

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 631.615

DOI: 10.26897/2687-1149-2023-1-45-49

**Результаты исследований температурного режима осушаемой торфяной почвы****Отари Назирович Дидманидзе, академик РАН, д-р техн. наук, профессор¹**

didmanidze@rgau-msha.ru

Екатерина Петровна Парлюк, д-р техн. наук, доцент¹

kparlyuk@rgau-msha.ru

Алексей Владимирович Евграфов[✉], канд. техн. наук, доцент²labpoliv@list.ru[✉]¹ Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; 127434, Российская Федерация, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49² Всероссийский научно-исследовательский институт гидротехники и мелиорации имени А.Н. Костякова; 127434, Российская Федерация, г. Москва, ул. Большая Академическая, 44, к. 2

Аннотация. При возделывании пропашных культур на выработанных торфяниках, вводимых в сельскохозяйственный оборот с использованием черной культуры земледелия, послепосевная обработка почвы (боронование, междурядное рыхление, окучивание и прореживание растений в рядках) изменяет теплофизические свойства торфа, создавая предпосылки к возникновению торфяного пожара. С целью изучения температурно-влажностного режима верхнего пожароопасного слоя торфяной почвы на осушенном поле, используемом под овоще-кормовой севооборот, проведены экспериментальные полевые исследования на осушенном болоте «Кальское» Рязанской области. Торфяная почва находилась в зоне подпитывания грунтовыми водами. Измерения параметров почвы проводились ежедневно на ее поверхности и в верхнем слое 0...5 см. Для мониторинга за состоянием торфяника применялось устройство, включающее в себя регистрирующий блок и четыре терморезистора. При моделировании самовозгорания и вынужденного зажигания торфяной почвы использованы результаты экспериментальных полевых исследований. На основе полученных практических данных предложены математические зависимости для расчета возможности самовозгорания торфяных почв. Предложен критерий неравномерности нагрева, позволяющий определить начало процесса самовозгорания. Расхождение экспериментальных и расчётных данных температурного режима торфяной почвы составило от 2,2 до 15,6%. Разработанные математические зависимости позволяют проводить прогнозные расчёты возможности возникновения пожаров на торфяных почвах. Предложена схема нового способа мониторинга пожароопасной обстановки, основанного на критерии неравномерности нагрева, позволяющего принять предупредительные меры и не допустить возгорания торфяной почвы на сельскохозяйственных угодьях.

Ключевые слова: овоще-кормовой севооборот на торфяной почве, температурный режим осушаемой торфяной почвы, мониторинг состояния торфяника, математические зависимости возможного возникновения пожара

Формат цитирования: Дидманидзе О.Н., Парлюк Е.П., Евграфов А.В. Результаты исследований температурного режима осушаемой торфяной почвы // *Агроинженерия*. 2023. Т. 25, № 1. С. 45-49. DOI: 10.26897/2687-1149-2023-1-45-49.

© Дидманидзе О.Н., Парлюк Е.П., Евграфов А.В., 2023

ORIGINAL PAPER

Studying the temperature conditions of drained peat soil**Otari N. Didmanidze, Full Member of the Russian Academy of Sciences, DSc (Eng), Professor¹**

didmanidze@rgau-msha.ru

Ekaterina P. Parlyuk, DSc (Eng), Associate Professor¹

kparlyuk@rgau-msha.ru

Aleksei V. Evgrafov[✉], CSc (Eng), Associate Professor²labpoliv@list.ru[✉]¹ Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; 49, Timiryazevskaya Str., Moscow, 127434, Russian Federation² All-Russian Research Institute of Hydraulic Engineering and Land Reclamation named after A.N. Kostyakov; Bld 2, Bolshaya Akademicheskaya Str., 44, 127434, Russian Federation

Abstract. When cultivating row crops on depleted peatlands introduced into agricultural circulation using the peat soil farming practice, post-sowing tillage (harrowing, inter-row loosening, hilling and thinning of plants in rows) changes the thermophysical properties of peat, increasing the probability of a peat fire. To study the temperature and humidity mode of the upper fire-hazardous layer of the peat soil on a drained field used for vegetable and fodder crop rotation, studies were carried out

on the drained Kalskoye swamp in the Ryazan region. Measurements of the soil parameters were carried out on its surface and in the upper layer of 0 to 5 cm. When modeling spontaneous combustion and forced ignition of the peat soil, the results of experimental field studies were used. Based on the practical data obtained, the authors proposed mathematical dependencies for calculating the possibility of spontaneous combustion of peat soils. Comparison of experimental and calculated data showed that their discrepancy is 2.2% to 15.6%. The obtained mathematical dependencies can be used to predict the probability of fires on peat soils. The authors propose a scheme of a new method for monitoring the fire hazard situation on drained peatlands during their introduction into agricultural production. This method of monitoring, based on the criterion of uneven heating, is useful for taking preventive measures against the peat soil ignition on agricultural land.

