

Лесоведение, лесоводство, лесные культуры, агролесомелиорация, озеленение, лесная пироэкология и таксация

Оригинальная статья

УДК 630*431.1

<https://doi.org/10.26897/1997-6011-2026-4-107-112>



ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭНЕРГИИ АКТИВАЦИИ ОПАДА СОСНЫ ОБЫКНОВЕННОЙ ИЗОТЕРМИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

А.В. Евграфов^{1✉}, А.В. Куриленко², А.С. Гузалов³, Д.А. Филимонов⁴

^{1, 2, 3, 4} Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; Институт механики и энергетики имени В.П. Горячкина; г. Москва, Российская Федерация

¹ labpoliv@list.ru; ORCID: 0000-0002-2313-2191

² a.kurilenko@rgau-msha.ru; ORCID: 0000-0003-3661-1121

³ aguzalov@mail.ru; ORCID: 0000-0003-3526-4332

⁴ filimonov.dmitrii@rgau-msha.ru; ORCID: 0009-0006-5484-5334

Аннотация. В статье приведены результаты экспериментальных исследований по определению энергии активации (E) и константы скорости реакции (k) опада сосны обыкновенной *Pinus sylvestris*. Цель исследований – изучение процессов термического разложения опада сосны методом термогравиметрического изотермического анализа для определения его кинетических характеристик и параметров. Лесные горючие материалы, ЛГМ, относятся к органическому биотопливу, в котором, как правило, содержится большое количество летучих веществ, которое, по данным различных исследований, составляет от 80 до 85%. Большую часть соснового опада составляют: кора – (74%) и шишки – (9%). При этом он содержит в своем составе такие вещества, как кремний, смола и поэтому практически не разлагается. Самовозгорание в опаде хвои может возникать при экзотермических условиях за счет его саморазогрева. Полученные данные на практике могут использоваться для расчетов индукционного периода, до возникновения процессов самовозгорания и вынужденного зажигания. Таким образом, процесс термической деструкции ЛГМ является в основном химическим преобразованием данных элементов под воздействием температур.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 26-16-00015 (URL: <https://rscf.ru/project/26-16-00015/>).

Ключевые слова: опад сосны, возгорание, термогравиметрический анализ, лесные пожары, энергия активации

Формат цитирования: Евграфов А.В., Куриленко А.В., Гузалов А.С., Филимонов Д.А. Экспериментальное определение энергии активации опада сосны обыкновенной изотермическим методом. Природообустройство. 2026;Т.19(4):107-112. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2026-4-107-112>

Scientific article

EXPERIMENTAL DETERMINATION OF THE ACTIVATION ENERGY OF SCOTTS PINE LITTER BY ISOTHERMAL METHOD

A.V. Evgrafov^{1✉}, A.V. Kurilenko², A.S. Guzalov³, D.A. Filimonov⁴

^{1, 2, 3, 4} Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; Goryachkin Institute of Mechanics and Power Engineering; Moscow, Russian Federation

¹ labpoliv@list.ru; ORCID: 0000-0002-2313-2191

² a.kurilenko@rgau-msha.ru; ORCID: 0000-0003-3661-1121

³ aguzalov@mail.ru; ORCID: 0000-0003-3526-4332

⁴ filimonov.dmitrii@rgau-msha.ru; ORCID: 0009-0006-5484-5334

Abstract. This article presents the results of experimental studies to determine the activation energy (E) and reaction rate constant (k) of Scots pine (*Pinus sylvestris*) litter. The objective of the study was

to investigate the thermal decomposition of pine litter using thermogravimetric isothermal analysis to determine its kinetic characteristics and parameters. Forest fuels (FFM) are organic biofuels that typically contain a high amount of volatile substances, which, according to various studies, range from 80 to 85%. The majority of pine litter consists of: bark – (74%) and cones – (9%). At the same time, it contains substances such as silicon and resin, and therefore it practically does not decompose. Self-ignition in pine needle litter can occur under exothermic conditions due to its self-heating. The obtained data can be used in practice to calculate the induction period before spontaneous combustion and forced ignition occur. Thus, the thermal degradation of FFM is primarily a chemical transformation of these elements under the influence of temperature.

