

УДК 536.468

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЗМЕРОВ ЗАГРАДИТЕЛЬНОЙ ПОЛОСЫ И УДЕЛЬНОГО РАСХОДА ВОДЫ ДЛЯ ЭФФЕКТИВНОЙ ЛОКАЛИЗАЦИИ И ПОЛНОЙ ОСТАНОВКИ ФРОНТА ТИПИЧНОГО НИЗОВОГО ЛЕСНОГО ПОЖАРА

Р. С. Волков, Г. В. Кузнецов, П. А. Стрижак

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
634050 Томск, Россия
E-mails: romanvolkov@tpu.ru, kuznetsovgv@tpu.ru, pavelspa@tpu.ru

Выполнено экспериментальное исследование условий возникновения и характеристик процессов локализации пламенного горения и термического разложения типичных лесных горючих материалов путем создания заградительной полосы в виде увлажненного слоя с фиксированными шириной, длиной, глубиной и заданным объемом удержанной жидкости. Установлены диапазоны значений параметров, при которых обеспечивалось устойчивое подавление пламенного горения и термического разложения лесного горючего материала. Эксперименты проведены для всех основных типов лесных горючих материалов: листьев, хвои, веток, смеси перечисленных материалов. Выполнено прогнозирование необходимых (минимальных) объемов воды и размеров заградительной полосы для гарантированной локализации горения лесных горючих материалов исследованных типов.

Ключевые слова: лесной горючий материал, термическое разложение, пламенное горение, фронт пожара, локализация, подавление, заградительная полоса.

DOI: 10.15372/PMTF20190110

Введение. Процессы зарождения, распространения, локализации и подавления лесных пожаров изучаются на протяжении длительного периода. Основные результаты исследований приведены в работах [1–5]. Нередко в работах указывается на необходимость комплексного фундаментального изучения взаимосвязанных теплообменных процессов в условиях термического разложения, фазовых превращений и химического реагирования [6–11]. Результаты исследований показывают, что современные технологии предотвращения горения лесного массива не всегда эффективны. Например, при сбросе воды с воздушных судов ее расход может достигать 30–50 т за один вылет. Согласно [12–14] при единовременном сбросе таких объемов воды более 90 % жидкости расходуется нерационально (не успевает испариться в зонах газофазного горения и пиролиза материала). Для эффективного тушения лесных пожаров необходимо интенсивное испарение воды (вследствие высокой теплоты парообразования возможно значительное поглощение энергии) в области высокотемпературных продуктов сгорания (в зоне пламенного горения) [14]. Также важную роль играют процессы теплоотвода из зоны горения в аэрозольный поток воды вследствие ее большой теплоемкости. Реализуются три режима подавления типичного пожара [15–17]: уменьшение температуры в зоне горения вследствие интенсивных эндотер-

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (код проекта 18-19-00056).

© Волков Р. С., Кузнецов Г. В., Стрижак П. А., 2019

мических фазовых превращений; вытеснение окислителя (воздуха) и продуктов пиролиза из зоны горения парами воды; блокирование вдува горючего в зону горения формирующейся парогазовой смесью. Существенного синергетического эффекта можно достичь, прежде всего, путем мелкодисперсного дробления (так называемого вторичного измельчения) жидкости при ее движении через высокотемпературные продукты сгорания и термического разложения [15–17].

На основе теоретических [12–14] и экспериментальных [16–18] исследований разработан подход, заключающийся в распределенном во времени и пространстве распылении воды в зону горения. Предложены схемы стадийной подачи порций аэрозоля с каплями различного размера. Первая порция содержит капли с максимальными (например, 1 мм) размерами, последняя — с минимальными (например, 100 мкм). При этом за счет регулирования интервала времен между порциями аэрозоля варьируется расстояние между каплями. В работе [19] показано, что каждая капля оказывает несущественное влияние на прогрев и испарение следующей за ней капли лишь в случае, если расстояние между ними составляет более $(10 \div 12)R_d$. Как следствие, целесообразно распределенное во времени и пространстве распыление воды в зону горения. Для реализации данной технологии необходимы группы воздушных судов (самолетов или вертолетов), сбрасывающих воду с различной высоты с применением специальных распылительных систем. В лабораторных условиях на примере модельных очагов горения показано [16–19], что при реализации такой технологии можно обеспечить практически полное использование (испарение в зоне пожара) сброшенной воды для тушения. В частности, установлено, что каждая последующая капля, движущаяся в зоне горения, испаряется медленнее (на 30–40 %) предыдущих [19]. Как следствие, для интенсификации парообразования в зоне пламенного горения необходимо уменьшать размеры впрыскиваемых капель в каждой следующей порции. При этом следует учитывать, что поток высокотемпературных продуктов сгорания тормозит и уносит капли [16].

В [16–19] экспериментально разработан ряд физических и математических моделей тепломассопереноса и фазовых превращений для прогнозирования необходимого и достаточного количества воды, подаваемой в зону горения с целью эффективного пожаротушения. Установлено, что для тушения лесного пожара с размерами очага горения, например, 5×5 м достаточно приблизительно 16 л, а с размерами 25×25 м — 370 л [18]. В реальных условиях на площади горения лесного массива $500 \div 1000$ м², как правило, выливаются десятки, иногда даже сотни тонн воды. В работе [20] проверены модели [12–14, 18] путем проведения соответствующих натурных, стендовых или полевых испытаний, а также дополнительных лабораторных экспериментов с целью определения минимальных объемов воды, необходимых для подавления термического разложения и горения соответствующих масс типичных лесных горючих материалов (ЛГМ).

Результаты исследований [16–20] позволили сделать вывод, что важным направлением в области пожаротушения является изучение процессов тепломассопереноса в условиях интенсивных фазовых превращений при локализации и подавлении пламенного горения и термического разложения конденсированных веществ на больших площадях путем специализированной подачи воды перед фронтом горения и во фронт. Поскольку в настоящее время отсутствуют достоверные экспериментальные данные о закономерностях процессов тепломассообмена и фазовых превращений при взаимодействии массива капель воды с фронтом горения в условиях, соответствующих, например, типичным лесным пожарам, целесообразно проведение экспериментальных исследований процессов теплопереноса при взаимодействии капельных потоков воды с фронтом горения ЛГМ, а также оценка влияния водного аэрозоля на подавление не только пламенного горения, но и процессов термического разложения типичных ЛГМ. При этом следует изучить условия создания загради-

тельных полос в виде увлажненных слоев материалов для локализации лесных пожаров [21–25].

В [26] проведены исследования на модельных очагах, однако не изучались размеры заградительной полосы (в виде увлажненного слоя ЛГМ перед фронтом горения) с учетом скорости ветра, структуры и основных свойств ЛГМ. Настоящая работа основана на предположении о том, что с использованием результатов экспериментальных исследований можно прогнозировать размеры полос при площадях лесных пожаров, соответствующих начальным условиям зарождения фронтов горения. Проводить исследования на модельных очагах пожаров больших размеров нецелесообразно, так как в этом случае практически невозможно достоверно определить необходимое (минимальное) количество жидкости для создания заградительных полос, которое потребуется одновременно доставить в зону горения лесного массива (натурные и полевые испытания [20–25] показали, что в реальных условиях проявляется влияние дополнительных факторов, которое сложно исключить). В первом приближении достаточно провести эксперименты в лабораторных условиях.

