УДК 536.46

ПОДАВЛЕНИЕ ПЛАМЕННОГО ГОРЕНИЯ И ТЕРМИЧЕСКОГО РАЗЛОЖЕНИЯ МОДЕЛЬНОГО ЛЕСНОГО И ТОРФЯНОГО ПОЖАРА СОСТАВАМИ НА ОСНОВЕ ВОДЫ

А. О. Жданова[1], Н. П. Копылов[2], Г. В. Кузнецов[1], Р. М. Курапов[1], Е. Ю. Сушкина[2]

[1]Томский политехнический университет, 634050 Томск
[2]ВНИИ противопожарной обороны МЧС России, 143903 Балашиха, np.nanpb@mail.ru

Зарегистрированы условия прекращения пламенного горения и термического разложения модельного лесного и торфяного пожара при воздействии водой, эмульсией пенообразователя (5 %), раствором бишофита (10 %), раствором ФР-Лес 01 (20 %), раствором антипирена (об. 5 %), раствором ОС-5 (15 %) и суспензией бентонита (5 %). Зарегистрированы температуры в процессе разгорания модельных очагов и тушения последних специализированными составами на основе воды. Установлены минимальные объемы огнетушащих составов и время, необходимое и достаточное для подавления пиролиза растительной биомассы. Определены минимальные плотности орошения модельных лесных и торфяных очагов составами на основе воды со специализированными добавками.

Ключевые слова: модельный торфяной пожар, лесная подстилка, пламенное горение, термическое разложение, специализированные добавки к воде, локализация и подавление горения.

DOI 10.15372/FGV2022.9292

ВВЕДЕНИЕ

Проблема лесных и торфяных пожаров актуальна во многих регионах мира [1]. Подобного рода чрезвычайные ситуации возникают как вследствие самовозгорания в условиях засушливого периода времени, так и в результате неосторожного обращения с огнем на территории бореальной зоны [1]. Непотушенные костры являются причиной возникновения низового пожара, который нередко переходит в верховое возгорание лесного массива, а также может стать причиной торфяного пожара. Для повышения огнетушащей способности воды применяют специализированные добавки, позволяющие интенсифицировать основные механизмы подавления горения. Специализированные добавки к воде подразделяются на несколько типов [2, 3]: смачивающие, огнезадерживающие, огнетушащие.

Изучению характеристик горения торфа посвящены исследования [4–7]. Погодные условия вносят существенные ограничения на локализацию и ликвидацию возгораний бореальной зоны. В частности, проанализированы закономерности бокового распространения торфяного пожара при различных условиях влажности и ветровой нагрузки [7].

Цикл исследований [8–11] направлен на изучение особенностей тушения торфяных пожаров. Так, например, исследованы основные характеристики подавления горения торфа в условиях распыления эмульсии пенообразователя [8]. Изучены условия предотвращения распространения тления торфяника под воздействием водяного тумана [11]. Установлены особенности определения риска возгорания и тушения лесных горючих материалов (ЛГМ) [12–18]. Проведены [16] натурные испытания по ликвидации модельных очагов горения древесины и опавшей растительности с помощью аэрозолей растворов солей. Для оценки динамики процессов «пожарного» созревания ЛГМ проводились исследования по влиянию погодных критериев [17].

Анализ опубликованных данных последнего десятилетия свидетельствует об актуальности изучения макроскопических закономерно-

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда (проект № 21-79-00030, https://rscf.ru/project/21-79-00030/).

© Жданова А. О., Копылов Н. П., Кузнецов Г. В., Курапов Р. М., Сушкина Е. Ю., 2023.