The research was carried out at the expense of a grant from the Russian Science Foundation No. 26-16-00015 (URL: <https://rscf.ru/project/26-16-00015/>)

Keywords: pine litter, ignition, thermographic analysis, forest fires, activation energy

Form of citation: Evgrafov A.V., Kurilenko A.V., Guzalov A.S., Filimonov D.A. Experimental determination of the activation energy of Scotts pine litter by isothermal method. *Prirodooobustroystvo*. 2026;19(4):107-112. (In Russ.) <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2026-4-107-112>

Введение. Причинами возникновения возгораний лесных массивов являются как антропогенные, так и природные факторы – такие, как сухие грозы, самовозгорание лесных горючих материалов (ЛГМ). Пожароопасность ЛГМ определяется значением энергии активации (E) кДж/моль. Данный параметр характеризует начальную энергию, при которой столкновение частиц вещества приводит к началу химической реакции, в нашем случае – к возникновению тления или горения, то есть это энергетический барьер, после преодоления которого запускается механизм реакции. Для различных веществ E , как правило, изменяется в пределах от 40-120 кДж/моль. Чем меньше энергия активации, тем выше скорость реакции и тем более высока вероятность возникновения возгораний при более низких температурах [1-3].

Следует отметить, что запасы фитомассы хвои в воздушно-сухом состоянии составляют 1,0-5,4 т/га. При этом следует учитывать, что опад распределяется по территории неравномерно и наблюдается местами в достаточно больших количествах.

Таким образом, хвоя содержится в достаточно больших количествах и составляет значительное процентное соотношение в лесных горючих материалах [4]. При этом количество веток диаметром до 3 мм, которые являются активным проводником процесса горения, составляет для сосны 30-40% от фитомассы хвои. Опад сосны содержит в своем составе такие вещества, как кремний, смолы, и поэтому практически не разлагается [5]. Следует отметить, что данный ЛГМ по классификации относится к первой группе проводников горения и характеризуется способностью к быстрому воспламенению. Процесс самовозгорания в опаде хвои может возникать при экзотермических

условиях за счет его саморазогрева. После небольших осадков, порядка 3-5 мм, данный лесной горючий материал высыхает и становится снова пожароопасным через несколько часов. Также при относительной влажности воздуха 45% и ниже в хвойных насаждениях создаются условия для высокой пожарной опасности.

Цель исследований: изучение процессов термического разложения ЛГМ методом термогравиметрического анализа для определения их кинетических характеристик и параметров.

Материалы и методы исследований. Опад хвои сосны для проведения экспериментальных исследований был отобран в Брянской области (рис. 1).

По среднегодовым значениям большую часть соснового опада составляют хвоя (74%), кора (17%) и шишки сосны (9%) [6], поэтому для проведения исследований была отобрана только хвоя.

При классической методике определения кинетических параметров термического разложения вещества как в изотермических, так и в неизотермических условиях, используются различные термографические установки (ТГ), выпускаемые промышленностью, в которых измельченное исследуемое вещество массой 5-12 мг загружается в инертный тигель (как правило, из корунда, алюминия, платины, керамики). Далее контейнер с образцом разогревается до заданной температуры, при которой изменение массы образца фиксируется термовесами. При проведении опытов выполняется измерение температуры тигля, причем считается, что температура вещества равна температуре контейнера ввиду его незначительного веса. Следует отметить, что такие условия соответствуют скорее промышленным условиям термического разложения материалов.

В реальных условиях нагревание лесных горючих материалов (ЛГМ) происходит иначе. При этом необходимо учитывать температуру самого вещества, в нашем случае – лесного горючего материала, а также начало термического разложения (деструкции) материала. Признаками термической деструкции, как правило, является появление газообразных продуктов – таких, как CO_2 , NO_x , CH_4 . Поэтому применение стандартных методик является в данном случае не совсем корректным.

Как отмечено выше, процесс самовозгорания лесных горючих материалов происходит в изотермических условиях, поэтому для определения кинетических параметров – таких, как константа скорости реакции и энергия активации, был выбран режим с постоянной температурой в термографической установке, смонтированной на базе сушильного шкафа СНОЛ-3,5 (рис. 2). При этом масса навески измерялась в граммах и была определена из рекомендаций по исследованиям превращений веществ в твердом состоянии – в частности, ЛГМ [7].

