

УДК 614.841.41:[614.841.42:630]

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ВОЗНИКНОВЕНИЯ И РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЛЕСНОГО НИЗОВОГО ПОЖАРА С ОЦЕНКОЙ УРОВНЯ ТЕПЛОВОЙ НАГРУЗКИ ОТ ФРОНТА ПЛАМЕНИ

Ласуга Г.Ф., Гоман П.Н.

Представлены результаты экспериментально-аналитического исследования процессов возникновения и распространения лесного низового пожара. Выявлены значения температуры факела пламени при горении напочвенного покрова соснового леса, определен уровень прогрева лесного горючего материала при воздействии теплового излучения. Осуществлен расчет плотности лучистого теплового потока от фронта пламени цилиндрической формы с последующим прогнозом реализуемых в условиях лесного пожара уровней теплового воздействия.

Ключевые слова: лесной низовой пожар, лесной горючий материал, фронт пламени, тепловое излучение, горение.

(Поступила в редакцию 2 апреля 2019 г.)

Введение. В последние годы по причине глобального потепления в ряде стран мира обстановка с лесными пожарами усложнилась. Вследствие пожаров ухудшается экология регионов, уничтожаются природные экосистемы, населенные пункты.

К крупнейшим лесным пожарам последнего десятилетия можно отнести возникшие в 2009 году в Австралии (уничтожено порядка 450 тыс. га леса, погибли 173 человека). В России в 2010 году в результате аномальной жары лесные пожары охватили площадь около 2 млн. га, более 60 человек погибли, 2,5 тыс. семей остались без крова. Жертвами лесных пожаров в Португалии в 2017 году стали 111 человек. Значительная часть погибших были автомобилистами, которые пытались эвакуироваться в безопасные районы, но попали в огненную ловушку на одной из дорог (рис. 1). Лесные пожары в 2018 году в Калифорнии стали крупнейшими за всю историю штата. Погибли 85 человек, порядка 250 считаются пропавшими без вести. Огнем было уничтожено около 14 тыс. домов [1, 2].

Особую опасность представляют пожары на радиационно загрязненных территориях, ситуация с которыми в последние годы также усугубилась. Так в 2015, 2017 и 2018 годах крупные пожары возникали в Чернобыльской зоне отчуждения на территории Украины [3, 4]. В указанных лесных насаждениях вследствие ограничения лесохозяйственной деятельности скапливается большое количество горючего материала, что повышает пожарную опасность и риск возникновения возгораний, в том числе трансграничного характера. Пожары на данной категории земель приводят к повторной миграции радионуклидов на значительные расстояния, что вызывает ухудшение экологической обстановки ряда стран и является серьезной международной проблемой (рис. 2).

В Республике Беларусь только с 2012 года произошло более 3,6 тыс. лесных пожаров на общей площади свыше 19 тыс. га. При этом наиболее пожароопасным выдался 2015 год, когда было зафиксировано 1,2 тыс. пожаров, а площадь, пройденная огнем, составила 16,9 тыс. га. Одним из наиболее сложных по статистике 2015 года является пожар, возникший 13 июня в Полесском государственном радиационно-экологическом заповеднике, на тушение которого было привлечено более 100 работников МЧС, задействованы три вертолета «Ми-8» и один вертолет «Ми-26». Тушение пожара продолжалось три дня [5].

В сложившейся ситуации для повышения уровня пожарной безопасности природных экосистем и снижения количества и площади пожаров особую важность приобретают научные исследования, связанные с изучением процессов возникновения и распространения лесных пожаров в условиях глобального потепления климата. Указанные исследования главным образом должны быть направлены на раннее обнаружение пожаров, прогнозирование условий их возникновения и развития, создание условий для ограничения распро-

странения и разработку современных способов тушения. Данная работа посвящена вопросам прогнозирования условий возникновения и развития лесных пожаров.



Рисунок 1. – Лесной пожар в Португалии 2017 года



Рисунок 2. – Лесной пожар в Чернобыльской зоне отчуждения 2018 года

Обзор литературы. Проблемой лесных пожаров активно занимаются специалисты разных стран мира. На территории постсоветского пространства значительный вклад в борьбу с пожарами в природных экосистемах внесли В.В. Усеня, В.Г. Гусев, А.М. Гришин, Г.А. Доррер, Е.С. Арцыбашев, И.В. Овсянников, Н.В. Барановский, М.В. Жарикова и ряд других исследователей [6–13]. Указанными авторами получены существенные результаты в области повышения пожарной безопасности природных экосистем [6, 10, 11], прогнозирования возникновения лесных пожаров и их экологических последствий [12], физико-математического моделирования распространения пожаров [7–9], создания современных огнетушащих и огнепреграждающих составов [6].

В ряде европейских и других стран большой вклад в развитие теории и практики защиты лесов от пожаров внесли: R. Ford, R. Weber, V. Babrauskas, J. Dupuy, R. Linn, W. McCaw, F. Albin и другие ученые [14–20]. На современном этапе достаточно полно исследованы процессы возникновения и распространения возгораний в природных экосистемах [14, 18], разработаны физические [15, 21–23], математические [16, 17, 20, 24–26], полевые [27, 28], численные модели лесных пожаров [19, 29, 30]. На основе разработанных моделей созданы программные комплексы (Behave, Farsite, FireLab и др.) для своевременного прогнозирования динамики развития пожаров. Данные комплексы в ряде стран мира внедрены в деятельность специализированных центров: Канадский межведомственный центр по лесным пожарам, Центр глобального мониторинга лесных пожаров в Германии, Национальный объединенный пожарный центр в США, Координационный центр реагирования на чрезвычайные ситуации в Греции, Республиканский центр управления и реагирования на чрезвычайные ситуации в Беларуси и др.

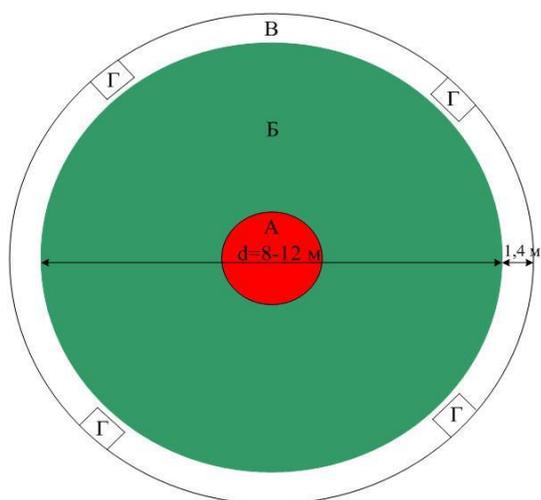
Следует отметить, что несмотря на существенные результаты в области обеспечения пожарной безопасности природных экосистем усугубление обстановки с лесными пожарами в последние годы говорит о недостаточной эффективности применяемых мер лесопожарной защиты и целесообразности дальнейшего исследования процессов возникновения и распространения пожаров в условиях глобального потепления климата для уточнения разработанных моделей прогнозирования динамики возгорания и разработки эффективных пожарно-профилактических мероприятий в природных экосистемах.

Материалы и методы исследования. В работе использована комбинация экспериментально-аналитических методов исследования процессов возникновения и распространения лесных пожаров. Целью исследования являлось установление условий возникновения и распространения лесных низовых пожаров. Объектом исследования стал лесной низовой пожар. Предметом исследования были закономерности возникновения и распростра-

нения лесного низового пожара с оценкой уровня возможного теплового воздействия. Исследование проводилось в три этапа.

