


**Ресурсосберегающие термодинамические циклы в технологии хранения жидкого углеводородного топлива**Александр А. Шевцов<sup>1</sup> [shevalol@rambler.ru](mailto:shevalol@rambler.ru)  0000-0003-2599-5692Сергей А. Шевцов<sup>2</sup> [shevtsov\\_sa@bk.ru](mailto:shevtsov_sa@bk.ru)Владислав А. Кошелев<sup>1</sup>

1 Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», ул. Старых Большевиков, 54а, г. Воронеж, 394064, Россия

2 Воронежский институт – филиал Ивановской пожарно-спасательной академии государственной противопожарной службы МЧС России, ул. Краснознаменная, 231, Воронеж, 394052, Россия

**Аннотация.** Предложены ресурсосберегающие термодинамические циклы по материальным и энергетическим потокам в технологии хранения жидкого углеводородного топлива в резервуарах с использованием парокompрессионного теплового насоса, обеспечивающие снижение потерь топлива, образовавшегося в результате испарения. Тепловой насос укомплектован двухсекционным испарителем, рабочая и резервная секции которого попеременно работают в режимах конденсации и регенерации. Пары углеводородного топлива из резервуара отводятся в секцию испарителя, работающую в режиме конденсации. Вода, содержащаяся в парах топлива, конденсируется на теплообменной поверхности в виде ледяной корки, а отделившаяся от воды сконденсированное топливо отводится в промежуточный сборник с возвратом в резервуар для хранения. Теплота конденсации хладагента в конденсаторе используется для нагрева промежуточного теплоносителя, который направляется на размораживание секции испарителя, работающей в режиме регенерации. После этой секции отработанный промежуточный теплоноситель возвращается в конденсатор в режиме замкнутого термодинамического цикла. Вода, образовавшаяся при размораживании, направляется на стадию биологической очистки. Таким образом, создаются реальные условия повышения энергетической эффективности и экологической безопасности технологии хранения жидкого углеводородного топлива в резервуарах с максимальной конденсацией паров, образующихся в результате испарения.

**Ключевые слова:** углеводородное топливо, ресурсосбережение, экологическая безопасность, технология хранения, испарение топлива, конденсация паров, парокompрессионный насос, термодинамические циклы

**Resource-saving thermodynamic cycles in liquid hydrocarbon fuel storage technology**Alexander A. Shevtsov<sup>1</sup> [shevalol@rambler.ru](mailto:shevalol@rambler.ru)  0000-0003-2599-5692Sergey A. Shevtsov<sup>2</sup> [shevtsov\\_sa@bk.ru](mailto:shevtsov_sa@bk.ru)Vladislav A. Koshelev<sup>1</sup>

1 Military Training and Scientific Center of the Air Force "Air Force Academy named after Professor N.E. Zhukovsky and Yu.A. Gagarina", st. Old Bolsheviks, 54a, Voronezh, 394064, Russia

2 Voronezh Institute – a branch of the Ivanovo Fire and Rescue Academy of the State Fire Service of the Ministry of Emergencies of Russia, Red-Unknown st., 231, 394052 Voronezh, Russia

**Abstract.** Resource-saving thermodynamic cycles for material and energy flows in the technology of storing liquid hydrocarbon fuel in tanks using a vapor compression heat pump are proposed, which reduce the loss of fuel resulting from evaporation. The heat pump is equipped with a two-section evaporator, the working and reserve sections of which alternately operate in condensation and regeneration modes, respectively. Vapors of hydrocarbon fuel from the tank are discharged to the evaporator section operating in condensation mode. The water contained in the fuel vapor condenses on the heat ex-change surface in the form of an ice crust, and the condensed fuel separated from the water is discharged into an intermediate tank and returned to the storage tank. The condensation heat of the refrigerant in the condenser is used to heat the intermediate coolant, which is sent to defrost the section of the evaporator operating in the regeneration mode. After this section, the spent intermediate coolant is returned to the condenser in the closed thermodynamic cycle mode. The water formed during defrosting is sent to the biological treatment stage. Thus, real conditions are created for increasing the energy efficiency and environmental safety of the technology for storing liquid hydrocarbon fuel in tanks with maximum condensation of the vapors resulting from evaporation.