Целью настоящей работы является экспериментальное определение условий локализации модельных очагов низовых лесных пожаров путем создания заградительной полосы с минимальными необходимыми размерами, в качестве которой, как и в [26], рассматривался увлажненный слой ЛГМ перед фронтом горения.

Методика эксперимента. Рассмотрим методику проведения экспериментальных исследований.

Материалы. Как и в работах [20, 26], использовались типичные ЛГМ: листья березы, хвоя сосны, ветки лиственных пород деревьев, смесь перечисленных материалов (листья березы — 25 %, хвоя сосны — 15 %, ветки лиственных пород деревьев — 60 %). Масса навесок составляла 50 г, плотность — 0,01838 г/см³, микропористость (рассчитываемая через плотность частиц материала) хвои сосны в абсолютно сухом состоянии — 0,79, листьев березы — 0,33.

Навески ЛГМ предварительно подвергались сушке в течение 3–5 дней при температуре, приблизительно равной 300 К. Непосредственно перед проведением экспериментов определялась влажность материалов (методом термической сушки). Для этого исследуемый ЛГМ взвешивался и затем помещался в сушильную печь при температуре $T \approx 375$ К на 2 ÷ 3 ч. После сушки навеска охлаждалась и повторно взвешивалась. Относительная влажность ЛГМ определялась по формуле $\gamma = (m_{fw} - m_{fd}) \cdot 100 / m_{fw}$, где m_{fw} , m_{fd} — масса ЛГМ соответственно до и после термической сушки, кг. Для листьев березы получены значения $\gamma = 5 \div 8$ %, для хвои сосны — $\gamma = 7 \div 10$ %, для веток осины — $\gamma = 10 \div 14$ %, для смеси материалов — пропорционально содержанию компонентов.

Материал выкладывался равномерно в металлический поддон (длина 310 мм, ширина 195 мм, глубина 45 мм). На различных уровнях по высоте навески ЛГМ размещались три хромель-алюмелевые (диапазон измеряемых температур 223–1473 К, систематическая погрешность ± 3 К) малоинерционные (время теплового запаздывания менее 0,1 с) термомпары. Термоэлектрические преобразователи располагались на высоте от поверхности раздела ЛГМ — внешняя газовая среда $H = 5, 20, 40$ мм.

Параметры полосы. Результаты экспериментов для очагов горения разных размеров и типов показывают, что локализация фронта пиролиза возможна лишь при совпадении поперечных размеров этого фронта и длины заградительной полосы. В случае если длина полосы была меньше поперечного размера поддона с навеской пиролизующегося материала, фронт термического разложения последнего обходил полосу по сухой поверхности ЛГМ и продолжал распространяться в области неувлажненного материала. Поэтому при анализе необходимых и достаточных условий подавления горения ЛГМ представляет интерес определение размеров заградительной полосы (ширины и глубины).

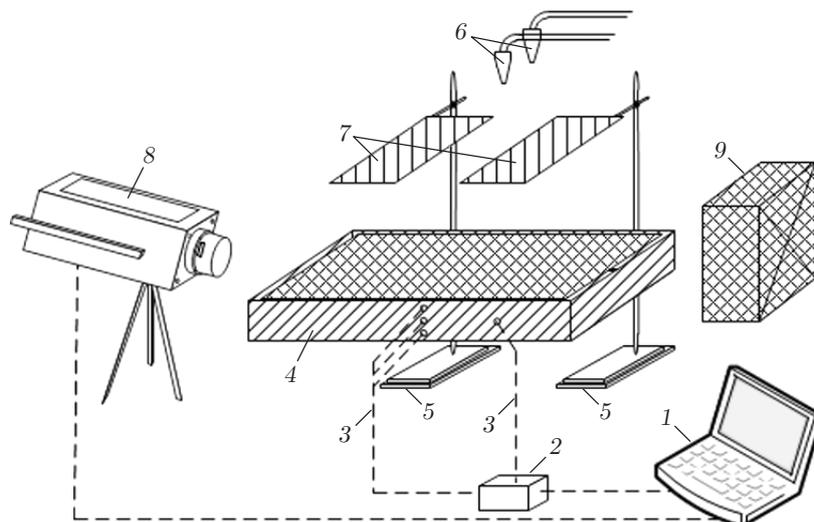


Рис. 1. Схема экспериментального стенда:

1 — рабочая станция, 2 — цифровой измеритель температуры, 3 — термоэлектрические преобразователи, 4 — поддон с ЛГМ, 5 — штатив, 6 — форсунки, 7 — емкость для воды, 8 — высокоскоростная видеокамера, 9 — нагнетатель воздуха

Экспериментальный стенд. Исследование движения фронта горения по поверхности ЛГМ при воздействии на него потока капель воды проводилось на стенде [26], схема которого приведена на рис. 1. При постановке экспериментов основной задачей являлось воспроизведение для рассмотренных ЛГМ значений температуры ($T \geq 780$ К) и тепловых потоков ($q = 0,5 \div 1,5$ кВт/м²), соответствующих горению растительных материалов в условиях продвижения лесных пожаров с умеренной (типичной [1]) скоростью (до 3 м/с).

Схемы распыления жидкости в заградительной полосе. Как и в работе [26], рассмотрены три варианта воздействия аэрозоля на процесс горения ЛГМ (рис. 2).

В первом варианте (см. рис. 2,а) поток капель воды с фиксированными значениями плотности орошения ζ (в каждом сечении) и ширины полосы L создавался заранее. Затем с помощью пьезоэлектрических горелок инициировалось горение ЛГМ. Навеска ЛГМ поджигалась равномерно по всей свободной поверхности. Предполагалось, что процессы пламенного горения и термического разложения ЛГМ прекращаются, если они происходят в зоне воздействия жидкостного аэрозоля. Контролировалось выполнение условия уменьшения температуры ЛГМ до значения, меньшего температуры начала термического разложения (во всех опытах использовалось значение предельной температуры начала пиролиза $T_f \approx 400$ К).

При реализации второго варианта (см. рис. 2,б) обеспечивался подвод воды в виде аэрозольной завесы непосредственно во фронт горения. На первом этапе инициировалось горение ЛГМ. С использованием метода высокоскоростной видеорегистрации контролировалось перемещение фронта горения по поверхности ЛГМ. Генерация капельного потока осуществлялась при достижении фронтом горения положения, соответствующего середине полосы, покрываемой водяной завесой ($0,5L$).

