.01.02.044
5. Chernenko A.A., Zemlyanoi V.E. Directions of development of forms and methods of countering unmanned aircraft. *Collection of scientific articles of the III Interdepartmental scientific and practical conference*. Novosibirsk, 2024. (rus).
6. Lopatko S.V., Kiselev A.Ya. On the issue of the organization of counteraction to small unmanned aerial vehicles. *Collection of Scientific Articles of the III Interdepartmental scientific and practical conference*. Novosibirsk, 2024. (rus).
7. Protecting Against the Threat of Unmanned Aircraft Systems (UAS). *U.S. Department of Homeland Security Cybersecurity and Infrastructure Security Agency Interagency Security Committee*. November 2020 Edition.
8. Brust M.R., Danoy G., Bouvry P., Gashi D., Pathak H., Gonc M.P. *Defending against Intrusion of Malicious UAVs with Networked UAV Defense Swarms*. *2017 IEEE 42nd Conference on Local Computer Networks Workshops*. DOI: 10.1109/LCN.Workshops.2017.71
9. Jeelani I., Gheisari M. *Safety Challenges of UAV Integration in the Construction Industry: Focusing on Workers at Height*. University of Florida, October 2022.
10. Mutis I., Romero A.F. Thermal performance assessment of curtain walls of fully operational buildings using infrared thermography and unmanned aerial vehicles. *Proceedings of the 35th CIB W78 2018 Conference: IT in Design, Construction, and Management*. 2019; 703-709. DOI: 10.1007/978-3-030-00220-6_84
11. Belyaev A.F., Sadovsky M.A. Mechanical action of air shock waves of explosion according to experimental research data. *Physics of explosion, collection No. 1*. Moscow, USSR Academy of Sciences, 1952. (rus).
12. Baker W., Cox P., Westine P., Kulesh J., Strelow R. *Explosive Phenomena. Evaluation and Consequences : in 2 books*. Translation from English edited by Ya.B. Zeldovich, B.E. Gelfand. Moscow, Mir Publ., 1986; 319. (rus).
13. Andreev K.K., Belyaev A.F. *Theory of explosives*. Oborongiz, Moscow, 1960; 595. (rus).
14. Komarov A.A. *Forecasting loads and estimating consequences of their impact on buildings and structures : Doctoral Thesis*. Moscow, MSCU, 2001; 460. (rus).
15. Kotlyarevsky V.A. et al. *Emergency Shelters in Civil Defense. Structure and Calculations*. Moscow, Stroyizdat, 1989. (rus).
16. Khusnutdinov D.Z. et al. *Accidental Explosions of Gas-Air Mixtures in Atmosphere*. Moscow, NRU MSCU, 2014; 80. (rus).
17. Rastorguev B.S. et al. *Project Designing of Buildings and Installations Against Accident Explosion Impacts*. Moscow, Association of Construction Building Universities Publishing, 2007; 152. (rus).
18. Birbraer A.N., Rolleder A.Yu. *Extreme Impacts over Installations*. Saint-Petersburg, Published by the Tech University, 2009; 594. (rus).
19. Litvinenko V.I. Barrage drones — ammunition. *Army Collection*. 2023; 4. URL: <https://army.ric.mil.ru/Stati/item/481638/> (rus).
20. Sosnitsky V. The battlefield on the ground and on the air. *Army collection*. 2018; 11. (rus).

21. Gumelev V.Yu. et al. Iranian unmanned aerial vehicles “Mohajer” and “Ababil”. *Army collection*. 2021; 10. (rus).
22. Irizarry J., Costa D.B. Exploratory Study of Potential Applications of Unmanned Aerial Systems for Construction Management Tasks. *Journal of Engineering, Management and Information Technology*. 2016; 32(3). DOI: 10.1061/(ASCE)ME.1943-5479.0000422
23. Koshlyakov N.S., Gliner E.B., Smirnov M.M. *Partial differential equations of mathematical physics*. Moscow, Higher School Publ., 1970; 710. (rus).
24. Construction Designer’s Reference Book. *Dynamic Analysis of Specific Impacts*. Moscow, Stroyizdat Publ., 1981; 248. (rus).

Поступила 23.09.2024, после доработки 24.09.2024;

принята к публикации 26.09.2024

Received September 23, 2024; Received in revised form September 24, 2024;

Accepted September 26, 2024

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; AuthorID: 57192376754; ORCID: 0000-0002-9685-0880; e-mail: N. Gromov@ikbs-mgsu.ru

КОРОЛЬЧЕНКО Антон Дмитриевич, заведующий сектором испытаний научно-исследовательского центра «Взрывобезопасность» Института комплексной безопасности в строительстве, преподаватель кафедры комплексной безопасности в строительстве, соискатель на уч. ст. канд. техн. наук, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26; РИНЦ ID: 890113; Scopus AuthorID: 57215919375; ResearcherID: E-3295-2017; ORCID: 0000-0002-1383-574X; e-mail: Anton.Korolchenko@ikbs-mgsu.ru

ЛАНСКОЙ Павел Сергеевич, преподаватель, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26; РИНЦ ID: 9558-9900; ResearcherID: JOP-7507-2023; ORCID: 0000-0002-6184-0279; e-mail: 6451187@mail.ru

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

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 RISC: 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 RISC: 550242; Scopus AuthorID: 57192376754; ResearcherID: AAO-5120-2021; ORCID: 0000-0002-9685-0880; e-mail: N. Gromov@ikbs-mgsu.ru

Anton D. KOROLCHENKO, Head of Testing Sector of Explosion Safety Research Center, Institute of Integrated Safety in Construction, Lecturer of Department of Integrated Safety in Construction, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Yaroslavskoe Shosse, 26, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RISC: 890113; Scopus AuthorID: 57215919375; ResearcherID: E-3295-2017; ORCID: 0000-0002-1383-574X; e-mail: Anton.Korolchenko@ikbs-mgsu.ru

Pavel S. LANSKOY, Lecturer-Researcher, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Yaroslavskoe Shosse, 26, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RISC: 9558-9900; ResearcherID: OP-7507-2023; ORCID: 0000-0002-6184-0279; e-mail: 6451187@mail.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.