**Keywords:** hydrocarbon fuel, resource saving, environmental safety, storage technology, fuel evaporation, vapor condensation, vapor compression pump, thermodynamic cycles

Для цитирования

Шевцов А.А., Шевцов С.А., Кошелев В.А. Ресурсосберегающие термодинамические циклы в технологии хранения жидкого углеводородного топлива // Вестник ВГУИТ. 2020. Т. 82. № 1. С. 201–206. doi:10.20914/2310-1202-2020-1-201-206

For citation

Shevtsov A.A., Shevtsov S.A., Koshelev V.A. Resource-saving thermodynamic cycles in liquid hydrocarbon fuel storage technology. *Vestnik VGUIT* [Proceedings of VSUET]. 2020. vol. 82. no. 1. pp. 201–206. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2020-1-201-206

This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License

## Введение

Требования к экологической и промышленной безопасности производственных объектов и технологических процессов нефтяной отрасли постоянно растут, поэтому необходимость в совершенствовании технологий хранения жидкого углеводородного топлива, обеспечивающих сокращение потерь, остается в центре внимания специалистов отрасли [1–6].

Основным видом потерь нефти и нефтепродуктов, полностью не устранимых на современном уровне развития средств транспорта и хранения углеводородов, являются потери от испарения из резервуаров и других емкостей (авто- и железнодорожных цистерн, топливных баков автомобилей и др.) [4–6].

Ущерб, наносимый этими потерями, состоит не только в уменьшении количества топливных ресурсов, стоимости теряемых продуктов и снижении качества топлива, но и в отрицательных экологических последствиях, которые являются результатом загрязнения окружающей среды. [7].

Известные способы сокращения потерь углеводородного топлива от испарения объединяют общие недостатки: низкая степень сокращения потерь, они сложные и дорогостоящие, не обеспечивают выполнение требований пожарной безопасности объектов защиты по величине пожарного риска [4–6].

Анализ резервов эффективности наиболее перспективных технологий хранения жидкого углеводородного топлива показал целесообразность реализации компрессионных систем, позволяющих существенно сократить естественные потери нефтепродуктов от испарения [7].

В химической технологии все более широкое применение находят тепловые насосы (ТН), которые позволяют довести эксплуатацию оборудования до высокого энергетического совершенства в отношении рационального использования энергоносителей [8–12].

Идеология создания ТН базируется на масштабном опыте разработки холодильных машин (ХМ), что не всегда оправдано, поскольку температурные режимы работы, охлаждаемые и нагреваемые среды, рабочие тела и термодинамические циклы при совместной выработке тепла и холода в общем случае различаются. Это делает необходимым разработку и использование универсальных подходов анализа и поиска решений по повышению эффективности ТН и теплоснабжающих систем на их основе. Повышение эффективности теплонасосных установок за счет совершенствования их термодинамических

циклов и схем может составить основу современных исследований в области сокращения потерь при хранении жидкого углеводородного топлива в резервуарах [5].

**Цель работы** – повышение энергетической эффективности и экологической безопасности технологии хранения жидкого углеводородного топлива в резервуарах. Предусматривается максимальная конденсация паров, образующихся в результате испарения, посредством замкнутых ресурсосберегающих термодинамических циклов.

## Обсуждение

В соответствии с поставленной целью замкнутые ресурсосберегающие термодинамические циклы в технологии хранения жидкого углеводородного топлива осуществлялись с использованием парокompрессионного теплового насоса по следующей схеме (рисунок 1).

