

**Д. В. АНТОНОВ**, магистрант, Национальный исследовательский Томский политехнический университет (Россия, 634050, г. Томск, просп. Ленина, 30; e-mail: 1aadsdfn@gmail.com)

**И. С. ВОЙТКОВ**, аспирант, Национальный исследовательский Томский политехнический университет (Россия, 634050, г. Томск, просп. Ленина, 30; e-mail: zent91@mail.ru)

**Р. С. ВОЛКОВ**, канд. техн. наук, доцент, Национальный исследовательский Томский политехнический университет (Россия, 634050, г. Томск, просп. Ленина, 30; e-mail: romanvolkov@tpu.ru)

**А. О. ЖДАНОВА**, канд. физ.-мат. наук, старший преподаватель, Национальный исследовательский Томский политехнический университет (Россия, 634050, г. Томск, просп. Ленина, 30; e-mail: zhdanovaao@tpu.ru)

**Г. В. КУЗНЕЦОВ**, д-р физ.-мат. наук, профессор, главный научный сотрудник, Национальный исследовательский Томский политехнический университет (Россия, 634050, г. Томск, просп. Ленина, 30; e-mail: kuznetsovgv@tpu.ru)

**И. Р. ХАСАНОВ**, д-р техн. наук, главный научный сотрудник, ВНИИПО МЧС России (Россия, 143903, Московская обл., г. Балашиха, мкр. ВНИИПО, 12; e-mail: irhas@rambler.ru)

**Н. Е. ШЛЕГЕЛЬ**, магистрант, Национальный исследовательский Томский политехнический университет (Россия, 634050, г. Томск, просп. Ленина, 30; e-mail: nik.shlegel.ask@gmail.com)

УДК 536.46

## ВЛИЯНИЕ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫХ ДОБАВОК НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ЛОКАЛИЗАЦИИ ПЛАМЕННОГО ГОРЕНИЯ И ТЕРМИЧЕСКОГО РАЗЛОЖЕНИЯ ЛЕСНЫХ ГОРЮЧИХ МАТЕРИАЛОВ

Дан сравнительный анализ механизмов, условий и характеристик локализации, подавления горения типичных лесных горючих материалов в условиях воздействия жидкостного аэрозоля при увлажнении заградительной полосы. Используются составы на основе воды без добавок, а также с примесью бентонита, бишофита и пенообразователей. Показаны возможные диапазоны изменения времен локализации и используемых объемов жидкости. Выявлены различия в необходимом удельном расходе жидкости в зоне заградительной полосы. Зарегистрировано минимальное время локализации горения для состава с добавкой бентонита. Установлены минимальные объемы жидкостного состава с добавкой бентонита по сравнению с бишофитом и пенообразователем.

**Ключевые слова:** лесной горючий материал; пламенное горение; термическое разложение; пиролиз; локализация; специализированные добавки к воде.

**DOI:** 10.18322/PVB.2018.27.09.5-16

### Введение

Введение тех или иных добавок и примесей (например, бентонита, бишофита, пенообразователей и др.) [1–14] в воду для тушения пожаров любой степени сложности [15–17] обусловлено стремлением специалистов интенсифицировать один или несколько известных механизмов локализации и подавления пламенного горения и термического разложения материала (которые подробно проанализированы в [18–20]). Традиционно такие добавки и примеси используют в процессе подавления горения лесных массивов на ограниченных площадях, так как в больших объемах их применение затруд-

нено [8–10]. Достаточно часто считается, что подавить горение лесных горючих материалов (ЛГМ) чрезвычайно сложно. Следовательно, наиболее рациональный подход к борьбе с этими стихийными бедствиями состоит в своевременной локализации очагов горения и пиролиза [19, 20].

К настоящему времени опубликовано мало экспериментальных данных по отличиям характеристик и условий локализации пламенного горения и термического разложения типичных лесных горючих материалов путем создания заградительных водных полос перед фронтом горения. В работе [20] предприняты попытки экспериментально определить

основные размеры (протяженность, ширину, глубину) заградительной полосы, необходимые для локализации пламенного горения и пиролиза хвои, листвы, смеси материалов при применении трех схем распыления — по кромке, перед кромкой и комбинированной (основанной на первых двух). Показано [20], что для эффективной локализации процессов пиролиза и пламенного горения всех исследованных ЛГМ нет необходимости применять чрезвычайно широкие и протяженные увлажненные слои (заградительные полосы) и большие объемы воды. Для локализации горения ЛГМ с различными объемами навесок достаточно, если данные параметры будут иметь ограниченные значения.

На основании результатов опытов с бентонитом, бишофитом и пенообразователями [8–10] можно выдвинуть гипотезу о том, что в случае применения этих добавок и примесей возможна оптимизация процесса расходования воды в области заградительной полосы или уменьшение времени подавления горения. В связи с этим интерес представляет изучение влияния указанных добавок и примесей на условия и характеристики локализации типичных модельных пожаров с использованием наиболее распространенных материалов.

Цель настоящей работы — экспериментальное исследование влияния специализированных добавок на эффективность локализации пламенного горения и термического разложения типичных лесных горючих материалов путем применения заградительной полосы в виде увлажненного материала перед основным фронтом горения.

### Методика экспериментальных исследований

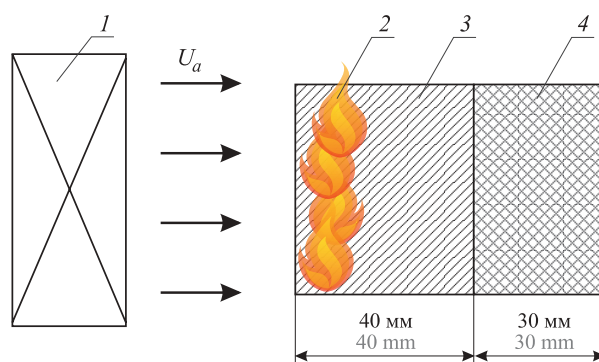
Добавки к воде делятся на три категории — смачивающие, огнезадерживающие и тушащие. Каждая из выделенных категорий существенно изменяет физико-химические свойства тушащего состава. Например, смачивающие вещества, снижая поверхностное натяжение воды, способствуют интенсивному проникновению тушащего состава в глубинные слои термически разлагающегося материала. Огнезадерживающие и тушащие составы придают обработанным материалам негорючие свойства и практически не обладают смачивающим эффектом. Выбор добавки к воде определяет один из основных механизмов подавления пламенного горения и термического разложения материалов: снижение температуры в зоне горения; блокирование доступа кислорода; вытеснение продуктов горения водяными парами.