На первом этапе с применением метода натурального моделирования проведена серия экспериментов по установлению условий возникновения и распространения очага лесного пожара [31]. В ходе экспериментов создавался фронт пламени цилиндрической формы, определялись значения температуры факела пламени при горении лесного горючего материала (далее – ЛГМ) наземной группы, устанавливалась динамика напочвенного горения, выявлялись уровни прогрева ЛГМ при воздействии лучистого теплового потока от фронта пламени.

Экспериментальные исследования проведены на полигоне Института леса НАН Беларуси, а также на территории лесного фонда Стародорожского района Минской области. На горизонтальных участках соснового леса были созданы экспериментальные площадки, включающие в себя центральную *А* и периферийную *Б* зоны, из которых первая выступала для инициирования возгорания. Периферийная зона предназначалась для выявления динамики низового пожара; по ее периметру создавалась минерализованная полоса *В* шириной 1,4 м с оставленными зонами *Г* для контроля температуры в слое напочвенного покрова, отделенная от зоны *Б* на 0,2 м (рис. 3 [32]). Для получения устойчивого пламенного горения в начальной стадии эксперимента на ЛГМ зоны *А* равномерно распределялся 1 л легко воспламеняющейся жидкости.



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

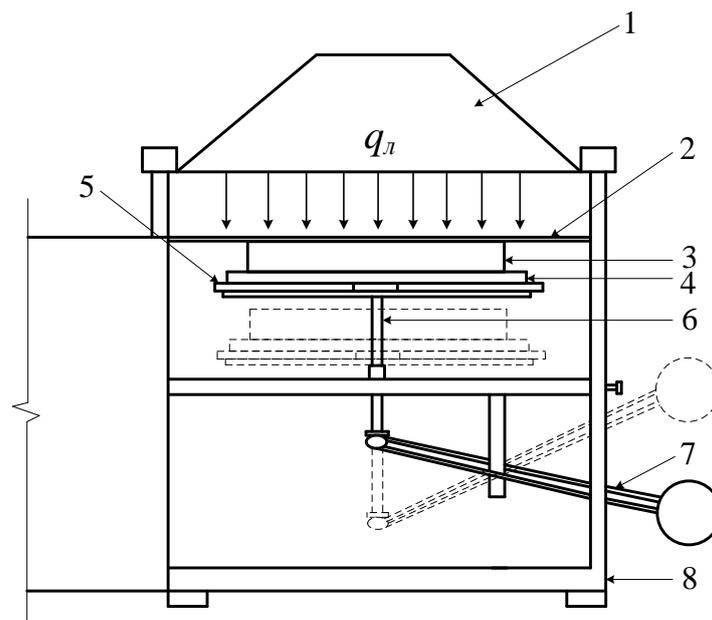
Рисунок 3. – Общая схема модельного очага лесного низового пожара

После воспламенения напочвенного покрова мгновенно охваченная огнем зона *А* инициировала формирование и распространение цилиндрического фронта пламени низового пожара. Замеры диаметра контура пожара и его высоты проводили с интервалом в 1 мин с помощью мерных реек. После достижения тепловым фронтом минерализованной полосы измеряли высоту пламени и его температуру в нескольких точках, а также температуру на участках напочвенного покрова в зоне *Г*. Температуру факела пламени и напочвенного покрова контролировали посредством измерителей-регуляторов «Сосна-003» с термоэлектрическими преобразователями. Измерения осуществлялись до полного выгорания зоны *Б*.

Во время эксперимента комплексный показатель горимости по данным Гидрометцентра изменялся от 4050 до 4310, что отвечает IV классу пожарной опасности в лесу по условиям погоды, при скорости ветра в диапазоне 0–1 м/с, температуре воздуха около 20 °С и влажности горючего материала порядка 20 %. Напочвенный покров, состоящий из мха, лишайника, опада хвои, мелких веток, коры, травы и листьев, использовали в естественном состоянии, а также формировали, чтобы охватить по толщине достаточно широкий диапазон значений от 0,07 м при плотности 50 кг/м³ до 0,01 м при плотности 75 кг/м³.

На втором этапе с применением метода аналитического моделирования был осуществлен расчет тепловой нагрузки от фронта пламени цилиндрической формы [33]. С использованием известных математических выкладок получено выражение, характеризующее уровень тепловой нагрузки на напочвенный покров леса в зависимости от параметров фронта пламени (по высоте, диаметру, температуре). Далее посредством полученного выражения моделировались условия проведенного натурального эксперимента и выявлялись значения плотности лучистого теплового потока, воздействующего на ЛГМ в процессе реального горения. Кроме того, получены прогнозные значения тепловой нагрузки, реализуемой в условиях лесных пожаров с интенсивным горением.

На третьем этапе с применением метода лабораторного эксперимента на установке по исследованию воспламеняемости материалов [34] моделировались условия воздействия на ЛГМ тепловой нагрузки докритического диапазона (не приводящей к воспламенению). Исследуемый на данном этапе ЛГМ по составу и характеристикам полностью соответствовал изученному на первом этапе. Целью эксперимента являлось установление предрасположенности напочвенного покрова к прогреву при воздействии теплового излучения пожара. Значения воздействующей на ЛГМ тепловой нагрузки устанавливались в диапазоне значений, характерных для проведенного натурального эксперимента и рассчитанных по второму этапу. Далее проводилось сравнение температуры в слое материала, полученной в ходе натурального и лабораторного экспериментов. Хорошая сходимость полученных результатов позволила сделать вывод о применимости данного подхода. Общий вид лабораторной установки представлен на рисунке 4.



- 1 – радиационная панель с нагревательным элементом; 2 – защитная плита с отверстием в центре $d=150$ мм; 3 – кольцо из асбеста для расположения образца;
4 – асбестоцементный лист; 5 – держатель образца; 6 – передвижная платформа;
7 – рычаг с противовесом; 8 – опорная станина в сборе

Рисунок 4. – Схема установки для моделирования воздействия на горючий материал теплового излучения

В соответствии с методикой исследования до начала эксперимента образец ЛГМ равномерно размещался в кольце из асбеста, расположенном на держателе образца. Далее в образец внедрялись датчики контроля температуры, и установка выводилась на требуемый температурный режим. При проведении экспериментов посредством радиационной панели установки на лицевую поверхность ЛГМ моделировалось воздействие тепловой нагрузки, характерной для проведенного натурального эксперимента. В процессе испытания фиксировалось распределение температуры по высоте образца. Испытание каждого последующего

образца проводилось после охлаждения держателя образца и кольца из асбеста до комнатной температуры.

Ниже приведена детализация действий по проведению указанных этапов исследования.

Результаты экспериментальных исследований процесса горения напочвенного покрова соснового леса. В результате проведенных экспериментов 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. 5 [32]). Горизонтальность испытательных площадок и относительная слабость ветра привели к реализации контура пламени почти круглой формы. Тем не менее высота пламени вдоль фронта изменялась с течением времени, что отображено на рисунке 6.