Схема содержит: резервуар с жидким углеводородным топливом 1; компрессор 2; конденсатор теплового насоса 3, двухсекционный испаритель с секциями 4,5; терморегулирующий вентиль 6; промежуточный сборник 7; теплообменник-утилизатор 8; насосы 9, 10, 11; потоки: жидкого углеводородного топлива 0.1; паров углеводородов 1.0; сконденсированного углеводородного топлива 2.0; топлива, отделенного от остатков воды 2.1; талой воды со следами углеводородов 3.0; хладагента 4.0; промежуточного теплоносителя 5.0.

Исходное углеводородное топливо по линии 0.1 поступает в резервуар 1 на хранение. Пары топлива, образующиеся при наполнении резервуара и из-за суточных колебаний температуры окружающего воздуха, по линии 1.0 направляются в рабочую секцию двухсекционного испарителя 4, работающую в режиме конденсации, где происходит конденсация паров топлива посредством рекуперативного теплообмена с кипящим хладагентом.

Процесс конденсации жидкого углеводородного топлива сопровождается образованием ледяной корки на теплообменной поверхности рабочей секции испарителя из замерзающей воды, содержащейся в парах нефтепродукта. Пары нефтепродуктов достигают температуры «точки росы», и сконденсированное жидкое углеводородное топливо, освободившееся от значительной части влаги, по потоку 2.0 отводится в промежуточный сборник 7, где происходит отделение остатков воды от нефтепродукта при отстаивании с последующим его возвратом по потоку 2.1 с помощью насоса 10 в резервуар 1.

