

УДК 536.4

**СРАВНЕНИЕ НЕОБХОДИМЫХ ОБЪЕМОВ ВОДЫ И ВРЕМЕН ЛОКАЛИЗАЦИИ  
РАСПРОСТРАНЕНИЯ ФРОНТА ГОРЕНИЯ МОДЕЛЬНЫХ НИЗОВЫХ  
И СТЕПНЫХ ПОЖАРОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ ЗАГРАДИТЕЛЬНОЙ ПОЛОСЫ**

**Кандидат физ.-мат. наук А.О. Жданова, И.С. Войтков, Н.Е. Шлегель,  
доктор физ.-мат. наук Г.В. Кузнецов**

**Национальный исследовательский Томский политехнический университет**

**Доктор техн. наук И.Р. Хасанов**

**Всероссийский научно-исследовательский институт противопожарной обороны  
МЧС России**

*Приведены результаты экспериментальных исследований процессов локализации модельных низовых лесных и степных пожаров с применением заградительной водной полосы в виде увлажненного слоя материала перед основным фронтом горения. Опыты выполнены с навесками хвои, листьев, травяных растений. Определены необходимые и достаточные (минимальные) размеры (ширина, протяженность, глубина) заградительных полос, а также объем воды, позволяющие локализовать распространение фронтов пламенного горения и термического разложения. Рассчитаны значения интегрального критерия – плотности орошения (удельного расхода). Выполнено сравнение скоростей термического разложения и пламенного горения исследованных материалов при разной скорости воздушного потока (для воспроизведения фактора ветра в реальных условиях), а также влияние последнего на условия и характеристики процесса локализации.*

**Ключевые слова:** низовые лесные пожары, степные пожары, локализация, заградительная водная полоса, предельные плотности орошения, необходимые объемы воды.

**COMPARISON OF THE REQUIRED VOLUMES OF WATER  
AND THE LOCALIZATION TIMES OF THE PROPAGATION  
OF THE COMBUSTION FRONT OF MODEL GRASS-ROOTS AND STEPPE FIRES  
WITH THE USE OBSTRUCTIVE WATER STRIP**

**Ph.D. (Phys.-Mat.) A.O. Zhdanova, I.S. Voytkov, N.E. Schlegel,  
Dr. (Phys.-Mat.) G.V. Kuznetsov**

**National Research Tomsk Polytechnic University**

**Dr. (Tech.) I.R. Khasanov**

**All-Russian Research Institute for Fire Protection of Russian Emergency Ministry**

*The results of experimental studies of the processes of localization of model lower forest and steppe fires with the use of a protective water strip in the form of a moistened layer of material in front of the main combustion front are presented. The experiments were performed with hinges of needles, leaves, and herbaceous plants. The necessary and sufficient (minimum) dimensions (width, length, depth) of barrier strips, as well as the volume of water, allowing localization of the fronts of combustion and thermal decomposition are determined. The values of the integral criterion - the density of irrigation (specific consumption) are calculated. Compari-*

*son of the rates of thermal decomposition and combustion of the investigated materials at different airspeed (for the reproduction of the wind factor in real conditions) and the influence of the latter on the conditions and characteristics of the localization process are compared.*

**Keywords:** grass-roots forest fires, steppe fires, localization, obstructive water strip, limiting densities irrigation, necessary volumes of water.

## Введение

По условиям, механизмам и основным характеристикам (последние существенно отличаются [1–12]) принято разделять [13–18] неконтролируемые возгорания, переходящие в пожары, на техногенные, полевые, низовые, верховые и смешанные лесные, торфяные, степные пожары, а также в зданиях и на различных транспортных средствах. Наиболее масштабные последствия (социальные, экономические, экологические) имеют пожары в непосредственной близости от населенных пунктов [16–18]. К таким, в первую очередь, относят низовые лесные и степные пожары [16–18]. При этом большинство заключений специалистов сводится к тому, что в реальной практике чрезвычайно сложно полностью подавить горение в таких условиях и целесообразно сосредоточиться на разработке технологий локализации очагов горения [19, 20].

Важность решения данных проблем обусловлена тем, что продукты горения, которые образуются во время пожара, как правило, чрезвычайно токсичные [21–25]. Кроме этого, твердые и газообразные продукты сгорания сильно загрязняют атмосферу и создают дымовую завесу, способствующую глобальным климатическим изменениям [21–25].