Третий вариант (см. рис. 2,в) является комбинированным (смешанным по способу распыления): вода распыляется одновременно перед фронтом и во фронт горения ЛГМ. В этом случае подвод жидкостного аэрозоля осуществляется в момент достижения пламенем передней кромки зоны предварительного воздействия капельного потока на ЛГМ перед движущимся фронтом горения ЛГМ.

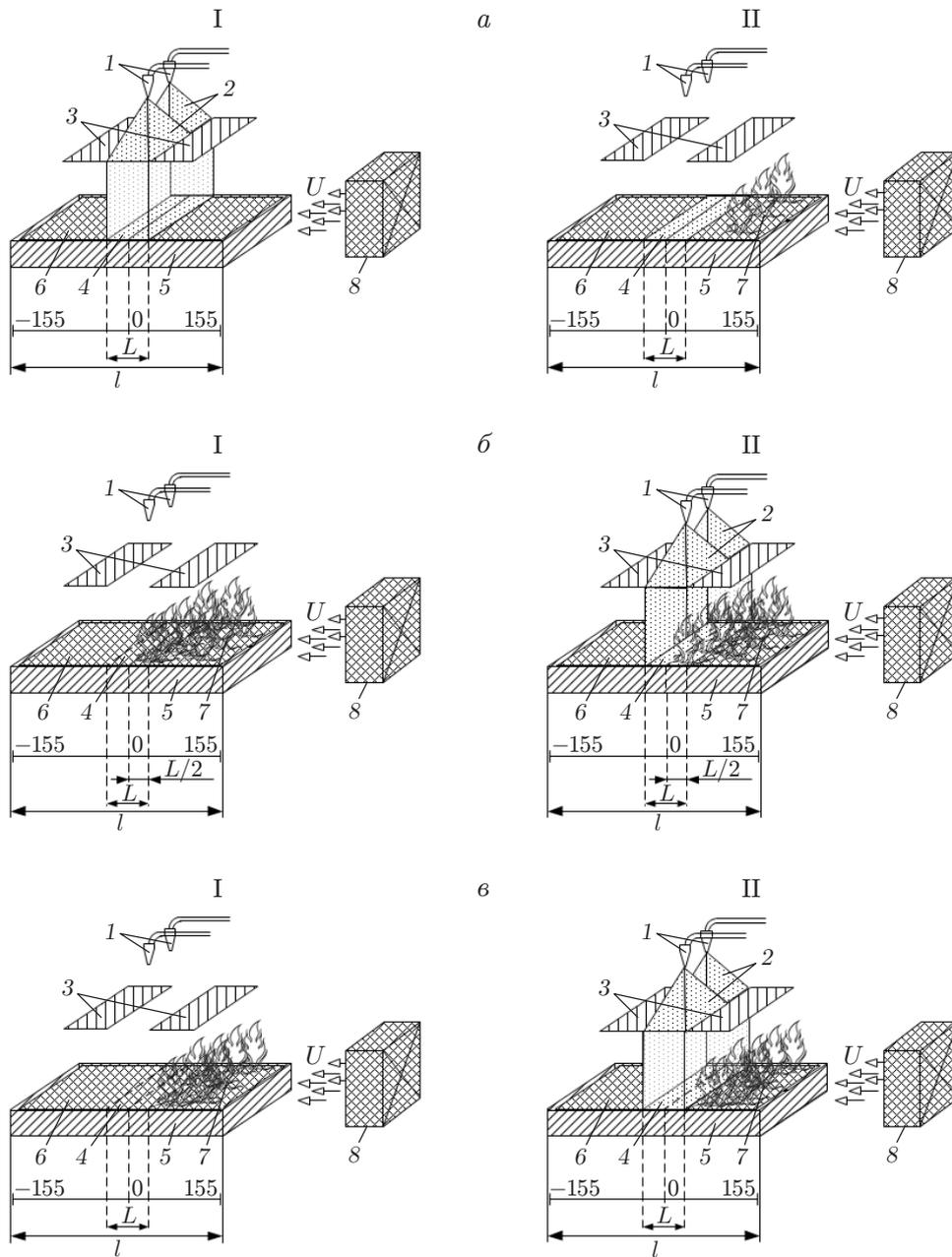


Рис. 2. Варианты распыления воды [26]:

a — перед фронтом, *б* — во фронте, *в* — комбинированный; I — первый этап, II — второй этап; 1 — форсунки, 2 — водяной аэрозоль, 3 — емкости для воды, 4 — загрязительная полоса, 5 — металлический поддон, 6 — ЛГМ, 7 — пламя, 8 — нагнетатель воздуха

Таблица 1

Средние значения интенсивности орошения
при различных значениях скорости движения воздушного потока [26]

Вариант взаимодействия аэрозоля с ЛГМ	U , м/с	ψ , л/(м ² ·с)
Первый	0,5–2,5	0,0500
Второй и третий	0,5	0,0500
	1,5	0,0375
	2,5	0,0350

Учет дополнительных факторов. Результаты экспериментов показывают, что помимо размеров заградительной полосы, типа и свойств ЛГМ, а также температуры во фронте горения определяющее влияние на условия локализации и предотвращения пиролиза могут оказывать скорость ветра и плотность или интенсивность орошения (удельный расход жидкости).

Как правило, скорость реального воздушного потока не превышает $2 \div 3$ м/с [26], поэтому в экспериментах данный параметр варьировался в ограниченном диапазоне (до 3 м/с). Направление движения потока воздуха совпадает с направлением перемещения фронта горения. Поток воздуха создавался с помощью канального нагнетателя осевого типа с семью лопастями (напряжение 220–240 В, частота 50 Гц, мощность 22 Вт, расход воздуха 320 м³/ч, класс водонепроницаемости IPX2). Скорость потока воздуха определялась с помощью анемометра по методике [26].

С использованием результатов экспериментов [20, 26] принято осредненное значение интенсивности орошения ЛГМ ψ в зависимости от скорости воздушного потока. Для первого варианта воздействия на ЛГМ водного аэрозоля значение ψ принято равным $\psi = 0,05$ л/(м²·с). Значения ψ для второго и третьего вариантов зависят от скорости воздушного потока U . В табл. 1 приведены средние значения ψ для исследованных вариантов взаимодействия воды и ЛГМ при различных значениях скорости U .

Результаты исследования и их обсуждение. На основе экспериментальных данных установлены следующие закономерности.

Основные характеристики процесса движения воды через зону ЛГМ. Результаты проведенных экспериментов показывают, что характеристики процесса движения воды через слой навески типичных ЛГМ при изменении условий существенно различаются. Значительное влияние на эти характеристики оказывают насыпная плотность материала и процессы термического разложения, испарения, фильтрации, приводящие к уплотнению или в определенных условиях, наоборот, увеличению пористости ЛГМ.

На рис. 3, 4 приведены зависимости глубины проникания жидкости в слой навески от времени, полученные с использованием средств высокоскоростной видеорегистрации (камеры с частотой кадров до 100 000 с⁻¹) и специальных алгоритмов слежения за динамическими объектами в программном комплексе “Тема Automotive” [27]. В случае интенсивного термического разложения для слежения за фронтом движения жидкости вглубь навески применялись показания термопар [26, 27].