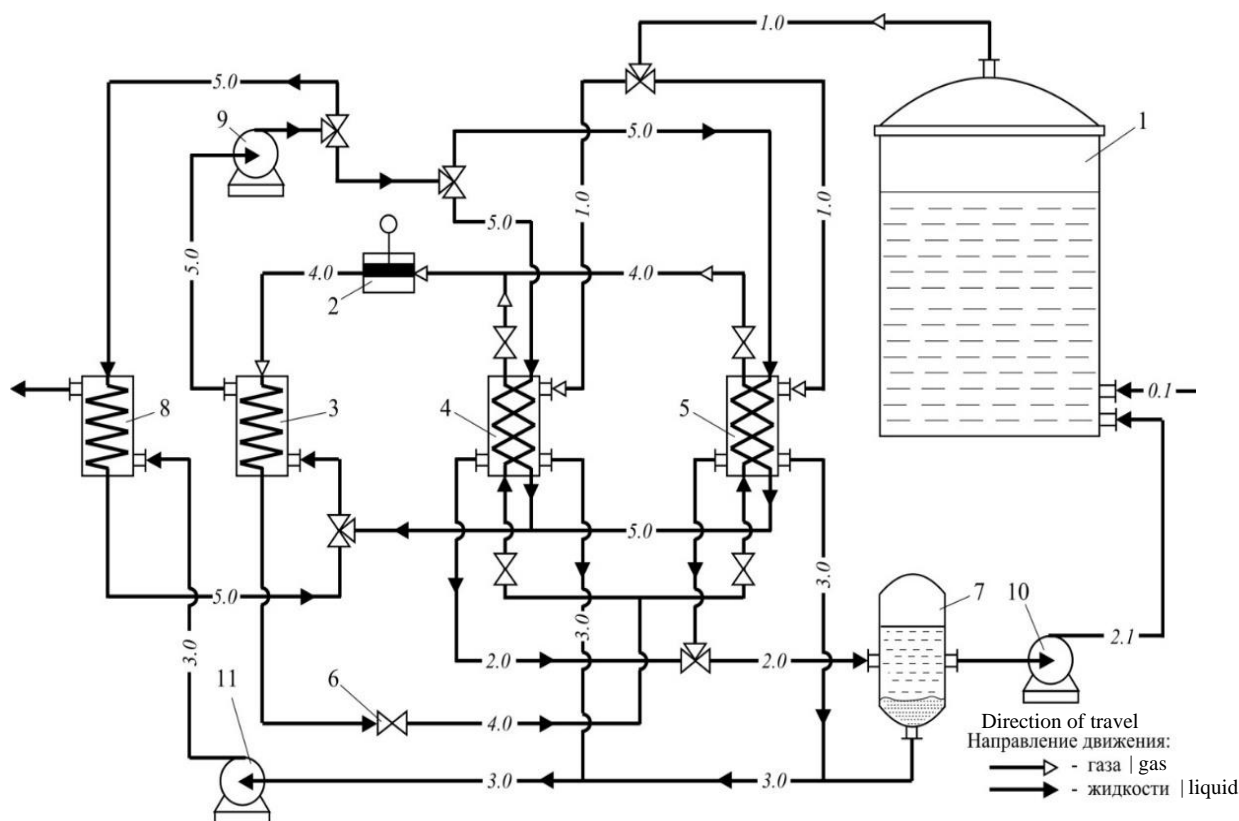


Рисунок 1. Технологическая схема применения парокомпрессионного теплового насоса при хранении жидкого углеводородного топлива в резервуарах

Figure 1. Technological scheme of applying a vapor compression heat pump for storing liquid hydrocarbon fuel in tanks

Для реализации технологии хранения жидкого углеводородного топлива в резервуарах используется парокомпрессионный тепловой насос, включающий компрессор 2, конденсатор 3, терморегулирующий вентиль 6 и двухсекционной испаритель с рабочей 4 и резервной 5 секциями, которые попеременно работают в режимах конденсации и регенерации.

Парокомпрессионный тепловой насос работает по следующему термодинамическому циклу. Хладагент, в качестве которого используется Хладон 13B1 CF<sub>3</sub> Br с температурой кипения -57,8 °С и критической температурой 66,9 °С, сжимается в компрессоре 2 до давления конденсации и по замкнутому контуру рециркуляции 4.0 направляется в конденсатор 3. Конденсируясь, он отдает теплоту промежуточному теплоносителю – тосолу. Затем хладагент направляется в терморегулирующий вентиль 6, где дросселируется до заданного давления. С этим давлением хладагент поступает в секцию испарителя 4, работающую в режиме конденсации, где он кипит с выделением холода, который посредством рекуперативного теплообмена используется для конденсации паров углеводородного топлива. При снижении интенсивности процесса конденсации смеси паров топлива и воды рабочая секция 4 переключается из контура

рециркуляции хладагента теплового насоса 4.0 на режим регенерации, а резервная секция 5 переключается на режим конденсации, выполняя функции рабочей секции. Такая организация переключения секций позволяет обеспечить непрерывность и максимальную эффективность процесса конденсации паров топлива. Пары хладагента после рабочей секции по замкнутому циклу 4.0 направляются в компрессор 2, сжимаются до давления конденсации и термодинамический цикл повторяется.

В технологии предусмотрена подготовка промежуточного теплоносителя, в качестве которого используется Тосол А40. Тосол нагревается в конденсаторе 3 теплового насоса за счет теплоты конденсации хладагента. Нагретый тосол отводится из конденсатора по двум потокам 5.0, один из которых подается на размораживание секции испарителя 5, работающей в режиме регенерации, а второй – направляется в теплообменник-утилизатор 8 для предварительного нагрева воды. При этом поток воды, образовавшейся при оттайке ледяной корки на теплообменной поверхности резервной секции испарителя, и поток воды со следами углеводорода, образовавшейся при осаждении в промежуточном сборнике 7, объединяются и с помощью

насоса 11 отводятся через теплообменник-утилизатор 8 на стадию биологической очистки. Потоки отработанного промежуточного теплоносителя после резервной секции испарителя и теплообменника-утилизатора объединяются и возвращаются в конденсатор 3 с образованием замкнутого термодинамического цикла.