стей в условиях тушения торфяных и низовых лесных пожаров. Результаты проведенных исследований обосновывают значимость воды в качестве широко распространенного огнетушащего агента, однако имеются ограничения для ее применения при тушении торфяных пожаров. Многолетние исследования отдельных групп специализированных добавок к воде позволили установить оптимальные соотношения добавок для достижения максимального эффекта подавления термического разложения горючих материалов. Следует подчеркнуть, что по отдельным направлениям характеристики горения и условия возникновения низовых и торфяных пожаров исследованы детально. Наработана база данных, позволяющая в лабораторных условиях моделировать условия горения лесной подстилки и торфа. Однако не были проведены экспериментальные исследования, позволяющие комплексно проанализировать эндотермические процессы в условиях воздействия на возгорание ЛГМ и торфа типичными для практики составами на основе воды со специализированными и широко распространенными добавками. Представляет интерес проведение экспериментов с целью выделения из широкой базы типичных специализированных добавок максимально результативных для тушения торфа и лесной подстилки.

МАТЕРИАЛЫ

В исследовании использованы напочвенный покров и торф бореальной зоны Томской области. Ширина рабочей зоны с навеской торфа 0.05 м, длина 0.05 м. Высота навески 0.03 м. Масса горючего материала определялась на электронных весах (Acom PC-100W) с погрешностью 0.001 г и составляла $m = 0.03$ кг. Образцы торфа измельчались в быстроходной роторной мельнице Pulverisette 14 (конечная степень измельчения $0.08 \div 6$ мм в зависимости от измельчающего кольца; частота оборотов ротора $6\,000 \div 20\,000$ об/мин). Для получения монодисперсного порошка торф просеивался в вибрационном грохоте ANALYSETTE 3 SPARTAN (продолжительность рассева $3 \div 20$ мин, диапазон дисперсности $0.02 \div 63$ мм в зависимости от используемых сит). Размер частиц не превышал 200 мкм.

Влажность ЛГМ непосредственно перед опытами определялась методом термической сушки [19]. Исследуемый образец ЛГМ взвешивали на весах и помещали в сушильную печь на 2 ч при температуре около $370 \div 375$ K. Затем образец вынимали из печи, охлаждали и вторично взвешивался на тех же весах. Влажность образца ЛГМ определялась по формуле $\gamma_f = (m_{fw} - m_{fd})/m_{fw} \cdot 100$ %, где m_{fw} и m_{fd} — масса образца ЛГМ до и после сушки соответственно, г. Относительная влажность смеси ЛГМ в экспериментах составляла $9 \div 14$ %. Гигроскопическая влажность торфа $16 \div 18$ %.

Массовые и объемные концентрации химических добавок к воде выбраны из типичных возможных на практике диапазонов: пенообразователь (5 % мас.), бишофит (10 % мас.), ФР-Лес 01 (20 % мас.), антипирен (5 % об.). При создании жидкостных составов на основе воды массой 400 г использовалось 20 г пенообразователя, 20 г бентонита, 40 г бишофита, 60 г ОС-5, 80 г концентрата огнетушащего состава ФР-Лес 01. Масса веществ измерялась на весах (VIBRA AJ-420CE) с погрешностью 0.001 г. При создании жидкостного состава на основе воды объемом 400 мл использовалось 20 мл антипирена. Объем вещества измерялся мерной колбой (1-50-2 50МЛ ГОСТ 1770-74) с ценой деления 1 мл. Для получения огнетушащих составов с типичными для практики массовыми и объемными концентрациями химические добавки перемешивались с водой в течение 5 мин.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ МЕТОДИКА

Подавление пламенного горения и термического разложения горючего материала возможно при выполнении одного из трех условий: 1) прекращение доступа кислорода в зону горения, 2) снижение до минимально допустимых значений температуры в этой зоне, 3) прекращение пиролиза горючих материалов [19]. Первые два условия должны выполняться в течение времени, достаточного для выполнения третьего условия. Поэтому первые два условия являются второстепенными по сравнению с условием прекращения пиролиза горючего материала. По этим причинам целью проводимых экспериментов являлось исследование пиролиза — температуры в слое горючего материала. Условием прекращения пиролиза является снижение температуры в слое прогретого материала до значений, меньших температуры начала пиролиза. Экспериментальные исследования проведены в лабораторных условиях на стенде, внешний вид которого показан на рис. 1.

