

УДК 623.454.53; 623.775; 662.175

doi: 10.53816/23061456_2025_1–2_113

**МАСКИРУЮЩИЕ АЭРОЗОЛИ
В НЕЛЕТАЛЬНЫХ СРЕДСТВАХ ПОРАЖЕНИЯ НАРУШИТЕЛЕЙ
MASKING AEROSOLS IN NON-LETHAL MEANS OF DESTRUCTION
OF VIOLATORS**

Е.И. Кветкин¹, канд. техн. наук С.И. Косяков¹, В.С. Филиппов²

E.I. Kvetkin, Ph.D. S.I. Kosyakov, V.S. Filippov

¹12 ЦНИИ Минобороны России, ²12 Главное управление Минобороны России

Представлены результаты физического и математического моделирования аэрозольной завесы в охраняемом помещении при сгорании пиротехнического состава. Продemonстрирован масштабный эффект увеличения времени существования аэрозольной завесы при увеличении объема помещения и неизменной дальности видимости в дыму. Эффект обусловлен опережающим увеличением количества тепла, инжестируемого в помещение с дымом (пропорционально объему помещения) по сравнению с количеством тепла, отводимого в стены, пол и потолок помещения при остывании дыма (пропорционально их площади). Показано влияние формы аэрозолей на характеристики аэрозольной завесы. Продemonстрированный масштабный эффект следует учитывать как при оценке результатов испытаний генераторов аэрозолей, так и при планировании применения генераторов аэрозолей в охраняемых помещениях.

Ключевые слова: аэрозоль, видимость, генератор, дым, завеса, масштабный эффект, форма.

The results of physical and mathematical modeling of an aerosol curtain in a guarded room during the combustion of pyrotechnic composition are presented. The large-scale effect of increasing the lifetime of an aerosol curtain with an increase in the volume of the room and a constant range of visibility in smoke is demonstrated. The effect is due to an outstripping increase in the amount of heat injected into the room with smoke (in proportion to the volume of the room) compared to the amount of heat released into the walls, floor and ceiling of the room when the smoke cools (in proportion to their area). The influence of the shape of aerosols on the characteristics of an aerosol curtain is shown. The demonstrated large-scale effect should be taken into account both when evaluating the test results of aerosol generators and when planning the use of aerosol generators in protected areas.

Keywords: aerosol, visibility, generator, smoke, curtain, scale effect, shape.

Генераторы аэрозолей (ГА) широко применяются при охране объектов и предотвращении доступа к ним, освобождении от террористов зданий, объектов, территорий и заложников, нейтрализации имеющих в распоряжении нарушителей средств поражения [1]. К ГА (рис. 1) относятся не только пиротехнические дымовые шашки и

гранаты [2], но также и дым-машины, осуществляющие испарение аэрозолеобразующих жидкостей на основе смеси пропиленгликоля или триэтиленгликоля с дистиллированной водой [3]. Эффективность применения ГА определяется временем, в течение которого аэрозольная завеса (АЗ) обеспечивает заданную дальность видимости L

[2, 3]. То есть АЗ должна как можно быстрее устанавливаться и как можно дольше существовать, оказывая дезориентирующее воздействие на нарушителя и скрывая (маскируя) предмет охраны.

Время установки АЗ зависит от способа создания аэрозольного облака, а время ее существования — от свойств аэрозолей и внешних условий, под влиянием которых аэрозоль рассеивается. При применении ГА на открытой местности внешними условиями являются ветер и дождь. При применении ГА в помещении внешними условиями становится интерьер помещения, при соприкосновении с которым АЗ остывает, а аэрозоль рассеивается [4].

Независимо от типа ГА (дым-машины, дымовые гранаты или мины) и типа аэрозолеобразующего вещества (аэрозолеобразующие жидкость или пиротехнический состав) для инжектирования этого вещества в охраняемое помещение ему необходимо сообщить определенное количество тепловой энергии $Q \sim M$ (при испарении или сгорании), пропорциональное массе M инжектированного вещества.

