ОХРАНА ЛЕСОВ ОТ ПОЖАРОВ

Научная статья УДК 614.841.12:630 EDN MDMXLS DOI 10.24419/LHI.2304-3083.2024.2.05

Исследование процесса воспламенения лесного горючего материала сфокусированным солнечным излучением

Павел Николаевич Гоман¹

кандидат технических наук

Александр Васильевич Ильюшонок²

кандидат физико-математических наук

Владимир Константинович Кулешов3

кандидат технических наук

Борис Николаевич Алферчик4

Аннотация. Одним из ключевых направлений обеспечения безопасности природных экосистем и разработки эффективных пожарно-профилактических мероприятий является понимание природы возникновения лесных пожаров. При установлении закономерностей влияния природных и антропогенных факторов на возгорание растительности могут быть усовершенствованы способы и методы охраны лесов от пожаров, что особенно актуально в условиях глобального потепления климата.

В работе представлены результаты экспериментальных исследований процесса воспламенения наземного лесного горючего материала в виде мха, травы, опада листвы, еловой и сосновой хвои, мелких веток, коры под воздействием солнечного излучения, сфокусированного стеклянной тарой. Установлено, что способность к воспламенению под воздействием сфокусированного теплового потока из исследуемых материалов проявляют мох, трава и опад листвы либо живой напочвенный покров с их преобладанием в составе. К возникновению горения могут привести оставленные в лесу стеклянные банки вместимостью 1 л и более, наполненные водой или другой прозрачной жидкостью. Пустые стеклянные банки вместимостью от 0,5 до 10 л, пустые и наполненные жидкостью бутылки вместимостью от 0,33 до 1 л, а также осколки стекла от указанной тары не способны сфокусировать поток солнечного излучения до величины, достаточной для воспламенения напочвенного покрова влажностью 10–30 %.

Ключевые слова: лесной пожар, сфокусированное солнечное излучение, лесной горючий материал, воспламенение.

Для цитирования: Гоман П.Н., Ильюшонок А.В., Кулешов В.К., Алферчик Б.Н. Исследование процесса воспламенения лесного горючего материала сфокусированным солнечным излучением. — Текст: электронный // Лесохозяйственная информация. 2024. N° 2. C. 57—67. DOI 10.24419/LHI.2304-3083.2024.2.05. https://elibrary.ru/mdmxls

¹ Университет гражданской защиты Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь, доцент кафедры промышленной безопасности (Минск, Республика Беларусь), g-pn83@mail.ru

² Университет гражданской защиты Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь, заведующий кафедрой естественных наук, доцент (Минск, Республика Беларусь), Ilyushonok@gmail.com

³ Университет гражданской защиты Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь, заведующий лабораторией (Минск, Республика Беларусь), Voldemar.Kul@gmail.com

⁴Университет гражданской защиты Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь, слушатель факультета подготовки руководящих кадров (Минск, Республика Беларусь), boris-1111111@mail.ru

Original article

EDN MDMXLS DOI 10.24419/LHI.2304-3083.2024.2.05

Study of the Process of Ignition of Forest Combustible Material by Focused Solar Radiation

Pavel N. Goman¹

Candidate of Technical Sciences

Aliaksandr V. Ilyushonak²

Candidate of Physico-Mathematical Sciences

Vladimir K. Kuleshov³

Candidate of Technical Sciences

Boris N. Alferchyk4

Annotation. One of the key areas for ensuring the safety of natural ecosystems and developing effective fire prevention measures is understanding the nature of forest fires. By establishing the patterns of influence of natural and anthropogenic factors on the burning of vegetation, the ways and methods of protecting forests from fires can be improved, which is especially important under conditions of global warming.

