

03

## Определение плотности и интенсивности орошения лесного горючего материала перед фронтом горения при создании эффективной заградительной полосы

© Р.С. Волков,<sup>1</sup> Г.В. Кузнецов,<sup>1</sup> К.Ю. Осипов,<sup>2</sup> И.Р. Хасанов<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 634050 Томск, Россия

<sup>2</sup> Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, 634055 Томск, Россия

<sup>3</sup> Всероссийский научно-исследовательский институт противопожарной обороны МЧС России, 143903 Балашиха, Россия  
e-mail: kuznetsovgv@tpu.ru

Поступило в Редакцию 17 августа 2019 г.

В окончательной редакции 17 августа 2019 г.

Принято к публикации 30 октября 2019 г.

Представлены результаты экспериментов по локализации и полному прекращению пламенного горения и термического разложения типичных лесных горючих материалов (на примере хвои сосны и листьев березы) при использовании перед фронтом горения специализированной заградительной полосы в виде увлажненного слоя материала с контролем его размеров и удержанного объема воды. Определены необходимые и достаточные условия полного прекращения распространения пламени и фронта пиролиза. Установлены связи между основными параметрами: объем воды, плотность и интенсивность орошения, размеры заградительной водной полосы, объем сухого лесного горючего материала. При обобщении результатов экспериментов выделены значения рациональной плотности и интенсивности орошения лесного горючего материала перед фронтом горения. Показаны основные отличия выбора эффективных значений этих параметров в случае локализации и прекращения пламенного горения и термического разложения хвоинок и листьев.

**Ключевые слова:** лесной горючий материал, пламенное горение, фронт пиролиза, локализация, заградительная полоса, увлажненный слой материала, интенсивность орошения, удельный расход жидкости.

DOI: 10.21883/JTF.2020.04.49080.314-18

### Введение

События последних лет (Греция — 2018 г., Испания — 2017 г., США — 2016 г., Россия — 2015 г. и др.) показывают, что в подавляющем большинстве случаев потушить низовой лесной пожар на всей площади, которую он охватывает, практически невозможно. Полностью прекратить горение не удавалось даже при использовании авиации. Анализ условий и характеристик крупных лесных пожаров показывает, что для прекращения горения необходимо существенное снижение температуры в зоне горения. Обеспечить такие условия можно лишь при специализированной подаче жидкости и контроле ее объема. Это вызывает большие сложности в реальных условиях. Поэтому нередко специалистами пожарных служб формулируются гипотезы о том, что нерационально подавлять очаги лесных пожаров, а целесообразно сосредоточиться на локализации распространения последних. В таких условиях горение прекратится за большее время, но на фиксированной и контролируемой площади лесного массива.

Локализация низовых лесных пожаров с применением специализированных заградительных полос в виде ровов, каналов, промоченных слоев материалов, как способ борьбы с лесными пожарами, известен достаточно

давно. Например, можно выделить несколько известных монографий [1–3], в которых отмечены основные преимущества и недостатки таких подходов. Основная задача — обеспечение условий локализации очага горения с последующим полным прекращением пламенного горения и термического разложения. В связи с существенными ограничениями по объему доставляемой в зону пожара воды, а также высокими скоростями распространения фронта пламени, в последние годы все более актуальной становится задача рационализации расхода огнетушащей жидкости (как правило, воды). В этом направлении в последние 3–5 лет предложено довольно много перспективных методов и подходов, в частности, некоторые из них (наиболее типичные для современных подходов) представлены в работах [4–6]. Тем не менее пока остается нерешенной в полной мере задача определения минимальных (необходимых и достаточных) объемов воды для локализации очага горения в течение ограниченного интервала времени. В таких условиях определяющую роль играют интенсивность и плотность орошения поверхности лесного горючего материала (ЛГМ) капельным аэрозолем [4–6].

