

УДК 614.841.42:630

ОЦЕНКА СПОСОБНОСТИ НАЗЕМНОГО ЛЕСНОГО ГОРЮЧЕГО МАТЕРИАЛА К ВОСПЛАМЕНЕНИЮ И ПОДДЕРЖАНИЮ ПРОЦЕССА ГОРЕНИЯ ПО СВОЕЙ ПОВЕРХНОСТИ

Гоман П.Н.

Представлены методика и результаты экспериментальных исследований процессов воспламенения и горения наземного лесного горючего материала. Получены значения скорости распространения фронта пламени по слою мха, опада сосновой хвои, еловой хвои, коры, листвы, мелких веток, а также значения высоты фронта пламени и тепловой нагрузки, требуемой для поддержания процесса горения. Проведен сравнительный анализ полученных результатов с данными натурных экспериментов по оценке динамики лесных низовых пожаров.

Ключевые слова: лесной пожар, лесной горючий материал, скорость распространения пламени, тепловое излучение, воспламеняемость.

(Поступила в редакцию 19 октября 2018 г.)

Введение. Лес является бесценным природным богатством на планете, т. к. выполняет множество функций, начиная от фотосинтеза и заканчивая энергетикой. При этом целый ряд государств ежегодно страдает от лесных пожаров, обстановка с которыми в последние годы только усугубилась. Увеличение количества и площади лесных пожаров, тяжести последствий от них во многом вызвано глобальным потеплением, вследствие которого в ряде стран устанавливается продолжительный засушливый период и создаются благоприятные условия для возникновения пожаров. Во время лесного пожара в атмосферу выбрасывается огромное количество углекислого газа, что способствует еще быстрейшему наступлению глобального потепления. Кроме того, слои пыли и сажи от пожаров приводят к таянию ледников, что влияет на рост уровня моря и создает вероятность затопления обширных побережных территорий по всему миру.

В качестве примеров крупных лесных пожаров в ряде стран за последние годы можно выделить следующие случаи:

23 июля 2018 г. в Греции вблизи Афин возникли крупные лесные пожары, число жертв которых составило 50 человек, еще 69 пострадавших были госпитализированы. Более 700 человек спасены специальными службами и рыбаками с пляжей, куда люди бежали от огня. Лесные пожары, возникшие из-за жары, бушевали в трех районах столичной области Аттика – в районе города Кинета в 50 км к западу от Афин, в восточной Аттике и в районе города Каламос [1].

17 июня 2017 г. в Португалии в районе населенного пункта Педроган-Гранди к северо-востоку от Лиссабона возник крупный лесной пожар. Его жертвами стали 66 человек, более 200 человек пострадали. Большинство погибших были автомобилистами, которые пытались эвакуироваться в безопасные районы, но попали в огненную ловушку на одной из дорог (рис. 1) [1].



Рисунок 1. – Последствия лесных пожаров в Португалии в 2017 г.

8–28 октября 2017 г. лесные пожары в ряде округов штата Калифорния (США) полностью уничтожили район Кофи-Парк в городе Санта-Роза, а также несколько поселков. В

округах Напа и Сонома 44 человека погибли, около 100 тыс. человек были эвакуированы, огонь уничтожил и повредил 8,9 тыс. построек. Общая площадь территории, которая подверглась воздействию пожаров, превысила 99 тыс. га, это больше, чем занимает самый густонаселенный город США Нью-Йорк. Нанесенный пожарами ущерб был оценен в 9,4 млрд долларов США [1].