The paper presents the results of experimental studies of the process of ignition of ground forest combustible material in the form of moss, grass, leaf litter, spruce and pine needles, small branches, and bark by solar radiation focused by glass containers. It has been established that from the materials under study, moss, grass and leaf litter, or ground cover with their predominance in composition exhibit the ability to ignite under the influence of a focused heat flux. Glass jars with a capacity of 1 liter or more filled with water or other transparent liquid left in the forest can cause fire. Empty glass jars with a capacity of 0.5 to 10 liters, empty and liquid-filled bottles with a capacity of 0.33 to 1 liter, as well as glass fragments from the said containers are not capable of focusing the flux of solar radiation to a value sufficient to ignite the ground cover with a humidity of 10–30 %.

Key words: forest fire, focused solar radiation, forest combustible material, ignition.

For citation: Goman P., Ilyushonak A., Kuleshov V., Alferchyk B. Study of the Process of Ignition of Forest Combustible Material by Focused Solar Radiation. – Text: electronic // Forestry Information. 2024. N° 2. P. 57–67. DOI 10.24419/LHI.2304-3083.2024.2.05. https://elibrary.ru/mdmxls

¹ University of Civil Protection of the Ministry for Emergency Situations of the Republic of Belarus, Associate Professor of the Department of Industrial Safety (Minsk, Republic of Belarus), g-pn83@mail.ru

² University of Civil Protection of the Ministry for Emergency Situations of the Republic of Belarus, Head of the Department of Natural Sciences (Minsk, Republic of Belarus), Ilyushonok@gmail.com

³ University of Civil Protection of the Ministry for Emergency Situations of the Republic of Belarus, Head of Laboratory (Minsk, Republic of Belarus), Voldemar.Kul@gmail.com

⁴ University of Civil Protection of the Ministry for Emergency Situations of the Republic of Belarus, Student at the Faculty of Management Staff Training (Minsk, Republic of Belarus), boris-1111111@mail.ru

Введение

Лесные пожары продолжают оставаться одним из наиболее опасных стихийных бедствий, так как они наносят вред окружающей среде, приводят к значительному материальному ущербу, нарушению условий жизнедеятельности людей, гибели спасателей и населения. В условиях глобального потепления климата обстановка с лесными пожарами в ряде стран мира стала носить угрожающий характер. Так, в 2023 г. в результате многочисленных пожаров был полностью уничтожен город на Гавайях, погибли более 110 чел., 4,5 тыс. чел. были эвакуированы, сгорело 2 тыс. зданий, общий ущерб составил около 5,5 млрд долл. США (рис. 1) [1]. Крупные пожары также наблюдались в Канаде, России, Греции, Португалии, Испании и других странах.

Причины лесных пожаров носят как природный, так и антропогенный характер: к природным относят грозовые разряды, извержения вулканов, падения метеоритов и др.; к антропогенным - деятельность человека (сельскохозяйственные палы, непотушенные костры, окурки и спички, искры при работе транспорта и т.п.). Кроме того, в возникновении возгораний в лесу существенное место отводится сфокусированному солнечному излучению [2-7]. В результате деятельности людей в природных экосистемах скапливаются многочисленные стеклянные осколки и тара в виде банок и бутылок. Утверждается, что в условиях продолжительной засухи и солнечной активности данные предметы могут способствовать воспламенению живого напочвенного покрова и вызвать лесные пожары [2, 3]. Эти утверждения основываются на опытах, связанных с искусственным воспламенением живого напочвенного покрова потоком солнечного излучения, сфокусированного стеклянной линзой. Однако мы не считаем, что такой эксперимент соответствует реальным условиям. В рамках эксперимента линзу держат в руках на расстоянии от растительности, обеспечивающем оптимальную фокусировку, что не отвечает условиям нахождения брошенного стекла в лесу непосредственно на живом напочвенном покрове. Осколки стекла

не являются линзой, поскольку их толщина в любом месте практически одинакова. Пустая стеклянная тара в виде банок и бутылок, хотя и имеет цилиндрическую форму, линзой не является потому, что внутри и снаружи находится среда с одинаковым показателем преломления – воздух. Следовательно, осколки стекла и пустая тара не способны фокусировать солнечное излучение, а на основании проведенных экспериментов с линзой делать выводы о возможности воспламенения живого напочвенного покрова от стеклянной тары и ее осколков некорректно. К тому же выводы о причинах лесных пожаров, связанных с брошенным стеклом, зачастую носят сугубо предположительный характер.