Серии опытов с ЛГМ и торфом отличались способом укладки образца на лаборатор-

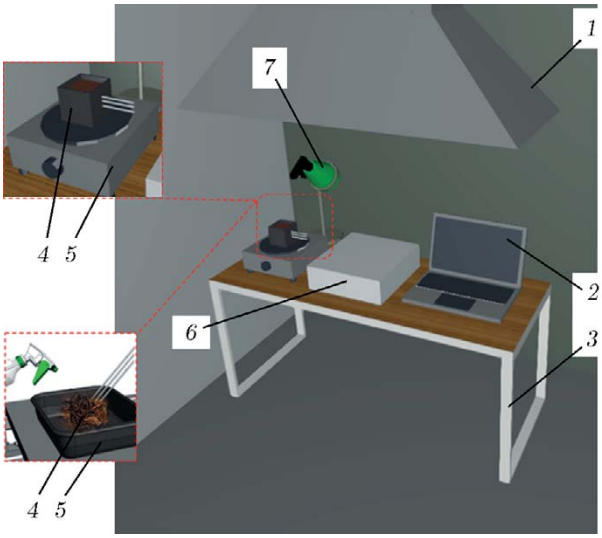

Рис. 1. Экспериментальный стенд:

1 — система вытяжки; *2* — ноутбук; *3* — лабораторный стол; *4* — форма для торфа / ЛГМ с термопарами; *5* — электроплита/поддон; *6* — блок аналогового ввода; *7* — система орошения

ный стол. Так, в экспериментах с торфом на электроплите устанавливалась форма, в которую помещалась навеска торфа массой 0.03 кг. Размеры навесок смеси ЛГМ 0.18×0.18 м соответствовали площади оснований 0.0324 м^2, высота образца составляла 0.03 м. Масса и площадь основания навесок торфа и ЛГМ выбраны из условий, установленных из анализа опубликованных результатов: масса $0.025 \div 0.5$ кг [20], плотность смеси ЛГМ $30 \div 87$ кг/м^3 [21], плотность торфа $300 \div 500$ кг/м^3 [9]. Плотность горючего материала в навеске вычислялась по формуле $\rho_f = m/(a_f \times b_f \times c_f)$, кг/м^3.

Температура образцов в процессе проведения экспериментов регистрировалась тремя хромель-алюмелевыми термопарами (диапазон температур $-50 \div 1\,200$ °C, погрешность ± 3 °C) в трех сечениях: на расстояниях от основания поддона $H_1 = 5$ мм, $H_2 = 15$ мм и $H_3 = 25$ мм (см. рис. 1). Данные с термопар передавались (интервал 1 с) с помощью аналого-цифрового преобразователя МВ110 по интерфейсу RS-485 на ноутбук. Тление материала инициировалось нагревом на электроплите (в течение 20 мин). Для удаления продуктов сгорания применялся вытяжной зонт. В экспериментах с ЛГМ на лабораторном столе (см. рис. 1) устанавливался металлический поддон высотой 0.2 м, шириной 0.3 м, длиной 0.35 м, в который выкладывался горючий материал массой 0.03 кг в следующем порядке: слой листьев — 0.009 кг, слой веток — 0.012 кг, слой хвои — 0.009 кг. Розжиг образца ЛГМ осуществлялся открытым пламенем по всей поверхности. Эксперименты с регистрацией характеристик процесса горения проводились многократно при фиксированных условиях (каждая отдельная серия эксперимента повторялась в среднем 8–12 раз). Процедура обработки экспериментальных данных аналогична описанной в [22].

После достижения в слое горючего материала температуры выше ее значения в начале термического разложения осуществлялось подавление пламенного горения последовательными импульсами огнетушащего состава. Предельная температура начала термического разложения исследовавшихся веществ (по аналогии с [9]) выбрана 80 °C для торфа и 100 °C для ЛГМ [19]. Достижение температурой, регистрируемой каждой термопарой в слое модельного очага, значения ниже, чем в начале термического разложения, считалось необходимым и достаточным условием прекращения термического разложения горючего материала.