В тигель (рис. 3) загружались образцы предварительно отобранного и высушенного опада сосны при температуре 25°C в помещении. Отбор проб производился в 2026 г. сразу после схода снегового покрова.

В ходе проведения исследований в экспериментальной ТГ-установке задавался изотермический режим при постоянных температурах 90 и 120°C . Предварительные результаты испытаний показали, что более низкие температуры не активируют термическую деструкцию образцов, а при более высоких температурах разложение происходит до установления изотермического режима. Установка выдерживалась

при заданных температурах в течение не менее 60 мин, вместе с тиглем, после чего в него загружался образец опада сосны. В ходе эксперимента с помощью термопар контролировались температуры воздуха в сушильном шкафу, тигля и вещества, которые при изотермическом режиме должны быть равны, а также фиксировалось появление газообразных продуктов термической деструкции, определяемых с помощью газоанализатора. Взвешивание образцов лесного горючего материала производилось до эксперимента и после его завершения для определения массы ЛГМ, подвергшейся термическому разложению, на аналитических весах ACZET CY-513 с точностью до $0,001$ г.

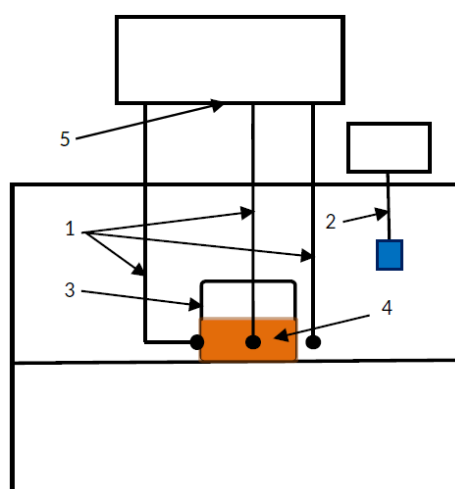


Рис. 2. Принципиальная схема термографической установки:

1 – термопары; 2 – пятикомпонентный газоанализатор; 3 – тигель из корунда 30×30 мм; 4 – опад сосны; 5 – регистратор температуры «ОВЕН»

Fig. 2. Schematic diagram of the thermographic installation, where:
1 – thermocouples; 2 – five-component gas analyzer;
3 – 30×30 mm corundum crucible;
4 – pine litter; 5 – OWEN temperature recorder



Рис. 1. Место отбора проб

Fig. 1. Photograph of the sampling site



Рис. 3. Фотография тигля из корунда 30×30 мм

Fig. 3. Photograph of a 30×30 mm corundum crucible

Эксперименты проводились в следующих вариантах:

1. Температура 90°C до прекращения выхода газообразных продуктов термической деструкции с целью определения общей массы реагирующих веществ в образце V_i' .

2. Температурный режим – 90°C до достижения максимальных показаний газоанализатора для определения массы прореагировавших веществ V_i за время τ .

Такие же опыты были проведены при температуре 120°C. Эксперименты проводились в трехкратной повторности.

Результаты и их обсуждение. Основой определения энергии активации является уравнение Аррениуса, которое в экспоненциальной форме записывается как

$$k = A \cdot \exp\left(-\frac{E}{R \cdot T}\right), \quad (1)$$

где k – константа скорости реакции; A – предэкспоненциальный множитель; E – энергия активации; R – универсальная газовая постоянная (8,341 Дж/моль К); T – абсолютная температура, К.

Существуют два способа экспериментального определения энергии активации: графический и аналитический [8, 9]. При аналитическом методе энергия активации веществ определяется по зависимости:

$$E = R \cdot \frac{T_1 \cdot T_2}{T_2 - T_1} \cdot \ln \frac{k_2}{k_1}, \quad (2)$$

где T_1, T_2 – температуры, при которых проводился эксперимент, °C; k_1, k_2 – константы скорости реакции при данных температурах.

Определить константу скорости реакции можно по математической зависимости:

$$\frac{\partial \alpha}{\partial \tau} = k \cdot (1 - \alpha)^n; \quad (3)$$

$$k = \left(\frac{\partial \alpha}{\partial \tau}\right) / (1 - \alpha)^n, \quad (4)$$

где α – степень разложения вещества; τ – время, с; n – порядок реакции.