Рис. 1. Последствия лесных пожаров на Гавайских островах в августе 2023 г.

Следует отметить, что до настоящего времени нет единого мнения о механизмах воспламенения лесного горючего материала различными источниками зажигания, не связанными с открытым огнем [8–13]. Проведен ряд исследований, демонстрирующих возможность возгорания растительности нагретыми до высокой температуры стальными и углеродистыми частицами, стеклянной линзой, тепловым потоком от факела пламени [14–16]. При этом отсутствуют исследования процессов воспламенения напочвенного покрова в результате воздействия солнечного излучения, сфокусированного стеклянными банками, бутылками и их осколками.

Цель исследования – установить закономерности воспламенения наземного лесного горючего материала потоком солнечного излучения, сфокусированным стеклянной тарой и ее осколками.

Материалы и методы исследования

Для проведения экспериментальных исследований в лесных массивах Республики Беларусь, отнесенных к наиболее опасному первому лесопожарному поясу, были отобраны образцы наземного лесного горючего материала в виде мха, травы, опада листвы, еловой и сосновой хвои, коры, мелких веток. Перед экспериментами исследуемые образцы по влажности разбивали на три группы (10, 20 и 30 %) посредством сушильно-весового метода. Указанные диапазоны влажности отвечают условиям продолжительной засухи с высокой вероятностью возникновения лесных пожаров.

В качестве источника фокусировки солнечного излучения была выбрана тара из прозрачного стекла в виде банок вместимостью 0,5, 1,0, 2,0, 3,0, 5,0 и 10,0 л и бутылок вместимостью 0,33, 0,5, 0,7 и 1,0 л. Тара использовалась как в пустом виде, так и наполненная водой (рис. 2). Также были подготовлены образцы осколков указанной тары в виде донышек, боковых стенок и горлышек разного размера.

При проведении экспериментов образцы лесного горючего материала раскладывали на сухих деревянных брусках, обладающих низкой теплопроводностью, что соответствует наихудшим условиям при пожаре. Погодные условия отвечали V классу пожарной опасности в лесу (чрезвычайная горимость), температура воздуха составляла 25–30 °C, порывы ветра достигали 3–4 м/с, облачность отсутствовала. Время проведения опытов – 11.00–15.00.

При проведении экспериментов фиксировали время начала пиролиза и воспламенения лесного горючего материала вследствие воздействия солнечного излучения, прошедшего через выбранную тару или ее осколки. При отсутствии воспламенения образцов в течение 4 ч эксперимент прекращали. При возникновении устойчивого пламенного горения опыт повторяли с данным источником фокусировки на новых, однотипных по виду и влажности образцах лесного горючего материала до фиксации воспламенения не менее 3-х образцов.

Результаты и обсуждение

В результате проведенных экспериментов установлено, что при воздействии сфокусированного солнечного излучения только мох проявляет способность к воспламенению независимо от плотности слоя образца (рис. 3). Для его возгорания нужны стеклянные банки вместимостью 1,0 л и более, наполненные водой или другой прозрачной жидкостью. Время воспламенения носит случайный характер и может колебаться в широком диапазоне - от нескольких минут до 1 ч. Существенное влияние на возникновение горения оказывают кратковременные порывы ветра, раздувающие обугленные участки образца, что способствует возникновению пламени. Воспламенение образцов мха наблюдалось для всех исследуемых групп его влажности с незначительным увеличением времени зажигания с повышением влагосодержания (рис. 4).