Среди современных способов локализации низовых лесных и степных пожаров наиболее часто применяют так называемые заградительные полосы [26, 27] в виде рвов, канав, просек, увлажненных материалов (т.е. пропитанных разными жидкостными составами). Одна из основных особенностей таких пожаров состоит в их скоротечности. Для эффективной борьбы с пожарами с момента обнаружения очага возгорания и до принятия каких-либо мер по его тушению должно быть затрачено минимальное время. При этом особое положение в подобных мероприятиях занимает непосредственная организация и подготовка средств по устранению пожара [14–17]. Поэтому важно упростить процедуры организации заградительных полос и их состав. Наиболее простая схема включает увлажнение слоя ЛГМ заданной ширины, протяженности и глубины (часто считают толщиной) перед фронтом горения [19, 20]. Однако пока мало экспериментальных данных о минимальных значениях размеров полос и объемах воды, обеспечивающих локализацию степных и низовых лесных пожаров [19, 20].

Цель настоящей работы – обоснование по результатам экспериментальных исследований необходимых и достаточных условий локализации распространения фронта горения моделей низовых и степных пожаров с применением водной заградительной полосы (увлажнения материала заранее перед основным фронтом горения).

## Экспериментальный стенд, макеты очагов, методики

В качестве типичных горючих материалов в проведенных опытах использовались: хвоя сосны, листья березы, смесь ЛГМ (листья березы – 25 %; хвоя сосны – 15 %; ветки лиственных пород деревьев – 60 %), совокупность травянистых растений. Контроль параметров отдельных элементов (в частности, размеров) и в целом навески горючего материала (влажность, плотность засыпки, размеры) выполнялся аналогично методикам [19, 20]. Основное отличие настоящей работы от опытов [19, 20] заключалось в выполне-

нии сравнительного анализа условий и характеристик локализации горения навесок ЛГМ и травянистых растений с целью изучения параметров эффективной локализации их горения при применении заградительной водной полосы перед фронтом пиролиза и пламенного горения. Масса навесок составляла около 45 г. Материал укладывался равномерно в металлический поддон с размерами: длина 300 мм, ширина 200 мм, глубина 40 мм. Плотность навески во всех опытах выдерживалась средней ( $30\text{--}40 \text{ кг/м}^3$ ) относительно реального возможного диапазона в реальной практике (вследствие многолетнего уплотнения опада).

Схема экспериментальной установки приведена на рис. 1. Показан нагнетатель воздуха для воспроизведения фактора ветра (варьировалась скорость потока воздуха  $U_a$ ). Со стороны нагнетателя инициировалось горение навески по всей ширине с помощью пьезозажигательных элементов (рис. 1). Перед фронтом горения (т.е. заранее за несколько минут) проливалась заградительная полоса с фиксированными размерами и объемом воды. С помощью трех термопар (платинородий-платиновые, диапазон температур -  $50\text{--}1500 \text{ }^\circ\text{C}$ , систематическая погрешность измерения  $1,5^\circ\text{C}$ , время теплового запаздывания  $0,1 \text{ с}$ ), расположенных на разной глубине в слое ЛГМ, тепловизора (Testo 885-2) и видеокамеры (Sony HDR CX240E) регистрировались условия продвижения фронтов пламенного горения и пиролиза по навеске, торможение за счет заградительной полосы и последующее полное прекращение химического реагирования в навеске (критерий – снижение температуры в слое материала меньше значения, соответствующего началу термического разложения, для всех материалов принималось общее значение около  $150^\circ\text{C}$ ). Размеры заградительной полосы и объем используемой воды варьировались для определения необходимых и достаточных условий локализации.

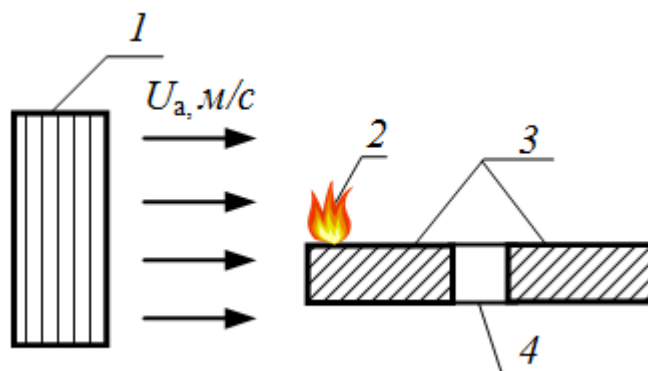


Рис. 1. Схема эксперимента:  
1 – нагнетатель, 2 – поджог, 3 – сухой ЛГМ, 4 – заградительная полоса