Лесные массивы Республики Беларусь пересекаются с рядом сопредельных государств, таких как Литва, Россия и Украина, в которых также зафиксирован скачок возникновения лесных пожаров. Особую опасность для Республики Беларусь представляют леса, подвергшиеся радиационному загрязнению в результате аварии на Чернобыльской АЭС. Так, в 2015 г. горела западная часть Чернобыльской зоны отчуждения. Особенно интенсивно горел лес в апреле и августе. Весенние пожары уничтожили растительность на площади 11 тыс. га, а в августе сгорело 5,4 тыс. га лесов, лугов и брошенных населенных пунктов (Лубянка, Ильинцы, Глинка и др.). Общая площадь территории, охваченной пожарами в 2015 г. в Чернобыльской зоне отчуждения, составила более 16 тыс. га [2]. В 2017 г. возник похожий случай. В результате технологической вырубki леса для прокладки железной дороги произошло возгорание остатков древесины и лесной подстилки, распространившееся на площадь около 20 га [3]. В 2018 г. в результате возникновения лесного пожара в зоне отчуждения сгорело около 10 га леса [4]. Анализ этих случаев показывает практическую невозможность быстрой ликвидации пожаров на радиационно-загрязненных территориях силами аварийно-спасательных подразделений и предотвращения переноса радиоактивных веществ на сопредельные европейские страны. Это требует дальнейшего изучения процессов, связанных с возникновением и распространением лесных пожаров, особенно в условиях глобального потепления. Важное место в исследовании лесных пожаров занимают вопросы оценки способности лесного горючего материала (далее – ЛГМ) к воспламенению и поддержанию процесса горения по своей поверхности. Изучение данных свойств позволит усовершенствовать современные способы прогнозирования возникновения лесных пожаров и оценки динамики их распространения.

Методика экспериментальных исследований. Для проведения экспериментальных исследований процессов воспламенения и горения ЛГМ в сосновых насаждениях Республики Беларусь, отнесенных к наиболее опасному первому лесопожарному поясу, были отобраны образцы наземного ЛГМ – мох, опад сосновой хвои, еловой хвои, коры, листвы и мелких веток. Перед проведением испытаний с применением сушильно-весового метода по ГОСТ 16588-91 образцы ЛГМ были доведены до влажности 10–30 %, что отвечает условиям пожароопасных засушливых периодов, когда по данным [5] возникает 96 % от общего количества пожаров.

Испытания проводились на установке, которая соответствовала требованиям ГОСТ 30444-97 (рис. 2). Для испытаний было подготовлено по пять образцов каждого вида ЛГМ влажностью 10 %, 20 % и 30 % [6, 7].

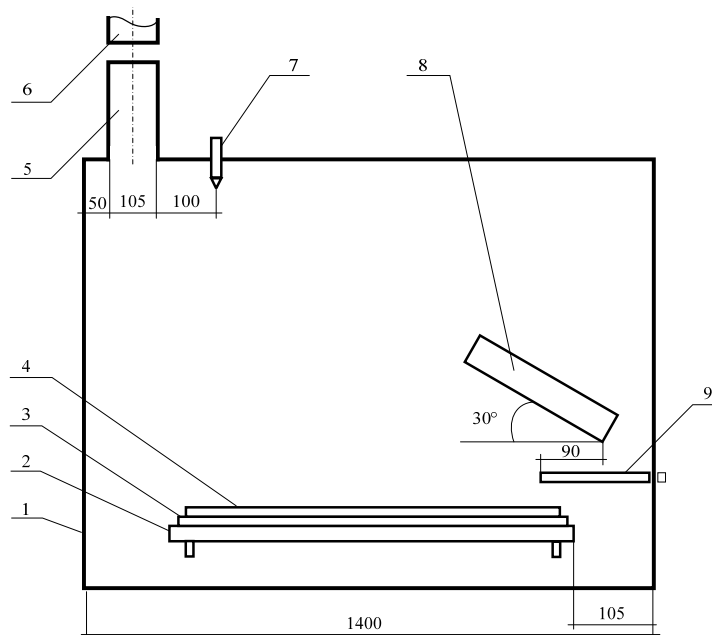
В начальной стадии испытания осуществлялось равномерное размещение на держателе образца ЛГМ конкретного вида по плотности и объемному весу, отвечающему условиям его естественного произрастания. Далее держатель образца помещался на платформу и вводился в камеру установки. Воспламенение образца осуществлялось с помощью опускания факела пламени газовой горелки в точку «0» на поверхности образца (рис. 3).

В процессе испытания фиксировалось время продвижения фронта пламени от момента воспламенения в точке «0» до противоположного края образца, высота пламени и продолжительность пламенного горения.

После окончания испытания открывалась дверца камеры, выдвигалась платформа, извлекался держатель с образцом, определялась масса несгоревшего остатка и коэффициент полноты сгорания образца.

Испытание каждого последующего образца проводилось после охлаждения держателя образца до комнатной температуры.