Рис. 2. Процесс фокусировки солнечного излучения наполненной водой (*a*) и пустой (*б*) стеклянной тарой





Рис. 3. Воспламенение мха при воздействии сфокусированного солнечного излучения (a- процесс активного выделения продуктов пиролиза, $\delta-$ процесс воспламенения)

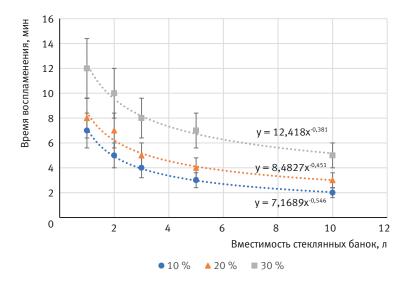


Рис. 4. Зависимость времени воспламенения мха влажностью 10, 20 и 30 % от вместимости стеклянных банок, фокусирующих солнечное излучение

(точки – эксперимент, кривые – аппроксимация)

Время воспламенения мха влажностью 10 % при фокусировке солнечного излучения стеклянной банкой вместимостью 1 л составляет около 7 мин (см. рис. 4). При увеличении вместимости тары до 10 л время воспламенения сокращается до 2 мин. Для мха влажностью 30 % при аналогичной вместимости тары время воспламенения составляет 12 и 5 мин соответственно.

На первый взгляд стеклянная банка, наполненная водой, представляет собой цилиндрическую линзу. В данном случае в вертикальном положении банка вместимостью 1 л фокусирует солнечный свет (в 11.00-15.00 угол склонения около 58°) в трапецию площадью около 0.3 cm^2 . Известно, что при входном световом потоке плотностью 1 кВт/м² через остекление проходит около 600 $Bт/м^2$ на широте г. Минска (пособие 2.91 к СНиП 2.04.05-91). С учетом площади продольного осевого сечения банки вместимостью 1 л, равной 170 см², в сфокусированном пятне плотность светового потока составляет около 340 кВт/м², что превышает значения тепловой стойкости лесного горючего материала и объясняет условия его воспламенения [17]. При большей вместимости банки плотность теплового потока растет.

При тепловом воздействии на сухую траву и опад листвы ключевым фактором, влияющим

на возникновение горения, является плотность слоя образца. При низкой плотности образца в виде разрозненных стеблей травы или слоя из нескольких листьев происходило точечное прогорание травинок или верхних листьев без возникновения горения (рис. 5а). В случае плотного травяного покрова или толщины слоя листьев 1 см и более наблюдался процесс обугливания рассматриваемого материала с возможным воспламенением при порывах ветра около 3-4 м/с (рис. 5б). При этом возгорание происходило при влажности травы и листвы 10-30 % и использовании для фокусировки солнечного излучения тары в виде стеклянных банок вместимостью 1,0 л и более, наполненных водой или другой прозрачной жидкостью.

Другие образцы лесного горючего материала при проведении экспериментов не поддерживали устойчивое пламенное горение по своей поверхности. Так, при воздействии потока солнечного излучения, сфокусированного бутылками вместимостью до 1,0 л и банками до 2,0 л, на опад еловой и сосновой хвои наблюдалось обугливание отдельных хвоинок без активного выделения продуктов пиролиза. Данное обстоятельство для сосновой хвои объясняется рыхлой структурой образца с наличием воздушных пустот, что не обеспечивает требуемого уровня нагрева в области фокусировки излучения (рис. 6). Для еловой хвои характерна более плотная структура слоя, однако из-за меньшего размера хвоинок происходило их быстрое обугливание без активного выделения продуктов пиролиза. При тепловом воздействии потоком солнечного излучения, сфокусированного стеклянными банками вместимостью от 3,0 л, наблюдалось более интенсивное дымообразование, и при порывах ветра могли возникать языки пламени с быстрым его затуханием без формирования устойчивого горения. Для воспламенения указанных образцов требуются большие тепловые потоки, что недостижимо в условиях фокусировки солнечного излучения стеклянной тарой.