Процесс термической деструкции летучих веществ, по данным ряда исследователей, является первым порядком реакции и описывается уравнением [10-12]:

$$\frac{\partial V_i}{\partial \tau} = k_i(T) \cdot (V_i' - V_i), \quad (5)$$

где $k_i(T)$ – константа скорости реакции выделения летучих веществ i ; V_i – масса выделившихся летучих веществ i за время τ , г; V_i' – эффективное значение летучих веществ i (общая масса летучих веществ в образце).

Степень разложения вещества определяется по уравнению:

$$\alpha = \frac{(M_0 - M_\tau)}{(M_0 - M_k)} = \frac{V_i}{V_i'}, \quad (6)$$

где M_0 – начальная масса образца, г; M_τ – масса образца через некоторый период времени, г; M_k – конечная масса образца, г.

Результаты экспериментальных исследований и расчета кинетических параметров опада хвой сосны представлены в таблице 1.

В таблице 2 приведена энергия активации некоторых пород древесины.

Из результатов анализа данных следует, что опад сосны обладает самой низкой энергией активации и является наиболее пожароопасным лесным горючим материалом

Таблица 1. Средние значения энергии активации и константы скорости реакции опада сосны

Table 1. Average values of activation energy and reaction rate constants of pine litter

№	Константа скорости реакции k_1 при 90°C, с ⁻¹	Константа скорости реакции k_2 при 120°C, с ⁻¹	Энергия активации E_0 , кДж/моль	Степень разложения α ,
1	$3,3 \cdot 10^{-12}$	$1,38 \cdot 10^{-11}$	56,764	$0 < \alpha \leq 0,44$

Таблица 2. Сравнительная энергия активации пород древесины на воздухе по модели Бройдо [13]

Table. 2. Comparative activation energy of wood species in air, according to the Broido model [13]

№	Порода древесины	Диапазон температур, °C	Энергия активации E_0 , кДж/моль	Степень разложения, α
1	Лиственница	174-329	98,14	$0 < \alpha \leq 0,43$
2	Сосна	144-319	86,67	$0 < \alpha \leq 0,38$
3	Ель	149-204	70,72	$0 < \alpha \leq 0,34$
4	Пихта	138-273	98,39	$0 < \alpha \leq 0,24$
5	Кедр	132-324	62,74	$0 < \alpha \leq 0,44$
6	Береза	153-319	115,20	$0 < \alpha \leq 0,45$
7	Осина	164-329	103,71	$0 < \alpha \leq 0,58$

Выводы

1. Опад хвой сосны содержится в достаточно больших количествах и составляет значительное процентное соотношение в лесных горючих материалах. Данный ЛГМ по классификации относится к первой группе проводников горения и характеризуется способностью к быстрому воспламенению.

2. При небольших осадках, порядка 3-5 мм, рассматриваемый лесной горючий материал высыхает и становится снова пожароопасным через несколько часов. Также при относительной влажности воздуха 45% и ниже в хвойных

насаждениях создаются условия высокой пожарной опасности.

3. Большую часть соснового опада составляют: кора – (74%) и шишки – (9%). При этом он содержит в своем составе такие вещества, как кремний, смола и поэтому практически не разлагается.

4. Самовозгорание в опаде хвой может возникать при экзотермических условиях за счет его саморазогрева. Полученное значение энергии активации 56,764 кДж/моль является достаточно небольшим и подтверждает высокую степень пожароопасности данного ЛГМ.