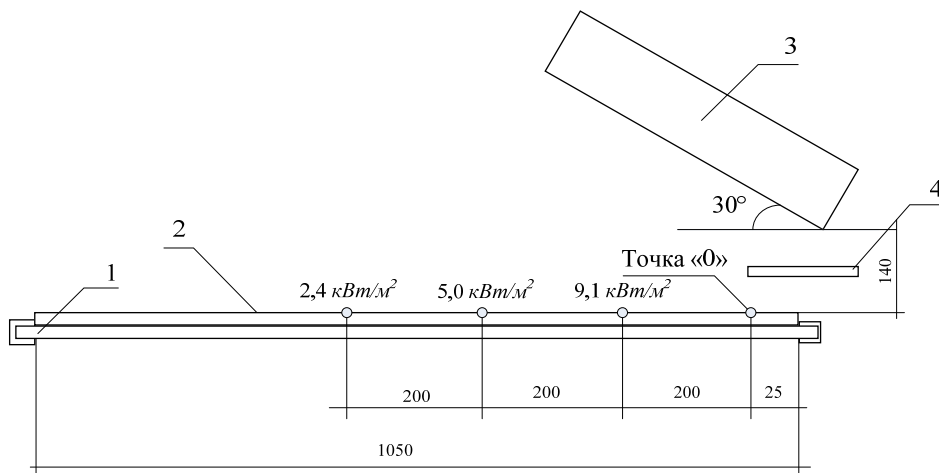
В случае, если пламя не достигало противоположного края образца, измерялась длина поврежденной части образца по его продольной оси. Измерения проводилось с точностью до 1 мм. Повреждением считалось выгорание и обугливание образца в результате распространения пламенного горения по его поверхности. Длину распространения пламени определяли как среднее арифметическое значение по длине поврежденной части пяти образцов.



1 – испытательная камера; 2 – платформа; 3 – держатель образца; 4 – образец; 5 – дымоход; 6 – вытяжной зонт; 7 – термопара; 8 – радиационная панель; 9 – газовая горелка (размеры в мм)

Рисунок 2. – Установка для испытаний на распространение пламени

Величину требуемой для распространения пламени поверхностной плотности теплового потока (далее – ПТП) устанавливали на основании результатов измерения длины распространения пламени по графику распределения ПТП по поверхности образца, полученному при калибровке установки [6, 7].



1 – держатель образца; 2 – образец; 3 – радиационная панель; 4 – газовая горелка (размеры в мм)

Рисунок 3. – Схема взаимного расположения радиационной панели, образца и газовой горелки

Результаты экспериментальных исследований. В результате проведенных экспериментальных исследований процессов воспламенения и горения наземного ЛГМ в виде мха, опада сосновой хвои, еловой хвои, листвы, коры и мелких веток установлено, что все исследуемые ЛГМ влажностью 10–30 % способны воспламениться при воздействии пламени газовой горелки. Время воспламенения ЛГМ составляло 1–4 с. При этом способность поддерживать процесс горения по своей поверхности проявляют лишь мох, опад сосновой хвои и листвы. Опавшая еловая хвоя, мелкие ветки и сосновая кора не способны самостоятельно формировать фронт пламени, достаточный для прогрева и воспламенения последующей порции ЛГМ, и поддерживают процесс распространения пламени лишь при наличии более пожароопасных материалов на своей поверхности. Пример проведения испытания для образца опада листвы представлен на рисунке 4.



Рисунок 4. – Горение образца опавшей листвы а) в начальной стадии эксперимента; б) при достижении пламенем середины образца; в) в завершающей стадии эксперимента

Экспериментальные исследования также показали, что в процессе проведения испытаний можно выделить 4 зоны распространения пламени по поверхности ЛГМ, способных к самостоятельному поддержанию процесса горения. В частности, для мха указанные зоны выделены на рисунке 5.

Первая и вторая зоны характеризуются высокой скоростью распространения пламени, равной 3,13 м/мин. Это связано с тем, что в подобных зонах создается высокая ППТП от радиационной панели установки, которая находится в интервале от 17,5 до 3,56 кВт/м².