Опад коры и мелких веток также не воспламенялся при воздействии сфокусированного солнечного излучения независимо от вместимости тары. В процессе теплового воздействия





а





б

Рис. 5. Воздействие сфокусированного солнечного излучения на образцы опада листвы (a) и сухой травы (δ)

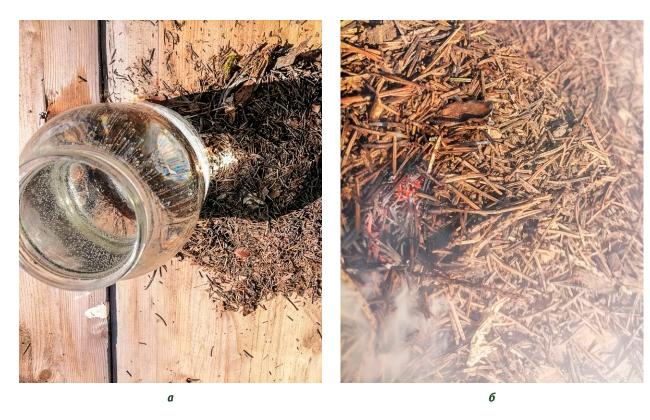


Рис. 6. Воздействие сфокусированного солнечного излучения на образцы опада еловой хвои (a- процесс теплового воздействия, б- процесс обугливания)

наблюдалось точечное обугливание без активного дымообразования (рис. 7). Данные материалы обладают достаточно плотной структурой и для их воспламенения требуется более интенсивное тепловое воздействие.

В лесу живой напочвенный покров представляет собой смесь исследуемых образцов. Следовательно, его воспламенение возможно при попадании сфокусированного солнечного излучения на компонент в виде мха, травы или опада листвы.





Рис. 7. Воздействие сфокусированного солнечного излучения на образцы опада коры (а) и мелких веток (б)

Важно отметить, что поток солнечного излучения, прошедший через пустую стеклянную тару или ее осколки независимо от их размера и формы, не приводил к пиролизу и, как следствие, к воспламенению лесного горючего материала.

Заключение

В результате проведенных исследований установлены закономерности воспламенения наземного лесного горючего материала сфокусированным солнечным излучением, на основании чего могут быть усовершенствованы пожарно-профилактические мероприятия и методики установления причин лесных пожаров.

В качестве основных выводов работы можно выделить следующее:

1. В условиях глобального потепления климата с образованием продолжительных пожароопасных периодов существует вероятность

возникновения лесных пожаров от сфокусированного солнечного излучения на участках леса с преобладанием в напочвенном покрове мха, травы и опада листвы.

- 2. Для воспламенения наземного лесного горючего материала потоком солнечного излучения требуется стеклянная тара в виде банок вместимостью 1,0 л и более, наполненная водой или другой прозрачной жидкостью. Брошенные на живой напочвенный покров стеклянные бутылки и осколки не формируют потоки излучения, достаточные для воспламенения растительности.
- 3. Время воспламенения живого напочвенного покрова может варьировать в широких пределах и определяется влажностью и плотностью горючего материала. Важным условием возникновения и поддержания процесса горения является наличие кратковременных порывов ветра, способствующих раздуванию обугленной растительности и образованию пламени.