Keywords: vegetable-fodder crop rotation on peat soils, temperature regime of the drained peat soil, monitoring of peatland condition, mathematical dependencies of possible fire outbreak

For citation: Didmanidze O.N., Parlyuk E.P., Evgrafov A.V. Studying the temperature conditions of drained peat soil. Agricultural Engineering (Moscow), 2023;25(1):45-49.4-11. (In Rus.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2023-1-45-49>.

Введение. При введении в сельскохозяйственный оборот осушенных торфяных почв используют три вида освоения: пескование – смешанное (или северное, шведское); покровное (насыпное, или римпауское); немецкое смешанно-слоиное [1-5]; черная культура земледелия. Первые два вида освоения осушенных торфяников не получили распространения в России по причине высоких финансовых и материальных затрат. Немецкое смешанно-слоиное освоение требует применения специального комплекса машин, которые в России не производятся, и оно также не получило распространения на территории нашей страны. Осушаемые торфяные почвы в России в настоящее время используют преимущественно для возделывания пропашных и зерновых в условиях черной культуры земледелия.

Поверхность выработанного торфяника при черной культуре освоения открыта для возникновения торфяных пожаров.

Как показали гидрологические исследования на осушаемых торфяных почвах [6, 7], основной причиной возникновения пожаров и тотального выгорания органических горизонтов является отрыв капиллярной каймы зеркала грунтовых вод от нижних горизонтов торфяной залежи. При этом возгоранию подвержены осушаемые болотные массивы в период летней межени на фоне высоких температур. Как правило, пожары возникают на самотечных осушительных системах, а также на польдерных системах, многие из которых

в настоящее время выведены из строя в результате разрушения их энергетических и насосных узлов.

Цель исследований: изучение режима изменения температуры поверхности и верхнего слоя торфяной почвы на осушенном поле, используемом под овоще-кормовой севооборот.

Материалы и методы. Температурный режим осушаемой торфяной почвы исследовался на осушенном болоте «Кальское», расположенном на землях ЗАО «Заборье» Рязанского района Рязанской области. Площадь объекта составляет 309 га. Водное питание – грунтовое. Почва торфяная низинная. Коэффициент фильтрации – 1,04...1,14 м/сут. Осушается объект глубокими редкими каналами, врезанными дном в песок. Расстояние между собирателями составляет 300 м, между ловчими – 500 м. Глубина грунтовых вод в зависимости от метеорологических условий колеблется в среднем за вегетацию от 1,2...1,5 м от поверхности, то есть торфяная почва находилась в зоне подпитывания грунтовыми водами.

В вегетационный период на опытных площадках площадью 4 м² три раза в день (в 9.00, 13.30 и 17.30) проводился мониторинг состояния торфяника, производились измерения температуры воздуха над поверхностью почвы и температуры почвы как на ее поверхности, так и на глубине 0...5 см (рис. 1). Расстояние между терморезисторами NTC47 D-15 соответствовало 15 см. Влажность торфяной почвы также определялась на поверхности и в центре слоя 0...5 см при помощи измерителя влажности почвы TP 46908 (рис. 2), предварительно оттарированным термостатно-весовым методом.

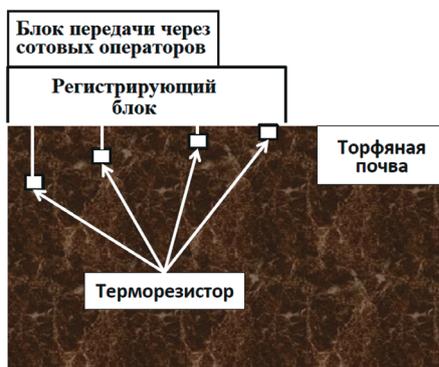


Рис. 1. Схема устройства для мониторинга состояния торфяника
Fig. 1. Design of the device for monitoring the peatland state



Рис. 2. Измеритель влажности почвы TP 46908
Fig. 2. Soil moisture meter

Результаты и их обсуждение. За период проведения исследований температура поверхности почти всегда превышала температуру воздуха (рис. 3). Температура в слое 0...5 см несколько раз превышала температуру поверхности почвы и температуру воздуха, то есть согласно лабораторным и теоретическим исследованиям создавалась предпосылка самовозгорания или вынужденного зажигания данного слоя торфяной почвы от нагретых тел – например, выхлопных систем машин и механизмов.