Дальность видимости L (или степень маскирования предмета охраны) в АЗ в пределах 25 % зависит от формы аэрозольных частиц и обратно пропорциональна массовой концентрации Φ аэрозоля [2]:

– для изометрических частиц

$$L = 2 / \Phi, \text{ м}; \quad (1)$$

– для вытянутых частиц в форме нитей или игл

$$L = 2,5 / \Phi, \text{ м}. \quad (2)$$

То есть, в помещениях разного объема V для создания АЗ с одинаковой видимостью $L = \text{const}$

необходимо обеспечить одинаковую массовую концентрацию аэрозоля $\Phi = M / V = \text{const}$. Значит, в помещения разного объема V необходимо не только инжектировать разную массу $M = \Phi \cdot V$ аэрозолеобразующего вещества, но также затратить разное количество тепла $Q \sim M$. Несмотря на это, нагрев ΔT аэрозольной среды в помещениях будет одинаковым, так как $\Delta T \sim Q / V \sim M / V \sim \Phi = \text{const}$.

В результате возникает масштабный эффект увеличения времени существования АЗ (маскирования предмета охраны) в помещении при увеличении его объема V и неизменной дальности видимости L в дыму. Эффект обусловлен опережающим увеличением количества тепла Q , инжектируемого в помещение с аэрозолем (пропорционально объему или кубу характерного размера помещения), по сравнению с количеством тепла, отводимого в стены, пол и потолок помещения при остывании АЗ (пропорционально их площади или квадрату характерного размера помещения).

Другими словами, при неизменной дальности видимости $L = \text{const}$ в АЗ и соответствующих неизменных массовой концентрации $\Phi = \text{const}$ аэрозоля и его нагреве $\Delta T = \text{const}$, время остывания АЗ будет увеличиваться при увеличении объема V помещения. Соответственно будут увеличиваться и время, в течение которого в помещении существуют восходящие конвективные потоки воздуха, и время удержания аэрозоля в парящем состоянии этими потоками, и время существования АЗ.

Влияние масштабного эффекта на время существования АЗ демонстрируется на рис. 2 результатами физического и математического моделирования внутренней тепловой гравитационной конвекции АЗ. Физическое моделирование АЗ осуществлялось в боксе (рис. 3)



Рис. 1. Способы применения генераторов аэрозолей

размерами $4 \times 1,6 \times 1,5$ м ($x_1 \times x_2 \times x_3$). В боксе у его обоих торцов напротив друг друга на расстоянии $d = 0,5$ м размещались средства регистрации — светодиодные лампы SBL-GU5.3 и люксометры LX-1108. Координаты ($x_1 \times x_2 \times x_3$) ламп ($1,34 \times 0,8 \times 0,75$) и ($2,73 \times 0,78 \times 0,74$), а люксометров — ($0,82 \times 0,8 \times 0,75$) и ($3,23 \times 0,78 \times 0,74$). Бокс задымлялся при сгорании в центре пола пиротехнического состава курящегося типа (рис. 1). По мере просветления аэрозоля периодически определялась освещенность E люксометров, а по формуле $D = \lg(E_0 / E) / d$ при известной начальной освещенности E_0 люксометров оценивалась оптическая плотность D АЗ. Из известных значений D по формулам [2],

— для изометрических частиц

$$\Phi = \begin{cases} 9,87 \cdot D(t)^{1,33} & \text{при } D \leq 0,3; \\ 19 \cdot D(t)^{1,8} & \text{при } D > 0,3, \end{cases} \quad \text{г/м}^3;$$

— для нитевидных частиц

$$\Phi = 2,66 \cdot D(t)^{1,16}, \quad \text{г/м}^3;$$

оценивалась массовая концентрация Φ аэрозоля. Одновременно по показаниям термопары оценивался нагрев аэрозоля ΔT . Термопара размещалась в точке ($2,08 \times 0,78 \times 0,94$). На рис. 2 символами 1 представлены опытные дан-

ные по изменению температуры ΔT и массовой концентрации Φ аэрозоля в боксе при сгорании в нем 46,16 г пиротехнического состава.

Графиками (2) и (3) на рис. 2 отмечены результаты математического моделирования. Расчеты проводились по уравнениям Рейнольдса в переменных скорость–давление–температура–плотность [4, 5]. Турбулентные характеристики воздуха определялись по двухпараметрической $k - \varepsilon$ модели турбулентности [4, 5]. Поведение аэрозоля ввиду его малой концентрации в воздухе предполагалось пассивным. Аэрозоль разделялся на 2 группы. Частицы одной группы считались полностью увлекающимися несущим потоком воздуха [5]. Частицы второй группы диаметром $d_p = 1,5$ мкм и плотностью $\rho_p = 1,7 \cdot 10^3$ кг/м³ считались инерционными и осаждающимися из несущего их потока [6].