В [7,8] опубликованы результаты экспериментов по определению типичных механизмов и условий локализации пламенного горения и пиролиза хвои ели, листьев

березы, их смеси за счет применения заградительных водных полос в виде увлажненного слоя материала перед фронтом горения, а также при распылении жидкости по кромке пожара и непосредственно во фронте пиролиза. Установлены минимальные необходимые размеры (ширина, толщина, протяженность) заградительных полос [7,8] для локализации пиролиза и пламенного горения. Актуальна задача обобщения результатов экспериментов [7,8] и проведения дополнительных экспериментальных исследований с целью определения рациональных диапазонов варьирования интенсивности и плотности орошения (при анализе последних часто используют термин „удельный расход жидкости“). При этом в отличие от постановок задач [7,8] целесообразно рассмотреть разные объемы лесного горючего материала перед заградительной полосой для определения максимальных достаточных значений интенсивности и плотности орошения в реальных условиях.

Цель настоящей работы — экспериментальное определение необходимых и достаточных значений плотности и интенсивности орошения лесного горючего материала (ЛГМ) перед фронтом горения в процессе его локализации за счет создания заградительной полосы. Последней считался увлажненный слой ЛГМ перед фронтом горения. Методика его создания аналогична первой схеме (т.е. заранее перед фронтами пламенного горения и пиролиза), рассмотренной в опытах [7].

## Методика проведения экспериментов

В экспериментах исследовались хвоя сосны и листья березы, как наиболее типичные материалы. Плотность ЛГМ в экспериментах составляла около  $\rho_f \approx 19 \text{ kg/m}^3$  (среднее значение для лесопокрываемых территорий мира в соответствии с данными, приведенными в [7,8]). В отличие от опытов [7] эксперименты проводились в два этапа. Целью первого являлось экспериментальное определение объема воды, который способен задержаться в слое ЛГМ, а также связи расчетных (спрогнозированных в соответствии с известными представлениями и физическими закономерностями) и фактических (установленных в сериях проводимых опытах) плотностей и интенсивностей орошения. При фиксированных значениях расчетной плотности орошения ( $\xi$ ), исходя из площади заградительной полосы ( $S$ ), определялся соответствующий значению  $\xi$  (варьировалась от 0.2 до  $31/\text{m}^2$ ) объем воды ( $V_w$ ) в каждом эксперименте:

$$V_w = \xi \cdot S \text{ [л]}.$$

Такой объем воды равномерно распылялся по поверхности ЛГМ за время  $t_{\text{spr}}$  (варьировалось в диапазоне 1–40 с). Для каждого значения  $t_{\text{spr}}$  вычислялось значение интенсивности орошения (удельного расхода воды на единицу площади поверхности ЛГМ в единицу времени):

$$\psi = V_w / (S t_{\text{spr}}) \text{ [л/(m}^2\text{s)]}.$$

По истечении 10 с, необходимых для удаления влаги, прошедшей через слой ЛГМ, металлический поддон с ЛГМ взвешивался на микровесах. Определялся (при известной плотности воды  $\rho_w \approx 1000 \text{ kg/m}^3$ ) объем воды ( $V_{fm}$ ), аккумулированной в порах ЛГМ. Исходя из значений объема воды, оставшегося в слое, рассчитывалась фактическая (установлена в проведенных опытах; ее можно считать эффективной, т.е. за вычетом воды, прошедшей через навеску в грунт, которая не участвует в локализации пиролиза и пламенного горения) плотность орошения полосы:

$$\xi_f = V_{fm} / S \text{ [л/m}^2\text{]}.$$

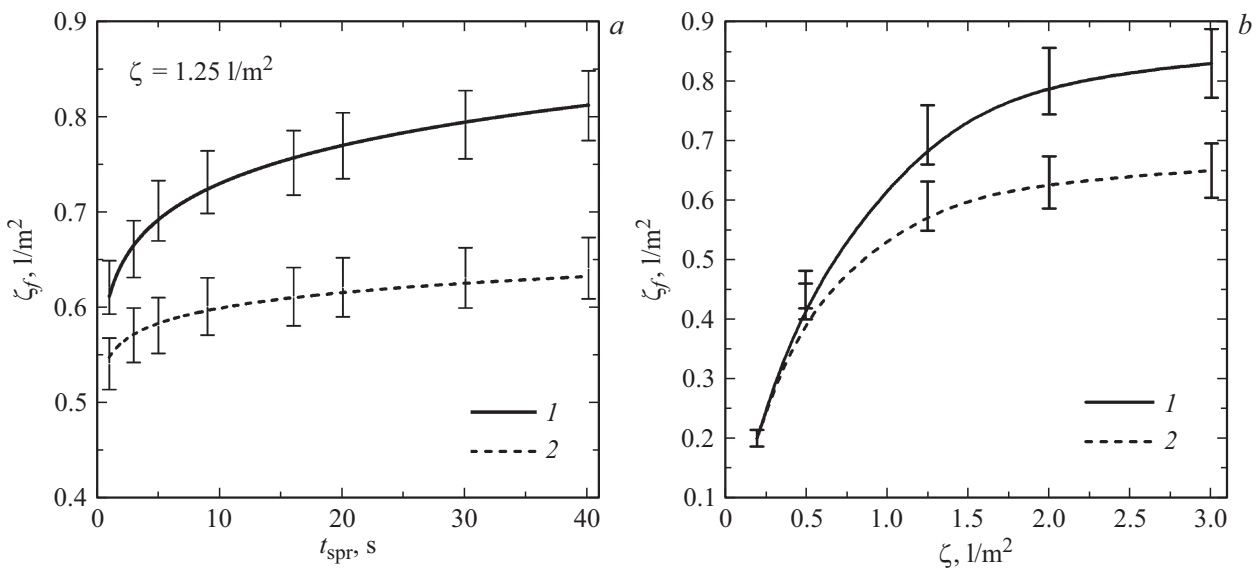
Для каждого значения параметров  $\xi$  и  $t_{\text{spr}}$ , а также ЛГМ выполнялись 5–7 экспериментов. По полученным в ходе экспериментов значениям параметров вычислялись значения основных регистрируемых параметров, рассмотренных далее.

На втором этапе, используя полученные ранее (в ходе первого) значения  $\xi$  и  $\psi$ , проводился цикл экспериментов по локализации и полному прекращению пламенного горения и термического разложения типичных лесных горючих материалов (хвоя, листья) за счет создания перед фронтом горения специализированной водной заградительной полосы (по аналогии с первой схемой [7]; вода проливалась заранее перед фронтом горения). В металлический поддон (ширина 200 мм, длина 300 мм, высота 45 мм) укладывалась по всей ширине полоса ЛГМ (массой  $m_f \approx 45 \text{ г}$ ). При использовании распылительных форсунок, генерирующих капли с размерами  $R_d = 0.1–0.35 \text{ мм}$ , создавалась заградительная полоса с известными размерами. При этом перед полосой оставлялась полоса сухого (способного к термическому разложению и пламенному горению) ЛГМ с изменяемым объемом  $V_f$ .

В экспериментах варьировались следующие параметры: объем сухого ЛГМ ( $V_f$ ), ширина заградительной полосы ( $L_w$ ), расчетная плотность орошения ( $\xi$ ), интенсивность орошения ( $\psi$ ).

Протяженность заградительной полосы принималась равной аналогичному размеру слоя навески ЛГМ, так как в предварительных экспериментах было установлено, что фронт пиролиза может обойти увлажненный слой материала (заградительную полосу). Особенно заметны были такие эффекты в опытах с листьями, для которых характерны высокие скорости распространения фронтов пламенного горения и термического разложения по поверхности навески. В экспериментах с хвоей регистрировались случаи продвижения фронта пиролиза материала под заградительной полосой (при малой глубине ее увлажнения). Поэтому в таких экспериментах важную роль играли значения глубины промачивания навески материала, т.е. толщина заградительной полосы.

Навеска ЛГМ зажигалась равномерно по ширине с использованием пьезоэлектрического горелочного устройства, включался нагнетатель, создающий воздушный



**Рис. 1.** Зависимость установленной в экспериментах плотности орошения от времени подачи воды в заградительную полосу (а), а также от расчетной (спрогнозированной) плотности орошения (b) при  $U_a \approx 1.3$  m/s: 1 — листья, 2 — хвоя.