Для оперативного управления термодинамическими циклами необходимо непрерывно определять давление насыщенного пара жидкого углеводородного топлива и через него с минимальным количеством косвенных измерений устанавливать расход топлива, возвращаемого в резервуар, исключая возможные потери при хранении.

Давление насыщенных паров компонентов, входящих в состав жидкого углеводородного топлива, функционально связано с концентрацией паров нефтепродуктов и зависит от соотношения фаз «газ-жидкость» и температуры в резервуаре. Текущее значение насыщенного пара жидкого углеводородного топлива можно определить по эмпирической формуле, предложенной Н.И. Тихоновым [4]:

$$P_{\text{НП}} = P_{38} \left[ \frac{14}{10 + \frac{V_{\text{П}}}{V_{\text{Ж}}}} \right]^{0,31} \cdot 10^{4,0283 - \frac{1252}{T}},$$

где  $T$  – температура жидкости, К;  $P_{38}$  – давление насыщенного пара при температуре  $t = 38$  °С, кПа;  $V_{\text{П}}$  – объем газовой фазы, м<sup>3</sup>;  $V_{\text{Ж}}$  – объем жидкой фазы, м<sup>3</sup>.

По расчетному и измеренному значению насыщенного пара целесообразно вырабатывать сигнал отклонения, который в системах управления позволит сформировать управляющее

воздействие на мощность привода компрессора теплового насоса. В этом случае создаются условия для реализации ресурсосберегающих термодинамических циклов, которые позволяют рационально использовать рабочее тело (хладагент) в обратном цикле Карно парокompрессионного теплового насоса, промежуточный хладагент в контуре рециркуляции обеспечить возврат жидкого углеводородного топлива по замкнутому термодинамическому циклу в резервуар с минимальными потерями от испарения.

### Заключение

Предлагаемая технология хранения жидкого углеводородного топлива в резервуарах позволяет:

- повысить энергетическую эффективность за счет рационального подключения к схеме парокompрессионного теплового насоса;
- обеспечить рекуперацию и утилизацию энергии теплоносителей и, как следствие, снизить удельные энергозатраты на реализацию технологии;
- повысить пожарную безопасность, исключив образование взрывопожароопасных концентраций паров углеводородного топлива с воздухом за счет их полной конденсации;
- повысить качество топлива, возвращаемого в резервуар для хранения, за счет удаления из него максимального количества воды;
- обеспечить экологическую безопасность за счет организации замкнутых термодинамических циклов по материальным и энергетическим потокам, исключая выброс вредных веществ в атмосферу, и отвода воды со следами углеводородов на биологическую очистку;
- исключить финансовые потери, связанные с испарением жидкого углеводородного топлива при хранении в резервуарах.

### Литература

- 1 Технический регламент о требованиях пожарной безопасности: Федер. закон от 22.08.2008 № 123-ФЗ (в ред. от 10.07.2012 № 117-ФЗ, 02.07.2013-ФЗ).
- 2 Кузнецов Е.В. Методы сокращения потерь светлых нефтепродуктов при проведении технологических операций на нефтебазах // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2008. № 2. С. 316–322.
- 3 Александров А.А., Архаров И.А. Моторные топлива. Современные аспекты безопасного хранения и реализации в городах-мегаполисах. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011. 352 с.
- 4 Дьяков К.В., Левин Р.Е., Земенков Ю.Д. Сверхнормативные потери от испарения при хранении в резервуарах // Нефтегазовое дело. 2017. № 1. С. 184–189.
- 5 Зоря Е.И., Лощенкова О.В. Оценка общедоступных технологий и методов определения потерь нефтепродуктов от испарения из резервуаров при хранении // Экологический вестник России. 2018. № 1. С. 24–31.
- 6 Голомянов А.И., Gladchenkov В.М. Борьба с потерями от испарения легкокипящих нефтепродуктов // Состояние и инновации технического сервиса машин и оборудования: материалы X региональной науч.-практ. конф. Новосибирский гос. аграрный ун-т, 2018. С. 72–75.
- 7 Артёмко В.А. Анализ способов уменьшения потерь нефтепродуктов при хранении // Сб. материалов IX Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых с международным участием, посвященной 385-летию со дня основания г. Красноярска. Красноярск: Сибирский федеральный ун-т, 2013. URL: <http://conf.sfu-kras.ru/sites/mn2013/section076.html>