Графиками 2 демонстрируются результаты расчета АЗ для условий опыта. Линиями 3 на рис. 2 отмечены результаты решения аналогичной задачи, но когда размеры бокса увеличены в 2 раза, до значений $8 \times 3,2 \times 3$ м, а его объем — в 8 раз. Соответственно в 8 раз, до 368 г увеличена масса сгорающего пиротехнического состава. Аналогичным образом линиями 2 и 3 на рис. 4 показано изменение дальности видимости L в АЗ. Значения L оценены по формуле 1 для освещения предмета охраны со стороны

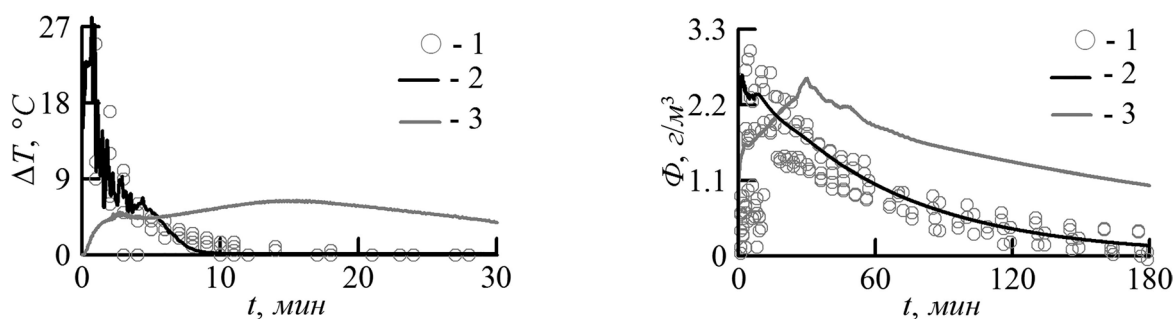


Рис. 2. Изменение в боксе параметров АЗ, созданной изометрическими аэрозолями

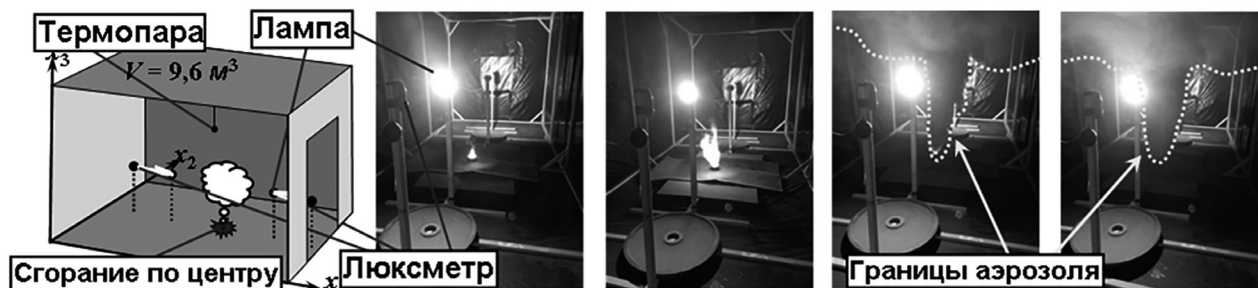


Рис. 3. Условия физического моделирования АЗ

нарушителя [2]. Совокупность графиков на рис. 2 и 4 иллюстрирует существо масштабного эффекта, при котором и время остывания АЗ, и время существования АЗ (маскирования предмета охраны) увеличиваются при увеличении объема V помещения, в котором применяется ГА.

Форма аэрозольных частиц также довольно заметно влияет на АЗ. Например, согласно формулам (1) и (2) дальность видимости L в нитевидном аэрозоле на 25 % больше дальности видимости L в изометрическом аэрозоле. Но скорость осаждения V_p нитевидных частиц (рис. 5) меньше скорости осаждения V_p изометрических частиц [7],

$$V_p = \frac{9,8}{12} \frac{d_p^2 \rho_p}{\mu \cdot \chi} \text{ и } V_p = \frac{9,8}{18} \frac{d_p^2 \rho_p}{\mu}, \quad (3)$$

где d_p и ρ_p — диаметр и плотность частиц;

μ — динамический коэффициент вязкости воздуха.