Подача составов на основе воды со специализированными добавками осуществлялась распылительным устройством. Размеры капель исследуемых составов отличались вследствие различных реологических свойств последних, диапазоны размеров капель и плотности огнетушащих составов приведены в таблице. Диапазон капель распыляемого состава на основе воды со специализированными добавками определялся в предварительной серии экспериментов без горючего материала. Создавался поток аэрозоля одного из использовавшихся огнетушащих составов, при этом с одной стороны от потока устанавливался источник света для создания однородного фона, с другой стороны — высокоскоростная видеокамера (Phantom Micro M310 с максимальным разрешением видеокадров $1\,280 \times 1\,280$ пиксель, максимальная частота съемки $6 \cdot 10^5$ с$^{-1}$). Предварительно проводились эксперименты по распылению потока всех рассмотренных составов с видеосъемкой процесса и последующей обработкой видеокадров в программном обеспечении ActionFlow с пакетом Multiphase Kit. Применялся метод Shadow Photography [13]. Полученные изображения обрабатывались при выполнении нескольких последовательных действий аналогичным образом [14]. По резуль-

Результаты определения характеристик процесса ликвидации модельного природного пожара

Огнетушащий состав	ρ, кг/м^3	R_d, мм	ЛГМ ($\tau_{td} = 584$ с)				Торф ($\tau_{td} = 9\,947$ с)			
			i	V_{fec}, мл	τ_{sd}, с	γ, л/м^2	i	V_{fec}, мл	τ_{sd}, с	γ, л/м^2
Вода	980	0.016 ÷ 0.056	2	1.30	387	0.00406	30	19.5	866	7.8
Эмульсия пенообразователя (5 % мас.)	1 128	0.024 ÷ 0.080	1	0.65	245	0.00203	20	13	649	5.2
Раствор бишофита (10 % мас.)	1 090	0.024 ÷ 0.088	1	0.65	386	0.00203	30	19.5	651	7.8
Раствор ФР-Лес 01 (20 % мас.)	1 044	0.032 ÷ 0.151	1	0.65	240	0.00203	10	6.5	620	2.6
Раствор антипирена (5 % об.)	1 040	0.024 ÷ 0.088	1	0.65	281	0.00203	10	6.5	699	2.6
Раствор ОС-5 (15 % мас.)	1 200	0.032 ÷ 0.135	2	1.3	223	0.00406	15	11.25	709	4.5
Суспензия бентонита (5 % мас.)	1 056	0.138 ÷ 0.304	1	0.65	421	0.00203	10	6.5	624	2.6

Примечание. ρ — плотность огнетушащего состава, R_d — радиус капли огнетушащего состава, i — число импульсов огнетушащего состава, V_{fec} — объем огнетушащего состава, необходимый для подавления пламенного горения и термического разложения горючих материалов, τ_{td} — время полного прогорания материала (без тушения и подачи огнетушащего вещества), τ_{sd} — время подавления термического разложения и пламенного горения материала последовательными импульсами ($i = 1, 2, \ldots, n$), $\gamma = V_{fec}/S_s$, S_s — площадь поверхности навески ЛГМ и торфа, м^2.

татам обработки видеокадров определялся характерный размер капель каждого огнетушащего состава. Систематическая погрешность определения размеров капель методом Shadow Photography соответствовала масштабному коэффициенту и в проведенных экспериментах не превышала 3.5 %.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

В таблице приведены результаты регистрации необходимых и достаточных условий прекращения горения и термического разложения горючих материалов в условиях подачи составов на основе воды с типичными для практики специализированными добавками.

Проведенные экспериментальные исследования позволили установить эффективность специализированных добавок к воде. Из таблицы видно, что ликвидация возгорания модельных очагов составами на основе воды с типичными добавками позволяет снизить как время тушения, так и объем, необходимый и достаточный для подавления пиролиза горючего материала. Время подавления разложения торфа больше времени тушения ЛГМ. Также следует отметить многократное увеличение объема огнетушащего вещества в экспериментах с торфом по сравнению с ЛГМ. Это связано в первую очередь с плотностью навесок. Так, плотность навесок ЛГМ составляла 30.86 кг/м^3, торфа 400 кг/м^3. Образец ЛГМ имеет много воздушных зазоров по всей высоте навески, что обусловлено разными геометрическими размерами компонентов, входящих в смесь. В экспериментальных исследованиях с образцами ЛГМ наблюдается скатывание капель огнетушащего вещества по слою навески вследствие наличия многочисленных воздушных зазоров и различной морфологии компонентов смеси.