Следует отметить, что с учетом результатов опытов [19, 20] в настоящей работе средний размер капель аэрозоля для генерации полосы составил  $R_d=0.08\text{--}0.1 \text{ мм}$ . Это обусловлено тем, что для высокопористых навесок горючих материалов необходимо удержание выливаемой воды во всех слоях. Особенно этот фактор важен для хвоинок и травянистых растений. Траектории и скорости распространения фронтов пиролиза и пламенного горения чрезвычайно сложные в отличие от листы. Лишь при использовании мелкодисперсных аэрозолей можно обеспечить практически равномерное распределение влаги по слоям навески. В случае хвои этот фактор является определяющим, так

как фронт пиролиза довольно часто обходил заградительную полосу под слоем увлажненного материала. Контроль размеров капель при впрыске в зону заградительной полосы выполнялся заранее, т.е. в тестовых экспериментах с применением высокоскоростного кросскорреляционного комплекса и оптических методов регистрации («Shadow Photography» и «Interferometry Particle Imagine»), описанных в работах [19, 20].

### Результаты и обсуждение

На рис. 2 приведены установленные по результатам опытов типичные тренды изменения температуры в разных сечениях навески (т.е. в области перед заградительной полосой, непосредственно в увлажненной части навески и за ней). Тренды представлены для одинаковой скорости воздушного потока 1,3 м/с и четырех типов материалов.