Факторами, определяющими тепловые характеристики торфяной залежи, являются химико-минералогический состав, дисперсность, температура, порозность и влажность почвы. Влажность и порозность оказывают основное влияние на тепловой режим и характеристики торфа [5-9]. Термические коэффициенты, влажность и объёмный вес торфа определяются следующими уравнениями:

$$\lambda = (a \cdot W + b \cdot \rho - c) \cdot 10^{-4}; \tag{1}$$

$$\lambda \cdot 10^5 = a \cdot e^{nW}; \tag{2}$$

$$K = \frac{\lambda}{C_p}, \tag{3}$$

где λ – коэффициент теплопроводности, характеризующий степень проводимости тепла между слоями, кал/см сек. град.; a, b, c, n – эмпирические коэффициенты; W – содержание влаги от массы абсолютно сухой почвы, %; ρ – плотность материала, кг/м³; K – коэффициент температуропроводности, характеризующий скорость распространения температуры, см²/сек.; C_p – коэффициент объёмной теплоёмкости, характеризующий интенсивность изменения температуры слоя при нагреве и охлаждении, кал/см³ град.

Для моделирования самовозгорания и вынужденного зажигания торфяной почвы в пожароопасном слое толщиной 0...5 см использованы результаты экспериментальных полевых исследований, полученных в результате ежедневного измерения температуры воздуха и температуры поверхности торфяной почвы $T_{\text{п}}$ с овоще-кормовым севооборотом.

При моделировании начальные значения температуры поверхности торфяной почвы $T_{\text{п}}^{\text{H}}$ задавались из полученных данных на 9.00 утра, и расчёт производился до 17.30.

Алгоритм расчёта заключается в следующем:

1) если температура окружающего слоя воздуха за предыдущие сутки равна или ниже, чем за текущие $T_{\text{ОКР}(N)}$, выполняется условие $T_{\text{ОКР}(N-1)} \leq T_{\text{ОКР}(N)}$, то приращение температуры поверхности торфяной почвы $\Delta T_{\text{п}}$ бралось со знаком «+»;

2) если температура окружающего слоя воздуха за текущие сутки $T_{\text{ОКР}(N)}$ выше, чем за предыдущие $T_{\text{ОКР}(N-1)}$, выполняется условие $T_{\text{ОКР}(N-1)} > T_{\text{ОКР}(N)}$, то приращение температуры $\Delta T_{\text{п}}$ бралось со знаком «-».

Математические зависимости возможного возникновения пожара на торфяной почве определяются ее температурой $T_{\text{п}}$:

$$T_{\text{п}} = T_{\text{п}}^{\text{H}} + \Delta T_{\text{п}}; \tag{4}$$

$$T_{\text{п}} = T_{\text{п}}^{\text{H}} + \Delta \tau_{\text{п}} \cdot \left(d_v \cdot \frac{F}{V} \cdot T_{\text{ОКР}} \right)^{\frac{1}{F}}, \tag{5}$$

где $T_{\text{п}}^{\text{H}}$ – начальная температура поверхности торфяной почвы; $\Delta \tau_{\text{п}}$ – интервал времени до нагрева поверхности торфа до температуры воздуха окружающей среды, мин; d_v – плотность скелета почвы; F – площадь поверхности, м²; V – объём, м³; $T_{\text{ОКР}}$ – температура воздуха, °С.