В опытах размер частиц торфа не превышал 200 мкм, что характеризует достаточно равномерную насыпку. Установлено, что состав на основе воды со специализированными добавками пропитывает слой торфа практически равномерно по всей толщине образца. На рис. 2, 3 приведены типичные распределения

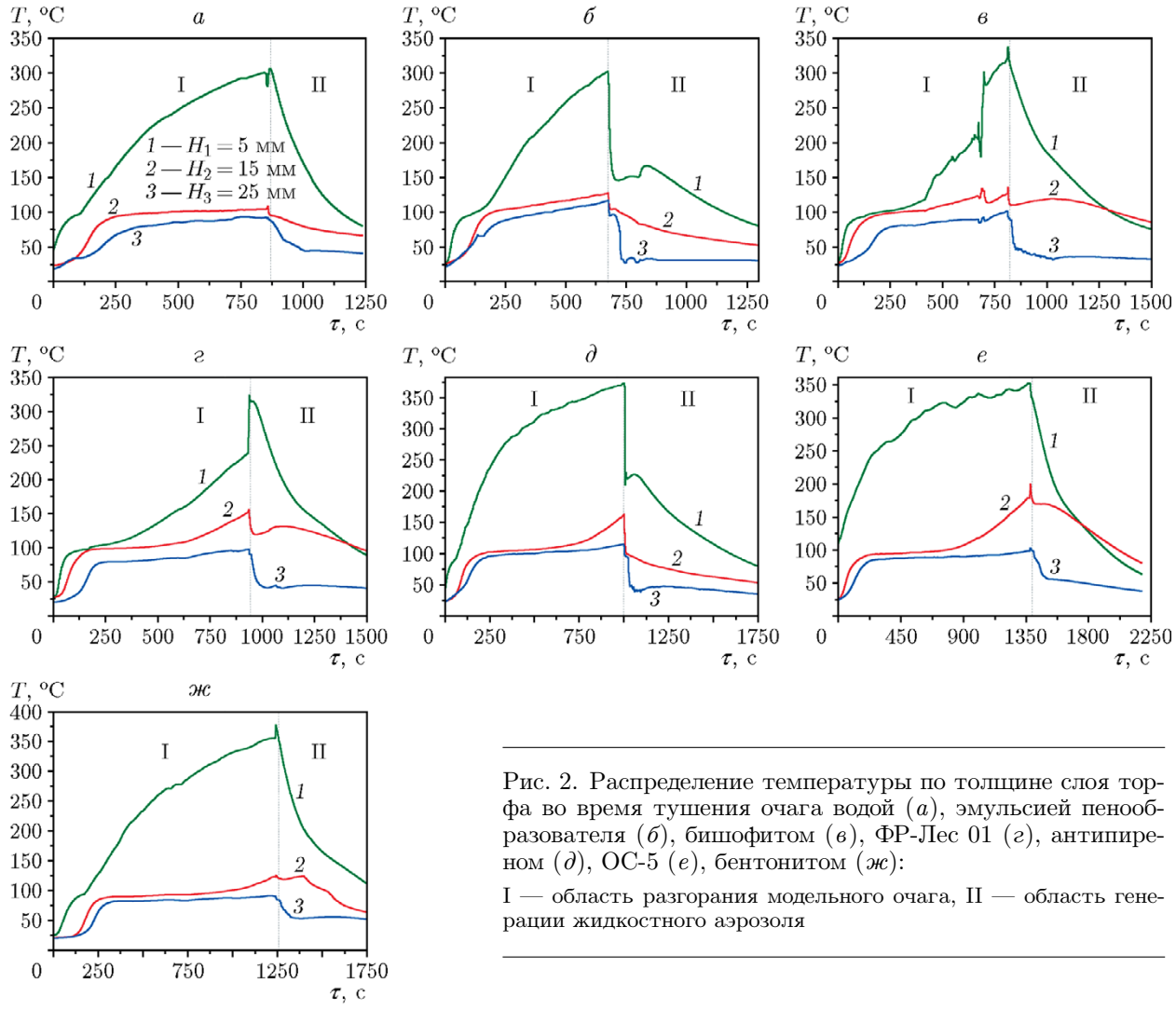

Рис. 2. Распределение температуры по толщине слоя торфа во время тушения очага водой (*а*), эмульсией пенообразователя (*б*), бишофитом (*в*), ФР-Лес 01 (*г*), антипиреном (*д*), ОС-5 (*е*), бентонитом (*ж*):