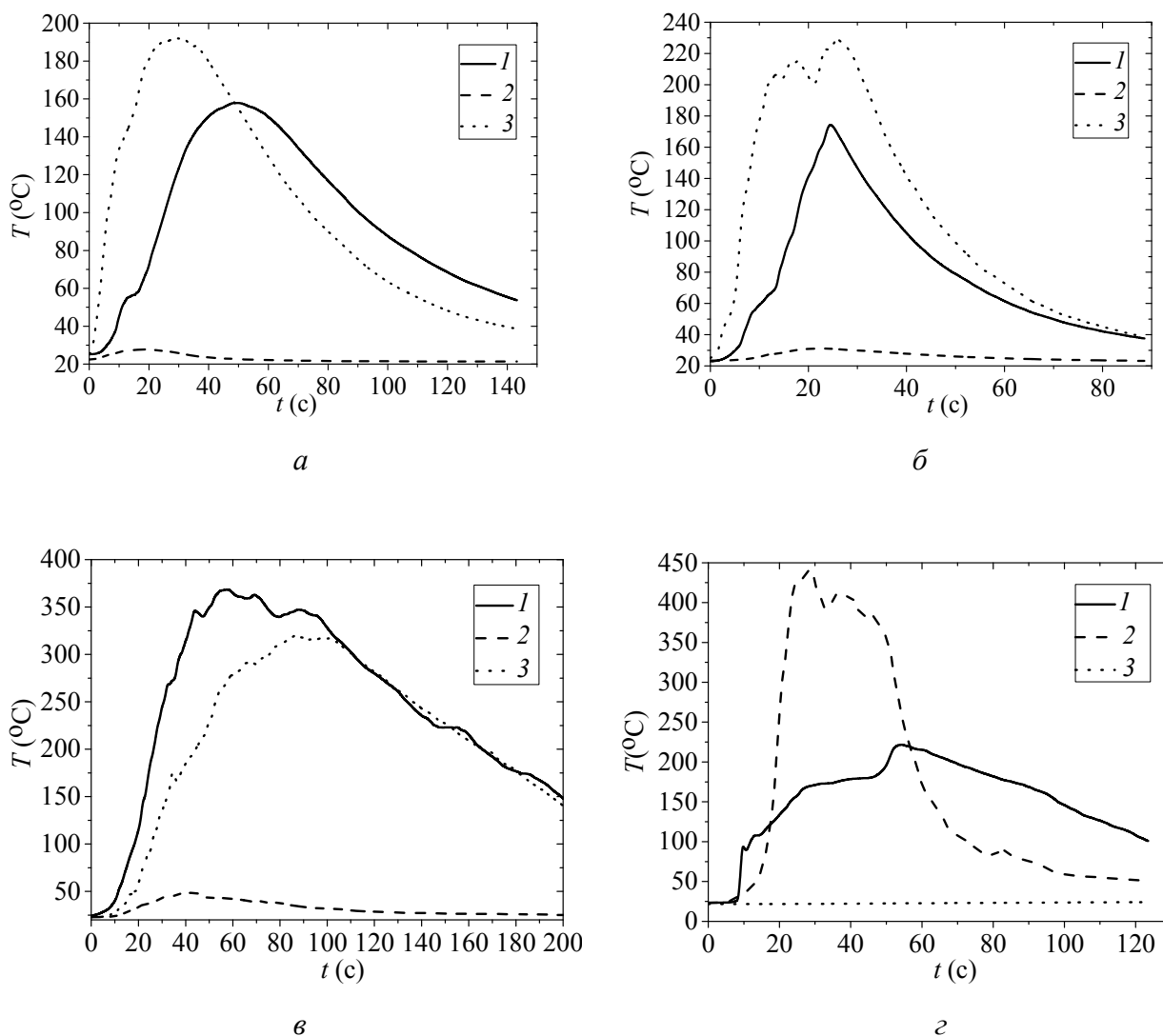


Рис. 2. Особенности распространения фронтов пламенного горения и пиролиза в навесках при воспроизведении условий низовых лесных и степных пожаров: а – листья (1,3 м/с), б – трава (1,3 м/с), в – смесь ЛГМ (1,3 м/с), г – хвоя (1,3 м/с); 1 – выгорающий фронт, 2 – заградительная полоса, 3 – основной фронт горения

На рис. 2 хорошо видно, что во всех экспериментах увлажненная полоса навески перед основным фронтом горения выполняет ключевую задачу, т.е. сдерживает его распространение. Непосредственно в области заградительной полосы, т.е. увлажненного материала перед фронтом горения температура не поднималась выше 40–50°C даже в случае высококалорийной (за счет наличия веточек) смеси ЛГМ. Если сравнивать реакционные способности исследованных навесок, то хвоя, как и следовало, ожидать представляет наиболее пожароопасный материал. Его разложение и пламенное горение сопровождается резким ростом температуры. Поэтому в опытах с хвоей регистрировались максимальные температуры во фронте горения, но довольно быстрое снижение температуры за ним (вследствие высоких скоростей выгорания).

При сравнении всех рассмотренных ЛГМ и травянистых растений можно отметить довольно близкие тренды с листвой. Скорее всего, это обусловлено близкими механизмами распространения фронтов пиролиза и пламенного горения. В частности, сравнительный анализ показаний термопар, тепловизора и видеокамеры позволил отметить, что фронты пиролиза и пламенного горения в случае навески листьев распространяются лишь по приповерхностному слою. Глубинные слои навески практически не вступают в реакции термического разложения (этим обусловлено минимальные времена локализации горения таких навесок на рис. 3, так как достаточно подавить реагирование в приповерхностном слое). В опытах с хвоей же регистрировались эффекты достаточно быстрого распространения фронтов пиролиза в глубинные слои. Как следствие, для полного прекращения горения требовались большие времена локализации (рис. 3). Для смеси материалов этот параметр был максимальным вследствие высокой роли веточек, имеющих значительную теплоту сгорания. Поэтому существенно отличаются скорости выгорания (рис. 4) и необходимые объемы воды для прекращения горения (рис. 5).

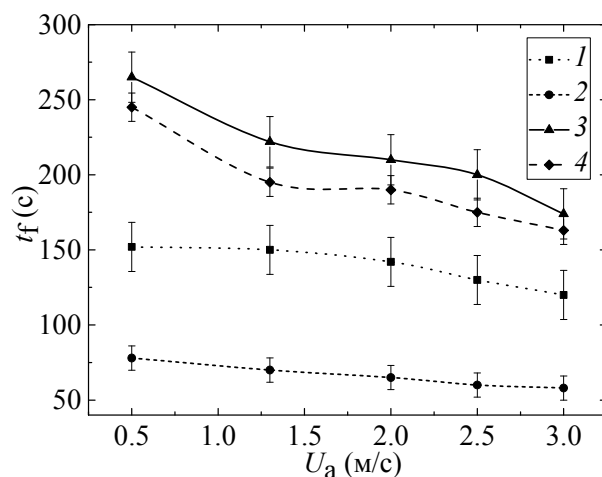


Рис. 3. Зависимость времени полной локализации процессов термического разложения и горения от скорости воздушного потока при рассмотрении различных типов ЛГМ:  
1 – хвоя, 2 – листья, 3 – смесь ЛГМ, 4 – травянистые растения