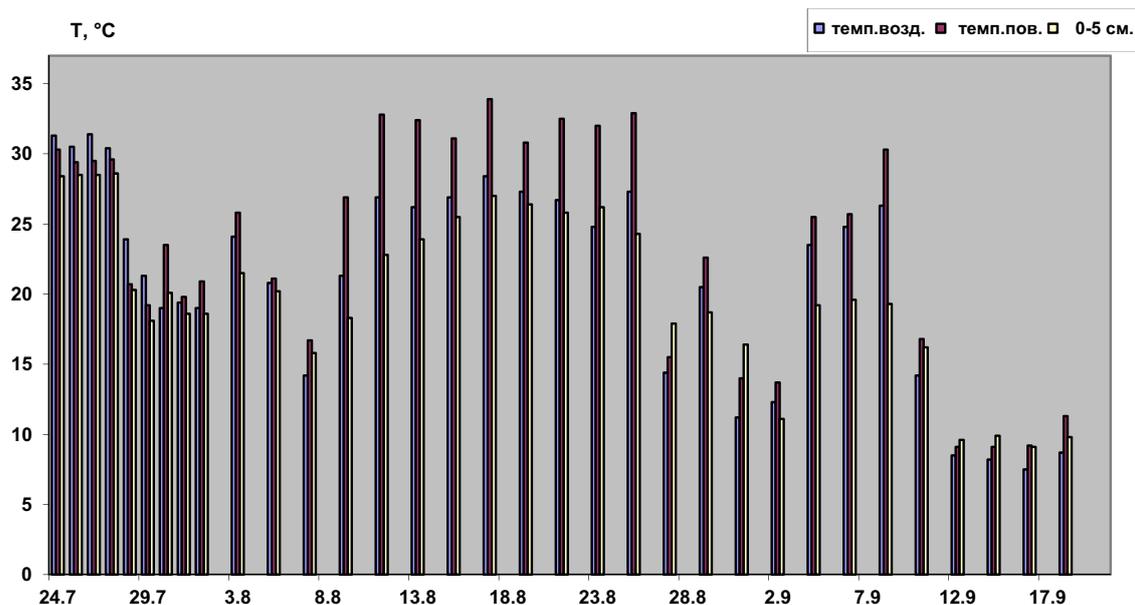


Рис. 3. Температурный режим осушаемой торфяной почвы

Fig. 3. Results of experimental studies of the temperature regime of peat soil

В процессе проведения экспериментальных полевых исследований торфяная почва подпитывалась грунтовыми водами, и поэтому 2% энергии шло на нагрев поверхности и слоя почвы (0...5 см), а остальная расходовалась на нижние непожароопасные слои и испарение влаги с поверхности¹. Для указанных условий предложено уравнение с поправочным коэффициентом 0,02:

$$T_{\Pi} = T_{\Pi}^H + \Delta\tau_{\Pi} \cdot \left(d_V \cdot \frac{F}{V} \cdot T_{\text{ОКР}} \right)^{1/2} \cdot 0,02. \quad (6)$$

Результаты расчётов по уравнению (6) сравнивались с экспериментальными данными (рис. 4).

Сравнение графиков показало, что кривые экспериментальных и расчётных данных совпадают по своему характеру. Максимальное расхождение между ними составило 15,6%, минимальное – 2,2%, а среднее – 8,7%. Полученный результат говорит о том, что зависимость (6) можно использовать для моделирования температуры поверхности торфяной почвы в практических расчётах при прогнозировании возможности самовозгорания торфяных почв.

При возделывании пропашных культур на торфяных почвах боронование, междурядное рыхление, окучивание и прореживание растений в рядах приводят к насыщению почвы окислителем, уменьшению объемной плотности

верхнего пожароопасного слоя. Происходит разрыв капиллярных связей с грунтовыми водами, которые в середине вегетационного периода находятся на максимальной глубине от поверхности, и поэтому 98% солнечной энергии идет на нагрев верхнего слоя торфяной почвы.

В естественных условиях охлаждение верхнего слоя торфа происходит неравномерно и определяется следующей зависимостью:

$$\psi = \frac{\Delta T_F}{\Delta T_{\Pi}}, \quad (7)$$

где ψ – критерий неравномерности нагрева; ΔT_F – разность температур окружающей среды и поверхности нагреваемого материала ($T_{\Pi} - T_{\text{ОКР}}$); ΔT_{Π} – разность между температурой теплофизического центра нагреваемого материала и окружающей среды ($T_{\Pi} - T_{\text{ОКР}}$).

Уменьшение критерия неравномерности нагрева является предпосылкой начала процесса самовозгорания.

Поступление информации о достижении равенства температур от терморезисторов, установленных на поверхности и слоях торфяной почвы, предупреждает об уменьшении критерия неравномерности нагрева до критических значений и о создании предпосылки возникновения очага возгорания на месте установки устройства.