В третьей зоне скорость распространения пламени по поверхности образца уменьшается и составляет 1,78 м/мин. Уменьшение скорости связано с тем, что ППТП, создаваемая радиационной панелью на расстоянии от 0,5 до 0,75 м, снижается и находится в диапазоне от 3,56 до 1,13 кВт/м².

В четвертой зоне плотность лучистого теплового потока, создаваемого радиационной панелью, составляет менее $1,13 \text{ кВт/м}^2$. Скорость распространения пламени по слою образца в этой зоне уменьшается до $0,89 \text{ м/мин}$. Из этого следует, что в четвертой зоне ПТП, создаваемая источником излучения, минимальна. Процесс распространения пламени осуществляется путем прогрева и воспламенения продуктов пиролиза фронтом пламени, формируемом при горении ЛГМ. В условиях реального пожара эта зона максимально приближена к случаю, когда процесс горения осуществляется исключительно по слою наземного ЛГМ и нет дополнительного потока тепла в область прогрева ЛГМ от горящего подлеска или подростка.

Анализ процесса горения опавшей сосновой хвои можно провести по рисунку 6.

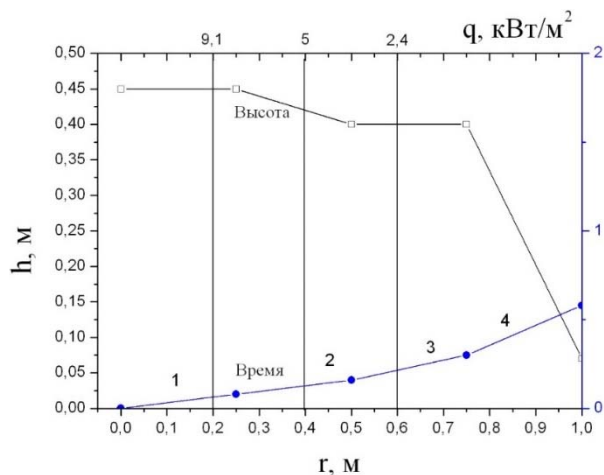


Рисунок 5. – Высота фронта пламени и время его продвижения по слою мха влажностью 10 %

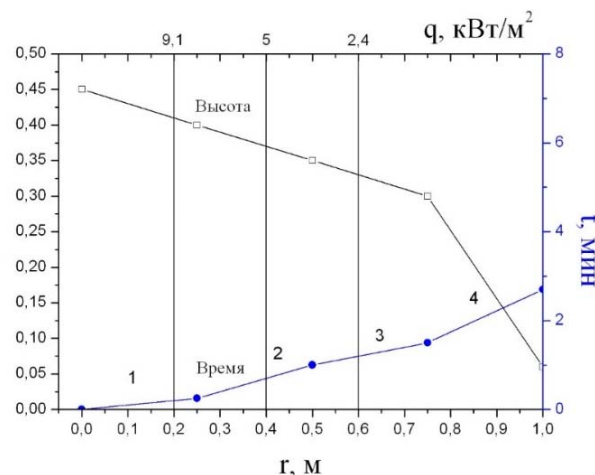


Рисунок 6. – Высота фронта пламени и время его продвижения по слою опада сосновой хвои влажностью 10 %

При горении сосновой хвои первая зона характеризуется высокой скоростью распространения пламени, равной 1 м/мин . Во второй и третьей зоне скорость распространения пламени по поверхности образца практически одинакова, но по сравнению с первой зоной уменьшается и составляет $0,23 \text{ м/мин}$. В четвертой зоне скорость распространения пламени по слою образца равна $0,21 \text{ м/мин}$.

На рисунках 7 и 8 представлены аналогичные зависимости для слоя опавших веток, для которых характерно затухание и прекращение горения.