Приведенные на рис. 3 зависимости иллюстрируют влияние структуры горючего материала (лесного и степного) на длительность процесса локализации соответствующих фронтов. Наиболее длительными являются процессы подавления пиролиза сухой травы и смеси ЛГМ. Это обусловлено, очевидно, их высокой пористостью и большой проницаемостью. Влага, поступающая к поверхности слоя даже достаточно густой травы, быстро

проходит через нее и впитывается грунтом (в экспериментах уходила в водосборник под поддоном горючего материала). Смеси листьев, хвоинок и веточек также соответствуют наиболее высокие (из рассмотренных материалов) пористости и, соответственно, проницаемости. Это обусловлено существенно отличающимися характерными размерами элементов этих смесей (хвоинки – доли миллиметров, листья – единицы миллиметров, веточки – десятки миллиметров). В результате смешения таких существенно разнородных компонентов, как правило, образуются навески с очень высокой (по сравнению с другими материалами) пористостью. Вода за малый интервал времени проходит через поры ЛГМ и не оказывает быстрого влияния на процесс горения слоя материала, прилегающего к полосе увлажненного материала (заградительной полосы).

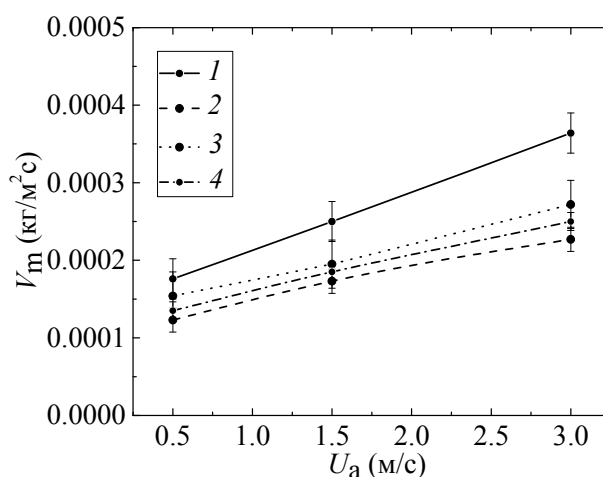


Рис. 4. Зависимость массовой скорости выгорания ЛГМ (с учетом пламенного горения и термического разложения в слое лесной подстилки) от скорости распространения воздушного потока:  
 1 – хвоя, 2 – смесь ЛГМ, 3 – листья, 4 – травянистые растения

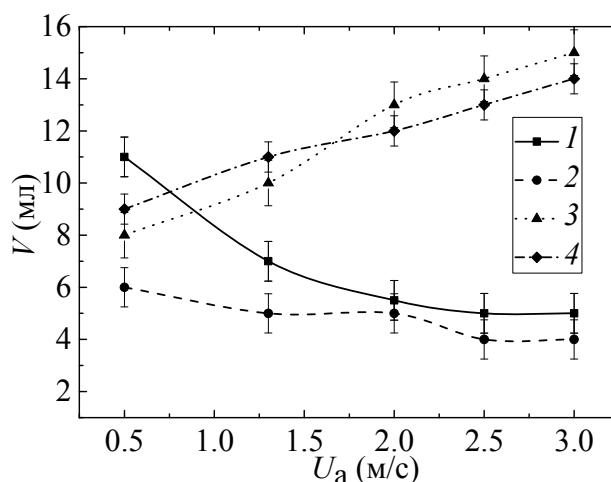


Рис. 5. Зависимость минимального объема тушащей жидкости, необходимого для подавления пламенного горения и термического разложения ЛГМ от скорости воздушного потока при горении различных типов ЛГМ: 1 – хвоя, 2 – листья, 3 – смесь ЛГМ, 4 – травянистые растения

Листья, как правило, в природе укладываются достаточно плотными слоями (в экспериментах навески формировались с учетом этих особенностей). Поэтому распыленная вода не проходила на большую глубину и не уходила в грунт (или в поддон в экспериментах), поглощая при нагреве теплоту, поступающую из зоны горения ЛГМ, за счет теплоемкости и фазовых превращений (испарения). Проницаемость для воды листьев минимальна по сравнению с другими исследованными материалами.