Результаты многолетних исследований, стендовых, полевых и натурных испытаний позволили специалистам пожарных служб [4–6] выделить из

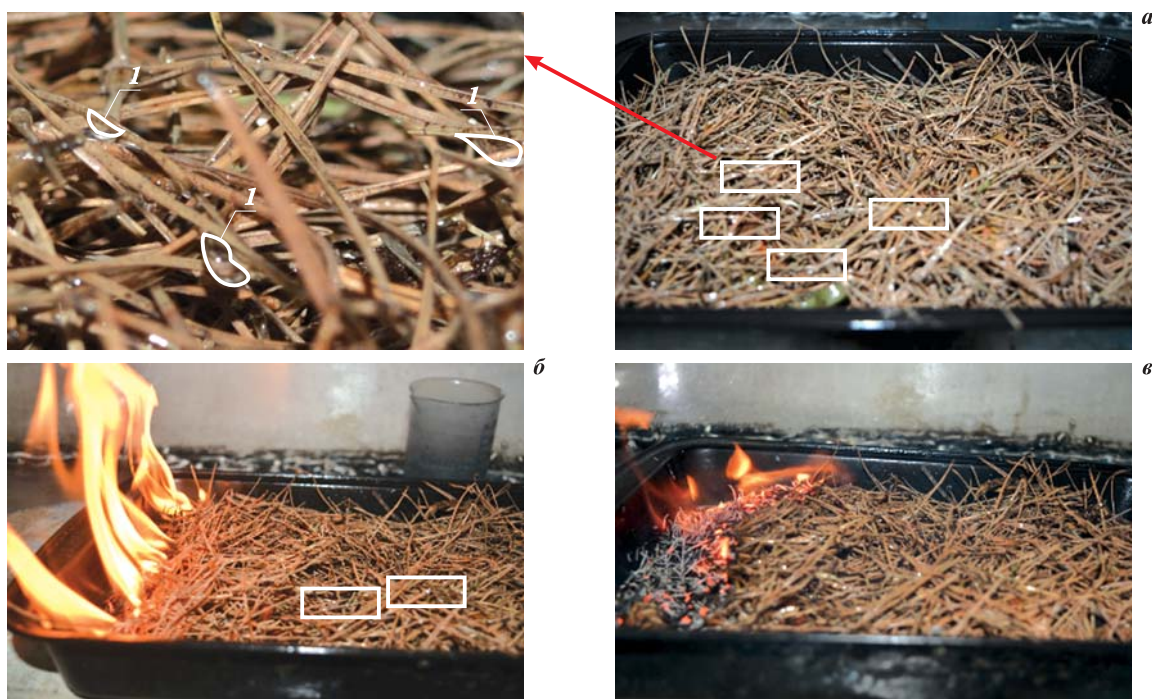
всего многообразия добавок к воде наиболее эффективные, экологичные и менее трудозатратные в плане приготовления растворов. Для тушения лесных пожаров хорошо зарекомендовали себя смачивающие составы пенообразователей, огнезадерживающий состав с добавкой бентонита и огнетушащий — с бишофитом [4–6]. Специалисты пожарных служб по результатам натурных испытаний установили влияние выделенных составов на процессы, протекающие при подавлении лесных пожаров крупными агломератами (характерны авиационным методом) и распыленными потоками (типичны для наземных способов) тушащего состава. Установлены значимые преимущества бентонита перед бишофитом и смачивателем [4–6]. Для исследования влияния специализированных добавок на эффективность локализации пламенного горения и термического разложения типичных лесных горючих материалов путем применения заградительной полосы создан лабораторный стенд (рис. 1).

Для создания заградительной полосы применялась дистиллированная вода (компонентный состав соответствовал ГОСТ 6709–72), а также смеси на основе воды с добавками бишофита (концентрация 8 % масс.), бентонита (5 % масс.), пенообразователя (0,3 % об.). Основные свойства добавок описаны в работах [4–6]. Наиболее типичные кадры видеogramм представлены на рис. 2–4. Показано, что в случае применения бентонита и бишофита во всех экспериментах регистрировался эффект локального скопления жидкостного состава на поверхности ЛГМ. В опытах с пенообразователями таких эффектов не наблюдалось. Это обусловлено тем, что пенообразователь вследствие измельчения капель способствует проникновению огнетушащего жидкостного состава в глубинные слои материала.

Анализ видеок кадров на рис. 2–4, выполненных в ходе опытов, позволяет сделать заключение, что

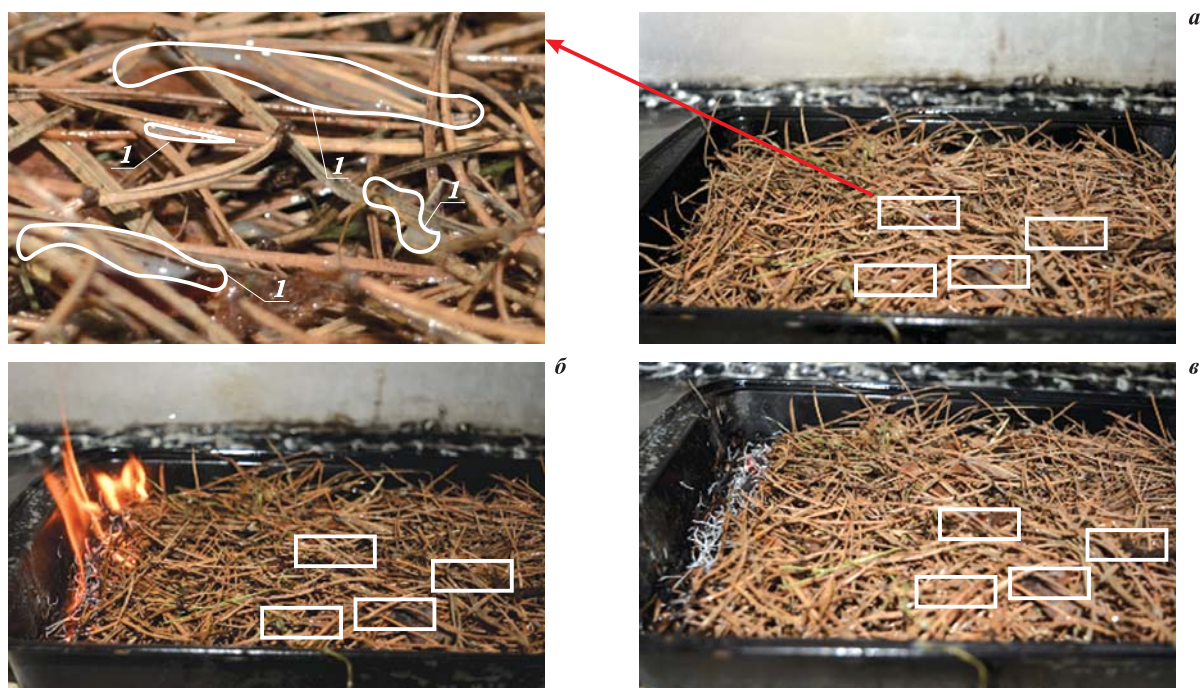


**Рис. 1.** Схема экспериментального стенда (вид сверху): 1 — нагнетатель воздуха; 2 — пламя; 3 — лоток с сухим ЛГМ; 4 — лоток с влажным ЛГМ;  $U_a$  — скорость потоков воздуха  
**Fig. 1.** Diagram of the experimental stand (top view): 1 — air blower; 2 — flame; 3 — tray with dry FFM; 4 — tray with wet FFM;  $U_a$  — air flow speed