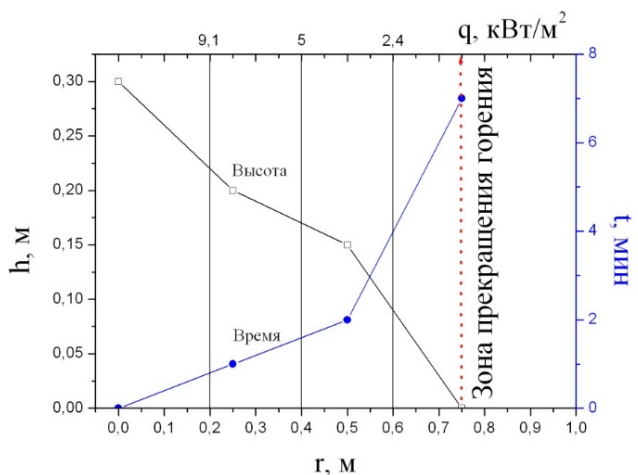


Рисунок 7. – Высота фронта пламени и время его продвижения по слою опавших веток влажностью 10 %

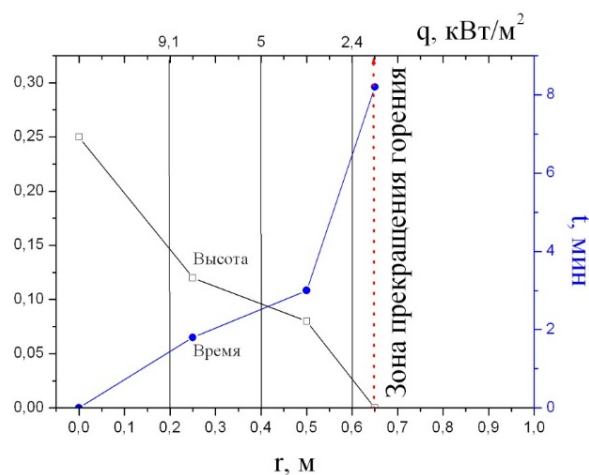


Рисунок 8. – Высота фронта пламени и время его продвижения по слою опавших веток влажностью 30 %

Как следует из рисунков 7 и 8, для образцов опавших веток, как и для образцов еловой хвои и сосновой коры, моментом, свидетельствующим о вероятном прекращении горения, является факт уменьшения пламени до высоты порядка $5\text{--}10 \text{ см}$. Принимая во внимание, что процесс горения ЛГМ осуществляется, как правило, в три стадии: прогрев, пиролиз, воспламенение, – указанная высота пламени не способна преодолеть два первых этапа.

Дополнительный прогрев ЛГМ при этом может быть обеспечен внешней ПТПП, что в реальных условиях выражено горением подлеска, подроста и прочих ЛГМ с большей высотой пламени.

Результаты определения условий распространения пламени по слою ЛГМ влажностью 10 %, что представляет наибольший практический интерес, приведены в таблице 1.

Таблица 1. – Результаты экспериментальных исследований условий распространения пламени по поверхности ЛГМ влажностью 10 %

Вид ЛГМ	Скорость распространения пламени, м/мин		Характеристика слоя ЛГМ		
	минимальная	максимальная	Поверхностная плотность, кг/м ²	Объемный вес, кг/м ³	Высота слоя, м
Мох	0,89	3,13	0,46–0,50	12,0–14,8	0,034–0,038
Сосновая хвоя	0,21	1,00	0,46–0,48	12,6–19,9	0,024–0,036
Опавшая листва	0,23	1,20	0,43–0,47	29,1–33,3	0,013–0,015
Еловая хвоя	не поддерживает распространение пламени по своей поверхности, требуется внешняя ПТПП более 2 кВт/м ²		0,90–0,94	76,4–81,9	0,011–0,013
Кора	не поддерживает распространение пламени по своей поверхности, требуется внешняя ПТПП более 5,2 кВт/м ²		1,41–1,43	109,3–112,9	0,011–0,013
Мелкие ветки	не поддерживает распространение пламени по своей поверхности, требуется внешняя ПТПП более 1,1 кВт/м ²		1,35–1,36	53,7–57,8	0,023–0,025

Из представленных в таблице данных следует, что наиболее пожароопасным ЛГМ является мох, скорость распространения пламени по поверхности которого существенно выше, чем для других материалов, и достигает 3,13 м/мин. Определяющую роль в распространении пламени по поверхности ЛГМ имеет высота пламени, которая зависит от интенсивности процессов прогрева и пиролиза. Принимая во внимание, что граничные условия прогрева в начальной стадии эксперимента одинаковые, более высокий фронт пламени при сгорании мха обусловлен высокой оптической проницаемостью среды и высоким содержанием воздуха внутри материала. В конечном итоге это приводит к быстрому сгоранию порции материала с высокой скоростью выделения продуктов пиролиза. Дальнейшее распространение пламени по поверхности материала обусловлено интенсивностью прогрева новых порций ЛГМ до температуры самовоспламенения.