Список использованных источников

1. Braga R., Dulce M.A., Aquino F. Characterization and comparative study of pyrolysis kinetics of the rice husk and the elephant grass // *Journal of thermal analysis and calorimetry*. 2013. № 11
2. Li L., Wang G., Wang S., Qin S. J Thermogravimetric and kinetic analysis of energy crop Jerusalem artichoke using distributed activation energy model // *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2013. 13
3. Shen D.K., Gu S., Luo K.H., Bridgwater A.V., Fang M.X. Kinetic study on thermal decomposition of woods in oxidative environment // *Fuel*. 2009. 10. 3.1
4. Лоскутов С.Р., Казарян Л.К., Петрунина Е.А., Анишкина А.А. Термический анализ и пиролиз хвой сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* Ledeb.) // *Химия в интересах устойчивого развития*. 2023. Т. 31, № 1. С. 49-59. DOI: 10.15372/KhUR2023438. EDN: LRWYBV
5. Гусев В.Г., Арцыбашев Е.С. Исследования Санкт-Петербургского научно-исследовательского института лесного хозяйства в области охраны лесов от пожаров // *Труды Санкт-Петербургского научно-исследовательского института лесного хозяйства*. 2014. № 2. С. 56-73. EDN: SHRBQZ
6. Иванова Е.А., Исаева Л.Г. Динамика массы и состава древесного опада в сосняке Лапландского заповедника // *Труды Ферсмановской научной сессии ГИ КНИЦ РАН*. 2019. № 16. С. 211-215. DOI: 10.31241/FNS.2019.16.043. EDN: CEYZEA
7. Марьяндышев П.А., Чернов А.А., Любов В.К. Термогравиметрическое и кинетическое исследование торфа и гидролизного лигнина // *Международный журнал экспериментального образования*. 2014. № 12. С. 20-27. EDN: TJYAEN
8. Микрюкова Е.Ю., Алишева Е.А. Экспериментальное определение энергии активации химической реакции в процессе изучения курса общей химии // *АНИ: педагогика и психология*. 2024. № 2 (47)
9. Lachter J., Bragg R.H., Close E. Graphical analysis of processes with multiple activation energies // *Journal of Applied Physics*. 1986. Vol. 60, № 5. Pp. 1841-1843. DOI: 10.1063/1.337230
10. Teng H., Lin H.-C., Ho J.-A. Thermogravimetric analysis on global mass loss kinetics of rice hull pyrolysis. *Industrial and Engineering Chemistry Research*. 36(1997)3974-3977
11. Nunn T.R., Howard J.B., Longwell J.P., Peters W.A. Product compositions and kinetics in the rapid pyrolysis of sweet gum hardwood. *Industrial and engineering chemistry process design and development*. 24(1985)836-844
12. Lapuerta M., Hernandez J.J., Rodriguez J. Comparison between the kinetics of devolatilization of forestry and agricultural wastes from the middle-south regions of Spain. *Biomass and Bioenergy*. 31(2007)13-19

Reference

1. Braga R. Characterization and comparative study of pyrolysis kinetics of the rice husk and the elephant grass / R. Braga, M.A. Dulce, F. Aquino // *Journal of thermal analysis and calorimetry*. 2013. № 11.
2. Li L. Thermogravimetric and kinetic analysis of energy crop Jerusalem artichoke using distributed activation energy model / L. Li, G. Wang, S. Wang, S. Qin J // *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2013. No. 13.
3. Shen D.K. Kinetic study on thermal decomposition of woods in oxidative environment / D.K. Shen, S. Gu, K.H. Luo, A.V. Bridgwater, M.X. Fang // *Fuel*. 2009. No. 10. 3.1
4. Loskutov S.R., Kazaryan L.K., Petrunina E.A., Aniskina A.A.. Thermal analysis and pyrolysis of Scots pine needles (*Pinus sylvestris* Ledeb.) // *Chemistry for Sustainable Development*. 2023. Vol. 31, No. 1. P. 49-59. DOI: 10.15372/KhUR2023438. EDN: LRWYBV
5. Gusev V.G., Artsybashev E.S. Research of the St. Petersburg Research Institute of Forestry in the field of forest fire protection / V.G. Gusev, // *Transactions of the St. Petersburg Research Institute of Forestry*. 2014. No. 2. P. 56-73. EDN: SHRBQZ
6. Ivanova E.A., Isaeva L.G. Dynamics of the mass and composition of woody litter in the pine forest of the Lapland Nature Reserve // *Proceedings of the Fersman scientific session of the GI KSC RAS*. 2019. No. 16. P. 211-215. DOI: 10.31241/FNS.2019.16.043. EDN: CEYZEA
7. Maryandyshev P.A., Chernov A.A., V.K. Lyubov. Thermogravimetric and kinetic study of peat and hydrolytic lignin // *International journal of experimental education*. 2014. No. 12. P. 20-27. EDN: TJYAEN
8. Mikryukova Elena Yuryevna, Alisheva Evgeniya Andreevna / Experimental determination of the activation energy of a chemical reaction in the process of studying a general chemistry course // *ANI: pedagogy and psychology*. 2024. No. 2 (47),.
9. Lachter J., Bragg R.H., Close E. Graphical analysis of processes with multiple activation energies // *Journal of Applied Physics*. 1986. Vol. 60, No. 5. P. 1841-1843. DOI: 10.1063/1.337230.
10. H. Teng H.-C. Lin J.-A. Ho. Thermogravimetric analysis on global mass loss kinetics of rice hull pyrolysis. *Industrial and Engineering Chemistry Research* 36 (1997) 3974-3977.
11. T.R. Nunn, J.B. Howard, J.P. Longwell, W.A. Peters. Product compositions and kinetics in the rapid pyrolysis of sweet gum hardwood. *Industrial and engineering chemistry process design and development* 24 (1985) 836-844.
12. M. Lapuerta, J.J. Hernandez, J. Rodriguez. Comparison between the kinetics of devolatilization of forestry and agricultural wastes from the middle-south regions of Spain. *Biomass and Bioenergy* 31 (2007) 13-19.