I — область разгорания модельного очага, II — область генерации жидкостного аэрозоля

температуры по толщине слоя ЛГМ и торфа во время тушения очага жидкостным аэрозолем.

Характер изменения температуры при воздействии составов на основе воды со специализированными добавками позволяет проанализировать ключевые механизмы подавления термического разложения модельных очагов возгорания. Так, например, на рис. 2,*б* наблюдается существенное падение (на 50 ÷ 150 °C) температур, регистрируемых всеми термопарами в течение первых 30 с после подачи эмульсии пенообразователя. При проведении опытов с ЛГМ температура навески также снижается после подачи эмульсии пенообразователя. Установленный эффект характеризуется низким поверхностным натяжением состава с добавлением пенообразователя, что позволяет эмульсии проникать в глубинные слои навески, снижая тем самым температуру последнего.

При тушении торфа раствором бишофита (рис. 2,*в*) температура по всей толщине навески в целом снизилась несущественно — на 10 ÷ 25 °C. После начала подачи раствора бишофита верхней (первой) термопарой зарегистрировано значительное уменьшение температуры в опытах как с торфом, так и с ЛГМ. Установленный эффект сопровождается образованием солевого остатка на поверхности горящего материала. В [23] показано, что обработанная бишофитом древесная поверхность длительный период времени позволяет горючему материалу сохранять высокую огнестойкость. Характер изменения температуры навески торфа в условиях тушения ФР-Лес 01 (рис. 2,*г*)