Сравнительный анализ полученных результатов с данными натурального эксперимента. Скорость развития площади и периметра лесного пожара сильно обусловлена типом растительности, а соответственно, типом наземного ЛГМ. Для оценки потенциальной площади и периметра лесного пожара необходимо произвести анализ растительности лесного насаждения и сделать вывод о преимущественном составе лесного напочвенного покрова [5]. В безветренную погоду площадь и периметр лесного низового пожара с однотипной растительностью следует принимать круглой формы и рассчитывать по формулам (1) и (2) соответственно.

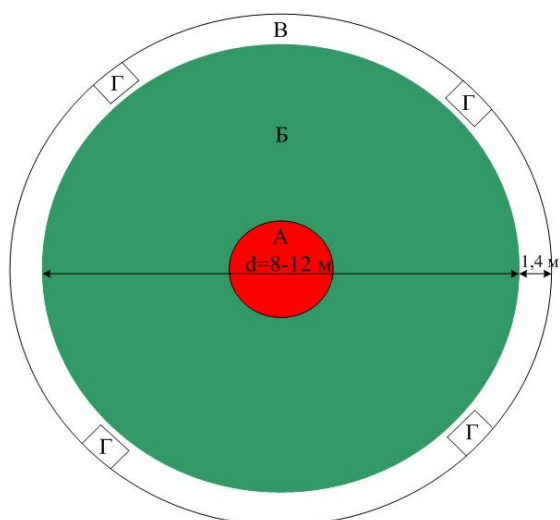
$$S = 3,14 \cdot 10^{-4} v^2 t^2, \quad (1)$$

$$P = 6,28 vt, \quad (2)$$

где S – площадь пожара в момент времени t (мин), га; P – периметр пожара, м; v – скорость распространения пламени по поверхности ЛГМ, м/мин.

При неоднородном составе напочвенного покрова скорость распространения пламени рекомендуется принимать по наземному ЛГМ с наибольшей скоростью распространения пламени.

В работе [8] приведены результаты натуральных экспериментальных исследований процесса распространения пламени по слою наземного ЛГМ хвойных насаждений Беларуси. Суть эксперимента заключалась в создании на территории лесного фонда экспериментальных площадок круглой формы диаметром 8–12 м, окаймленных минерализованной полосой (рис. 9). В процессе эксперимента фиксировались данные по высоте, температуре и скорости распространения фронта пламени.



A – зона пуска огня ($d = 1$ м); *B* – зона ЛГМ ($d = 8-12$ м); *B* – минерализованная полоса шириной 1,4 м; *Г* – зона ЛГМ для контроля температуры в его слое

Рисунок 9. – Общая схема модельного очага лесного низового пожара

В результате проведенных экспериментов было установлено, что в начальный период развития пожара при переходе пламени из зоны *A* в зону *B* скорость распространения фронта пламени возрастает постепенно, что характерно для периода разгорания. В дальнейшем развитие пожара с перемещением его фронта происходит почти с постоянной скоростью. Это отвечает увеличению периметра пожара по закону, близкому к линейному с течением времени (рис. 10). Горизонтальность испытательных площадок и относительная слабость ветра привели к реализации контура пламени почти круглой формы (рис. 11).

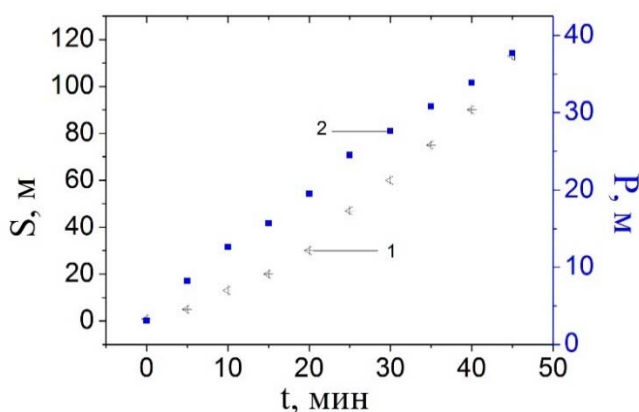


Рисунок 10. – Зависимость площади (1) и периметра (2) пожара от времени горения модельных очагов; температура окружающей среды – 20 °С, скорость ветра – 1 м/с, запас ЛГМ – 1,4 кг/м², его влажность – 20 %