Коэффициент формы χ нитевидных частиц зависит от отношения размеров частиц $\beta = l_p / d_p$ и может составлять десятки...сотни единиц (рис. 6). Соответственно, скорость осаждения нитевидных частиц меньше скорости осаждения изометрических частиц одинакового диаметра d_p . Это отличие проявляется во времени, в течение которого существует АЗ, обеспечиваются заданная дальность видимости L в АЗ и сокрытие (маскирование) предмета охраны от нарушителя.

Поскольку различные пиротехнические составы продуцируют изометрические частицы в форме сферы и многогранника (у которых все три размера примерно одинаковы) или вытянутые частицы в форме нитей и игл (у которых один размер много больше двух других, рис. 5), то для

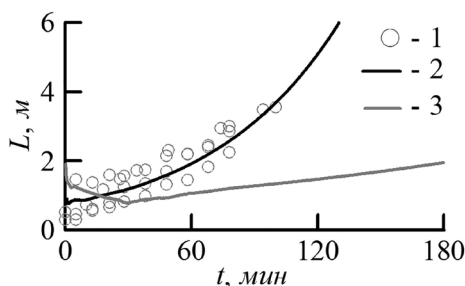


Рис. 4. Изменение в помещениях разного объема дальности видимости в АЗ, созданной изометрическими аэрозолями

демонстрации влияния формы аэрозольных частиц на АЗ вновь было проведено физическое и математическое моделирование внутренней тепловой гравитационной конвекции АЗ.

Условия физического и математического моделирования были аналогичны предыдущим и показаны на рис. 3. Отличие состояло в сжигании в боксе 25,71 г дымового состава, продуцирующего нитевидный аэрозоль. На рис. 7 символами 1 представлены результаты опыта с нитевидным аэрозолем, а символами 2 — результаты опытов с изометрическим аэрозолем, ранее показанные на рис. 2. Здесь же графиками 3 представлены результаты расчетов для нитевидного аэрозоля, а графиками 4 — для изометрического аэрозоля, также ранее показанные на рис. 2 линиями 2.

Сопоставление указанных опытных и расчетных данных свидетельствует, что несмотря на практически одинаковое остывание аэрозольной среды в боксе нитевидные частицы 1 витали в 2 раза дольше, чем изометрические частицы 2. Этот эффект описан формулами (3). Сопоставление указанных формул дает коэффициент формы χ вытянутых частиц аэрозоля, равный $\chi = 1,5$. Исходя из графика на рис. 6 получаем отношение длины l_p вытянутой частицы к ее диаметру d_p равное $\beta = l_p / d_p = 2,5$. То есть результаты расчетов 3 на рис. 7 свидетельствуют, что сред-

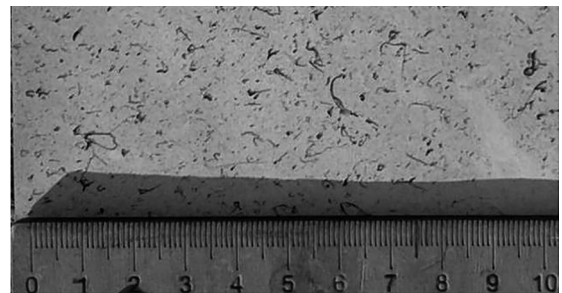


Рис. 5. Внешний вид нитевидных дымовых частиц

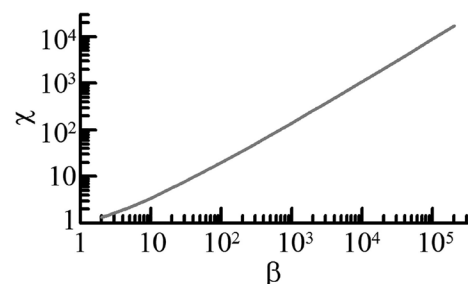


Рис. 6. Значения коэффициента формы для нитевидных аэрозольных частиц [7]

няя длина нитевидных частиц аэрозоля в опыте должна была составлять $l_p \approx 3,75$ мкм при среднем диаметре частиц $d_p \approx 1,5$ мкм. С другой стороны, согласно исследованиям [8] для частицы, по форме близкой к круглому цилиндру диаметром d_p и длиной l_p , коэффициент формы χ в уравнении (3) выражается формулой $\chi = 100,7 / l_p$. Тогда средняя длина нитевидных частиц аэрозоля в опыте должна была составлять $l_p \approx 100,7 / \chi \approx 66,7$ мкм.