8 Пат. 2693046, RU, С11С 3/04, С11С 3/10, С10L 1/02, С07С 67/03. Способ управления процессом переработки масличных семян в биодизельное топливо / Шевцов С.А., Ткач В.В., Тертычная Т.Н., Сердюкова Н.А. № 2018126879; Заявл. 20.07.2018; Опубл. 31.05.2019. Бюл. № 19.

9 Шевцов С.А., Каргашиллов Д.В., Хабибов М.У. Особенности проектирования резервуарных установок сжиженных углеводородных газов в системах автономного газоснабжения с учетом оценки пожарного риска // Пожарная безопасность. 2016. № 3. С. 150–155.

10 Пат. 2622948, RU, В01D 5/00, F25J 3/00 Способ конденсации паров нефтепродуктов / Шевцов С.А., Каргашиллов Д.В., Гаврилов А.М., Шуткин А.Н., Быков И.А. № 2016136785, Заявл. 13.09.2016; Опубл. 21.06.2017, Бюл. № 18.

11 Yunus I.S., Wichmann J. Wördenweber R. Lauersen K.J. et al. Synthetic metabolic pathways for photobiological conversion of CO<sub>2</sub> into hydrocarbon fuel // Metabolic Engineering. 2018. V. 49. P. 201–211. doi: 10.1016/j.ymben.2018.08.008

12 Zhang X., Tang W., Zhang Q., Wang T. et al. Hydrodeoxygenation of lignin-derived phenolic compounds to hydrocarbon fuel over supported Ni-based catalysts // Applied Energy. 2018. V. 227. P. 73–79. doi: 10.1016/j.apenergy.2017.08.078

## References

1 Technical regulation on fire safety requirements: Feder. Law of August 22, 2008 No. 123-FZ (as amended on July 10, 2012 No. 117-FZ, July 2, 2013-FZ). (in Russian).

2 Kuznetsov E.V. Methods for reducing losses of light oil products during technological operations at oil depots. Mountain Information and Analytical Bulletin. 2008. no. 2. pp. 316–322. (in Russian).

3 Alexandrov A.A., Arkharov I.A. Motor fuels. Modern aspects of safe storage and sale in megalopolises. Moscow, Publishing House of MSTU. N.E. Bauman, 2011. 352 p. (in Russian).

4 Dyakov K.V., Levin R.E., Zemenkov Yu.D. Excessive evaporation losses during storage in tanks. Oil and Gas Business. 2017. no. 1. pp. 184–189. (in Russian).

5 Zorya E.I., Loshchenkova O.V. Evaluation of generally available technologies and methods for determining the loss of oil products from evaporation from reservoirs during storage. Ecological Bulletin of Russia. 2018. no. 1. pp. 24–31. (in Russian).

6 Golomyanov A.I., Gladchenkov V.M. The fight against losses from evaporation of low-boiling oil products. State and innovations of technical service of machinery and equipment: materials of the X regional scientific-practical. conf. Novosibirsk state agricultural university, 2018. pp. 72–75. (in Russian).

7 Artyomenko V.A. Analysis of ways to reduce losses of oil products during storage. Youth and Science: a collection of materials of the 9th All-Russian Scientific and Technical Conference of students, graduate students and young scientists with international participation, dedicated to the 385th anniversary of the founding of Krasnoyarsk. Krasnoyarsk, Siberian Federal University, 2013. Available at: <http://conf.sfukras.ru/sites/mn2013/section076.html> (in Russian).