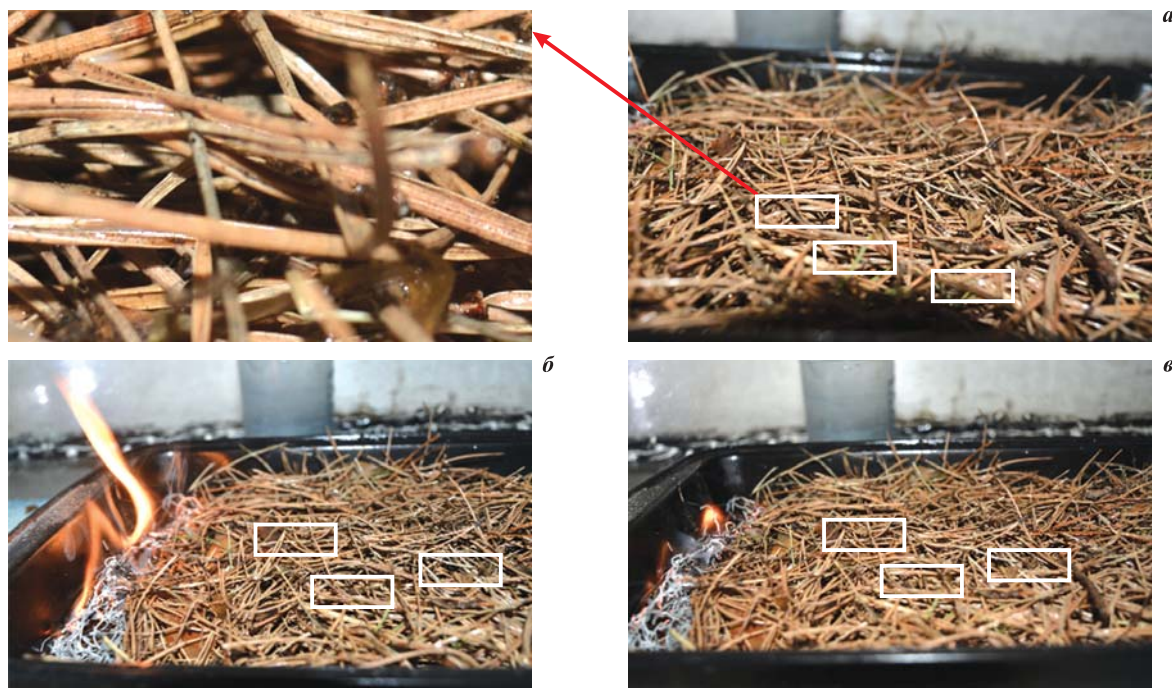
**Рис. 2.** Типичные видеокadres эксперимента (при скорости потока воздуха 2 м/с) с заградительной полосой при использовании добавки бишофита (концентрация 8 % масс.): *а* — генерация жидкостного аэрозоля (создание заградительной полосы); *б* — продвижение фронта пламени; *в* — торможение фронта горения; *1* — области локальной концентрации (скопления) тушащей жидкости

**Fig. 2.** Typical experimental video frames (with an airflow velocity of 2 m/s) with a barrier strip using a bischofite additive (concentration 8 % by mass): *a* — generation of a liquid aerosol (creation of a barrier); *b* — advancement of the flame front; *v* — braking of the combustion front; *1* — regions of local concentration (concentrations) of quenching liquids



**Рис. 3.** Типичные видеокadres эксперимента (при скорости потока воздуха 2 м/с) с заградительной полосой при использовании добавки бентонита (концентрация 5 % масс.): *а* — генерация жидкостного аэрозоля (создание заградительной полосы); *б* — продвижение фронта пламени; *в* — торможение фронта горения; *1* — области локальной концентрации (скопления) тушащей жидкости

**Fig. 3.** Typical video frames of the experiment (at an airflow velocity of 2 m/s) with a barrier strip using the bentonite additive (concentration of 5 % by mass): *a* — generation of a liquid aerosol (creation of a barrier); *b* — advancement of the flame front; *v* — braking of the combustion front; *1* — regions of local concentration (concentrations) of quenching liquids



**Рис. 4.** Типичные видеокдры эксперимента (при скорости потока воздуха 2 м/с) с заградительной полосой при использовании добавки пенообразователя (концентрация 0,3 % об.): *a* — генерация жидкостного аэрозоля (создание заградительной полосы); *б* — продвижение фронта пламени; *в* — торможение фронта горения

**Fig. 4.** Typical video frames of the experiment (with an airflow velocity of 2 m/s) with a barrier strip with the addition of a blowing agent (concentration 0.3 % by vol.): *a* — generation of a liquid aerosol (creation of a barrier); *b* — advancement of the flame front; *v* — braking of the combustion front

при генерации воды с добавкой бишофита на поверхности навески ЛГМ наблюдается скопление в основном мелких капель. Добавление бентонита повышает поверхностное натяжение водного состава, и капли при оседании на поверхности ЛГМ образуют единую пленку, которая разрушается лишь из-за неравномерной структуры хвои. В опытах с листовой данная пленка сохраняется в каждом опыте от начала воздействия жидкостного состава до полного прекращения горения. При добавлении в воду пенообразователя поверхностное натяжение воды снижается [4–6]. Довольно часто регистрируются малые локальные, смоченные составом фрагменты хвои. Состав с пенообразователем проникает в глубинные слои навески наиболее интенсивно, и, как следствие, глубина промачивания навески в этом случае максимальная. Этот эффект способствует локализации горения хвои при минимальных требуемых объемах и идентичных размерах заградительных полос по сравнению с другими составами.

Приготовление используемых в экспериментах составов осуществлялось непосредственно в емкости. Она наполнялась дистиллированной водой, после чего в нее в необходимом количестве добавлялись исследуемые добавки. При приготовлении составов на основе воды последние в течение 300 с активно перемешивались в баллоне.

Методика эксперимента включала выполнение последовательных процедур:

- в металлический поддон (ширина 200 мм, длина 300 мм) укладывалась по всей ширине полоса ЛГМ (масса  $m_f \approx 25$  г);
- при использовании распылительных форсунок, генерирующих капли размером  $R_d = 0,1 \div 0,35$  мм, создавалась заградительная полоса таким образом, чтобы перед ней оставалась полоса ЛГМ объемом  $V_f$ . Варьировались следующие параметры: объем сухого ЛГМ, ширина заградительной полосы, плотность орошения;
- навеска ЛГМ зажигалась равномерно по ширине с одного конца с помощью пьезоэлектрической горелки;
- включался нагнетатель, создающий воздушный поток (с варьируемой скоростью  $U_a = 0,5 \div 2$  м/с), и навеска ЛГМ начинала равномерно прогорать. Весь процесс регистрировался видеокамерой;
- эксперимент продолжался до полного тушения либо выгорания навески ЛГМ (прекращения тления). Момент прекращения тления устанавливался по показаниям трех термопар (расположенных в разных слоях навески ЛГМ), а также по видеogramмам. Аналогично экспериментам [18–20] в качестве критерия полного прекращения процесса пиролиза принималось снижение температуры ЛГМ менее 400 К (средняя темпе-

ратура начала пиролиза типичных лесных горючих материалов — хвой сосны и ели, листьев березы и других деревьев).