На рис. 3 можно наблюдать следующие закономерности. При идентичных начальных условиях (масса, схема распыления, дисперсность аэрозоля и др.) глубина проникания воды в слои хвои и листьев значительно (в несколько раз) различается. Чем больше время распыления и объем использованной воды, тем существеннее различаются значения h_m в опытах с хвоей и листьями. Это обусловлено тем, что размеры хвоинок в десятки раз меньше аналогичных размеров листьев. Капли воды растекались по поверхности таких

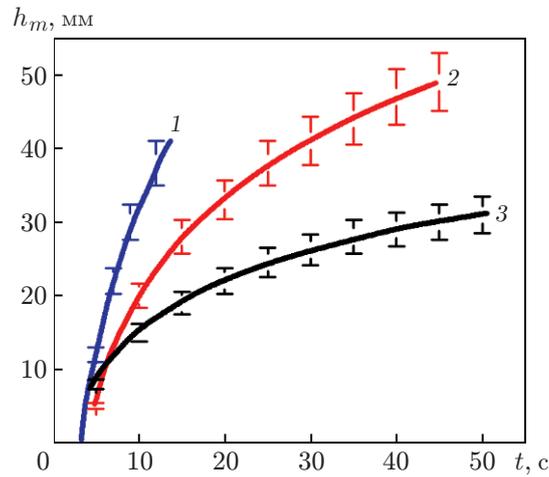


Рис. 3. Зависимость глубины проникания воды в слой навески от времени ее распыления:

1 — хвоя сосны, 2 — смесь ЛГМ, 3 — листья березы

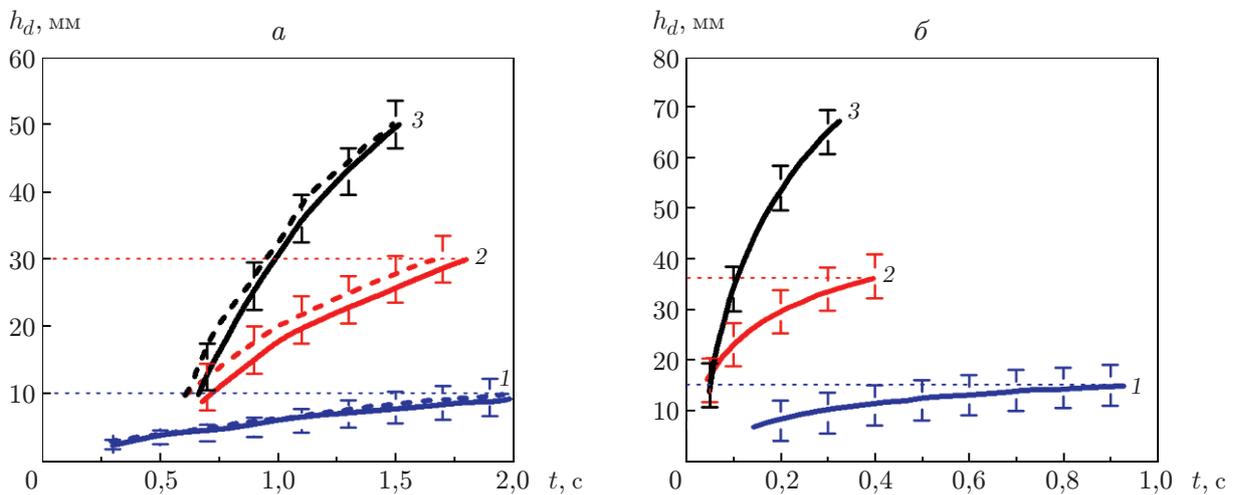


Рис. 4. Зависимости глубины проникания одиночной капли в слой навески из хвои от времени распыления, полученные с использованием термопарных измерений (а) и высокоскоростной видеорегистрации (б) при различных объемах капли:

1 — $V_d = 90$ мкл, 2 — $V_d = 200$ мкл, 3 — $V_d = 800$ мкл; сплошные линии — в отсутствие пиролиза, штриховые — при наличии пиролиза

элементов и удерживались на них в различных объемах. При использовании листьев относительное сопротивление движению капель жидкости через навеску было существенно больше. Основная масса подаваемой к поверхности ЛГМ воды удерживалась в приповерхностном слое либо накапливалась на поверхности материала и медленно проникала в приповерхностные слои. Таким образом, можно сделать вывод об интенсивном пропитывании (увлажнении) лишь приповерхностных слоев листьев, проникании значительной доли воды в глубинные слои хвои и средних значениях h_m для смеси хвои, листьев, веток.

Процесс пиролиза оказывает незначительное влияние на скорость проникания малых объемов жидкости через навеску материала. Однако чем больше объем воды, тем существеннее влияние процесса термического разложения на глубину проникания. Это проявляется в том, что скорости движения воды по пиролизующимся слоям больше, чем при отсутствии термического разложения, вследствие того что в процессе пиролиза увеличивается пористость навески материала и в глубинные слои проникает большое количество жидкости. Кроме того, в экспериментах регистрировалось уплотнение слоев материала вследствие интенсивного термического разложения и давления воды сверху, что способствовало ускорению движения воды через навеску.

На рис. 4,б видно, что чем выше объем поступающей в ЛГМ воды (или время распыления жидкости при постоянном удельном расходе), тем значительнее увеличение значений h_d .

В отсутствие интенсивного задымления (последнее регистрировалось вследствие пиролиза уплотненного ЛГМ) контроль процессов движения капель жидкости в навеске можно проводить с использованием как средств высокоскоростной видеорегистрации, так и термопарных измерений (резкое уменьшение температуры на одной из термопар свидетельствовало о том, что движущиеся капли воды достигли последней). Сравнение значений h_d , полученных с использованием этих двух методик, показывает, что они удовлетворительно согласуются (в среднем различие составляет не более 20 %).

Основные характеристики процессов подавления пламенного горения и термического разложения ЛГМ. Экспериментально определены ширина и глубина заградительной полосы, необходимые для локализации горения исследованных ЛГМ при различных вариантах распыления воды (рис. 5). Как и в работе [26], установлено, что наиболее эффективные (по времени подавления горения и использованному объему) условия, при которых локализуется горение материалов, могут быть достигнуты при использовании третьего (комбинированного) варианта, обеспечивающего распыление воды как во фронте (по кромке пожара) горения, так и перед ним. Это способствует интенсификации процессов подавления пламенного горения и термического разложения материала при всех рассмотренных вариантах распыления воды.

В опытах с листьями эффективная локализация достигается при увлажнении достаточно тонкого приповерхностного слоя навески в области заградительной полосы (соответственно требуется меньший объем воды). В случае хвои локализовать горение можно только при увлажнении в заградительной полосе всего объема материала (т. е. глубина заградительной полосы должна соответствовать толщине навески) (см. рис. 5). Ветки имеют большую теплоту сгорания и длительность пиролиза и как следствие большее тепловыделение, поэтому для эффективной локализации пламенного горения и пиролиза веток необходимо увеличивать время распыления воды в полосе (соответственно, и объем).