8 Shevtsov S.A., Tkach V.V., Tertychnaya T.N., Serdyukova N.A. The method of controlling the process of processing oilseeds into biodiesel. Patent RF, no. 2693046, 2019.

9 Shevtsov S.A., Kargashilov D.V., Khabibov M.U. Design features of reservoir installations of liquefied petroleum gases in autonomous gas supply systems taking into account fire risk assessment. Fire safety. 2016. no. 3. pp. 150–155. (in Russian).


10 Shevtsov S.A., Kargashilov D.V., Gavrilov A.M., Shutkin A.N., Bykov I.A. Method for condensation of oil product vapors. Patent RF, no. 2622948, 2017.

11 Yunus I.S., Wichmann J. Wördenweber R. Lauersen K.J. et al. Synthetic metabolic pathways for photobiological conversion of CO<sub>2</sub> into hydrocarbon fuel. Metabolic Engineering. 2018. vol. 49. pp. 201–211. doi: 10.1016/j.ymben.2018.08.008

12 Zhang X., Tang W., Zhang Q., Wang T. et al. Hydrodeoxygenation of lignin-derived phenolic compounds to hydrocarbon fuel over supported Ni-based catalysts. Applied Energy. 2018. vol. 227. pp. 73–79. doi: 10.1016/j.apenergy.2017.08.078

## Сведения об авторах


**Александр А. Шевцов** д.т.н., профессор, кафедра 208 общепрофессиональных дисциплин, Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина, ул. Старых Большевиков, 54а, г. Воронеж, 394064, Россия, shevalol@rambler.ru

 <https://orcid.org/0000-0003-2599-5692>

**Сергей А. Шевцов** д.т.н., профессор, кафедра пожарной безопасности объектов защиты и государственного надзора, Воронежский институт – филиал Ивановской пожарно-спасательной академии государственной противопожарной службы МЧС России, 394052 Воронеж, ул. Краснознаменная, 231, shevtsov\_sa@bk.ru

## Information about authors

**Alexander A. Shevtsov** Dr. Sci. (Engin.), department of 208 general professional disciplines, Military Training and Scientific Center of the Air Force “Air Force Academy named after Professor N.Ye. Zhukovsky and Yu.A. Gagarina, st. Old Bolsheviks, 54a, Voronezh, 394064, Russia, shevalol@rambler.ru

 <https://orcid.org/0000-0003-2599-5692>

**Sergey A. Shevtsov** Dr. Sci. (Engin.), professor, department of Fire Safety of Protection Objects and State Supervision, Voronezh Institute - a branch of the Ivanovo Fire and Rescue Academy of the State Fire Service of the Ministry of Emergencies of Russia, 394052 Voronezh, ul. Red-Unknown, 231, shevtsov\_sa@bk.ru

**Владислав А. Кошелев** курсант, кафедра 208 общепрофессиональных дисциплин, Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина, ул. Старых Большевиков, 54а, г. Воронеж, 394064, Россия

**Vladislav A. Koshelev** cadet, department of 208 general professional disciplines, Military Training and Scientific Center of the Air Force “Air Force Academy named after Professor N. Ye. Zhukovsky and Yu.A. Gagarina, st. Old Bolsheviks, 54a, Voronezh, 394064, Russia

**Вклад авторов**

Все авторы в равной степени принимали участие в написании рукописи и несут ответственность за плагиат

**Contribution**

All authors were equally involved in writing the manuscript and are responsible for plagiarism

**Конфликт интересов**

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Conflict of interest**

The authors declare no conflict of interest.

---

<b>Поступила</b> 06/02/2020	<b>После редакции</b> 15/02/2020	<b>Принята в печать</b> 25/02/2020
<b>Received</b> 06/02/2020	<b>Accepted in revised</b> 15/02/2020	<b>Accepted</b> 25/02/2020

---