### Результаты и их обсуждение

На рис. 5 приведены установленные в опытах времена полного прекращения горения типичных лесных горючих материалов при разных характерных размерах (ширине) заградительной полосы (увлажненного ЛГМ перед фронтом горения). Хорошо видно, что (как и можно было ожидать) времена прекращения горения в несколько раз уменьшаются при увеличении ширины полосы (аналогичные по виду зависимости установлены в опытах при распылении воды непосредственно в зону горения [19, 20]). Для опытов с хвоей были характерны существенно нелинейные зависимости в сравнении с листвой (см. рис. 5), что обусловлено различием условий и скоростей распространения фронтов пламенного горения и пиролиза хвои и листвы. В опытах с листвой регистрировалось довольно быстрое распространение фронта пламенного горения по поверхности навески и очень медленное продвижение фронта термического разложения в глубинные слои. Как следствие, довольно часто листья выгорали по всей ширине свободной поверхности навески до заградительной полосы, а затем медленно тлели. Для прекращения горения необходимо было обеспечить останов основного фронта пламенного горения или подавление горения в целом. Чем шире заградительная полоса, тем больше воды аккумулировано в ее приповерхностных слоях. В опытах с листвой именно из приповерхностного слоя навески материала интенсивно использовалась вода для прекращения горения и пиролиза, поэтому на рис. 5 для листвы характерны практически линейные зависимости. В экс-

периментах с хвоей движение фронта пламенного горения в целом соответствовало аналогичному процессу в опытах с листвой, но условия и скорости распространения фронтов пиролиза отличались в несколько раз. В частности, наблюдался интенсивный пиролиз хвои по всей толщине навески, поэтому увеличение ширины полосы при сохранении использованного объема воды не могло линейно повлиять на время прекращения горения. Вода в области заградительной полосы присутствовала в разных сечениях навески по толщине и интенсивно испарялась по всему слою материала. Чем шире полоса, тем равномернее распределялась вода в пористой структуре навески хвои. Вследствие этого время прекращения горения снижалось существенно нелинейно.

Если же сравнивать между собой времена подавления горения ЛГМ при использовании разных жидкостных составов, то можно отметить ожидаемые максимальные значения этой характеристики для опытов с водой без примесей (см. рис. 5). Bentonит обеспечивал минимальные значения времен подавления горения за счет образования на поверхности материала устойчивой пленки, которая не позволяла проходить фронту пламенного горения. Кроме того, в результате поникновения в приповерхностные слои состав на основе бентонита способствовал заполнению пор навесок. Особенно заметен был данный эффект в опытах с хвоей. В случае применения пенообразователя наблюдалось сокращение времен локализации по сравнению с водой вследствие существенного уменьшения (на 25–35 %) характерных радиусов капель. Благодаря этому последние проникали в глубинные слои навески в большем количестве и обеспечивали локализацию процессов пламенного горения и термического разложения за меньшее время и при малых объемах воды.

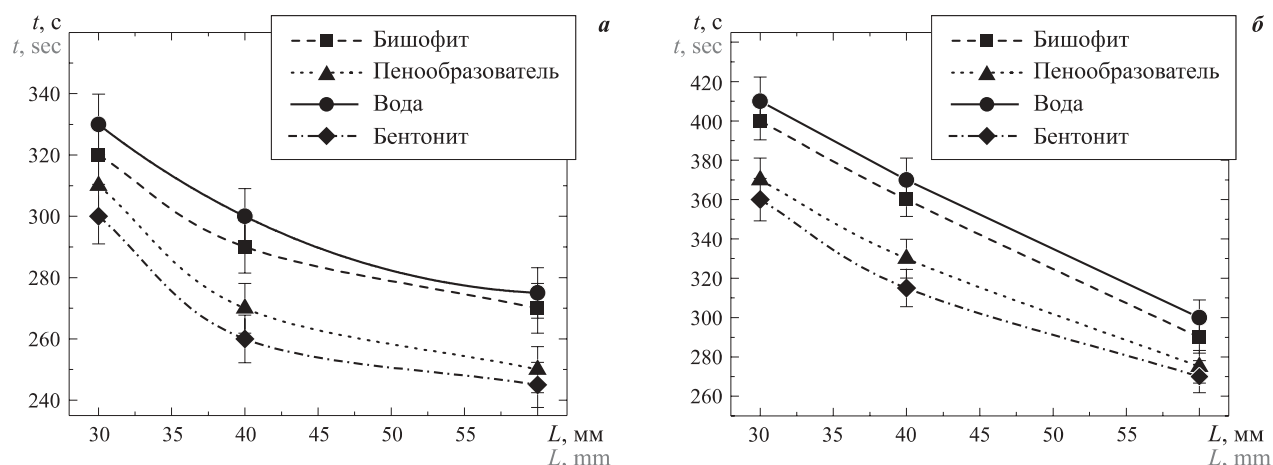
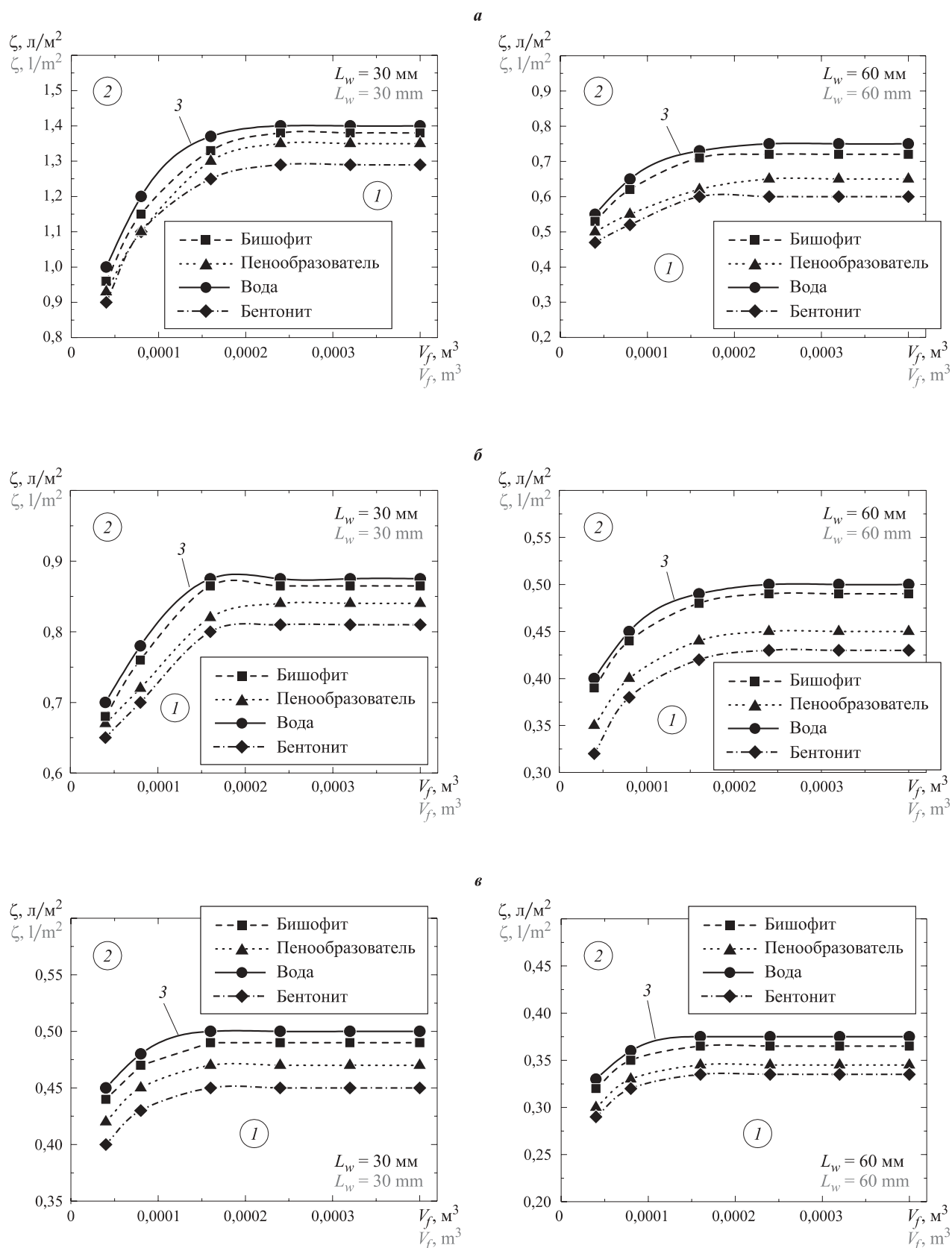