Хвоя занимает по времени локализации реакции промежуточное положение по сравнению с листьями и травой по двум причинам. Во-первых, хвоя достаточно легко уплотняется под действием собственного веса и в связи с малыми размерами (по сравнению с листьями и веточками). В результате пористость и проницаемость слоя хвои существенно больше аналогичного параметра для травы и смеси. Во-вторых, большему уплотнению структуры способствуют малые характерные размеры хвоинок, а также их малая жесткость по сравнению с веточками и листьями. Хвоинки достаточно легко деформируются под действием внешних нагрузок (например, снега или дождя в природных условиях) и заполняют поры. Соответственно, условия прохождения воды через хвою хуже, чем у травы и смеси.

Приведенные на рис. 3–5 значения параметров дают основания для оценки влияния скорости движения воздушного потока (ветра в природных условиях) на время локализации горения исследованных материалов. Хорошо видно, что это влияние в диапазоне изменения скоростей от 0,5 м/с до 3 м/с на время локализации горения листьев несущественно (максимальные отличия соответствуют доверительным интервалам, показанным на рис. 3 вертикальными линиями, проходящими через экспериментальные точки). Аналогичная связь времени локализации и скорости воздушного потока видна и для хвои. Но у высокопористых горючих материалов влияние воздушного потока более значительно (рис. 3–5). Последнее, скорее всего, обусловлено тем, что с ростом скорости потока воздуха интенсифицируются процессы дробления капель воды при их столкновениях. Чем выше скорости воздуха, тем интенсивнее дробление первых капель в аэрозольном облаке. Образующиеся мелкие капли проходят через пористую структуру горючих материалов медленнее, чем большие (лучше задерживаются, например, отдельными травинками или хвоинками). В результате поступившая к поверхности высокопористого горючего материала вода аккумулируется в тонком приповерхностном слое (не проходит в грунт или поддон в эксперименте) и поглощает теплоту, поступившую из области горения.

Существенно менее значимое влияние скорости воздушного потока на времена локализации установлено для ЛГМ на основе листьев. В этом случае поверхность материала, как показали проведенные эксперименты покрыта тонкой пленкой воды. Последняя играет важную роль, как было отмечено выше, в регулировании теплового баланса в окрестности заградительной полосы. Увеличение скорости движения капель воды при их приближении к поверхности пленки не оказывает значимого влияния на времена локализации горения ЛГМ, основу которого составляют листья.

Представленные на рис. 3–5 результаты опытов дают основание для обоснованного вывода о том, что эффективность применения водных заградительных полос существенно зависит от вида лесов, и этот фактор необходимо учитывать при планировании и организации процессов локализации низовых лесных и степных пожаров. В частности, при обобщении результатов опытов рассчитаны значения так называемой эффективной плотности орошения (по сути удельного расхода воды) для обеспечения минимальных достаточных условий локализации горения исследованных навесок (рис. 6).

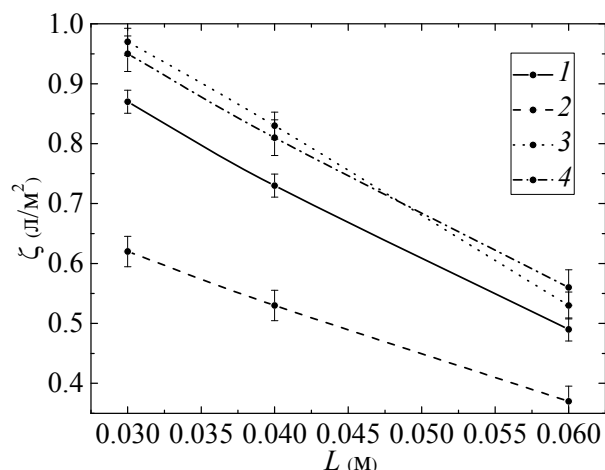


Рис. 6. Зависимость плотности орошения от ширины заградительной полосы ( $U_a \approx 1.3$  м/с):  
 1 – хвоя, 2 – листья, 3 – травянистые растения, 4 – смесь ЛГМ

При сравнительном анализе рис. 6 можно сделать несколько выводов. В частности, установлено, что типичные для степей травянистые растения по удельным характеристикам локализации горения близки к смесям типичных ЛГМ. Также проведенные эксперименты показали, что необходимый минимальный объем тушащей жидкости (воды), вылитой в заградительную полосу, для травянистых растений больше чем для других типов ЛГМ при малых скоростях воздушного потока. При увеличении скорости потока, объем тушащей жидкости растет (однако не так значительно, как для смеси ЛГМ). Т.е. в случае травянистых растений параметры заградительной полосы будут меньше зависеть от скорости воздушного потока. Важно правильно выбрать объем воды и размеры полосы. Можно использовать установленные зависимости, приведенные на рис. 6. Они представляют наибольшую практическую ценность для достоверного прогнозирования минимальных параметров распыления воды в зону горения и перед фронтом.