В опытах со смесью ЛГМ вследствие наличия хвои регистрировались аналогичные закономерности: активное термическое разложение реализовывалось в слое ЛГМ под заградительной полосой (увлажненным материалом) и за ней, если она не была пропитана (смочена) водой по всей глубине. Это обусловлено тем, что характеристики движения фронтов горения листьев и хвои различаются. В частности, результаты измерений с помо-

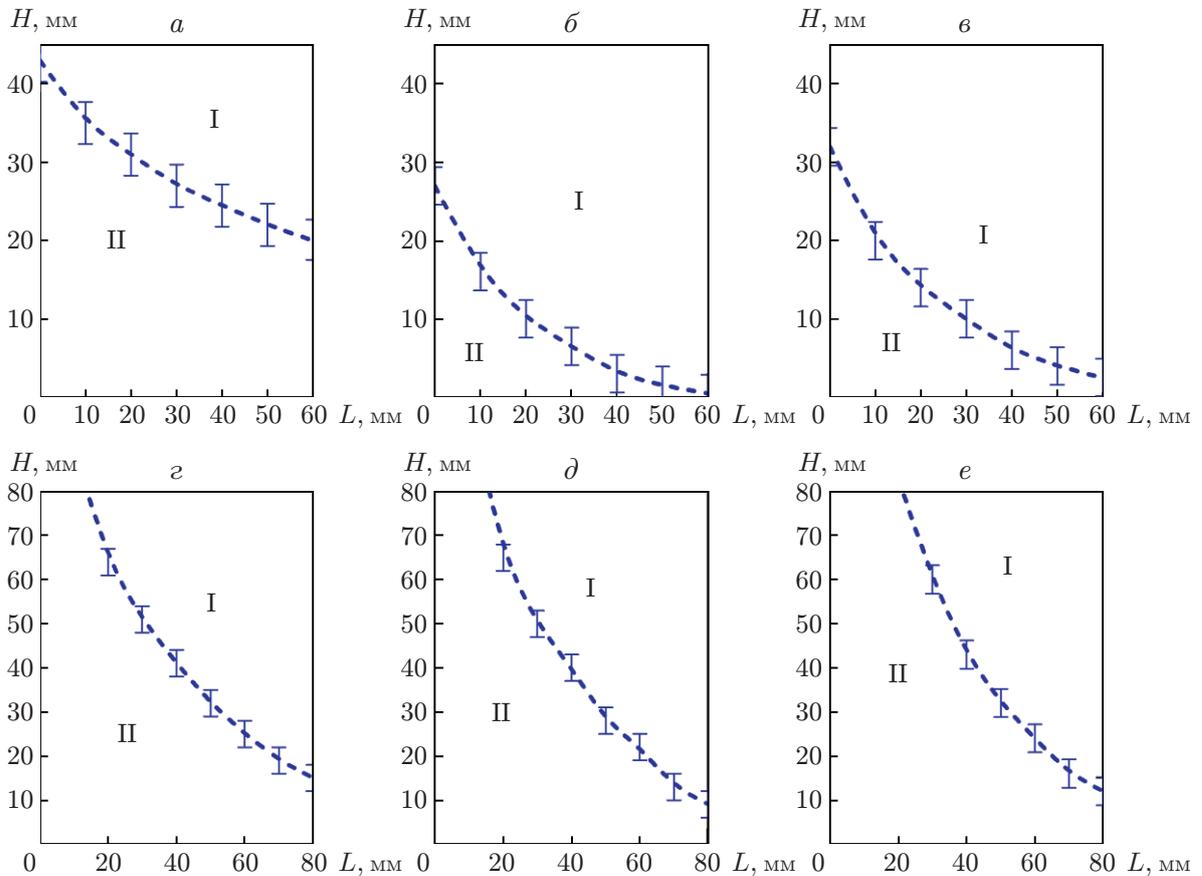


Рис. 5. Области локализации пожара (I) и области горения (II) при средней скорости ветра 1,3 м/с:

a–в — листья березы, *г–е* — хвоя сосны; *a, г* — первый вариант, *б, д* — второй вариант, *в, е* — третий вариант распыления воды в заградительную полосу; штриховая линия — граница областей I, II

щью термопар и высокоскоростной видеорегистрации показывают, что термическое разложение хвои происходит с быстрым движением фронтов пиролиза и пламенного горения не только по поверхности насыпного слоя в направлении, совпадающем с направлением движения потока воздуха, но и в глубинных слоях. В ряде экспериментов хвоя интенсивно термически разлагалась по всей глубине насыпного слоя до достижения фронтом горения заградительной водной полосы. Поэтому интенсивный пиролиз хвои происходил как в приповерхностных, так и в глубинных слоях навески. Очевидно, это обусловлено тем, что хвоя представляет собой высокопористый горючий материал. Как следствие, по всей глубине насыпного слоя обеспечиваются условия для интенсивного пиролиза. В экспериментах с листвой интенсивное термическое разложение регистрировалось лишь в приповерхностных слоях. Фронт пламенного горения достигал заградительной полосы с активным пиролизом лишь в приповерхностном слое. Поэтому для замедления распространения фронтов пламенного горения и термического разложения ЛГМ в случае хвои необходимо увлажнять навеску по всей толщине (т. е. увеличивать глубину заградительной полосы), а в случае листьев достаточно увлажнения относительно тонкого (20 ÷ 30 % толщины навески) приповерхностного слоя (см. рис. 5).

Определение ширины и глубины заградительной полосы с учетом скорости ветра. Установлены диапазоны предельных значений ширины и глубины заградительной водной

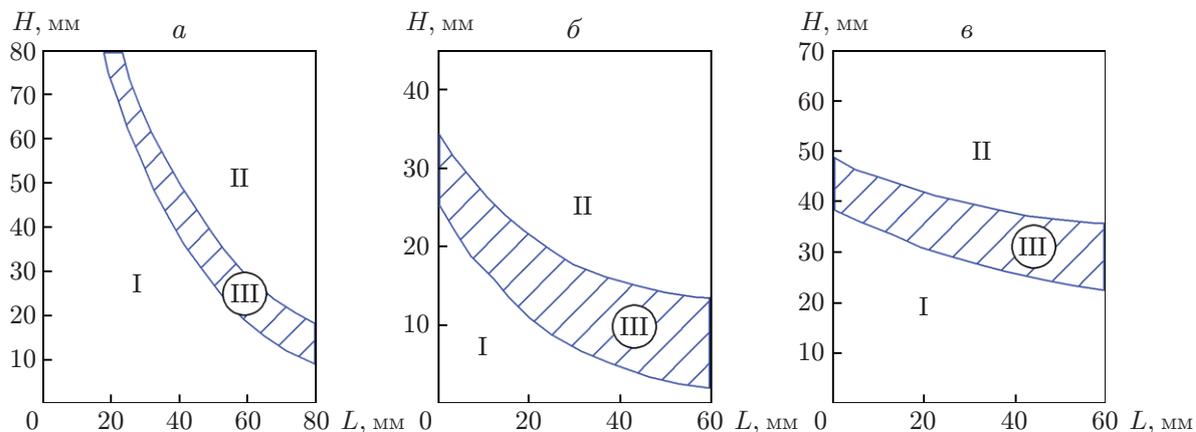


Рис. 6. Область горения (I), область локализации и предотвращения пламенного горения и пиролиза материала (II) и переходная область (III) при скорости ветра $0,5 \div 3,0$ м/с при распылении воды в заградительную полосу в соответствии с третьим вариантом:

a — листья березы, *б* — хвоя сосны, *в* — смесь ЛГМ

полосы для исследованных материалов при различных скоростях воздушного потока, имитирующего ветер (рис. 6). На рис. 6 показаны три области изменения параметров полосы, соответствующие прекращению или продолжению движения фронта горения, а также переходным условиям (с определенной вероятностью происходила локализация горения или фронт пиролиза преодолевал заградительную полосу).

Результаты проведенных экспериментов показывают, что определяющее влияние на локализацию горения практически всех исследованных материалов (листьев — в меньшей мере) оказывает необходимая (минимальная) глубина заградительной полосы, которая, в свою очередь, зависит от объема выливаемой воды и ширины полосы. В случае листьев регистрировалось растекание воды по поверхности навески. Таким образом, при идентичных начальных объемах воды ширина полосы увеличивалась, а глубина была меньше.

На рис. 7–9 приведены зависимости интенсивности и абсолютной плотности орошения от объема воды и ширины навески, а также от ширины заградительной полосы. Видно, что при формировании заградительных полос в соответствии с наиболее безопасным первым вариантом время доставки воды в зону пиролиза не оказывает влияния на условия локализации. Это обусловлено тем, что заградительная полоса в виде увлажненного слоя материала формируется заранее, т. е. перед фронтом горения в условиях умеренных (соответствующих окружающему воздуху) температур. В таких условиях пиролиз не реализуется. Поэтому основное влияние оказывают объем воды и площадь поверхности заградительной полосы. Следовательно, при выборе технологических параметров вместо интенсивности орошения целесообразно использовать плотность орошения, или удельный расход. Следует также отметить, что путем варьирования объема и массы пиролизующегося материала установлена целесообразность локализации и предотвращения пиролиза ЛГМ в малой области, граничащей с заградительной полосой. Поэтому, несмотря на увеличение в несколько раз объема пиролизующегося материала, минимальные размеры заградительной полосы и плотность орошения практически не меняются (см. рис. 8, *a*).

При экстраполяции экспериментальных данных на более широкие диапазоны параметров L и H получены необходимые и достаточные значения глубины и ширины заградительной полосы для локализации и последующего подавления пламенного горения и термического разложения исследованных ЛГМ при фиксированном объеме использованной

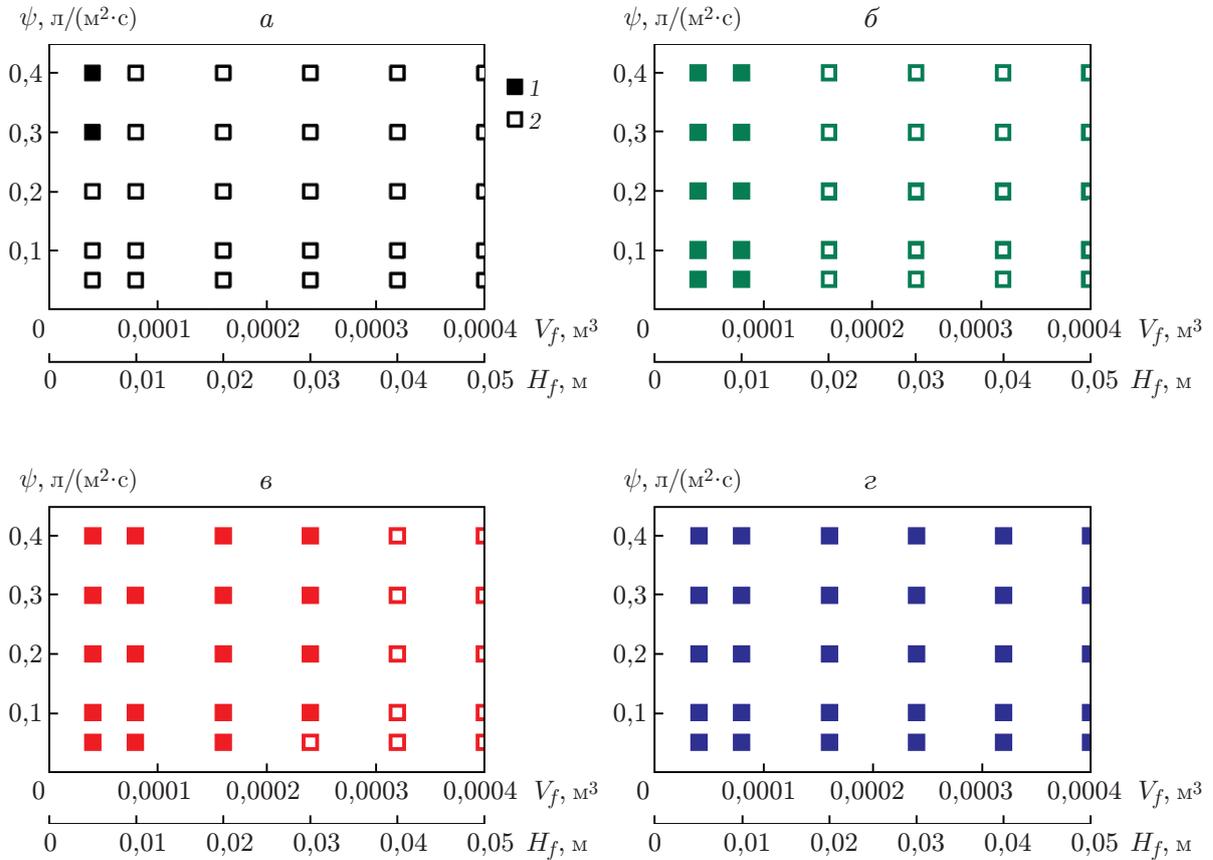


Рис. 7. Зависимости интенсивности орошения от объема и ширины навески термически разлагающегося ЛГМ (хвоя сосны) при $L \approx 0,06$ м, $U \approx 2$ м/с и различных значениях абсолютной плотности орошения:
a — $\zeta = 0,40$ л/м², *б* — $\zeta = 0,45$ л/м², *в* — $\zeta = 0,50$ л/м², *г* — $\zeta = 0,55$ л/м²;
 1 — локализация и предотвращение пламенного горения и пиролиза материала, 2 — распространение фронта горения

воды (табл. 2). При прогностических оценках принималось, что протяженность полосы в виде увлажненного слоя ЛГМ равна поперечному размеру фронта термического разложения материала, а эффективная плотность орошения (удельный расход) выбиралась с учетом полученных в экспериментах результатов (см. рис. 7, 8).