Список источников

- 1. Число погибших в результате лесных пожаров на Гавайях возросло до 110. Текст: электронный // Известия. Режим доступа: https://iz.ru/1560246/2023-08-17/chislo-pogibshikh-v-rezultate-lesnykh-pozharov-nagavaiiakh-vozroslo-do-110 (дата обращения 05.10.2023).
- 2. Барановский, Н.В. Прогнозирование лесной пожарной опасности в условиях антропогенной нагрузки / Н.В. Барановский. Новосибирск : CO PAH, 2021. 302 с.
- 3. Кузнецов, Г.В. Прогноз возникновения лесных пожаров и их экологических последствий / Г.В. Кузнецов, Н.В. Барановский. – Новосибирск : CO PAH, 2009 – 301 с.
- 4. Гришин, А.М. Математическое моделирование лесных пожаров и новые способы борьбы с ними / А.М. Гришин. Новосибирск: Наука, 1992. 407 с.
- 5. Усеня, В.В. Лесные пожары, последствия и борьба с ними / В.В. Усеня. Гомель : Ин-т леса НАН Беларуси, 2002. 206 с.
- 6. Усеня, В.В. Лесная пирология: учебное пособие / В.В. Усеня, Е.Н. Каткова, С.В. Ульдинович; Мин-во образования Респ. Беларусь, Гомельский гос. ун-т им. Ф. Скорины; Ин-т леса НАН Беларуси. Гомель: ГГУ им. Ф. Скорины, 2011. 264 с.
- 7. Ходаков, В.Е. Лесные пожары: методы исследования / В.Е. Ходаков, М.В. Жарикова. Херсон : изд-во Гринь Д.С., 2011.-470 с.
- 8. Blasi, Di C. Modeling chemical and physical processes of wood and biomass pyrolysis / C. Di Blasi // Prog. Energy Combust. Sci. 2008. № 34. P. 47–90.
- 9. Mehrabian, R. Effects of pyrolysis conditions on the heating rate in biomass particles and applicability of TGA kinetic parameters in particle thermal conversion modeling / R. Mehrabian, R. Scharler, I. Obernberger // Fuel. $-2012. N^{\circ}90. P. 567-575.$
- 10. Dibble, A.C. Combustion characteristics of northeastern USA vegetation tested in the cone calorimeter: invasive versus noninvasive plants / A.C. Dibble, R.H. White, P.K. Lebow // Int. J. Wildland Fire. − 2007. − № 16. − P. 426–443.
- 11. Miloua, H. Numerical prediction of the fire spread in vegetative fuels using NISTWFDS model / H. Miloua // Int. J. Eng. Res. Africa. $-2015. N^{\circ}20. P. 177-192.$
- 12. Font, R. Kinetics of pyrolysis and combustion of pine needles and cones / R. Font, J.A. Conesa, J. Moltó // J. Anal. Appl. Pyrol. -2009. $-N^{\circ}$ 85. -P. 276–286.
- 13. Effect of vegetation heterogeneity on radiative transfer in forest fires / F. Pimont, J.L. Dupuy, Y. Caraglio, D. Morvan // Int. J. Wildland Fire. -2009. $-N^{\circ}$ 18. -P. 536–553.
- 14. Барановский, Н.В. Экспериментальное исследование зажигания лесного горючего материала лучистым тепловым потоком / Н.В. Барановский, П.Н. Гоман // Современные проблемы науки и образования. -2013. -№ 5. -8 с.
- 15. Кузнецов, Г.В. Пространственная постановка и численное исследование задачи о зажигании слоя лесного горючего материала нагретой до высоких температур частицей / Г.В. Кузнецов, Н.В. Барановский // Бутлеровские чтения. − 2010. − N² 12. − C. 30−37.
- 16. Касперов, Г.И. Исследование пожароопасных свойств лесных горючих материалов сосновых насаждений / Г.И. Касперов, П.Н. Гоман // Труды БГТУ. Серия II. Лесная и деревообрабатывающая промышленность. 2010. Вып. XVIII. С. 337–340.
- 17. Гоман, П.Н. Воспламеняемость лесного горючего материала при воздействии теплового потока / П.Н. Гоман // Труды СПбНИИЛХ. -2023. № 3. С. 112–123. DOI 10.21178/2079-6080.2023.3.112.