### Выводы

1. Выполненная высокоскоростная видеорегистрация и малоинерционные термодатные измерения позволили установить существенно отличающиеся механизмы, условия и характеристики термического разложения лесных горючих материалов: хвоя, листья, смесь с веточками. В частности, для хвои характерны процессы продвижения фронтов пиролиза как в глубинные слои навески, так и по ее поверхности в соответствии с направлением ветра. В опытах с листьями глубинные слои прогревались долго. В течение этого времени весь приповерхностный слой выгорает. Для моделей очагов степных пожаров установлены механизмы и условия, хорошо коррелирующие с хвоинками.

2. Для локализации пиролиза при низовых лесных и степных пожарах необходимо и достаточно организовать перед фронтом горения специализированную заградительную полосу в виде увлажненного слоя материала. При этом размеры такой полосы и объем необходимой воды (соответственно, и удельный расход воды или плотность орошения) для хвоинок и растительных материалов отличаются незначительно.

3. Для борьбы с фронтами горения при низовых лесных и степных пожарах наиболее рациональной, безопасной и достаточной схемой распыления воды является формирование за-



градительной полосы перед фронтом. Основной параметр для специалистов – эффективная плотность орошения, позволяющая обеспечить требуемую ширину, длину и глубины полосы. При этом нет существенных ограничений по времени распыления воды в области полосы.

*Исследования выполнены за счет средств Гранта Российского научного фонда (проект 18–19–00056). Авторы выражают благодарность сотрудникам Лаборатории моделирования процессов теплопереноса Национального исследовательского Томского политехнического университета (<http://hmtslab.tpu.ru>) за помощь в проведении экспериментальных исследований.*

## Литература

1. Merino L., Caballero F., Martínez-De-Dios J. R., Maza I., Ollero A. An unmanned aircraft system for automatic forest fire monitoring and measurement // Journal of Intelligent and Robotic Systems: Theory and Applications. - 2012. V. 65, № 1–4. P. 533–548.
2. Москвиллин Е.А. Применение авиации для тушения лесных пожаров // Пожарная безопасность. - 2009. №1. С.89–92.
3. Копылов Н.П., Хасанов И.Р., Кузнецов А.Е., Федоткин Д.В., Москвиллин Е.А., Стрижак П.А., Карпов В.Н. Параметры сброса воды авиационными средствами при тушении лесных пожаров // Пожарная безопасность. - 2015. № 2. С. 49–55.
4. Thompson M.P., Calkin D.E., Herynk J., McHugh C.W., and Short K.C. Airtankers and wildfire management in the US Forest Service: examining data availability and exploring usage and cost trends // International Journal of Wildland Fire. - 2012. V. 22, № 2. P. 223–233.
5. 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 // International Journal of Wildland Fire. - 2014. V. 23, № 2. P. 259–271.
6. 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.
7. Субботин А.Н. Математическая модель распространения низового лесного пожара по подстилке или слою опада хвои // Пожарная безопасность. -2008. № 1. С. 109–116.
8. Асеева Р.М., Серков Б.Б., Сивенков А.Б. Горение и пожарная опасность древесины // Пожаровзрывобезопасность. - 2012. Т. 21, №1. С. 19–32.
9. 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 Journal. - 2014. V. 70. P. 61–70.
10. Коробейничев О.П., Шмаков А.Г., Чернов А.А., Большова Т.А., Шварцберг В.М., Куценогий К.П., Макаров В.И. Тушение пожаров с применением аэрозолей растворов солей // Физика горения и взрыва. - 2010. Т. 46, № 1. С. 20–25.
11. Snegirev A.Yu., Tsoy A.S. Treatment of local extinction in CFD fire modeling // Proceedings of the Combustion Institute. - 2015. V. 35, № 3. P. 2519–2526.
12. Korobeinichev O.P., Shmakov A.G., Shvartsberg V.M., Chernov A.A., Yakimov S.A., Koutsenogii K.P., Makarov V.I. Fire suppression by low-volatile chemically active fire suppressants using aerosol technology // Fire Safety Journal. - 2012. V. 51. P. 102–109.
13. Барановский Н.В., Кузнецов Г.В. Прогноз возникновения лесных пожаров и их экологических последствий, Новосибирск: Изд-во Сибирского отделения РАН. - 2009.
14. Доррер Г.А. Математические модели динамики лесных пожаров. – М.: Лесная промышленность. - 1979.
15. Конев Э.В. Физические основы горения растительных материалов. – Новосибирск: Наука. - 1977.
16. Гришин А.М. Математические модели лесных пожаров. – Томск: Издательство Томского университета. - 1981.
17. Щетинский, Е.А. Тушение лесных пожаров / Е.А. Щетинский. – Москва: ВНИИЛМ. - 2002. – 104 с.