Из табл. 2 следует, что эффективные условия локализации процесса горения распространенных типов ЛГМ обеспечиваются при небольших объемах воды и размерах полосы. Актуальной задачей является проведение полевых испытаний на специализированных полигонах МЧС России для экспериментального обоснования приведенных в табл. 2 значений основных параметров заградительной полосы для локализации горения соответствующих ЛГМ. Полученные результаты исследований и данные работ [24–36] позволяют прогнозировать условия, при которых происходит локализация пламенного горения и пиролиза большой группы ЛГМ при различных размерах очагов горения.

Выводы. Результаты проведенных экспериментов с использованием трех вариантов распыления воды перед фронтом горения и во фронте модельного низового лесного пожара позволили сделать следующие выводы.

Наиболее рациональным с точки зрения затраченного объема воды и времени подавления горения следует считать распыление воды по кромке очага. Из анализа значений

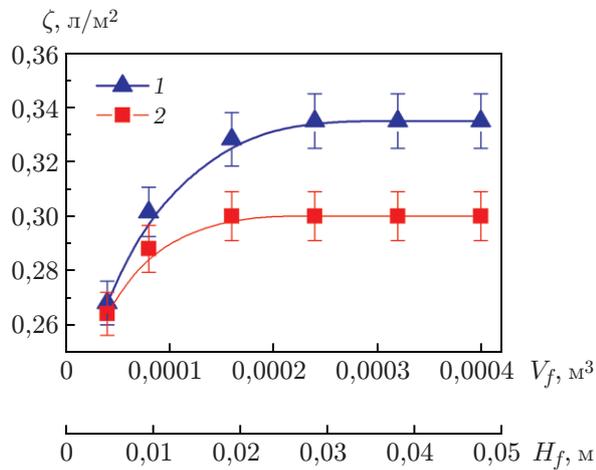


Рис. 8

Рис. 8. Зависимости абсолютной плотности орошения от объема и ширины навески термически разлагающегося ЛГМ при $L \approx 0,06$ м, $U \approx 2$ м/с:

1 — хвоя сосны, 2 — листья березы

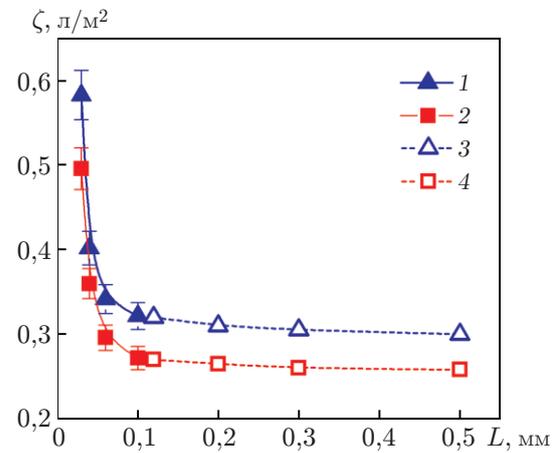


Рис. 9

Рис. 9. Зависимость абсолютной плотности орошения от ширины заградительной полосы при $U \approx 2$ м/с:

1, 3 — хвоя, 2, 4 — листья; 1, 2 — эксперимент, 3, 4 — расчет

Таблица 2

Прогнозируемые минимальные значения объема воды, глубины и ширины заградительной полосы для локализации горения типичных ЛГМ

Тип ЛГМ	Объем навески ЛГМ перед полосой, м ³	Площадь поверхности ЛГМ перед полосой, м ²	Минимальный объем воды в полосе, л	Минимальная ширина полосы, м	Минимальная глубина полосы, м
Хвоя	0,035	0,5	0,125	0,30	0,050
	0,070	1,0	0,250	0,45	0,040
	0,280	4,0	0,380	0,65	0,025
	0,700	10,0	0,675	0,70	0,023
Листья	0,035	0,5	0,115	0,35	0,020
	0,070	1,0	0,190	0,40	0,018
	0,280	4,0	0,325	0,45	0,016
	0,700	10,0	0,430	0,50	0,015
Смесь ЛГМ	0,035	0,5	0,240	0,40	0,035
	0,070	1,0	0,275	0,60	0,033
	0,280	4,0	0,410	0,70	0,031
	0,700	10,0	0,750	0,75	0,030

времени локализации очагов горения и объема полезно израсходованной (испарившейся) воды следует, что на торможение до полного прекращения распространения фронта горения наибольшее влияние оказывают глубина H и ширина заградительной полосы L . В системе координат $H(L)$ определены области, соответствующие эффективной локализации и последующему подавлению горения ЛГМ.

Структура лесного горючего материала определяет эффективность применения того или иного варианта подачи воды в зону горения. Это обусловлено значительным различием интегральных характеристик процессов движения воды через слои хвои, листьев и их смеси. Процессы пламенного горения различных видов ЛГМ локализуются практически одинаково эффективно, процессы термического разложения протекают с существенными отличиями.

Скорость ветра определяет скорость движения фронта горения ЛГМ. В проведенных опытах этот параметр варьировался в диапазоне значений, возможных в лабораторных условиях. На практике значения скорости ветра могут быть больше.

В настоящей работе создана необходимая экспериментальная база для прогнозирования условий локализации очагов горения лесных массивов.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Доррер Г. А.** Математические модели динамики лесных пожаров. М.: Лесн. пром-сть, 1979.
2. **Гришин А. М.** Математические модели лесных пожаров. Томск: Изд-во Том. гос. ун-та, 1981.
3. **Барановский Н. В.** Прогноз возникновения лесных пожаров и их экологических последствий / Н. В. Барановский, Г. В. Кузнецов. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2009.
4. **Ходаков В. Е.** Лесные пожары: методы исследования / В. Е. Ходаков, М. В. Жарикова. Херсон: Гринь Д. С., 2011.
5. **Высокоморная О. В.** Испарение и трансформация капель и больших массивов жидкости при движении через высокотемпературные газы / О. В. Высокоморная, Г. В. Кузнецов, П. А. Стрижак. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2016.
6. **Grishin A. M., Shipulina O. V.** Mathematical model for spread of crown fires in homogeneous forests and along openings // *Combust., Explos., Shock Waves*. 2002. V. 38, N 6. P. 622–632.
7. **Korobeinichev O. P., Shmakov A. G., Chernov A. A., et al.** Fire suppression by aerosols of aqueous solutions of salts // *Combust., Explos., Shock Waves*. 2010. V. 46, N 1. P. 16–20.
8. **Reszka P., Borowiec P., Steinhaus T., Torero J. L.** A methodology for the estimation of ignition delay times in forest fire modelling // *Combust. Flame*. 2012. V. 159. P. 3652–3657.
9. **Волков Р. С., Жданова А. О., Кузнецов Г. В., Стрижак П. А.** Подавление реакции термического разложения лесных горючих материалов на больших площадях горения // *Инж.-физ. журн.* 2018. Т. 91, № 2. С. 1–9.
10. **Vysokomornaya O. V., Kuznetsov G. V., Strizhak P. A.** Experimental investigation of atomized water droplet initial parameters influence on evaporation intensity in flaming combustion // *Fire Safety. J.* 2014. V. 70. P. 61–70.
11. **Calkin D. E., Stonesifer C. S., Thompson M. P., McHugh C. W.** Large airtanker use and outcomes in suppressing wildland fires in the United States // *Intern. J. Wildland Fire*. 2014. V. 23, N 2. P. 259–271.
12. **Strizhak P. A.** Influence of droplet distribution in a “water slug” on the temperature and concentration of combustion products in its wake // *J. Engng Phys. Thermophys.* 2013. V. 86, N 4. P. 895–904.