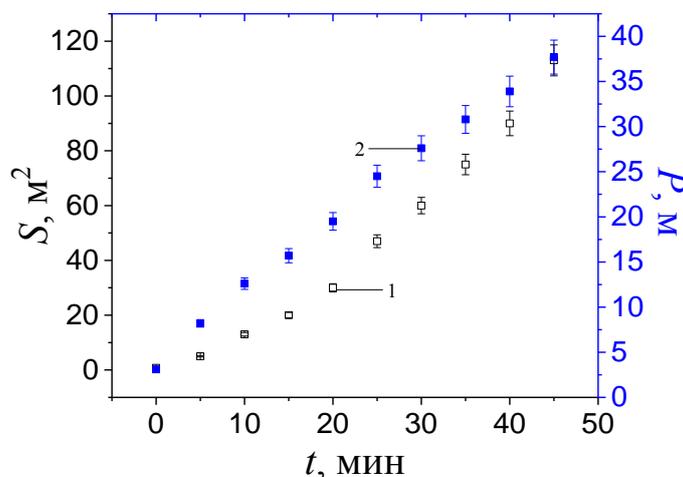


Рисунок 5. – Зависимость площади (1) и периметра (2) пожара от времени горения модельных очагов; температура окружающей среды – 20°С, скорость ветра – 1 м/с, запас ЛГМ – 1,4 кг/м², его влажность – 20 %

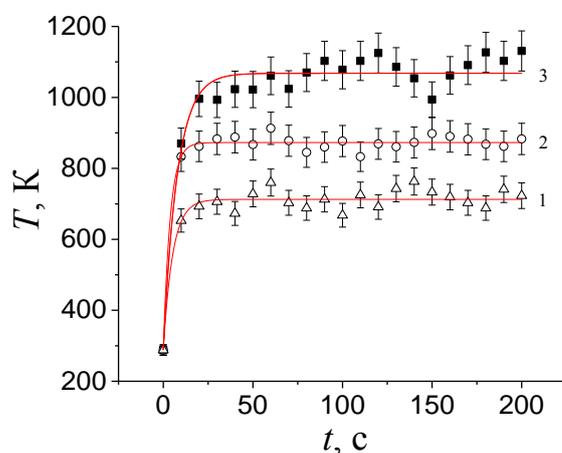
Скорость перемещения фронта пламени по плотному напочвенному слою с преобладанием опада хвои толщиной около 0,01 м невелика; для достижения границы зоны *B* огню потребовалось около 45 мин. Для слоев с преобладанием мха и лишайника скорость распространения огня сравнима и на 20–30 % превышает установленную для опада хвои, при подобии графической зависимости площади от времени. В целом по всем 10 экспериментальным площадкам время достижения пламенем границы минерализованной полосы составляло 30–50 мин в зависимости от размеров модельного очага.

Уровень прогрева лесной подстилки под действием лучистого теплового потока и, соответственно, эффективность примененного противопожарного барьера в виде минерализованной полосы были выявлены непосредственно в ходе натурального эксперимента. Как известно [14], разогрев напочвенного покрова в первую очередь определяется уровнем тепловой нагрузки, который во многом определяется температурой фронта пламени, а также его высотой и шириной.



Рисунок 6. – Горение ЛГМ при проведении натурального эксперимента

В литературе встречаются различные значения температуры горения веществ и материалов [36, 37]. Однако, применительно к условиям лесного пожара, наиболее достоверным является непосредственное измерение температуры в различных точках по высоте пламени входе натурального эксперимента. По результатам проведенных испытаний для проводников горения в виде мха, лишайника, опада хвои, листвы, коры, мелких веток температура факела пламени достигает 1070 К (рис. 7), что ниже температуры пламени при горении легковоспламеняющихся и горючих жидкостей (бензин, керосин и др.) – 1150 К, сухой древесины – 1270 К, сжиженных газов – 1470 К [36]. Как следует из рисунка 7, формирование пламени происходит весьма быстро с последующими колебаниями температуры во времени, связанными с перемещением конвекционных потоков продуктов сгорания и поступлением более холодных воздушных масс в зону реакции горения.



1 – зона контакта с горючим материалом; 2 – центр факела; 3 – верхняя область факела

Рисунок 7. – Температура факела пламени с течением времени горения напочвенного покрова соснового леса

При воздействии теплового потока на напочвенный покров происходит его прогрев, сушка, пиролиз и последующее воспламенение продуктов пиролиза по достижении критической температуры, которая по данным [14] составляет 590–620 К. Быстрота необходимого прогрева во многом определяется удаленностью материала и наличием препятствий в виде минерализованных полос и других противопожарных барьеров, способных нейтрализовать воздействие теплового потока [6, 15]. В ходе натурального эксперимента установлено, что значения температуры в слое напочвенного покрова на различном удалении от фронта пламени отвечают гиперболическому закону. В качестве примера на рисунке 8 приведена

зависимость температуры в середине слоя ЛГМ от расстояния до цилиндрического фронта пламени.

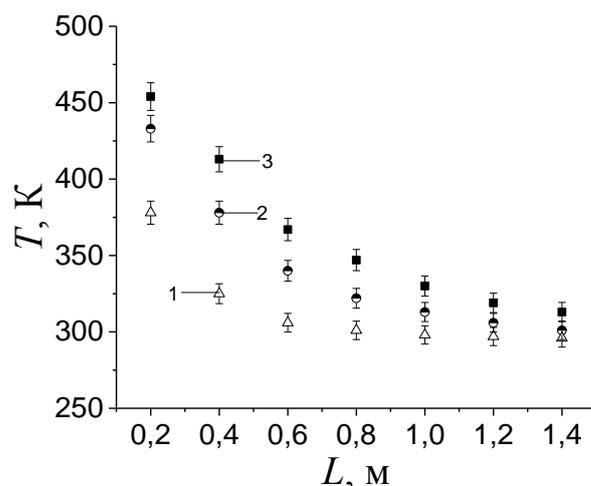


Рисунок 8. – Температура в середине слоя напочвенного покрова толщиной 0,07 м при воздействии теплового излучения от цилиндрического фронта пламени низового пожара для значений высоты пламени (h), м: 0,25 (1); 0,5 (2); 0,75 (3)

Как видно на рисунке 8, с увеличением расстояния до фронта пламени температура напочвенного покрова снижается. Например, при высоте пламени $h = 0,5$ м удаление ЛГМ от огня на 1 м приводит к уменьшению температуры в его слое до 315 К, что минимизирует вероятность дальнейшего распространения огня. При воздействии фронта пламени высотой 0,75 м на расстоянии 0,2 м обеспечивается прогрев ЛГМ до 450 К, а увеличение расстояния до 1,4 м способствует снижению температуры материала в 1,4 раза. В целом, можно заключить, что слой напочвенного покрова, удаленный от фронта пламени на расстояние 0,2 м, при условиях, отвечающих четвертому классу горимости, и высоте фронта пламени 0,75 м, не способен достичь критической температуры за счет воздействия теплового излучения.

Однако для низовых пожаров большей интенсивности условия безопасности следует рассматривать отдельно с учетом возможности сочетания результатов натурального эксперимента с данными расчета плотности лучистого теплового потока от протяженных фронтов пламени и критериями воспламеняемости наземного горючего материала. Другими словами, для оценки уровня облученности напочвенного покрова при воздействии повышенных тепловых нагрузок от фронтов пламени целесообразно экстраполировать результаты натурального эксперимента на большие масштабы теплового фронта, для чего имеет смысл решить задачу аналитически. Это позволит оценить уровни тепловой нагрузки от масштабных тепловых фронтов и выявить взаимосвязь между плотностью теплового потока, воздействующего на горючий материал, и температурой в его слое.

Экстраполяция результатов экспериментальных исследований на большие параметры теплового фронта. В связи с тем, что проведение масштабных натуральных экспериментов с созданием обширных по высоте и ширине тепловых фронтов затруднительно ввиду опасности возникновения неконтролируемого горения, для оценки уровня облучения напочвенного покрова целесообразно экстраполировать результаты натурального эксперимента на большие параметры теплового фронта [15]. Соответственно, возникает необходимость выявления закономерностей формирования и пространственного распределения лучистого теплового потока, создаваемого поверхностями цилиндрической формы. Существенно, что среди имеющихся литературных источников совсем немного данных по оценке плотностей тепловых потоков, испускаемых излучателями указанной формы [38, 39]. Так, в работе [38] приведены выражения для угловых коэффициентов облученности между цилиндром и прямоугольной поверхностью, расположенной в плоскости параллельной оси цилиндра, а также для двух неограниченно длинных цилиндров, размещенных на некотором расстоянии. В рамках рассмотренной геометрии излучатель и при-

нимающая поверхность позиционируются как одинаковые по высоте, что не соответствует ситуации проведенного натурального эксперимента и ограничивает возможности практического применения полученных выражений для угловых коэффициентов облученности. В другой работе [39] приведено выражение по выявлению термического поражения мишени в зоне действия цилиндрического фронта. Приведенная в источнике геометрия также не в полной мере отвечает ситуации проведенного натурального эксперимента и может быть уточнена посредством детального моделирования условий натурального эксперимента по воздействию теплового излучения на напочвенный покров от подошедшего к противопожарному барьеру в виде минерализованной полосы протяженного фронта пламени цилиндрической формы.