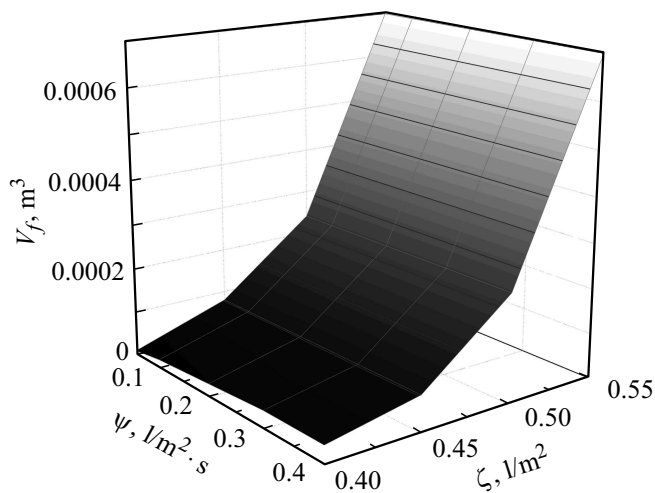
поток для воспроизведения ветра (скорость потока воздуха варьировалась в экспериментах в диапазоне  $U_a = 0.5-2$  m/s). Далее ЛГМ постепенно выгорал. Весь процесс регистрировался видеокамерой. Для контроля температуры навески ЛГМ использовались три хромель-алюмелевых (диапазон измеряемых температур  $-50-1200^\circ\text{C}$ , инерционность 1s, систематическая погрешность  $\pm 3^\circ\text{C}$ ) термопары. Эксперимент продолжался до момента полного прекращения пламенного горения и термического разложения навески ЛГМ. Момент прекращения пиролиза фиксировался по показаниям термопар (при температурах навески меньше температуры начала термического разложения принималось общее пороговое значение для хвои и листьев  $130^\circ\text{C}$  в соответствии с методиками [7,8]), а также по видеороликам (при угасании пламени).

## Результаты и обсуждение

По результатам экспериментов определялись необходимые и достаточные для полного прекращения пламенного горения и термического разложения фиксированного объема ЛГМ перед заградительной полосой ( $V_f$ ) значения плотности и плотности орошения ( $\xi$  и  $\psi$ ). На рис. 1,а представлена зависимость фактической (установленной в опытах) интенсивности орошения от времени подачи воды в заградительную полосу  $\zeta_f = f(t_{spr})$ . Видно, что при увеличении  $t_{spr}$  значения  $\zeta_f$  нелинейно увеличиваются. При этом следует отметить, что при  $t_{spr} > 20$  s дальнейший рост  $\zeta_f$  практически останавливается. Данный результат является неочевидным и очень важным, так как показывает, что для оптимизации использования воды в процессе подготовки заградительной полосы (в виде увлажненного слоя

ЛГМ) формирование последней следует осуществлять при подаче воды в течение периода времени не более 20s. В этом случае объем удержанной в порах ЛГМ воды будет максимален. Дальнейшее распыление воды в области заградительной полосы нецелесообразно, так как будет приводить к избыточному заливанию материала и продвижению жидкости в грунт под навеской материала. К тому же в случае избыточной подачи жидкости изменяется структура навески материала. За счет действия силы тяжести слои хвои или листьев уплотняются, возрастает внутриводное давление. Это приводит к образованию каверн и полостей, через которые существенная доля ранее удержанной материалом воды уходит в грунт.

На основании рис. 1,б можно сделать несколько выводов. Во-первых, значения фактической (с учетом удержанной в навеске материала) и расчетной (спрогнозированной) плотности орошения могут отличаться до 5 раз. Во-вторых, генерация заградительной полосы при значениях расчетной плотности орошения более  $1.5-2$  l/m<sup>2</sup> нецелесообразна. В проведенных опытах не зарегистрированы существенные изменения условий и характеристик подавления горения, а объем использованной воды увеличивается в несколько раз. В-третьих, значения  $\zeta_f$  существенно зависят от типа ЛГМ: для листьев значения  $\zeta_f$  на 25–30% выше, чем для хвои. Это обусловлено физическими отличиями процессов продвижения (по сути, разными механизмами) воды через слои листвы и хвои. В частности, скорости продвижения воды через навески хвои и листьев идентичной толщины и плотности отличаются в несколько раз. Для листвы характерно быстрое накопление воды в тонком приповерхностном слое и медленное продвижение последней в глубинные слои. Чаше вода растекается



**Рис. 2.** Зависимости минимального объема ЛГМ (хвоя) перед заградительной полосой ( $V_f$ ), для которого удалось достичь условий полного прекращения пламенного горения и термического разложения, от интенсивности ( $\psi$ ) и расчетной плотности ( $\xi$ ) орошения при  $U_a \approx 1.3$  м/с.