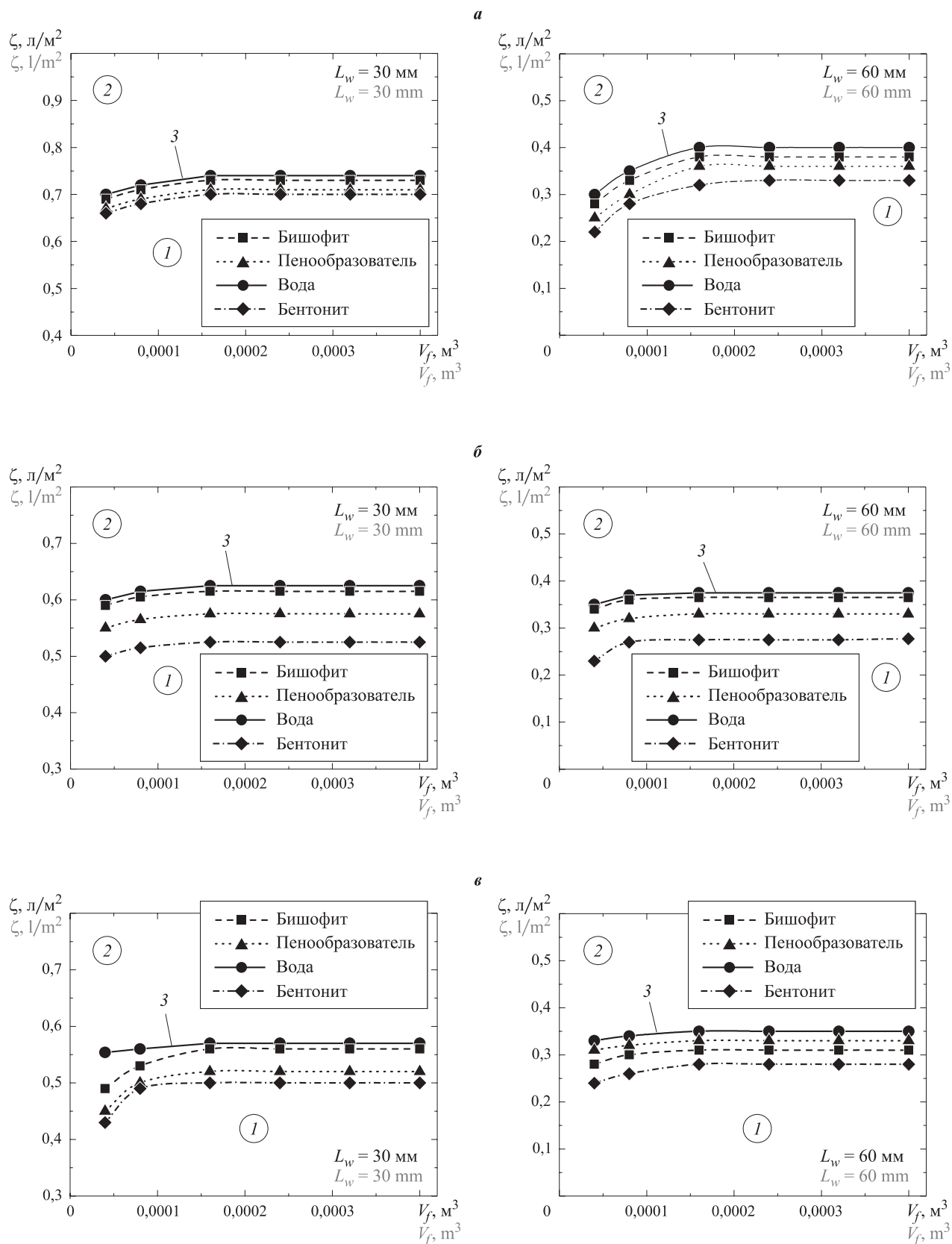
Рис. 5. Зависимость времени полного прекращения реакции термического разложения от ширины полосы ЛГМ  $L$  при скорости воздушного потока 1,3 м/с: а — хвоя; б — листва

Fig. 5. Dependence of the time for complete cessation of the thermal decomposition reaction on the width of the FFM strip  $L$  at an air speed of 1.3 m/s: а — needles; б — leaves



**Рис. 6.** Зависимость плотности орошения от объема ЛГМ (хвои) для различных типов добавок при скорости воздушного потока 0,5 м/с (а), 1,3 м/с (б) и 2 м/с (в): 1 — прогорание ЛГМ; 2 — останов фронта горения заградительной полосой (и последующее подавление горения в целом); 3 — пограничная (переходная область)

**Fig. 6.** Dependence of the density of irrigation on the volume of FFM (needles) for various types of additives at an air speed of 0.5 m/s (a), 1.3 m/s (b) and 2 m/s (v): 1 — burning FFM; 2 — stopping of the front of burning by the barrier strip (and the subsequent suppression of combustion as a whole); 3 — border (transition area)



**Рис. 7.** Зависимость плотности орошения от объема ЛГМ (листья) для различных типов добавок при скорости воздушного потока 0,5 м/с (а), 1,3 м/с (б) и 2 м/с (в): 1 — прогорание ЛГМ; 2 — полный останов фронта горения заградительной полосой и подавление пиролиза; 3 — пограничная (переходная область)

**Fig. 7.** Dependence of the density of irrigation on the volume of FFM (leaves), for various types of additives at an air speed of 0.5 m/s (a), 1.3 m/s (b) and 2 m/s (v): 1 — burning FFM; 2 — full stop of the front of burning by a barrier strip and suppression of pyrolysis; 3 — border (transition area)

На рис. 6 приведены зависимости плотности орошения (удельного расхода воды) от объема сухого (не подверженного термическому разложению) ЛГМ перед заградительной полосой для хвои, а на рис. 7 — для листвы с выделением характерных областей.