13. Лоскутов С.Р., Шапченкова О.А., Анискина А.А. Термический анализ древесины основных лесобразующих пород Средней Сибири // Сибирский лесной журнал. 2015. № 6. С. 17-30. DOI: 10.15372/SJFS20150602. EDN: VKGQAL

13. Loskutov S.R. Thermal analysis of wood of the main forest-forming species of Central Siberia / S.R. Loskutov, O.A. Shapchenkova, A.A. Aniskina // Siberian Forestry Journal. 2015. No. 6. P. 17-30. DOI: 10.15372/SJFS20150602. EDN: VKGQAL

Информация об авторах

Алексей Владимирович Евграфов, д-р техн. наук, доцент; ORCID: 0000-0002-2313-2191; AuthorID: 828739; labpoliv@list.ru

Алексей Викторович Куриленко, канд. техн. наук; ORCID: 0000-0003-3661-1121; AuthorID: 1099301; a.kurilenko@rgau-msha.ru

Артёмбек Сергеевич Гузалов, канд. техн. наук; ORCID: 0000-0003-3526-4332; AuthorID: 1036988; aguzalov@mail.ru

Дмитрий Александрович Филимонов, канд. техн. наук; ORCID: 0009-0006-5484-5334; filimonov.dmitrii@rgau-msha.ru

Information about the authors

Alexey V. Evgrafov, DSs (Tech), Associate Professor; ORCID: 0000-0002-2313-2191, authorid: 828739; labpoliv@list.ru

Alexey V. Kurylenko, CSs (Tech), ORCID: 0000-0003-3661-1121, authorid: 1099301; a.kurilenko@rgau-msha.ru

Artembek S. Guzalov, CSs (Tech); Associate Professor ORCID: 0000-0003-3526-4332, authorid: 1036988; aguzalov@mail.ru

Dmitry A. Filimonov, CSs (Tech), ORCID: 0009-0006-5484-5334, authorid: 1251247; filimonov.dmitrii@rgau-msha.ru

Вклад авторов

А.В. Евграфов – общее научное руководство исследованиями, привлечение финансирования (руководитель гранта РНФ № 26-16-00015), утверждение окончательного текста статьи.

А.В. Куриленко – работа с источниками литературы по пожароопасности свойств ЛПМ, участие в анализе результатов и оформлении библиографического списка.

А.С. Гузалов – обработка первичных данных с газоанализатора и регистратора ОВЕН, участие в написании раздела «Материалы и методы».

Д.А. Филимонов – обеспечение работы измерительного оборудования, статистическая обработка результатов экспериментов, участие в визуализации данных и подготовке графических материалов.

Конфликт интересов / Conflict of interests

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interests

Поступила в редакцию / Received 18.05.2026

Поступила после рецензирования / Received 23.06.2026

Принята к публикации после доработки / Accepted 23.06.2026

Contribution of the authors

A.V. Evgrafov – general scientific management of the research, fundraising (head of the RSF grant No 26-16-00015), approval of the final text of the article.

A.V. Kurylenko – work with literature sources on the fire hazard properties of FFM, participation in the analysis of the results and the design of the bibliographic list.

A.S. Guzalov – processing of primary data from the OWEN gas analyzer and recorder.

D.A. Filimonov – ensuring the operation of measuring equipment, statistical processing of the results of experiments, participation in data visualization and preparation of graphic materials.