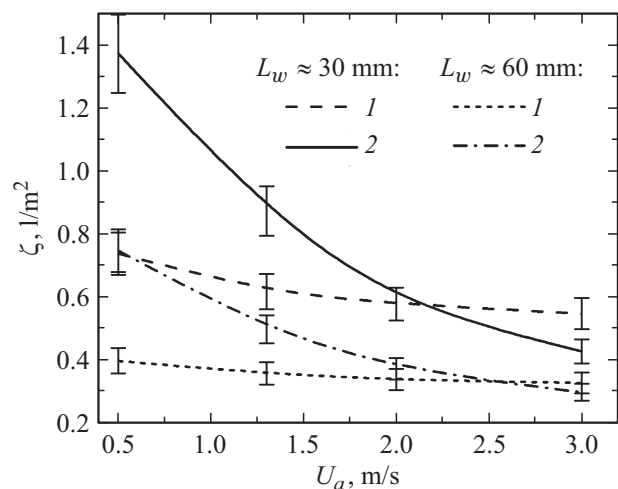
в поперечных направлениях по поверхности листьев. В опытах с хвоинками регистрировались обратные эффекты. Вода интенсивно просачивалась в глубинные слои, и ширина увлажненного слоя практически не менялась. В то же время важно отметить, что отличия структуры навесок листьев и хвои существенно влияли на скорости и траектории распространения фронтов пламенного горения и пиролиза. В опытах с хвоей фронт пиролиза относительно быстро распространялся как в направлении глубинных слоев, так и по поверхности навески в направлении заградительной полосы. Поэтому эффективные условия его локализации достигались лишь при увлажнении ЛГМ по всей толщине заградительной полосы. Для локализации фронтов пиролиза и пламенного горения листьев достаточно увлажнить приповерхностный слой материала в области заградительной полосы. Как следствие, минимальные значения необходимой плотности орошения для листьев в любом случае будут ниже, чем при локализации пиролиза хвои.

На практике сложно контролировать значения фактической плотности орошения, поэтому при представлении последующих результатов используется ее расчетное (спрогнозированное) значение. На рис. 2 представлена область параметров, иллюстрирующая зависимость минимального объема ЛГМ перед заградительной полосой ( $V_f$ ), для которого в проведенных экспериментах удалось достичь условий полного прекращения пламенного горения и термического разложения, от интенсивности ( $\psi$ ) и расчетной плотности ( $\xi$ ) орошения. Видно, что вне зависимости от величины  $\psi$ , значения параметра  $V_f$  зависят в основном от  $\xi$  (за исключением начального диапазона  $0 < \xi < 0.4$  л/м<sup>2</sup>, т.е. малых значений). То есть при локализации и полном прекращении пла-

менного горения и термического разложения в реальных условиях (когда объем сухого ЛГМ перед полосой в несколько раз или даже несколько десятков и сотен раз больше, чем в проведенных экспериментах) определяющим фактором является не время подачи жидкости ( $t_{spr}$ ), а объем воды, способный аккумулироваться в структуре навески ЛГМ ( $V_{fm}$ ). При этом для прогнозирования объема воды, удержанного в порах ЛГМ, и фактической плотности орошения, следует учитывать оптимальные установленные в экспериментах значения  $t_{spr}$  (указанные ранее при анализе рис. 1, а).

Рис. 3 иллюстрирует зависимости значений  $\xi$ , необходимых для обеспечения условий полного прекращения пламенного горения и термического разложения ЛГМ, от скорости воздушного потока ( $U_a$ ) для исследованных типов ЛГМ. Установлено, что рост значений  $U_a$  приводит к снижению необходимых и достаточных значений параметра  $\xi$  в 2–3 раза. Установленный эффект обусловлен, скорее всего, ростом скорости выгорания ЛГМ при увеличении  $U_a$ . ЛГМ прогорает слишком быстро перед заградительной полосой, не успевая прогреть и испарить находящуюся в ней влагу, тем самым пламенное горение и термическое разложение материала локализуется существенно быстрее, и дополнительные объемы увлажненного материала не вступают в реакцию термического разложения.