Анализ рис. 6 и 7 позволяет сделать несколько наиболее важных выводов. *Во-первых*, во всех опытах для прекращения пиролиза хвои и листвы достаточно применения ограниченного объема жидкостного состава в области заградительной полосы, т. е. нет необходимости чрезмерно заливать полосу. Причем чем шире полоса реагирующего слоя перед заградительной, тем заметнее этот эффект. Таким образом, рис. 6 и 7 иллюстрируют, что локализация процесса горения и хвои, и листвы объемом выше некоторого предельного значения практически ничем не отличается (по времени и используемому объему воды). *Во-вторых*, снижение плотности орошения при увеличении скорости воздушного потока связано с тем, что горение идет по верхнему слою навески. Проникновение тушащего состава в глубинные слои лесного горючего материала не является определяющим при локализации горения (особенно листвы). Наиболее заметны эти особенности при высоких скоростях движения воздушного потока. *В-третьих*, составы с бентонитом и пенообразователем характеризуются минимальными значениями времен локализации горения и требуемых объемов воды. Как следствие, удельный расход (плотность орошения) для них также минимален для разных типов и объемов ЛГМ. *В-четвертых*, как и на рис. 5, при сравнении рис. 6 и 7 можно отметить существенно нелинейные связи между ключевыми параметрами по сравнению с аналогичными характеристиками в опытах с листвой. Причины этого явления были проанализированы выше. *В-пятых*, если обобщать характеристики на рис. 6 и 7 при использовании данных из работ [4–6, 19, 20], то можно отметить существенно меньшие значения плотности орошения, достаточные для локализации горения, по сравнению с подавлением горения за счет впрыска жидкости непосредственно в зону горения.

Наибольшую ценность представляют экспериментальные количественные результаты, иллюстрирующие отличия между временами, объемами жидкости и удельными расходами, необходимыми и достаточными для локализации горения разных типов материалов за счет применения заградительных полос. В частности, из рис. 6 и 7 видно, что удельные расходы (плотности орошения) можно варьировать в пределах 20–40 % при использовании жидкостных составов на основе воды с добавками. Даже небольшая по объемной или массовой концентрации добавка способствует значительной экономии состава (снижению требуемого удельного расхода). Особен-

но заметны данные эффекты для составов на основе бентонита и пенообразователя, поэтому их можно считать наиболее рациональными для широкого применения в практике локализации горения различных лесных массивов. Главная задача специалистов — оптимизация процессов приготовления данных составов для борьбы с лесными пожарами на больших площадях.

Следует также отметить, что добавление различных примесей к воде для локализации и подавления горения лесных массивов оправдано при работе с ограниченными по площади очагами горения. Сравнительный анализ рис. 5–7 показывает, что полное выгорание локализованного участка лесного массива даже при высоких скоростях воздушного потока происходит в течение нескольких минут. За это время фронты пламенного горения и пиролиза могут распространиться на чрезвычайно большие площади, поэтому полученные в опытах количественные результаты позволяют прогнозировать типичные времена для формирования заградительных полос перед фронтом горения.

Рис. 6 и 7 показывают, что параметры заградительной полосы (геометрические размеры и необходимый объем жидкости) следует выбирать исходя из размеров прилегающего слоя лесного горючего материала, т. е., иными словами, энергоемкости заградительной полосы (определяемой высокими теплосемкостью воды и теплотой парообразования последней) должно хватить для подавления пламенного горения и пиролиза всего прилегающего к полосе материала. Из рис. 6 и 7 видно, что объем такого материала ограничен и довольно мал. Однако следует заметить, что при больших объемах материала характеристики процесса не меняются (см. рис. 6 и 7). Это обусловлено тем, что к тому моменту времени, когда фронт пламенного горения доходит до заградительной полосы, материал уже полностью выгорает в области инициирования и представляет собой инертный ЛГМ. Именно поэтому его объем и не влияет на условия и характеристики горения. Как следствие, с использованием данных, приведенных на рис. 6 и 7, можно прогнозировать удельные расходы исследованных огнезадерживающих и огнетушащих составов для разных объемов потенциально опасных пиролизующихся материалов.

## Заключение

Проведенные эксперименты позволили установить достаточно существенные отличия между основными характеристиками процессов локализации пламенного горения и пиролиза типичных ЛГМ при применении воды, а также составов на основе воды с типичными для практики пожаротушения добавками. Особенно заметны отличия по необходимому

удельному расходу жидкости (плотности орошения) при применении ее в заградительной полосе (при указанной ширине последней можно пересчитать как абсолютные, так и относительные значения необходимых объемов воды или других составов на ее основе). Минимальное время локализации горения установлено для состава с добавкой бентонита. Кроме того, зарегистрированы минимальные объемы жидкостного состава с добавкой бентонита по сравнению с бишофитом и пенообразователем.

\*\*\*

*Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 18-19-00056). Авторы выражают благодарность сотрудникам лаборатории моделирования процессов тепло-массопереноса Национального исследовательского Томского политехнического университета (<http://hmtslab.tpu.ru>) за помощь в проведении экспериментальных исследований.*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