18. Высокоморная О.В., Кузнецов Г.В., Стрижак П.А. Испарение и трансформация капель и больших массивов жидкости при движении через высокотемпературные газы. Новосибирск: Издательство СО РАН. - 2016. 302 с.

19. Volkov R.S., Kuznetsov G.V., Strizhak P.A. Experimental Study of the Suppression of Flaming Combustion and Thermal Decomposition of Model Ground and Crown Forest Fires // Combustion, Explosion, and Shock Waves. - 2017. V. 53. No 6. P. 678–688.

20. Войтков И.С., Волков Р.С., Жданова А.О., Кузнецов Г.В., Накоряков В.Е. Физико-химические процессы при взаимодействии аэрозоля с фронтом горения лесных горючих материалов // Прикладная механика и техническая физика. - 2018. Т. 59, №5, С. 1–13

21. Zhang X., Kondragunta S. Temporal and spatial variability in biomass burned areas across the USA derived from the GOES fire product // Remote Sensing of Environment. - 2008. V. 112. P. 2886–2897.

22. Haas J.R., Calkin D.E., Thompson M.P. Wildfire risk transmission in the Colorado front range, USA // Risk Analysis. - 2015. P. 226–240.

23. Ager A.A., A. Day M., Finney M.A., Vance-Borland K., Vaillant N.M. Analyzing the transmission of wildfire exposure on a fire-prone landscape in Oregon, USA // Forest Ecology and Management. 2014. P. 377–390.

24. Reilly M.J., Elia M., Spies T.A., Gregory M.J., Sanesi G., Laforzezza R. Cumulative effects of wildfires on forest dynamics in the eastern Cascade Mountains, USA // Ecological Applications. - 2018. Vol 28. P. 291–308.

25. Dowdy A.J. Climatological variability of fire weather in Australia // Journal of Applied Meteorology and Climatology. - 2018. Vol 57. P. 221–234.

26. Лощилова Н.А., Беляев И.В., Эффективность тушения лесного пожара при комбинировании естественной и искусственной преград // Фундаментальные и прикладные исследования в современном мире. - 2015. № 12-3. С. 31–32.

27. Ерицов А.М., Гусев В.Г., Совершенствование технологий создания заградительных и опорных полос при тушении лесных пожаров в зонах лесоавиационных работ // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Лес. Экология. Природопользование. - 2016. № 1 (29). С. 42–56.

### Сведения об авторах

**Жданова Алена Олеговна**, старший преподаватель Исследовательской школы физики высокоэнергетических процессов, Национальный исследовательский Томский политехнический университет. Россия, 634050, г. Томск, проспект Ленина 30. Рабочий телефон: 8 (3822) 701-777, доп. 3461 E-mail: zhdanovaao@tpu.ru

**Войтков Иван Сергеевич**, аспирант Исследовательской школы физики высокоэнергетических процессов, Национальный исследовательский Томский политехнический университет. Россия, 634050, г. Томск, проспект Ленина 30. E-mail: zent91@mail.ru

**Шлегель Никита Евгеньевич**, магистрант Исследовательской школы физики высокоэнергетических процессов, Национальный исследовательский Томский политехнический университет. Россия, 634050, г. Томск, проспект Ленина 30. E-mail: nik.shlegel.ask@gmail.com

**Хасанов Ирек Равильевич**, главный научный сотрудник, Всероссийский научно-исследовательский институт противопожарной обороны МЧС России. Россия 143903, Московская область, г. Балашиха, мкр. ВНИИПО 12. телефон: 8 (495) 521-87-27 E-mail: irhas@rambler.ru

**Кузнецов Гений Владимирович**, профессор, главный научный сотрудник Инженерной школы энергетики, Национальный исследовательский Томский политехнический университет. Россия, 634050, г. Томск, проспект Ленина 30. Рабочий телефон: 8 (3822) 563-613. E-mail: kuznetsovgv@tpu.ru