Ниже представлены результаты расчета плотности лучистого теплового потока от цилиндрического источника, которые позволяют выявить возможные уровни тепловой нагрузки на наземный горючий материал, расположенный в области действия теплового фронта.

Если расстояние от облучаемой поверхности до излучателя невелико по сравнению с его размерами, что действительно имеет место в значительном количестве практических случаев, то применение закона обратных квадратов для определения энергетической освещенности не совсем корректно. Источник следует представлять как большое количество точечных излучателей с последующим суммированием вкладов от каждого [33, 35].

Общая схема исследования и исходные геометрические построения представлены на рисунке 9.

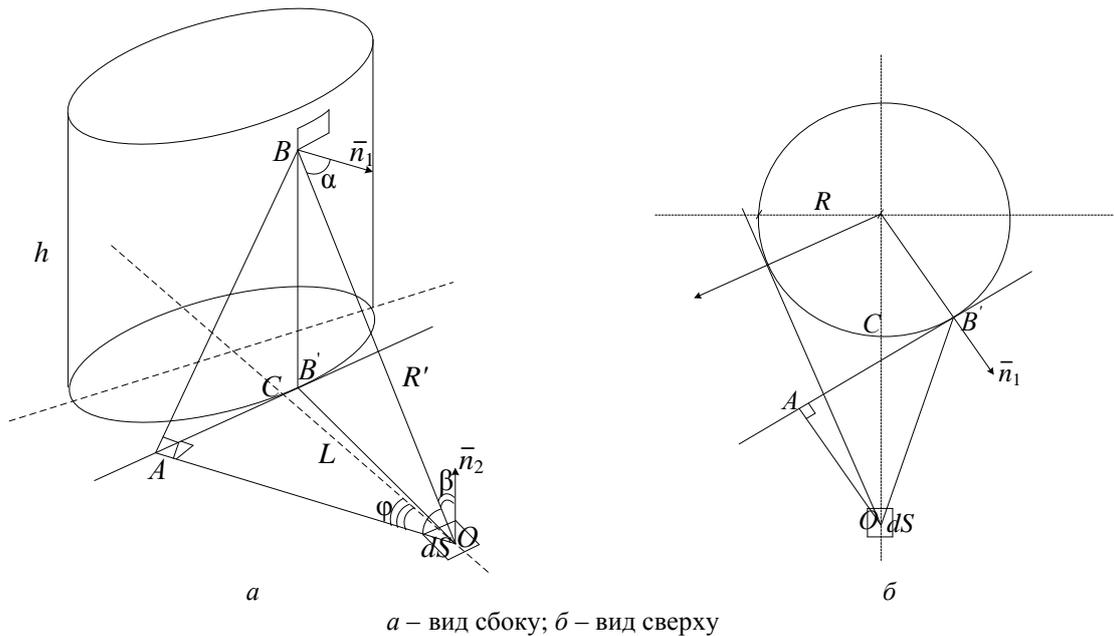


Рисунок 9. – Схема расчета тепловой нагрузки от цилиндрического источника на напочвенный покров леса

Источник цилиндрической формы радиуса R и высоты h рассмотрен в предположении, что посылаемый поток по всем направлениям одинаков, т. е. излучающая поверхность по лучистой яркости отвечает Ламбертовому источнику. На горизонтальной облучаемой поверхности конечных размеров с центром O , расположенной в плоскости основания теплового источника, на расстоянии L от излучающей поверхности, тепловой поток воздействует на горючий материал наземной группы, что отвечает условиям проведенных натуральных экспериментов. При расчете учтена величина видимого элементарного участка излучающего фронта из точки O , а также эффективная величина участка поверхности, подвергнутой облучению вдоль заданного направления. Затем произведено суммирование вкладов от всех элементарных участков по видимой поверхности теплового источника.

Посылаемый на облучаемую поверхность элементарный поток от излучателя пропорционален участку излучателя, который виден из точки O , т. е. $dx dy \cos \alpha$, и величине телесного угла $d\Omega$, опирающегося на облучаемую поверхность dS . Если нормаль \bar{n}_2 к поверхности dS составляет угол β с осью конуса, являющегося границей телесного угла $d\Omega$, то искомый поток пропорционален косинусу угла между нормалью \bar{n}_2 и осью телесного угла $d\Omega$, который записывают как [40]

$$d\Omega = \frac{dS \cos \beta}{R'^2}, \quad (1)$$

где R' – расстояние от элементарного участка излучателя до облучаемой поверхности. Следовательно, падающий искомый элементарный поток dF на поверхность dS вдоль нормали \bar{n}_2 к ней может быть выражен как [40]

$$dF = BdS \frac{\cos \alpha \cos \beta}{R'^2} dx dy, \quad (2)$$

где B – энергетическая яркость источника. Соответственно, величина плотности лучистого теплового потока dq от элемента излучателя $dx dy$ как $\frac{dF}{dS}$ может быть представлена в виде [40]

$$dq = \frac{B}{R'^2} \cos \alpha \cos \beta dx dy. \quad (3)$$

После суммирования всех вкладов от элементарных участков излучателя получено выражение, характеризующее закономерности распределения плотности лучистого теплового потока от протяженного цилиндрического фронта пламени с учетом его радиуса, высоты, температуры, а также расстояния до облучаемой поверхности [40]:

$$q = \frac{\sigma T^4}{2\pi} (a_{L,R}(h) [b_{L,R}(h) - c_{L,R}(h)] + b_{L,R}(0) - c_{L,R}(0)), \quad (4)$$

где σ – постоянная Стефана – Больцмана; q – плотность лучистого теплового потока, Вт/м²; T – температура цилиндрического излучателя, К; R – радиус цилиндрического излучателя, м; h – высота цилиндрического излучателя, м; L – расстояние от излучателя до облучаемой поверхности, м. Величины $a_{L,R}(h)$, $b_{L,R}(h)$ и $c_{L,R}(h)$ вычисляются по формулам:

$$a_{L,R}(h) = -\frac{L^2 + 2LR + h^2}{\sqrt{(L^2 + h^2)((L + 2R)^2 + h^2)}};$$

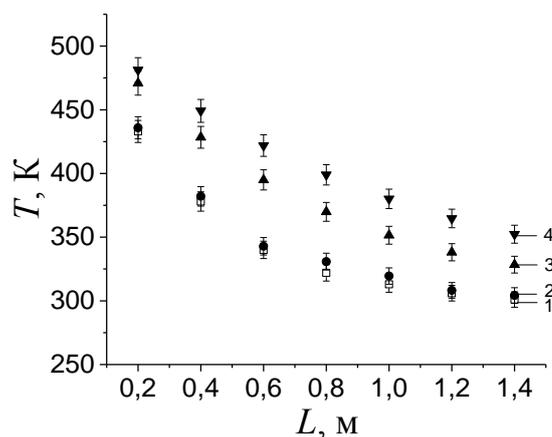
$$b_{L,R}(h) = \operatorname{arctg} \left[\frac{L + R}{\sqrt{(L^2 + h^2)((L + 2R)^2 + h^2)}} \left[\frac{(L + R)^2 + R^2 + h^2}{R} \left(1 + \sqrt{1 - \frac{R^2}{(L + R)^2}} \right) - 2R \right] \right];$$

$$c_{L,R}(h) = \operatorname{arctg} \left[\frac{L + R}{\sqrt{(L^2 + h^2)((L + 2R)^2 + h^2)}} \left[\frac{(L + R)^2 + R^2 + h^2}{R} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{R^2}{(L + R)^2}} \right) - 2R \right] \right].$$

Выражение (4) характеризует излучение абсолютно черного тела на абсолютно черную поверхность без учета возможного переизлучения, что отвечает наихудшим условиям при пожаре и направлено на повышение эффективности профилактических мероприятий.