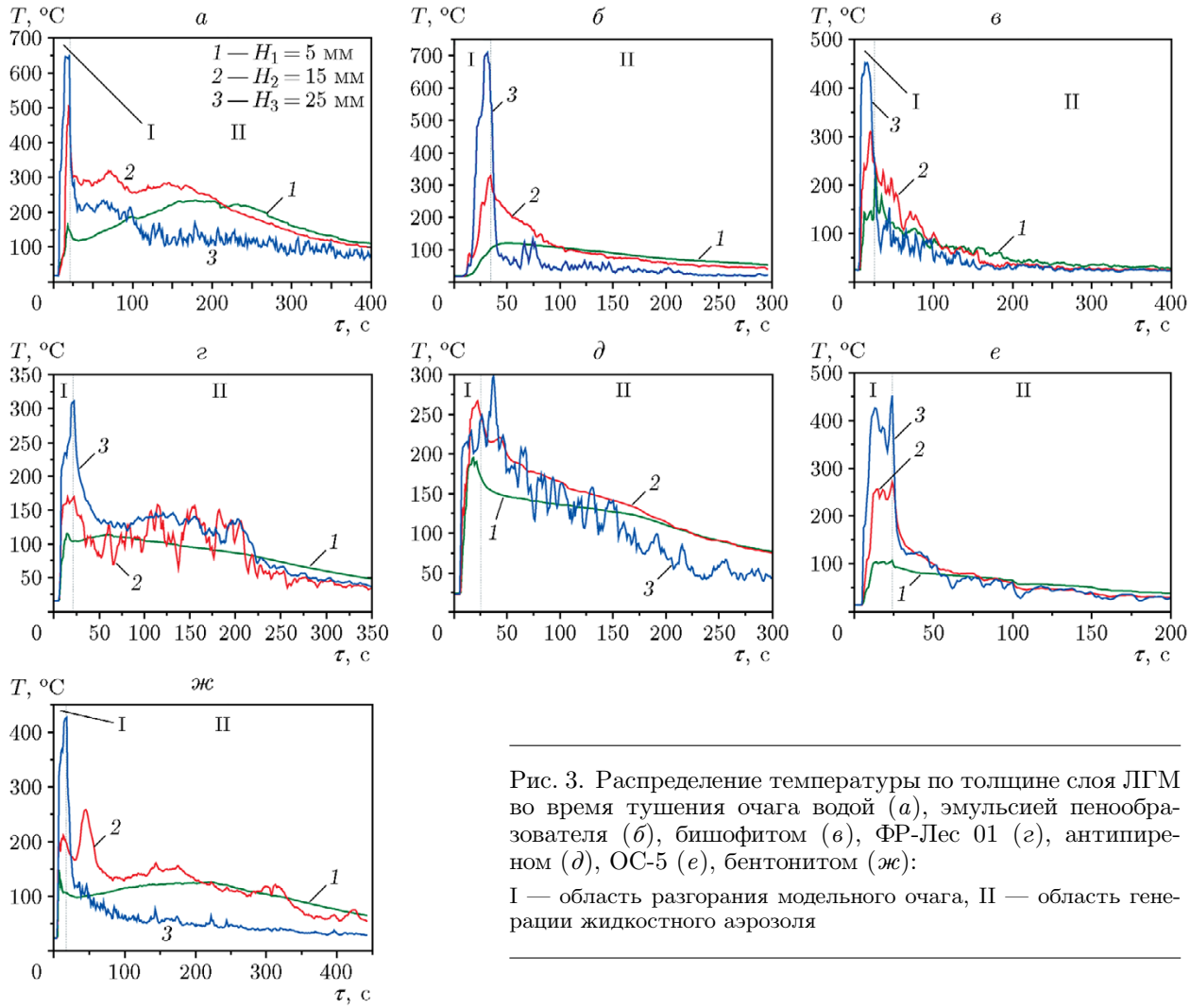

Рис. 3. Распределение температуры по толщине слоя ЛГМ во время тушения очага водой (*а*), эмульсией пенообразователя (*б*), бишофитом (*в*), ФР-Лес 01 (*г*), антипиреном (*д*), ОС-5 (*е*), бентонитом (*ж*):

I — область разгорания модельного очага, II — область генерации жидкостного аэрозоля

схож с опытами в условиях воздействия раствором бишофита. Пламезамедлитель длительного действия ФР-Лес 01 относится к категории специализированных добавок, повышающих эффективность тушения в несколько раз по сравнению с водой. Это обусловлено обугливанием материала, что предотвращает выброс легковоспламеняющихся газов и позволяет реализовать один из основных механизмов подавления горения (блокирование доступа продуктов пиролиза в атмосферу). В основе химической реакции лежит обезвоживание целлюлозы. Наряду с этим, при испарении воды снижается концентрация кислорода, что приводит к образованию негорючего слоя с графитовой структурой на поверхности материала.

Целесообразно выделить механизм взаимодействия термически разлагающегося торфа с антипиреном (рис. 2,*д*). Последний способствует образованию защитного слоя на поверхности горючего материала, что приводит к блокированию поступления окислителя в зону возгорания и реализации эндотермических реакций вследствие снижения температуры слоя на 75 ÷ 150 °C. Также поступление антипирена в активную фазу горения позволяет на уровне химических превращений воздействовать на радикальные цепные реакции [24]. Аналогичный механизм прекращения пиролиза зарегистрирован при использовании состава на основе воды с добавлением бентонита. Образование защитного слоя бентонита на поверхности позволяет блокировать поступление окислителя в зону горения, снизить выход легко-

воспламеняющихся газов вследствие снижения температуры навески. Жидкостный состав с добавлением ОС-5 позволяет реализовать одновременно огнетушащие и огнезащитные свойства последнего. ОС-5 блокирует как фазу пламенного горения, так и тление горючих материалов (рис. 2,*е*, 3,*е*).