Следует отметить, что в реальной практике лесных пожаров в случае высоких скоростей ветра значимое влияние могут оказывать эффекты срыва с поверхности фрагментов пиролизующегося материала и переноса на дальние расстояния, что представляет высокую опасность новых локальных возгораний. В настоящей работе данные эффекты не рассматривались, так как требуют отдельного экспериментального изучения. С учетом результатов исследований [7,8] можно сделать вывод, что



**Рис. 3.** Зависимости значений плотности орошения (необходимой для достижения условий полного прекращения пламенного горения и термического разложения) от скорости воздушного потока для исследованных типов ЛГМ: 1 — листья, 2 — хвоя.

перенос за счет ветра фрагментов (частиц) пиролизующихся материалов возможен в случае скоростей ветра от 8–10 m/s. При этом температура фрагментов материала и дальность полета достаточны для формирования локальных очагов горения на новых участках леса. Но в таких условиях работы специалистов по локализации очагов горения (и тем более подавлению пламени), как правило, не проводятся из-за высокой пожарной опасности. В диапазоне небольших скоростей ветра, рассмотренном в настоящей работе, эффекты переноса фрагментов ЛГМ потоком воздуха не зарегистрированы.

В соответствии с результатами проведенных опытов можно сделать заключение о том, что для достоверного прогнозирования параметров (ширина, протяженность, толщина) надежной заградительной полосы недостаточно знать необходимый (минимальный) объем воды и расчетную плотность орошения. Важно также учитывать объем сухого (способного к термическому разложению и пламенному горению) ЛГМ перед полосой, ширину и глубину полосы, время подачи воды на полосу, а также скорость ветра. Оценку всех этих параметров можно выполнить при комплексном анализе фактической плотности орошения и интенсивности орошения (удельной). Проведенные эксперименты показали, что нижние оценки реальных значений этого параметра (расчетная плотность орошения или удельный расход жидкости) для заградительных полос в виде увлажненного слоя материала составляют 0.37–0.72 l/m<sup>2</sup> для хвои и 0.35–0.41 l/m<sup>2</sup> для листьев. Очевидно, что с учетом исследованных в экспериментах [7,8] факторов следует при прогнозировании удельных расходов воды приведенные значения увеличивать на 30–50%.

## Заключение

С учетом влияния группы факторов (плотность насыпки, скорости воздушных потоков и объем сухого ЛГМ перед полосой) по результатам выполненных экспериментов при варьировании в типичных для практики диапазонах изменения основных параметров, характеризующих изучаемые процессы, определен рациональный диапазон варьирования плотности орошения (удельного расхода) в заградительных полосах (в виде увлажненных слоев навески материала перед фронтом горения), составляющий 0.4–1.4 l/m<sup>2</sup>.

## Финансирование работы

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (18-19-00056).

## Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

## Список литературы

- [1] *Дорпер Г.А.* Математические модели динамики лесных пожаров. М.: Лесная промышленность, 1979. 160 с.
- [2] *Гришин А.М.* Математические модели лесных пожаров. Томск: Изд-во ТГУ, 1981. 278 с.
- [3] *Барановский Н.В., Кузнецов Г.В.* Прогноз возникновения лесных пожаров и их экологических последствий. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2009. 301 с.
- [4] *Calkin D.E., Stonesifer C.S., Thompson M.P., McHugh C.W.* // Int. J. Wildland Fire. 2014. Vol. 23. N 2. P. 259–271.
- [5] *Korobeinichev O.P., Shmakov A.G., Shvartsberg V.M., Chernov A.A., Yakimov S.A., Koutsenogii K.P., Makarov V.I.* // Fire Saf. J. 2012. Vol. 51. P. 102–109.
- [6] *Lautenberger C.H., Fernando-Pello C.A.* // Comb. Flame. 2009. Vol. 156. P. 1503–1513.
- [7] *Войтков И.С., Волков Р.С., Жданова А.О., Кузнецов Г.В., Накоряков В.Е.* // ПМТФ. Вып. 5. С. 143–155.
- [8] *Волков Р.С., Кузнецов Г.В., Стрижак П.А.* // ФГВ. 2017. Т. 53. Вып. 6. С. 67–78.