Результаты лабораторных исследований процесса воздействия теплового излучения на напочвенный покров соснового леса, их сравнение с результатами натурального эксперимента. Выявленные закономерности распределения потоков излучения от цилиндрического источника позволяют посредством лабораторной установки для определения воспламеняемости материалов смоделировать условия проведенного натурального эксперимента [34]. Используя данный подход, в лабораторных условиях смоделировали процесс воздействия на напочвенный покров тепловой нагрузки от фронта пламени, характерной для условий проведенного натурального эксперимента и определенной по (4); посредством термопар определили значения температуры в слое напочвенного покрова и произвели ее сравнение с температурой, измеренной в естественных условиях.

В качестве примера на рисунке 10 приведены результаты сопоставления данных, полученных в ходе лабораторных и натуральных экспериментов, по температуре в слое горючего материала при воздействии теплового излучения от фронта пламени высотой 0,5 м. Также приведены расчетные оценки уровня прогрева напочвенного покрова при образовании более масштабных по высоте фронтов. Уровень тепловой нагрузки на напочвенный покров от радиационной панели лабораторной установки изменялся в диапазоне от минимального $1,2 \text{ кВт/м}^2$ для моделирования случая удаления образца на расстояние 1,4 м при высоте фронта пламени 0,5 м до максимального $19,50 \text{ кВт/м}^2$ для моделирования случая удаления образца на расстояние 0,2 м при высоте фронта пламени 1,5 м.



1 – результаты натурального эксперимента; 2, 3, 4 – результаты лабораторного эксперимента

Рисунок 10. – Зависимость температуры в середине слоя напочвенного покрова толщиной 0,07 м от расстояния до облучаемой поверхности при температуре и радиусе цилиндрического фронта пламени 970 К и 5 м соответственно для высоты излучателя (h), м: 0,5 (1, 2); 1 (3); 1,5 (4)

Как видно на рисунке 10, данный подход позволяет получать значения температуры в слое напочвенного покрова, которые согласуются с результатами натурального эксперимента. Расхождение полученных в лабораторных и естественных условиях данных по температуре в слое напочвенного покрова в зависимости от параметров тепловых фронтов, которые наблюдались в условиях натурального эксперимента, не превышает 10 %. Соответственно, выражение (4) может быть использовано для оценки пространственного распределения лучистого теплового потока от цилиндрического фронта пламени, характерного для лесных пожаров.

Оценка возможного теплового воздействия от цилиндрического фронта пламени лесного пожара. Для получения прогнозных оценок по уровню теплового воздействия в условиях формирования лесных низовых и полевых пожаров на рисунках 11 и 12 представлены зависимости плотности лучистого теплового потока от характерных и реализуемых в реальных условиях параметров фронтов пламени по ширине, высоте и температуре.

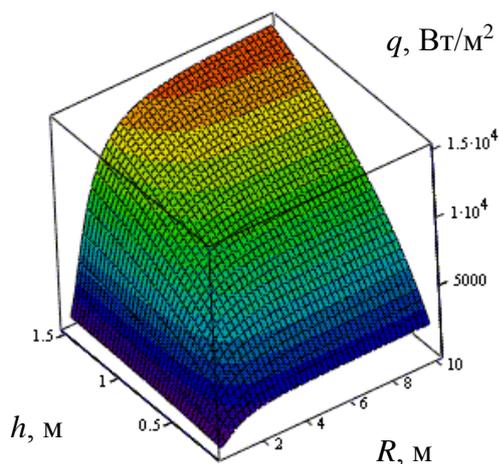


Рисунок 11. – Зависимость тепловой нагрузки от высоты и радиуса цилиндрического фронта пламени при температуре излучателя 1070 К и расстоянии до облучаемой поверхности 1 м

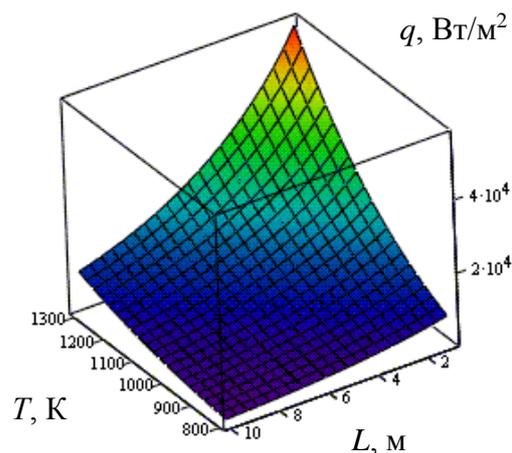


Рисунок 12. – Зависимость тепловой нагрузки от температуры цилиндрического фронта пламени и расстояния до облучаемой поверхности при высоте и радиусе излучателя равных 10 м

Как можно видеть на рисунке 11, в условиях лесных низовых пожаров с формированием масштабных цилиндрических фронтов пламени температурой 1070 К уровень тепловой нагрузки на расстоянии 1 м может изменяться от 0,6 кВт/м² при минимальных значениях высоты и радиуса излучателя, равных 0,25 и 1 м соответственно, до 14,7 кВт/м² при максимальных значениях высоты и радиуса излучателя, равных 1,5 и 10 м соответственно. При этом увеличение радиуса цилиндрического фронта пламени более, чем на 2 м перестает существенно сказываться на уровне облученности горючего материала, что более выражено при небольшой высоте излучателя и, вероятно, обусловлено незначительным вкладом удаленных участков в результирующую плотность лучистого теплового потока.

В случае возникновения павальных пожаров с основным проводником горения в виде сухой древесины (рис. 12) температура факела пламени может быть выше и достигать 1270 К [36], что приведет к существенному увеличению уровня тепловой нагрузки при пожаре. В данных условиях при значениях высоты и радиуса цилиндрического фронта пламени, равных 10 м, плотность лучистого теплового потока на расстоянии 1 м от излучателя составит 52,3 кВт/м². При этом с удалением от фронта пламени плотность лучистого теплового потока снижается и на расстоянии 10 м составляет 10,9 кВт/м².

Закключение. В результате проведенных исследований установлены закономерности возникновения и распространения лесных низовых пожаров в природных экосистемах умеренного климатического пояса. Получено аналитическое решение, позволяющее прогнозировать уровень тепловой нагрузки от цилиндрического фронта пламени, зачастую наблюдаемого в условиях лесных низовых и павальных пожаров. Методами натурного и лабораторного моделирования выявлены закономерности прогрева ЛГМ при воздействии теплового излучения от фронта пламени.