Рисунок 11. – Горение ЛГМ при проведении натурального эксперимента

Как следует из рисунка 10, скорость распространения пламени по преобладающей в натурном эксперименте сосновой хвое в период установившегося горения составила порядка 0,21 м/мин, что полностью соответствует полученным в данной работе результатам (табл. 1).

Заключение. В результате проведенных экспериментальных исследований процессов воспламенения и горения наземного ЛГМ выявлены основные проводники горения – мох, опад сосновой хвои и листья, а также материалы, не способные к самостоятельному распространению пламени по своей поверхности – опад еловой хвои, коры, мелких веток. Определены значения скорости распространения и высоты фронта пламени при горении указанных ЛГМ. Проведен сравнительный анализ полученных результатов с данными натурального эксперимента, свидетельствующий об их хорошем согласовании, а также позволяющий сделать вывод о том, что предложенные в данной работе подходы и полученные результаты по условиям воспламенения и горения ЛГМ хвойных насаждений могут быть использованы для оценки условий возникновения и распространения лесных пожаров.

Работа выполнена в рамках функционирующей в Университете гражданской защиты МЧС Беларуси научной школы «Мониторинг, прогнозирование и предупреждение чрезвычайных ситуаций. Оценка рисков» по направлению «Риски возникновения пожаров в природных экосистемах».

ЛИТЕРАТУРА

1. Крупнейшие лесные пожары в мире. Досье [Электронный ресурс] // ТАСС. – Режим доступа: <https://tass.ru/info/5397861>. – Дата доступа: 11.10.2018.
2. Чернобыль, Припять, Чернобыльская АЭС и зона отчуждения [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://chornobyl.in.ua/pozar-chernobyl-2015.html>. – Дата доступа: 11.10.2018.
3. В лесу в Чернобыльской зоне произошел крупный пожар [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://censor.net.ua/news/445922/v_lesu_v_chernobylskoyi_zone_proizoshel_krupnyyi_pojar. – Дата доступа: 11.10.2018.
4. В Чернобыльской зоне на территории Украины горит лес [Электронный ресурс] // Новости tut.by. – Режим доступа: <https://news.tut.by/accidents/595654.html?crnd=61838>. – Дата доступа: 11.10.2018.
5. Усеня, В.В. Лесная пирология: учеб. пособие / В.В. Усеня, Е.Н. Каткова, С.В. Ульдинович. – Гомель, 2011. – 264 с.
6. Моделирование процесса распространения пламени по слою наземного лесного горючего материала: отчет о НИР (заключ.) / Университет гражданской защиты МЧС Беларуси; рук. П.Н. Гоман. – Минск, 2017. – 56 с. – № ГР 20150943.
7. Гоман, П.Н. Экспериментальное исследование процесса распространения пламени по слою лесного горючего материала / П.Н. Гоман // Чрезвычайные ситуации: предупреждение и ликвидация. – 2018. – № 1(43). – С. 65–76.
8. Гоман, П.Н. Экспериментально-численное моделирование процесса горения и распространения огня в условиях лесного низового пожара [Электронный ресурс] / П.Н. Гоман, В.Р. Соболев, Д.В. Баровик, В.Б. Таранчук // Технологии техносферной безопасности: Интернет-журнал. – Вып. 3 (37). – 2011. – 14 с. – Режим доступа: <http://elib.bspu.by/bitstream/doc/2029/1/%D0%A1%D1%82%D0%B0%D1%82%D1%8C%D1%8F%20%D0%A2%D0%A2%D0%91.pdf>. – Дата доступа: 11.10.2018.