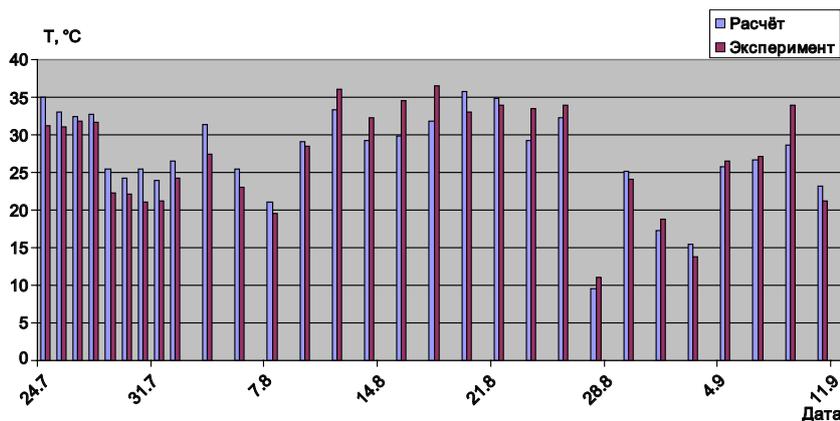


Рис. 4. Сравнение результатов экспериментальных исследований и моделирования нагрева торфяной почвы в слое 0...5 см

Fig. 4. Comparison of experimental study results and the modeling of peat soil heating in a layer of 0-5 cm

Выводы

1. Возделывание пропашных культур на выработанных торфяниках создает предпосылки к возникновению торфяного пожара, поскольку обработка почвы (боронование, междурядное рыхление, окучивание и прореживание растений в рядах) изменяет теплофизические свойства торфа. Происходит насыщение почвы окислителем, уменьшение ее объемной плотности и разрыв капиллярных связей с грунтовыми водами, и 98% солнечной энергии идет на нагрев верхнего пожароопасного слоя торфяной почвы.

2. Разработанные математические зависимости возможного возникновения пожара позволяют проводить прогнозные расчёты потенциального возникновения пожаров на торфяных почвах. Средняя погрешность между экспериментальными и расчетными данными составляет 8,7%, что свидетельствует о допустимости применения математических зависимостей для практических расчётов прогнозирования возможности самовозгорания и вынужденного зажигания торфяных почв с овоще-кормовым севооборотом.

3. Предложенный способ мониторинга на выработанных торфяниках, основанный на критерии неравномерности нагрева, позволяет принять предупредительные меры и не допустить возгорания торфяной почвы на сельскохозяйственных угодьях.

¹ Кизяев Б.М., Губер К.В., Храбров М.Ю. и др. Концепция региональной целевой программы «Предотвращение и ликвидация возгорания торфяников и торфяных почв Московской области»: Учебное пособие. М.: ВНИИГиМ, 2010. 150 с.

Список использованных источников

1. Rösler M. The history of land-use in the area of «Friedländer Grosse Wiese». *Archives of Nature Conservation and Landscape Research*. 2000;39(4):301-348.
2. Verhoeven J.T.A., Setter T.L. Agricultural use of wetlands: Opportunities and limitations. *Annals of Botany*. 2010;105(1):155-163. <https://doi.org/10.1093/aob/mcp172>
3. Schenk S. Analysis of land use changes of northeastern german low fens using old maps and current geoinformation. *Gis. Science – Die Zeitschrift Fur Geoinformatik*. 2018;1:10-21.
4. Lukenbach M.C., Devito K.J., Kettridge N., Petrone R.M., Waddington J.M. Burn severity alters peatland moss water availability: Implications for post-fire recovery. *Ecohydrology*. 2016;9(2):341-353. <https://doi.org/10.1002/eco.1639>
5. Hokanson K.J., Moore P.A., Lukenbach M.C., Devito K.J., Kettridge N., Petrone R.M., Mendoza C.A., Waddington J.M. A hydrogeological landscape framework to identify peatland wildfire smouldering hot spots. *Ecohydrology*. 2018;11(4): e1942. <https://doi.org/10.1002/eco.1942>
6. Зайдельман Ф.Р., Батраков А.С., Шваров А.П. Изменение физических свойств осушенных торфяных почв после внесения песка разными способами // Почвоведение. 2005. № 2. С. 218-231. EDN: HSEZAP
7. Зарщикова О.А., Евграфов А.В. Природные причины возникновения лесных пожаров // Материалы Международной научной конференции молодых учёных и специалистов, посвящённой 150-летию со дня рождения В.П. Горячкина (Москва, 6-7 июня 2018 г.). М.: Российский государственный аграрный университет – МСХА им. К.А. Тимирязева, 2018. С. 669-674. EDN: LZCWKT
8. Евграфов А.В. Мониторинг уровня грунтовых вод с целью предупреждения лесоторфяных пожаров // Природообустройство. 2012. № 1. С. 19-22. EDN: OUWUPX
9. Киселев Я.С., Хорошилов О.А., Демехин Ф.В. Физические модели горения в системе пожарной безопасности: Монография / МЧС России, Санкт-Петербургский университет государственной противопожарной службы. СПб.: Изд-во Политехнического университета, 2009. 347 с. EDN: QNNYOT