В качестве наиболее важных результатов работы можно выделить следующие:

- температура факела пламени развившегося пожара при горении напочвенного покрова соснового леса в составе мха, лишайника, опада хвои, листвы, коры, мелких веток, достигает 1070 К, что несколько ниже температуры горения древесины;

- при воздействии теплового излучения от фронта пламени лесного низового пожара высотой до 0,75 м уровень прогрева напочвенного покрова, удаленного от фронта пламени на расстояние 0,2 м, не превышает 450 К, что ниже требуемой для воспламенения критической температуры. При этом увеличение расстояния до 1,4 м приводит к снижению температуры ЛГМ в 1,4 раза;

- при возникновении лесных низовых пожаров с формированием цилиндрического фронта пламени температурой 1070 К, высотой 1,5 м и радиусом 10 м уровень теплового

воздействия вблизи фронта пламени достигает $14,7 \text{ кВт/м}^2$, что не вызывает воспламенения напочвенного покрова, расположенного за противопожарным барьером в виде минерализованной полосы шириной 1,4 м;

– при возникновении повальных лесных пожаров с формированием цилиндрического фронта пламени температурой 1270 К, высотой и радиусом, равными 10 м, уровень теплового воздействия вблизи фронта пламени достигает $52,3 \text{ кВт/м}^2$, что представляет угрозу поражения людей и создает риск перехода огня через имеющиеся минерализованные полосы и аналогичные противопожарные барьеры.

ЛИТЕРАТУРА

1. Крупнейшие лесные пожары в мире. Досье [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://tass.ru/info/5397861>. – Дата доступа: 26.02.2019.
2. В Калифорнии локализован природный пожар [Электронный ресурс]. – 2019. – Режим доступа: <https://ru.euronews.com/2018/11/25/california-camp-fire-contained>. – Дата доступа: 26.02.2019.
3. Богорад, В.И. Радиационные последствия пожара в зоне отчуждения Чернобыльской АЭС / В.И. Богорад [и др.] // Ядерная и радиационная безопасность. – 2016. – Вып. 1(69). – С. 64–68.
4. В Чернобыльской зоне отчуждения вновь возник пожар [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.interfax.ru/world/616303>. – Дата доступа: 26.02.2019.
5. Лесные пожары и площадь, пройденная лесными пожарами [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.belstat.gov.by/ofitsialnaya-statistika/realny-sector-ekonomiki/selskoe-hozyaistvo/lesnoe-khozyaistvo/godovye-dannye/lesnye-pozhary-i-ploshchad-proydenneya-lesnymi-pozharami/>. – Дата доступа: 27.03.2019.
6. Усеня, В.В. Лесные пожары, последствия и борьба с ними / В.В. Усеня. – Гомель: Ин-т леса НАН Беларуси, 2002. – 206 с.
7. Гусев, В.Г. Физико-математические модели распространения пожаров и противопожарные барьеры в сосновых лесах / В.Г. Гусев. – СПб.: НИИ ЛХ, 2005. – 200 с.
8. Гришин, А.М. Математические модели лесных пожаров / А.М. Гришин. – Томск: Томский ун-т, 1981. – 278 с.
9. Доррер, Г.А. Динамика лесных пожаров / Г.А. Доррер. – Новосибирск: СО РАН, 2008. – 404 с.
10. Арцыбашев, Е.С. Лесные пожары и борьба с ними / Е.С. Арцыбашев. – М.: Лесная промышленность, 1974. – 152 с.
11. Овсянников, И.В. Противопожарное устройство лесов / И.В. Овсянников. – М.: Лесная промышленность, 1978. – 112 с.
12. Кузнецов, Г.В. Прогноз возникновения лесных пожаров и их экологических последствий / Г.В. Кузнецов, Н.В. Барановский. – Новосибирск: СО РАН, 2009. – 301 с.
13. Ходаков, В.Е. Лесные пожары: методы исследования / В.Е. Ходаков, М.В. Жарикова. – Херсон: Гринь Д.С., 2011. – 470 с.
14. Ford, R. Investigation of Wildfires / R. Ford. – Bend: Maverick Publications, 1995. – 176 p.
15. Weber, R. Modelling fire spread through fuel beds / R. Weber // Progress in Energy and Combustion Science. – 1991. – Vol. 17. – P. 62–82.
16. Dupuy, J. Fire spread through a porous forest fuel bed: A radiative and convective model including fire-induced flow effects / J. Dupuy, M. Larini // Int. J. Wildland Fire. – 1999. – Vol. 9, № 3. – P. 155–172.
17. McCaw, W. Predicting fire spread in Western Australia mallee-heath shrubland. PhD sci. diss. Synopsis / W. McCaw; University of New South Wales. – Canberra, Australia, 1998. – 256 p.
18. Babrauskas, V. Ignition Handbook / V. Babrauskas. – Issaquah: Fire Science Publishers, 2003. – 1118 p.
19. Linn, R. A transport model for prediction of wildfire behaviour. PhD sci. diss. / R. Linn; New Mexico State University. – Las Cruces, 1997. – 195 p.
20. Albin, F. A mathematical model for predicting the maximum potential spotting distance from a crown fire / F. Albin, M. Alexander, M. Cruz // Int. J. Wildland Fire. – 2012. – № 21. – P. 609–627.
21. Morvan, D. Physical phenomena and length scales governing the behaviour of wildfires: a case for physical modelling / D. Morvan // Fire Technol. – 2011. – № 47. – P. 437–460.
22. Mell, W. A physics-based approach to modelling grassland fires / W. Mell, M.A. Jenkins, J. Gould, P. Cheney // Int. J. Wildland Fire. – 2007. – № 16. – P. 1–22.
23. Sun, L. Comparison of burning characteristics of live and dead chaparral fuels / L. Sun, X. Zhou, S. Mahalingam, D.R. Weise // Combust. Flame. – 2006. – № 144. – P. 349–359.

24. Sullivan, A.L. Wildland surface fire spread modelling, 1990–2007. 1: physical and quasi-physical models / A.L. Sullivan // *Int. J. Wildland Fire*. – 2009. – № 18. – P. 349–368.
25. Chuah, K.H. The prediction of flame heights and flame shapes of small fire whirls / K.H. Chuah, G. Kushida // *Proc. Combust. Inst.* – 2007. – № 31. – P. 2599–2606.
26. Battaglia, F. Simulating fire whirls / F. Battaglia, K. McGrattan, R. Rehm, H. Baum // *Combust. Theory Model.* – 2000. – № 4. – P. 123–138.
27. Nelson, R.M. Re-analysis of wind and slope effects on flame characteristics of Mediterranean shrub fires / R.M. Nelson // *Int. J. Wildland Fire*. – 2015. – № 24. – P. 1001–1007.
28. Lei, J. Experimental research on combustion dynamics of medium-scale fire whirl / J. Lei, N. Liu, L. Zhang, H. Chen, L. Shu, P. Chen, et al. // *Proc. Combust. Inst.* – 2011. – № 33. – P. 2407–2415.
29. Morvan, D. Numerical study of the behaviour of a surface fire propagating through a firebreak built in a Mediterranean shrub layer / D. Morvan // *Fire Saf. J.* – 2015. – № 71. – P. 34–48.
30. Gavrilov, K. Numerical simulation of coherent structures over plant canopy / K. Gavrilov, G. Accary, D. Morvan, D. Lyubimov, S. Méradji, O. Bessonov // *Flow, Turbul. Combust.* – 2011. – № 86. – P. 89–111.
31. 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: 16.02.2019.
32. Гоман, П.Н. Оценка способности наземного лесного горючего материала к воспламенению и поддержанию процесса горения по своей поверхности / П.Н. Гоман // *Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси*. – 2018. – Т 2, № 4. – С. 446–454.
33. Соболев, В.Р. О влиянии формы протяженного теплового источника на плотность лучистого потока энергии / В.Р. Соболев, П.Н. Гоман, В.И. Януга // *Весці БДПУ. Сер. III, Фізіка. Матэматыка. Інфарматыка. Біялогія. Геаграфія*. – 2010. – № 4. – С. 3–9.
34. *Материалы строительные. Метод испытания на воспламеняемость: ГОСТ 30402–96*. – Введ. 30.03.97. – Минск: Министерство архитектуры и строительства Республики Беларусь: ФГУП ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко, 1996. – 27 с.
35. Соболев, В.Р. К вопросу о пространственном распределении интенсивности лучистого потока энергии от источника большой площади / В.Р. Соболев, П.Н. Гоман, В.И. Януга // *Чрезвычайные ситуации: образование и наука*. – 2011. – № 2(6) – С. 116–124.
36. *Система стандартов безопасности труда. Пожарная безопасность. Общие требования: ГОСТ 12.1.004-91*. – Введ. 01.07.92. – М.: Гос. ком-т по стандартизации: МВД СССР, 1991. – 80 с.
37. Cruz, M.G. Ignition of crown fuels above a spreading surface fire. PhD sci. diss. / M.G. Cruz; University of Montana. – Missoula, 2004. – 126 p.
38. Уонг, Х. Основные формулы и данные по теплообмену для инженеров: справочник / Пер. с англ. / Х. Уонг. – М.: Атомиздат, 1979. – 216 с.
39. Степанов, К.Л. Тепловое излучение взрыва: Оценка риска термического поражения людей и возникновения пожаров / К.Л. Степанов, Л.К. Станчиц, Ю.А. Станкевич // *Вестн. Команд.-инженер. ин-та МЧС Республики Беларусь*. – 2011. – № 1(13). – С. 31–45.
40. Гоман, П.Н. Аналитическое решение задачи по определению уровня тепловой нагрузки от цилиндрического фронта пламени лесного пожара / П.Н. Гоман // *Проблемы обеспечения безопасности людей при пожаре и взрыве: материалы IV Междунар. заочн. науч.-практ. конф., Минск, 22 декабря 2017 г. / Университет гражданской защиты МЧС Беларуси; редкол.: И.И. Полевцова [и др.]*. – Минск, 2017. – С. 54–59.