Результаты представленных опытов и тестовых расчетов свидетельствуют, что математическое моделирование внутренней тепловой гравитационной конвекции АЗ в постановке, воспроизводящей условия опытов, позволяет восстановить более точную картину формирования в охраняемом помещении АЗ. В данном случае видно, что в опыте с изометрическим аэрозолем в боксе витали частицы среднего размера $d_p \approx 1,5$ мкм, а в опыте с нитевидным аэрозолем в течение довольно длительного времени (1...3 часа) витали частицы со средней длиной $l_p \approx 3,75...66,7$ мкм.

На рис. 8 графиками 3 и 4 показано изменение в экспериментальном боксе дальности видимости L в АЗ, созданной нитевидными и изометрическими аэрозолями. В расчетах значения L оценены по формулам (1) и (2) для освещения предмета охраны со стороны нарушителя [2].

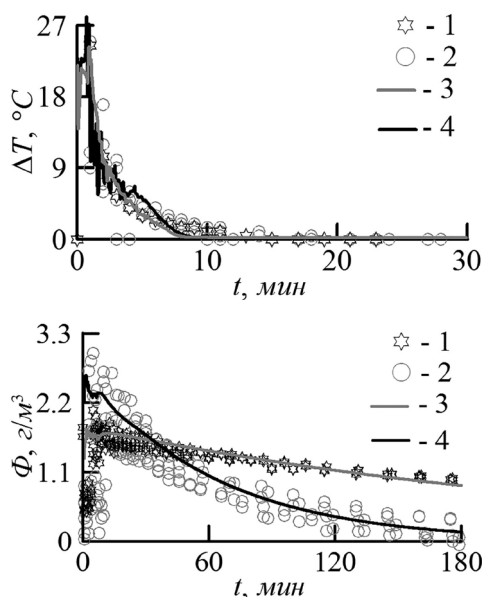


Рис. 7. Изменение в боксе параметров АЗ, созданной нитевидными и изометрическими аэрозолями

Сопоставление всей совокупности экспериментальных и расчетных данных на рис. 2, 4, 5, 7 и 8 свидетельствует о существенном влиянии на АЗ и внешних условий, и формы самих аэрозолей при применении в охраняемом помещении ГА в качестве нелетальных средств поражения нарушителей. В этом состоит существенное отличие в постановке АЗ на открытой местности и внутри охраняемого помещения.

Так, создание АЗ в охраняемом помещении, при соприкосновении с интерьером которого аэрозоль остывает и рассеивается, приводит к довольно длительному (в течение 0,5...1 часа, рис. 4) ограничению видимости в помещении в пределах $L = 1 \dots 2$. Использование в АЗ нитевидных аэрозолей повысит длительность ограничения видимости в помещении (рис. 8). То есть применение в охраняемом помещении в качестве нелетальных средств поражения нарушителей ГА, продуцирующих нитевидные аэрозоли, может привести к более длительному ограничению видимости L в помещении. То есть АЗ будет дольше оказывать дезориентирующее воздействие на нарушителя и скрывать (маскировать) предмет охраны. Отсюда следует предложение об использовании в дымовых нелетальных средствах поражения нарушителей веществ, продуцирующих нитевидные аэрозоли.

Продемонстрированный в настоящей статье масштабный эффект взаимодействия нагретой АЗ с интерьером помещения следует учитывать при оценке результатов испытаний ГА. Испытания ГА обычно проводят в боксах небольшого объема [5, 6]. При этом параметры назначения ГА оценивают по времени, в течение которого обеспечивается заданная дальность видимости L в АЗ (рис. 4 и 8). Неучет масштабного эффекта или формы аэрозолей приведет к перерасходу ресурсов (например, количества аэрозолеобразую-

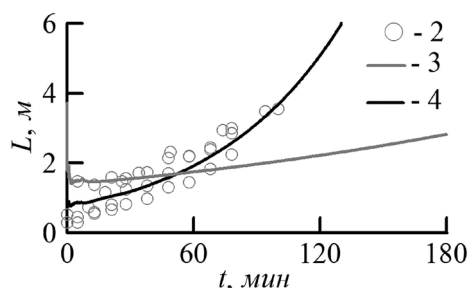


Рис. 8. Изменение в боксе дальности видимости в АЗ, созданной аэрозолями разной формы

щего вещества), обеспечивающих выполнение ГА требований к его параметрам назначения. Это же следует учитывать и при планировании применения ГА в охраняемых помещениях. Иначе помещение будет задымлено на большее время, что может создать затруднения при нейтрализации в нем нарушителей (террористов).