13. **Kuznetsov G. V., Strizhak P. A.** Heat and mass transfer in quenching the reaction of thermal decomposition of a forest combustible material with a group of water drops // *J. Engng Phys. Thermophys.* 2014. V. 87, N 3. P. 608–617.
14. **Zhdanova A. O., Kuznetsov G. V., Strizhak P. A.** Numerical investigation of physicochemical processes occurring during water evaporation in the surface layer pores of a forest combustible material // *J. Engng Phys. Thermophys.* 2014. V. 87, N 4. P. 773–781.
15. **Korobeinichev O. P., Shmakov A. G., Shvartsberg V. M., et al.** Fire suppression by low-volatile chemically active fire suppressants using aerosol technology // *Fire Safety J.* 2012. V. 51. P. 102–109.
16. **Volkov R. S., Kuznetsov G. V., Strizhak P. A.** The influence of initial sizes and velocities of water droplets on transfer characteristics at high-temperature gas flow // *Intern. J. Heat Mass Transfer.* 2014. V. 79. P. 838–845.
17. **Volkov R. S., Kuznetsov G. V., Strizhak P. A.** Experimental investigation of mixtures and foreign inclusions in water droplets influence on integral characteristics of their evaporation during motion through high-temperature gas area // *Intern. J. Thermal Sci.* 2015. V. 88. P. 193–200.
18. **Vysokomornaya O. V., Kuznetsov G. V., Strizhak P. A.** Evaporation of water droplets in a high-temperature gaseous medium // *J. Engng Phys. Thermophys.* 2016. V. 89, N 1. P. 141–151.
19. **Volkov R. S., Kuznetsov G. V., Legros J. C., Strizhak P. A.** Experimental investigation of consecutive water droplets falling down through high-temperature gas zone // *Intern. J. Heat Mass Transfer.* 2016. V. 95. P. 184–197.
20. **Волков Р. С., Кузнецов Г. В., Стрижак П. А.** Экспериментальное исследование процессов подавления пламенного горения и термического разложения модельных низовых и верховых лесных пожаров // *Физика горения и взрыва.* 2017. Т. 53, № 6. С. 67–78.
21. **Лоцилова Н. А., Беляев И. В.** Эффективность тушения лесного пожара при комбинировании естественной и искусственной преград // *Фундамент. и прикл. исслед. в соврем. мире.* 2015. № 12-3. С. 31–32.
22. **Ерицов А. М., Гусев В. Г.** Совершенствование технологий создания заградительных и опорных полос при тушении лесных пожаров в зонах лесоавиационных работ // *Вестн. Поволж. гос. технол. ун-та. Сер. Лес. Экология. Природопользование.* 2016. № 1. С. 42–56.
23. **Копылов Н. П., Хасанов И. Р., Кузнецов А. Е. и др.** Параметры сброса воды авиационными средствами при тушении лесных пожаров // *Пожар. безопасность.* 2015. № 2. С. 49–55.
24. **Lautenberger C. H., Fernando-Pello C. A.** A model for the oxidative pyrolysis of wood // *Combust. Flame.* 2009. V. 156. P. 1503–1513.
25. **Sawyer R., Bradstock R., Bedward M., Morrison R. J.** Fire intensity drives post-fire temporal pattern of soil carbon accumulation in Australian fire-prone forests // *Sci. Total Environ.* 2018. V. 610/611. P. 1113–1124.
26. **Войтков И. С., Волков Р. С., Жданова А. О. и др.** Физико-химические процессы при взаимодействии аэрозоля с фронтом горения лесных горючих материалов // *ПМТФ.* 2018. Т. 59, № 5. С. 143–155.
27. **Volkov R. S., Kuznetsov G. V., Strizhak P. A.** Movement of water drops in a forest fuel layer in the course of its thermal decomposition // *Thermal Sci.* 2018. V. 22, N 1. P. 301–312.
28. **Korobeinichev O. P., Paletsky A. A., Gonchikzhapov M. B., et al.** Combustion chemistry and decomposition kinetics of forest fuels // *Procedia Engng.* 2013. V. 62. P. 182–193.
29. **Палецкий А. А., Гончикжапов М. Б., Коробейничев О. П.** Исследование пиролиза лесных горючих материалов методом зондовой молекулярно-пучковой масс-спектрометрии // *Сиббезопасность-Спассиб.* 2011. № 1. С. 97–98.

30. **Гончикжапов М. Б., Палецкий А. А., Коробейничев О. П.** Кинетика пиролиза лесных горючих материалов в инертной/окислительной среде при быстром и медленном темпах нагрева // Сиббезопасность-Спасиб. 2012. № 1. С. 38–44.
31. **Wadhvani R., Sutherland D., Moinuddin K. A. M., Joseph P.** Kinetics of pyrolysis of litter materials from pine and eucalyptus forests // J. Thermal Anal. Calorimetry. 2017. V. 130. P. 2035–2046.
32. **Москвилин Е. А.** Применение авиации для тушения лесных пожаров // Пожар. безопасность. 2009. № 1. С. 89–92.
33. **Grishin A. M., Filkov A. I.** A deterministic-probabilistic system for predicting forest fire hazard // Fire Safety J. 2011. V. 46, N 1/2. P. 56–62.
34. **Михайлова Н. В., Гуцев Н. Д.** Результаты лабораторных исследований свойств новых огнетушащих составов для борьбы с лесными пожарами // Безопасность жизнедеятельности. 2014. № 4. С. 33–39.
35. **Parker W. J., Jenkins R. J., Butler C. P., Abbott G. L.** Flash method of determining thermal diffusivity, heat capacity, and thermal conductivity // J. Appl. Phys. 1961. V. 32. P. 1679–1684.
36. **Duane A., Piqué M., Castellnou M., Brotons L.** Predictive modelling of fire occurrences from different fire spread patterns in Mediterranean landscapes // Intern. J. Wildland Fire. 2015. V. 24. P. 407–418.

*Поступила в редакцию 25/VII 2018 г.,
после доработки — 25/VII 2018 г.
Принята к публикации 24/IX 2018 г.*