**Моделирование процессов возникновения и распространения лесного
низового пожара с оценкой уровня тепловой нагрузки от фронта пламени**

**Modeling of the processes of the occurrence and spread of forest groundfire
with the estimation of the level of flame front heat load**

Ласута Геннадий Федорович

кандидат сельскохозяйственных наук

Министерство по чрезвычайным ситуациям
Республики Беларусь, заместитель Министра

Адрес: 220030, г. Минск,
ул. Революционная, 5

Gennadiy F. Lasuta

PhD in Agricultural Science

Ministry of Emergency Situations of the Republic
of Belarus, Deputy Minister

Address: 220118, Belarus, Minsk,
ul. Revolyutsionnaya, 5

Гоман Павел Николаевич

кандидат технических наук, доцент

Государственное учреждение образования
«Университет гражданской защиты МЧС
Беларуси», кафедра промышленной
безопасности, доцент

Адрес: 220118, Беларусь, г. Минск,
ул. Машиностроителей, 25
e-mail: g_pn83@mail.ru

Pavel N. Homan

PhD in Technical Science, Associate Professor

The State Educational Establishment «University
of Civil Protection of the Ministry for Emergency
Situations of the Republic of Belarus», Chair
of Industrial Safety, Associate Professor

Address: 220118, Belarus, Minsk,
ul. Mashinostroiteley, 25
e-mail: g_pn83@mail.ru

MODELING OF THE PROCESSES OF THE OCCURRENCE AND SPREAD OF FOREST GROUND FIRE WITH THE ESTIMATION OF THE LEVEL OF FLAME FRONT HEAT LOAD

Lasuta G.F., Homan P.N.

Purpose. The article is devoted to the study of the processes of occurrence and spread of forest ground fires in order to predict the level of heat load from the flame front and improve forest fire prevention measures. The object of the study is a forest ground fire. The subject of the study are the patterns of occurrence and spread of forest ground fire.

Methods. A combination of experimental and analytical methods for investigating the processes of the emergence and spread of forest ground fires was used, the analysis of the obtained results was carried out and compared with the data of a full-scale experiment.

Findings. Experimental data on flame temperature at burning of ground fuel combustible material were obtained, as well as the estimates of the heat load levels realized under conditions of forest ground fire during the formation of large-scale cylindrical flame fronts, which are important for the theory of forest fires. It has been established that the temperature of the flame of a developed fire during the burning of ground cover of coniferous plantations containing moss, lichen, needles, foliage, bark, small branches reaches 1070 K, which is lower than the burning temperature of wood. It was revealed that under conditions of low intensity ground fire a flame front up to 1 m high is formed, unable to ignite ground cover, located behind standard fire barriers in the form of a 1.4 m wide mineralized strip. It was established that at high intensive forest fires with the flame front formation of a cylindrical shape with a height of up to 10 m and the diameter of up to 20 m, the level of heat exposure near the flame front can reach 26 kW/m².

Application field of research. The results can be used by emergency bodies and units to predict the conditions of occurrence and spread of forest fires.

Conclusions. As a result of the research the regularities of the occurrence and spread of ground fires in natural ecosystems of the temperate climate zone were established. An analytical solution has been obtained that makes it possible to predict the level of heat load from a cylindrical flame front, often realized in conditions of ground forest fires. The methods of full-scale and laboratory modeling revealed patterns of heating of combustible forest material when exposed to thermal radiation from the flame front.

Keywords: forest ground fire, forest combustible material, flame front, heat radiation, burning.

(The date of submitting: April 2, 2019)

REFERENCES

1. *Krupneyshie lesnye pozhary v mire* [Dos'e The largest forest fires in the world. Dossier], available at: <https://tass.ru/info/5397861> (accessed: February 26, 2019). (rus)
2. *V Kalifornii lokalizovan prirodnyy pozhar* [Wildfire localized in California], available at: <https://ru.euronews.com/2018/11/25/california-camp-fire-contained> (accessed: February 26, 2019). (rus)
3. Bogorad V.I., Litvinskaya T.V., Shevchenko I.A., Dybach A.M., Slepchenko A.Yu. Radiatsionnye posledstviya pozhara v zone otchuzhdeniya Chernobyl'skoy AES [Radiation effects of fire in the exclusion zone of the Chernobyl nuclear power plant]. *Yadernaya i radiatsionnaya bezopasnost'*, 2016. Iss. 1(69). Pp. 64–68. (rus)
4. *V Chernobyl'skoy zone otchuzhdeniya vnov' vznik pozhar* [In the Chernobyl exclusion zone re-emerged fire], available at: <https://www.interfax.ru/world/616303> (accessed: February 26, 2019). (rus)
5. *Lesnye pozhary i ploshchad', proydennaya lesnymi pozharami* [Forest fires and area covered by forest fires], available at: <http://www.belstat.gov.by/ofitsialnaya-statistika/realny-sector-ekonomiki/selskoehozyaystvo/lesnoe-khozyaystvo/godovye-dannye/lesnye-pozhary-i-ploshchad-proydennaya-lesnymi-pozharami/>. (accessed: March 27, 2019). (rus)
6. Usenya V.V. *Lesnye pozhary, posledstviya i bor'ba s nimi* [Forest fires and their consequences]: tutorial. Gomel: Institut lesa NAN Belarusi, 2002. 206 p. (rus)
7. Gusev V.G. *Fiziko-matematicheskie modeli rasprostraneniya pozharov i protivopozharnye bar'ery v sosnovykh lesakh* [Physical and mathematical models of the spread of fires and fire barriers in pine forests]: tutorial. Saint Petersburg: NII lesnogo khozyaystva, 2005. 200 p. (rus)