Вклад авторов

О.Н. Дидманидзе – постановка проблемы, разработка концепции статьи, научное руководство

Е.П. Парлюк – анализ литературы, сбор статистических данных
А.В. Евграфов – табличное и графическое представление результатов, описание результатов и формирование выводов исследования.
Дидманидзе О.Н., Парлюк Е.П., Евграфов А.В. имеют на статью авторские права и несут ответственность за плагиат.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 05.10.2022; поступила после рецензирования и доработки 19.12.2022; принята к публикации 22.12.2022

References

1. Rösler M. The history of land-use in the area of «Friedländer Grosse Wiese» [Zur nutzungs-geschichte der friedländer grossen wiese]. *Archives of Nature Conservation and Landscape Research*. 2000;39(4):301-348.
2. Verhoeven J.T.A., Setter T.L. Agricultural use of wetlands: Opportunities and limitations. *Annals of Botany*. 2010;105(1):155-163. <https://doi.org/10.1093/aob/mcp172>
3. Schenk S. Analysis of land use changes of northeastern german low fens using old maps and current geoinformation. *Gis. Science – Die Zeitschrift Fur Geoinformatik*. 2018;1:10-21.
4. Lukenbach M.C., Devito K.J., Kettridge N., Petrone R.M., Waddington J.M. Burn severity alters peatland moss water availability: Implications for post-fire recovery. *Ecohydrology*. 2016;9(2):341-353. <https://doi.org/10.1002/eco.1639>
5. Hokanson K.J., Moore P.A., Lukenbach M.C., Devito K.J., Kettridge N., Petrone R.M., Mendoza C.A., Waddington J.M. A hydrogeological landscape framework to identify peatland wildfire smouldering hot spots. *Ecohydrology*. 2018;11(4): e1942. <https://doi.org/10.1002/eco.1942>
6. Zaidelman F.R., Batrakov A.S., Shvarov A.P. Changes in the physical properties of drained peat soils after the introduction of sand in various ways. *Eurasian Soil Science*. 2005;2:218-231. (In Rus.)
7. Zarshchikova O.A., Evgrafov A.V. Natural causes of forest fires. *Materialy Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii molodykh uchonykh i spetsialistov, posvyashchonnoy 150-letiyu so dnya rozhdeniya V.P. Goryachkina* (Moscow, June 6-7, 2018). Moscow, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy. 2018: 669-674. (In Rus.)
8. Evgrafov A.V. Monitoring the level of groundwater to prevent forest and peat fires. *Prorodoobustroystvo*. 2012;1:19-22. (In Rus.)
9. Kiselev Ya.S., Khoroshilov O.A., Demekhin F.V. Physical models of combustion in the fire safety system: Monograph. EMERCOM of Russia, St. Petersburg University of the State Fire Service. St. Petersburg: Publishing House of the Polytechnic University, 2009. 347 p. (In Rus.)

Contribution

O.N. Didmanidze – problem definition, conceptualization, research supervision

E.P. Parlyuk – literature analysis, collection of statistical data
A.V. Evgrafov – tabular and graphical visualization of the results, description of the results and drawing up of conclusions
O.N. Didmanidze, E.P. Parlyuk, A.V. Evgrafov have equal author's rights and bear equal responsibility for plagiarism.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests regarding the publication of this paper.

Received 05.10.2022; revised 19.12.2022; accepted 22.12.2022