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. — 2012. — Vol. 65, Issue 1-4. — P. 533–548. DOI: 10.1007/s10846-011-9560-x.
2. Cary G. J., Davies I. D., Bradstock R. A., Keane R. E., Flannigan M. D. Importance of fuel treatment for limiting moderate-to-high intensity fire: findings from comparative fire modelling // Landscape Ecology. — 2017. — Vol. 32, Issue 7. — P. 1473–1483. DOI: 10.1007/s10980-016-0420-8.
3. Копылов Н. П., Москвиллин Е. А., Федоткин Д. В., Стрижак П. А. Влияние вязкости огнетушащего раствора на эффективность тушения лесных пожаров с помощью авиации // Лесотехнический журнал. — 2016. — Т. 6, № 4(24). — С. 62–67. DOI: 10.12737/23436.
4. Копылов Н. П., Хасанов И. Р., Кузнецов А. Е., Федоткин Д. В., Москвиллин Е. А., Стрижак П. А., Карпов В. Н. Повышение эффективности тушения лесных пожаров с использованием добавок к воде // Пожарная безопасность. — 2015. — № 4. — С. 46–50.
5. Копылов Н. П., Хасанов И. Р., Федоткин Д. В., Стрижак П. А., Карпов В. Н., Зверева-Степная А. В., Москвиллин Е. А. Стенд для исследования огнетушащих веществ, применяемых при тушении лесных пожаров авиационными средствами // Пожарная безопасность. — 2015. — № 4. — С. 51–57.
6. Копылов Н. П., Хасанов И. Р., Кузнецов А. Е., Федоткин Д. В., Москвиллин Е. А., Стрижак П. А., Карпов В. Н. Оптимизация выбора добавок к воде при тушении лесных пожаров с помощью авиации // Пожарная безопасность. — 2016. — № 4. — С. 48–50.
7. Гусев В. Г., Ерицов А. М., Куприн Г. Н., Куприн Д. С., Степанов В. Н. Результаты экспериментальных исследований параметров противопожарных заградительных полос при свободном сливе огнетушащей жидкости с вертолета // Труды Санкт-Петербургского научно-исследовательского института лесного хозяйства. — 2016. — № 2. — С. 60–74.
8. Михайлова Н. В., Гуцев Н. Д. Результаты лабораторных исследований свойств новых огнетушащих составов для борьбы с лесными пожарами // Безопасность жизнедеятельности. — 2014. — № 4(160). — С. 33–39.
9. Dombrovsky L. A., Dembele S., Wen J. X. A simplified model for the shielding of fire thermal radiation by water mists // International Journal of Heat and Mass Transfer. — 2016. — Vol. 96. — P. 199–209. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.01.028.
10. Grishin A. M., Shipulina O. V. Mathematical model for spread of crown fires in homogeneous forests and along openings // Combustion, Explosion, and Shock Waves. — 2002. — Vol. 38, Issue 6. — P. 622–632. DOI: 10.1023/A:1021127924913.
11. 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. — Vol. 51. — P. 102–109. DOI: 10.1016/j.firesaf.2012.04.003.
12. Rakowska J., Szczygieł R., Kwiatkowski M., Porycka B., Radwan K., Prochaska K. Application tests of new wetting compositions for wildland firefighting // Fire Technology. — 2017. — Vol. 53, Issue 3. — P. 1379–1398. DOI: 10.1007/s10694-016-0640-0.
13. Kawahara T., Hatae S., Kanyama T., Ishizaki Y., Uezu K. Development of eco-friendly soap-based firefighting foam for forest fire // Environmental Control in Biology. — 2016. — Vol. 54, Issue 1. — P. 75–78. DOI: 10.2525/ecb.54.75.

14. Korobeinichev O. P., Shmakov A. G., Chernov A. A., Bol'shova T. A., Shvartsberg V. M., Kutsenogii K. P., Makarov V. I. Fire suppression by aerosols of aqueous solutions of salts // *Combustion, Explosion, and Shock Waves*. — 2010. — Vol. 46, Issue 1. — P. 16–20. DOI: 10.1007/s10573-010-0003-y.
15. Bottero A., D'Amato A. W., Palik B. J., Kern C. C., Bradford J. B., Scherer S. S. Influence of repeated prescribed fire on tree growth and mortality in pinus resinosa forests, Northern Minnesota // *Forest Science*. — 2017. — Vol. 63, Issue 1. — P. 94–100. DOI: 10.5849/forsci.16-035.
16. Chromek I., Lukášová K., Berčák R., Vaněk J., Holuša J. Hollow tree fire is a useless forest fire category // *Central European Forestry Journal*. — 2018. — Vol. 64, Issue 1. — P. 67–78. DOI: 10.1515/forj-2017-0028.
17. Tremblay P.-O., Duchesne T., Cumming S. G. Survival analysis and classification methods for forest fire size // *PLoS ONE*. — 2018. — Vol. 13, Issue 1. — e0189860. DOI: 10.1371/journal.pone.0189860.
18. Zhdanova A. O., Volkov R. S., Voytkov I. S., Osipov K. Yu., Kuznetsov G. V. Suppression of forest fuel thermolysis by water mist // *International Journal of Heat Mass Transfer*. — 2018. — Vol. 126. — P. 703–714. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.05.085.
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. — Vol. 53, No. 6. — P. 678–688. DOI: 10.1134/s0010508217060089.
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.

*Материал поступил в редакцию 5 августа 2018 г.*

**Для цитирования:** Антонов Д. В., Войтков И. С., Волков Р. С., Жданова А. О., Кузнецов Г. В., Хасанов И. Р., Шлегель Н. Е. Влияние специализированных добавок на эффективность локализации пламенного горения и термического разложения лесных горючих материалов // *Пожаровзрывобезопасность / Fire and Explosion Safety*. — 2018. — Т. 27, № 9. — С. 5–16. DOI: 10.18322/PVB.2018.27.09.5-16.

English

## INFLUENCE OF SPECIALIZED ADDITIVES ON THE EFFICIENCY OF LOCALIZATION OF FLAME BURNING AND THERMAL DECOMPOSITION OF FOREST FUEL MATERIALS

**ANTONOV D. V.**, Undergraduate, National Research Tomsk Polytechnic University (Lenina Avenue, 30, Tomsk, 634050, Russian Federation; e-mail: 1aadsdfn@gmail.com)

**VOYTKOV I. S.**, Postgraduate Student, National Research Tomsk Polytechnic University (Lenina Avenue, 30, Tomsk, 634050, Russian Federation; e-mail: zent91@mail.ru)

**VOLKOV R. S.**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, National Research Tomsk Polytechnic University (Lenina Avenue, 30, Tomsk, 634050, Russian Federation; e-mail: romanvolkov@tpu.ru)

**ZHDANOVA A. O.**, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Senior Lecturer, National Research Tomsk Polytechnic University (Lenina Avenue, 30, Tomsk, 634050, Russian Federation; e-mail: zhdanovaao@tpu.ru)

**KUZNETSOV G. V.**, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Chief Researcher, National Research Tomsk Polytechnic University (Lenina Avenue, 30, Tomsk, 634050, Russian Federation; e-mail: kuznetsovgy@tpu.ru)

**KHASANOV I. R.**, Doctor of Technical Sciences, Chief Researcher, All-Russian Research Institute for Fire Protection of Emercom of Russia (VNIPO, 12, Moscow Region, Balashikha, 143903, Russian Federation; e-mail: irhas@rambler.ru)

**SHLEGEL N. E.**, Undergraduate, National Research Tomsk Polytechnic University (Lenina Avenue, 30, Tomsk, 634050, Russian Federation; e-mail: nik.shlegel.ask@gmail.com)

## ABSTRACT

**Introduction.** One of the widely used methods of localizing the distribution of grassroots foci of forest burning is to create specialized barrier strips in the form of a moistened layer of forest fuel material. Water spray systems are traditionally used for soaking up such strips. Often, experts formulate hypotheses about the possible increase in the effectiveness of the use of such bands through the use of specialized aqueous formulations. However, experimental results, which substantiate such hypotheses, are still insufficient.

**Methods.** Attempts were made to equalize the mechanisms, conditions, and characteristics of the localization of the suppression of combustion of typical forest combustible materials (needles, leaves, their mixture) through the use of water without additives, as well as formulations based on the common impurities in firefighting in the moistening of barrier strips in this work. Wetting, flame retardant and extinguishing additives were used.