8. Grishin A.M. *Matematicheskie modeli lesnykh pozharov* [Mathematical models of forest fires]: tutorial. Tomsk: Tomsk State University, 1981. 112 p. (rus)
9. Dorrer G.A. *Dinamika lesnykh pozharov* [Dynamics of forest fires]: tutorial. Novosibirsk: Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 2008. 404 p. (rus)
10. Artsybashev E.S. *Lesnye pozhary i bor'ba s nimi* [Forest fires and fighting against them]: tutorial. Moscow: Lesnaya promyshlennost', 1974. 152 p. (rus)
11. Ovsyannikov I.V. *Protivopozharnoe ustroystvo lesov* [Fireproof forest facilities]: tutorial. Moscow: Lesnaya promyshlennost', 1978. 112 p. (rus)
12. Kuznetsov G.V., Baranovskiy N.V. *Prognoz vozniknoveniya lesnykh pozharov i ikh ekologicheskikh posledstviy* [Forecast of forest fires and their environmental consequences]: tutorial. Novosibirsk: Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 2009. 301 p. (rus)
13. Khodakov V.E., Zharikova M.V. *Lesnye pozhary: metody issledovaniya* [Forest fires: research methods]: tutorial. Kherson: Grin' D.S., 2011. 470 p. (rus)
14. Ford R. *Investigation of Wildfires*: tutorial. Bend: Maverick Publications, 1995. 176 p.
15. Weber R. Modelling fire spread through fuel beds. *Progress in Energy and Combustion Science*, 1991. Vol. 17. Pp. 62–82.
16. Dupuy J., Larini M. Fire spread through a porous forest fuel bed: A radiative and convective model including fire-induced flow effects. *Int. J. Wildland Fire*, 1999. Vol. 9, No. 3. Pp. 155–172.
17. McCaw W. *Predicting fire spread in Western Australia mallee-heath shrubland*. PhD sci. diss. Synopsis. University of New South Wales, Canberra, Australia, 1998. 256 p.
18. Babrauskas V. *Ignition Handbook*: tutorial. Issaquah: Fire Science Publishers, 2003. 1118 p.
19. Linn R. *A transport model for prediction of wildfire behaviour*. PhD sci. diss., New Mexico State University, Las Cruces, 1997. 195 p.
20. Albin F., Alexander M., Cruz M. A mathematical model for predicting the maximum potential spotting distance from a crown fire. *Int. J. Wildland Fire*, 2012. No. 21. Pp. 609–627.
21. Morvan D. Physical phenomena and length scales governing the behaviour of wildfires: a case for physical modelling. *Fire Technol*, 2011. No. 47. Pp. 437–460.
22. Mell W., Jenkins M.A., Gould J., Cheney P. A physics-based approach to modelling grassland fires. *Int. J. Wildland Fire*, 2007. No. 16. Pp. 1–22.
23. Sun L., Zhou X., Mahalingam S., Weise D.R. Comparison of burning characteristics of live and dead chaparral fuels. *Combust. Flame*, 2006. No. 144. Pp. 349–359.
24. Sullivan A.L. Wildland surface fire spread modelling, 1990–2007. 1: physical and quasi-physical models. *Int. J. Wildland Fire*, 2009. No. 18. Pp. 349–368.
25. Chuah K.H., Kushida G. The prediction of flame heights and flame shapes of small fire whirls. *Proc. Combust. Inst.*, 2007. No. 31. Pp. 2599–2606.
26. Battaglia F., McGrattan K., Rehm R., Baum H. Simulating fire whirls. *Combust. Theory Model.*, 2000. No. 4. Pp. 123–138.
27. Nelson R.M. Re-analysis of wind and slope effects on flame characteristics of Mediterranean shrub fires. *Int. J. Wildland Fire*, 2015. No. 24. Pp. 1001–1007.
28. Lei J., Liu N., Zhang L., Chen H., Shu L., Chen P., et al. Experimental research on combustion dynamics of medium-scale fire whirl. *Proc. Combust. Inst.*, 2011. No. 33. Pp. 2407–2415.
29. Morvan D. Numerical study of the behaviour of a surface fire propagating through a firebreak built in a Mediterranean shrub layer. *Fire Saf. J.*, 2015. No. 71. Pp. 34–48.
30. Gavrilov K., Accary G., Morvan D., Lyubimov D., Méradji S., Bessonov O. Numerical simulation of coherent structures over plant canopy. *Flow, Turbul. Combust.*, 2011. No. 86. Pp. 89–111.
31. 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 combustion process and the spread of fire in a forest ground fire]. *Tekhnologii tekhnosfernoy bezopasnosti: Internet-zhurnal*, 2011. No. 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: February 16, 2019). (rus)
32. Goman P.N. Otsenka sposobnosti nazemnogo lesnogo goryuchego materiala k vosplameneniyu i podderzhaniyu protsessa goreniya po svoey poverkhnosti [Assessment of the ability of terrestrial fuel combustible material to ignite and maintain the combustion process on its surface]. *Journal of Civil Protection*, 2018. Vol. 2, No. 4. Pp. 446–454.

33. Sobol' V.R., Goman P.N., Yanut' V.I. O vliyaniy formy protyazhennogo teplovogo istochnika na plotnost' luchistogo potoka energii [On the influence of the shape of an extended heat source on the density of the radiant energy flux]. *Vesti BDPU. Ser. III, Fizika. Matematika. Infarmatyka. Biyalogiya. Geografiya*, 2010. No. 4. Pp. 3–9.
34. *Materialy stroitel'nye. Metod ispytaniya na vosplamnyaemost': GOST 30402-96* [Building materials. Flammability Test Method. Interstate standard 30402-96]. Affirmed March 30, 1997. Minsk: Ministry of Architecture and Construction of the Republic of Belarus, 1997. 27 p. (rus)
35. Sobol' V.R., Goman P.N., Yanut' V.I. K voprosu o prostranstvennom raspredelenii intensivnosti luchistogo potoka energii ot istochnika bol'shoy ploshchadi [To the question of the spatial distribution of the intensity of the radiant flux of energy from a large area source]. *Chrezvychaynye situatsii: obrazovanie i nauka*, 2011. No. 2(6). Pp. 116–124.
36. *Sistema standartov bezopasnosti truda. Pozharnaya bezopasnost'. Obshchie trebovaniya: GOST 12.1.004-91* [Occupational safety standards system. Fire safety. General requirements. Interstate standard 12.1.004-91] Affirmed July 01, 1992. Moscow: State Committee for Standardization, 1992. 80 p. (rus)
37. Cruz M.G. *Ignition of crown fuels above a spreading surface fire*. PhD sci. diss. University of Montana, Missoula, 2004. 126 p.
38. Uong Kh. *Osnovnye formuly i dannye po teploobmenu dlya inzhenerov: per. s angl. Spravochnik* [Basic formulas and data on heat transfer for engineers: translation from English. Directory]: tutorial. Moscow: Atomizdat, 1979. 216 p. (rus)
39. Stepanov K.L., Stanchits L.K., Stankevich Yu.A. Teplovoe izluchenie vzryva: Otsenki riska termicheskogo porazheniya lyudey i vozniknoveniya pozharov. [Heat radiation of an explosion: Estimates of the risk of thermal injury to people and the occurrence of fires]. *Vestnik Komandno-inzhenernogo instituta MChS Respubliki Belarus'*, 2011. No. 1(13). Pp. 31–45.
40. Goman P.N. Analiticheskoe reshenie zadachi po opredeleniyu urovnya teplovoy nagruzki ot tsilindricheskogo fronta plameni lesnogo pozhara [Analytical solution of problems of determining the level of heat load from a cylindrical flame front of a forest fire] *Proc. IV Intern. corresp. scientific-practical conf. «Problems of safety of people in case of fire and explosion», Minsk, December 22, 2017*. University of Civil Protection of the Ministry for Emergency Situations of the Republic of Belarus. Ed. by: I.I. Polevoda [et al.]. Minsk, 2017. Pp. 54–59. (rus).