EVALUATION OF THE GROUND FOREST COMBUSTIBLE MATERIAL ABILITY TO IGNITION AND MAINTAINING THE COMBUSTION PROCESS ON ITS SURFACE

Pavel Homan, PhD in Technical Science, Associate Professor

The state educational establishment «University of Civil Protection of the Ministry of Emergency Situations of the Republic of Belarus», Minsk, Belarus

Purpose. The article is devoted to the study of the processes of ignition and combustion of ground forest combustible material with the aim of further assessing the possibility of occurrence and spread of forest fires. The object of the research is ground forest combustible material in form of moss, fir-spruce pine needles, spruce needles, bark, foliage and small branches. The subject of the research is the process of ignition and combustion of ground forest combustible material.

Methods. The method of experimental study of the processes of ignition and combustion of ground forest combustible material was used; the analysis of the obtained results and their comparison with the data of a natural experiment were carried out.

Findings. The experimental data on the rate of flame spread on the layer of ground forest combustible material, the height of the flame front and the thermal load required to maintain the combustion process was obtained, which are important for the theory of forest fires. The scientific novelty of the obtained results is to establish regularity of occurrence and spread of forest fires.

Application field of research. Units and subunits for emergencies can use the obtained results to predict the conditions of occurrence and spread of forest fires.

Conclusions. The research technique and the results of experimental investigations of the processes of ignition and combustion of ground forest combustible material are presented. The values of the rate of flame spread on the layer of moss, pine needles, spruce needles, bark, foliage and small branches and the values of the height of the flame front and the thermal load required to maintain the combustion process were obtained. It was established that the main conductor of ground burning in the forest is moss, the rate of flame spread over its surface reaches 3,13 m/min. Materials that maintain the flame spreading process are moss, pine needles and foliage. Spruce needles, bark and small branches do not form a flame front sufficient to support the combustion process. For these forest combustible materials the heat load required to maintain the combustion process should be more than 5,2 kW/m², 2 kW/m² and 1,1 kW/m², respectively.

Keywords: forest fire, forest combustible material, flame velocity, thermal radiation, flammability.

(The date of submitting: October 19, 2018)

REFERENCES

1. *The largest forest fires in the world. Dossier*, available at: <https://tass.ru/info/5397861> (accessed: October 11, 2018). (rus)
2. *Chernobyl, Pripyat, Chernobyl NPP and the exclusion zone*, available at: <http://chornobyl.in.ua/pozar-chernobyl-2015.html> (accessed: October 11, 2018). (rus)
3. *A large fire occurred in the forest in the Chernobyl zone*, available at: https://censor.net.ua/news/445922/v_lesu_v_chernobylskoyi_zone_proizoshel_krupnyyi_pozar (accessed: October 11, 2018). (rus)
4. *The forest is burning In the Chernobyl zone in Ukraine*, available at: <https://news.tut.by/accidents/595654.html?crnd=61838> (accessed: October 11, 2018). (rus)
5. Usenya V.V., Katkova E.N., Ul'dinovich S.V. *Lesnaya pirologiya* [Forest pyrology]: tutorial. Gomel', 2011. 264 p. (rus)
6. Goman P.N. et al. *Modelirovanie protsessa rasprostraneniya plameni po sloyu nazemnogo lesnogo goryuchego materiala* [Modeling the flame spread process in the layer of forest combustible material]: report (final). University of Civil Protection. Minsk, 2017. 56 p. State registration No. 20150943. (rus)
7. Goman P.N. Eksperimental'noe issledovanie protsessa rasprostraneniya plameni po sloyu lesnogo goryuchego materiala [Experimental investigation of the flame spread process in the layer of forest combustible material]. *Chrezvychaynye situatsii: preduprezhdenie i likvidatsiya*, 2018. No. 1 (43). Pp. 65–76. (rus)
8. Goman P.N., Sobol' V.R., Barovik D.V., Taranchuk V.B. Eksperimental'no-chislennoe modelirovanie protsessa goreniya i rasprostraneniya ognya v usloviyakh lesnogo nizovogo pozhara [Experimental and numerical simulation of the process of combustion and spread of fire in conditions of forest ground fire]. *Tekhnologii tekhnosfernoy bezopasnosti (internet-journal)*, 2011. Iss. 3 (37). 14 p., available at: <http://elib.bspu.by/bitstream/doc/2029/1/%D0%A1%D1%82%D0%B0%D1%82%D1%8C%D1%8F%20%D0%A2%D0%A2%D0%91.pdf> (accessed: October 11, 2018). (rus)