Результаты настоящего исследования будут полезны для специалистов родственных дисциплин (отраслей наук) — например, занимающихся пожарной безопасностью, созданием и внедрением технических средств пожарной охраны (дальности видимости в дымах пожаров).

Список источников

1. Бабкин А.В., Велданов В.А., Грязнов Е.Ф. и др. Средства поражения и боеприпасы: учебник; под общ. ред. В.В. Селиванова. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. 984 с.
2. Филиппов В.С., Кветкин Е.И., Косяков С.И. Обоснование способа применения дымовых гранат в помещениях военных объектов // Боеприпасы XXI век. 2023. № 2. С. 231–234.
3. Пурис А.М., Косяков С.И., Сильников М.В., Филиппов В.С. Обоснование способа применения и режима эксплуатации дымовых машин при охране военных объектов // Вопросы оборонной техники. Серия 16. Технические средства противодействия терроризму. 2022. № 1–2 (163–164). С. 103–108.
4. Кветкин Е.И., Филиппов В.С., Пурис А.М., Косяков С.И. Анализ результатов испытаний дымовой гранаты посредством математического моделирования внутренней гравитационной конвекции дыма // Боеприпасы XXI век. 2022. № 2. С. 111–116.
5. Пурис А.М., Федоров Д.С., Косяков С.И., Матросов В.Н. Моделирование внутренней гравитационной конвекции аэрозольной среды при взрыве дымовой гранаты // Вопросы оборонной техники. Серия 16. Технические средства противодействия терроризму. 2021. № 1–2 (151–152). С. 46–52.
6. Пурис А.М., Федоров Д.С., Косяков С.И., Чернопрудов Д.М. Моделирование дымовой завесы в охраняемом помещении // Вопросы оборон-

ной техники. Серия 16. Технические средства противодействия терроризму. 2021. № 1–2 (151–152). С. 91–97.

7. Фукс Н.А. Механика аэрозолей. М.: Изд-во АН СССР, 1965. 380 с.

8. Слезкин Н.А. Динамика вязкой несжимаемой жидкости. М.: Гос. изд-во технико-теоретической лит., 1955. 520 с.

References

1. Babkin A.V., Veldanov V.A., Gryaznov E.F. et al. Weapons and ammunition: Textbook; Under the editorship of V.V. Selivanov. M.: Publishing MGTU im. N.Uh. Bauman, 2008. 984 p.
2. Filippov V.S., Kvetkin E.I., Kosyakov S.I. Substantiation of the method of using smoke grenades in the premises of military facilities // Ammunition XXI century. 2023. No 2. Pp. 231–234.
3. Puris A.M., Kosyakov S.I., Silnikov M.V., Filippov V.S. Justification of the method of application and mode of operation of smoke machines for the protection of military facilities // Issues of defense technology. Series 16. Technical means of countering terrorism. 2022. No 1–2 (163–164). Pp. 103–108.
4. Kvetkin E.I., Filippov V.S., Puris A.M., Kosyakov S.I. Analysis of smoke grenade test results by mathematical modeling of internal gravitational smoke convection // Ammunition XXI century. 2022. No 2. Pp. 111–116.
5. Puris A.M., Fedorov D.S., Kosyakov S.I., Matrosov V.N. Modeling of the internal gravitational convection of an aerosol medium during a smoke grenade explosion // Issues of defense technology. Series 16. Technical means of countering terrorism. 2021. No 1–2 (151–152). Pp. 46–52.
6. Puris A.M., Fedorov D.S., Kosyakov S.I., Chernoprudov D.M. Simulation Of A Smoke Screen In A Protected Area // Issues of defense technology. Series 16. Technical means of countering terrorism. 2021. No 1–2 (151–152). Pp. 91–97.
7. Fuchs N.A. Mechanics of aerosols. M.: Publishing House of the USSR Academy of Sciences, 1965. 380 p.
8. Slezkin N.A. Dynamics of a viscous incompressible liquid. M.: State Publishing House of Technical and theoretical Literature, 1955. 520 p.