References

- 1. Chislo pogibshih v rezul'tate lesnyh pozharov na Gavajyah vozroslo do 110. Tekst : elektronnyj // Izvestiya. Rezhim dostupa: https://iz.ru/1560246/2023-08-17/chislo-pogibshikh-v-rezultate-lesnykh-pozharov-na-gavaiiakh-vozroslo-do-110 (data obrashcheniya 05.10.2023).
- 2. Baranovskij, N.V. Prognozirovanie lesnoj pozharnoj opasnosti v usloviyah antropogennoj nagruzki / N.V. Baranovskij. Novosibirsk : SO RAN, 2021. 302 s.
- 3. Kuznecov, G.V. Prognoz vozniknoveniya lesnyh pozharov i ih ekologicheskih posledstvij / G.V. Kuznecov, N.V. Baranovskij. Novosibirsk : SO RAN, 2009 301 s.
- 4. Grishin, A.M. Matematicheskoe modelirovanie lesnyh pozharov i novye sposoby bor'by s nimi / A.M. Grishin. Novosibirsk: Nauka, 1992. 407 s.
- 5. Usenya, V.V. Lesnye pozhary, posledstviya i bor'ba s nimi / V.V. Usenya. Gomel' : In-t lesa NAN Belarusi, 2002. 206 s.
- 6. Usenya, V.V. Lesnaya pirologiya: uchebnoe posobie / V.V. Usenya, E.N. Katkova, S.V. Ul'dinovich; Min-vo obrazovaniya Resp. Belarus', Gomel'skij gos. un-t im. F. Skoriny; In-t lesa NAN Belarusi. Gomel': GGU im. F. Skoriny, 2011. 264 s.
- 7. Hodakov, V.E. Lesnye pozhary: metody issledovaniya / V.E. Hodakov, M.V. Zharikova. Herson : izd-vo Grin' D. S., 2011. 470 s.
- 8. Blasi, Di C. Modeling chemical and physical processes of wood and biomass pyrolysis / C. Di Blasi // Prog. Energy Combust. Sci. $-2008. N^{\circ} 34. P. 47-90.$
- 9. Mehrabian, R. Effects of pyrolysis conditions on the heating rate in biomass particles and applicability of TGA kinetic parameters in particle thermal conversion modeling / R. Mehrabian, R. Scharler, I. Obernberger // Fuel. $-2012. N^{\circ}90. P. 567-575.$
- 10. Dibble, A.C. Combustion characteristics of northeastern USA vegetation tested in the cone calorimeter: invasive versus noninvasive plants / A.C. Dibble, R.H. White, P.K. Lebow // Int. J. Wildland Fire. 2007. N° 16. P. 426–443.
- 11. Miloua, H. Numerical prediction of the fire spread in vegetative fuels using NISTWFDS model / H. Miloua // Int. J. Eng. Res. Africa. $-2015. N^{\circ}20. P. 177-192.$
- 12. Font, R. Kinetics of pyrolysis and combustion of pine needles and cones / R. Font, J.A. Conesa, J. Moltó // J. Anal. Appl. Pyrol. -2009. $-N^{\circ}$ 85. -P. 276–286.
- 13. Effect of vegetation heterogeneity on radiative transfer in forest fires / F. Pimont, J.L. Dupuy, Y. Caraglio, D. Morvan // Int. J. Wildland Fire. -2009. $-N^{\circ}$ 18. -P. 536–553.
- 14. Baranovskij, N.V. Eksperimental'noe issledovanie zazhiganiya lesnogo goryuchego materiala luchistym teplovym potokom / N.V. Baranovskij, P.N. Goman // Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya. − 2013. − № 5. − 8 s.
- 15. Kuznecov, G.V. Prostranstvennaya postanovka i chislennoe issledovanie zadachi o zazhiganii sloya lesnogo goryuchego materiala nagretoj do vysokih temperatur chasticej / G.V. Kuznecov, N.V. Baranovskij // Butlerovskie chteniya. $-2010. N^2 12. S. 30-37$.
- 16. Kasperov, G.I. Issledovanie pozharoopasnyh svojstv lesnyh goryuchih materialov sosnovyh nasazhdenij / G.I. Kasperov, P.N. Goman // Trudy BGTU. Seriya II. Lesnaya i derevoobrabatyvayushchaya promyshlennost'. 2010. Vyp. XVIII. S. 337–340.
- 17. Goman, P.N. Vosplamenyaemost' lesnogo goryuchego materiala pri vozdejstvii teplovogo potoka / P.N. Goman // Trudy SPbNIILH. -2023. № 3. S. 112-123. DOI 10.21178/2079-6080.2023.3.112