**Results.** Experimental quantitative results illustrating the differences between the times, liquid volumes and specific costs necessary and sufficient to localize the burning of different types of materials due to the application of barrier strips have been obtained.

**Discussion.** Sufficiently significant differences in the main characteristics of the process of localization of flaming combustion and pyrolysis of typical FFM with the use of water and aqueous formulations with typical additives for firefighting practice have been established. The minimum time of localization of combustion is established for the composition with the addition of bentonite. Minimal volumes of liquid composition with the addition of bentonite in comparison with bischofite and foaming agent are also registered.

**Conclusions.** The results of the experiments can be used to select the parameters and schemes for the formation of barrier strips to provide the required conditions for the localization of combustion in real practice for different volumes of pyrolysing material.

**Keywords:** forest combustible material; flaming burning; thermal decomposition; pyrolysis; localization; specialized additives to water.

## REFERENCES

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*. 2012, vol. 65, issue 1-4, pp. 533–548. DOI: 10.1007/s10846-011-9560-x.
2. Cary G. J., Davies I. D., Bradstock R. A., Keane R. E., Flannigan M. D. Importance of fuel treatment for limiting moderate-to-high intensity fire: findings from comparative fire modelling. *Landscape Ecology*, 2017, vol. 32, issue 7, pp. 1473–1483. DOI: 10.1007/s10980-016-0420-8.
3. Kopylov N. P., Moskvilin E. A., Fedotkin D. V., Strizhak P. A. Influence of viscosity of fire-extinguishing solution on forest fires extinguish using aviation. *Lesotekhnicheskij zhurnal / Forestry Engineering Journal*, 2016, vol. 6, no. 4(24), pp. 62–67 (in Russian). DOI: 10.12737/23436.
4. Kopylov N. P., Khasanov I. R., Kuznetsov A. E., Fedotkin D. V., Moskvilin E. A., Strizhak P. A., Karpov V. N. Effectiveness increase of forest fire suppression by use of additives to water. *Pozharnaya bezopasnost / Fire Safety*, 2015, no. 4, pp. 46–50 (in Russian).
5. Kopylov N. P., Khasanov I. R., Fedotkin D. V., Strizhak P. A., Karpov V. N., Zvereva-Stepnaya A. V., Moskvilin E. A. Test bench for fire extinguishing agents applied at forest fire suppression by aviation. *Pozharnaya bezopasnost / Fire Safety*, 2015, no. 4, pp. 51–57 (in Russian).
6. Kopylov N. P., Khasanov I. R., Kuznetsov A. E., Fedotkin D. V., Moskvilin E. A., Strizhak P. A., Karpov V. N. Optimization of the choice of additives to water at forest fires suppression by means of aircraft. *Pozharnaya bezopasnost / Fire Safety*, 2016, no. 4, pp. 48–50 (in Russian).
7. Gusev V. G., Ericov A. M., Kuprin G. N., Kuprin D. S., Stepanov V. N. The results of experimental investigations of parameters of the fire-barrier strips with the free discharge of fire extinguishing liquid from a helicopter. *Trudy Sankt-Peterburgskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta lesnogo khozyaystva / Proceedings of the Saint Petersburg Forestry Research Institute*, 2016, no. 2, pp. 60–74 (in Russian).
8. Mihailova N. V., Gutsev N. D. Results of laboratory researches of properties of new fire extinguishing compositions. *Bezopasnost' zhiznedeatel'nosti / Life Safety*, 2014, no. 4(160), pp. 33–39 (in Russian).

9. Dombrovsky L. A., Dembele S., Wen J. X. A simplified model for the shielding of fire thermal radiation by water mists. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2016, vol. 96, pp. 199–209. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.01.028.
10. Grishin A. M., Shipulina O. V. Mathematical model for spread of crown fires in homogeneous forests and along openings. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 2002, vol. 38, issue 6, pp. 622–632. DOI: 10.1023/A:1021127924913.
11. 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, vol. 51, pp. 102–109. DOI: 10.1016/j.firesaf.2012.04.003.
12. Rakowska J., Szczygieł R., Kwiatkowski M., Porycka B., Radwan K., Prochaska K. Application tests of new wetting compositions for wildland firefighting. *Fire Technology*, 2017, vol. 53, issue 3, pp. 1379–1398. DOI: 10.1007/s10694-016-0640-0.
13. Kawahara T., Hatae S., Kanyama T., Ishizaki Y., Uezu K. Development of eco-friendly soap-based fire-fighting foam for forest fire. *Environmental Control in Biology*, 2016, vol. 54, issue 1, pp. 75–78. DOI: 10.2525/ecb.54.75.
14. Korobeinichev O. P., Shmakov A. G., Chernov A. A., Bol'shova T. A., Shvartsberg V. M., Kutsenogii K. P., Makarov V. I. Fire suppression by aerosols of aqueous solutions of salts. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 2010, vol. 46, issue 1, pp. 16–20. DOI: 10.1007/s10573-010-0003-y.
15. Bottero A., D'Amato A. W., Palik B. J., Kern C. C., Bradford J. B., Scherer S. S. Influence of repeated prescribed fire on tree growth and mortality in pinus resinosa forests, Northern Minnesota. *Forest Science*, 2017, vol. 63, issue 1, pp. 94–100. DOI: 10.5849/forsci.16-035.
16. Chromek I., Lukášová K., Berčák R., Vaněk J., Holuša J. Hollow tree fire is a useless forest fire category. *Central European Forestry Journal*, 2018, vol. 64, issue 1, pp. 67–78. DOI: 10.1515/forj-2017-0028.
17. Tremblay P.-O., Duchesne T., Cumming S. G. Survival analysis and classification methods for forest fire size. *PLoS ONE*, 2018, vol. 13, issue 1, e0189860. DOI: 10.1371/journal.pone.0189860.
18. Zhdanova A. O., Volkov R. S., Voytkov I. S., Osipov K. Yu., Kuznetsov G. V. Suppression of forest fuel thermolysis by water mist. *International Journal of Heat Mass Transfer*, 2018, vol. 126, pp. 703–714. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.05.085.
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, vol. 53, no. 6, pp. 678–688. DOI: 10.1134/s0010508217060089.
20. Voytkov I. S., Volkov R. S., Zhdanova A. O., Kuznetsov G. V., Nakoryakov V. E. Physicochemical processes in the interaction of an aerosol with the combustion front of forest combustible materials. *Prikladnaya mekhanika i tekhnicheskaya fizika / Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 2018, vol. 59, no. 5, pp. 1–13 (in Russian).

**For citation:** Antonov D. V., Voytkov I. S., Volkov R. S., Zhdanova A. O., Kuznetsov G. V., Khasanov I. R., Shlegel N. E. Influence of specialized additives on the efficiency of localization of flame burning and thermal decomposition of forest fuel materials. *Pozharovzryvobezopasnost / Fire and Explosion Safety*, 2018, vol. 27, no. 9, pp. 5–16 (in Russian). DOI: 10.18322/PVB.2018.27.09.5-16.