Как показывает практика, эффективность воздействия огнетушащих составов на очаг горения зависит также от условий доставки огнетушащего средства к очагу возгорания. При тушении наземными способами варьируется плотность орошения, например при использовании ранцевых систем пожаротушения. В таблице приведены необходимые и достаточные плотности орошения горящих материалов составами на основе воды со специализированными добавками. Наряду с наземными способами генерации огнетушащих составов, ликвидация крупных лесных пожаров сопровождается сбросом больших массивов воды авиационным методом тушения [1, 25]. Выявлены отличия размеров капель типичных огнетушащих суспензий, эмульсий и растворов при сбросе с варьируемой высоты нераспыленных массивов, струй и аэрозолей [25]. Зарегистрировано, что распад крупных фрагментов огнетушащих составов происходит по двум схемам (дробление и коагуляция) [25]. Однако следует отметить, что значения средних и максимальных размеров капель широко распространенных на практике огнетушащих составов отличаются в 3–5 раз [25]. Установленные закономерности напрямую зависят от свойств составов, в частности от вязкости и поверхностного натяжения.

ВЫВОДЫ

Анализ полученных результатов экспериментальных исследований позволил выделить в качестве перспективных два состава на основе воды — со специализированными добавками ФР-Лес 01 и антипирена. Применение на практике перечисленных растворов позволит при плотности орошения 0.00203 и 2.6 л/м^2 локализовать и подавить пиролиз лесных и торфяных возгораний.

При смешивании с водой пламезамедлителя длительного действия ФР-Лес 01 повышение эффективности тушения обусловлено реализацией одного из основных механизмов подавления термического разложения горючего материала — обугливание последнего. В условиях обугливания предотвращается выброс легковоспламеняющихся газов, вследствие чего блокируется поступление продуктов пиролиза в атмосферу. Применение в качестве специализированной добавки к воде антипирена способствует образованию защитного слоя на поверхности горючего материала, что приводит к блокированию поступления окислителя в зону возгорания и реализации эндотермических реакций.

Торфяные пожары относятся к особой категории возгораний, поскольку торф тлеет длительное время и его горение не сопровождается открытым огнем. Для предотвращения торфяных пожаров целесообразно при ликвидации лесного пожара обрабатывать специализированными составами близко расположенные торфяники.

Авторы выражают благодарность сотрудникам лаборатории тепломассопереноса Национального исследовательского Томского политехнического университета (http://hmtslab.tpu.ru) за помощь в проведении экспериментальных исследований.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Государственный** доклад «О состоянии защиты населения и территорий Российской Федерации от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера в 2020 году», МЧС России, Москва, 2021. — https://www.mchs.gov.ru/uploads/document/2021-05-07/2f6a02740e1048c96604666552d7c80a.pdf.
2. **ГОСТ Р 50588-2012.** Пенообразователи для тушения пожаров. Общие технические требования и методы испытаний (с поправкой). — М.: Стандартинформ, 2012. — https://docs.cntd.ru/document/1200093407 (accessed March 29, 2021).
3. **ГОСТ 7032-75.** Глина бентонитовая для тонкой и строительной керамики. — М.: Изд-во стандартов, 1989.
4. **Долгов А. А., Ковалева Д. С.** Лабораторные методы определения термокинетических параметров процесса сушки торфов при лесных пожарах // Технологии гражданской безопасности. — 2020. — Т. 17, № 2. — С. 52–57. — DOI: 10.54234/CST.19968493.2020.17.2.64.9.52.
5. **Othman M., Latif M. T.** Dust and gas emissions from small-scale peat combustion // Aerosol Air Qual. Res. — 2013. — V. 13, N 3. — P. 1045–1059. — DOI: 10.4209/aaqr.2012.08.0214.
6. **Hu Y., Christensen E. G., Amin H. M. F., Smith T. E. L., Rein G.** Experimental study of moisture content effects on the transient gas and particle emissions from peat fires // Combust.

Flame. — 2019. — V. 209. — P. 408–417. — DOI: 10.1016/j.combustflame.2019.07.046.
7. **Huang X., Restuccia F., Gramola M., Rein G.** Experimental study of the formation and collapse of an overhang in the lateral spread of smouldering peat fires // Combust. Flame. — 2016. — V. 168. — P. 393–402. — DOI: 10.1016/j.combustflame.2016.01.017.
8. **Pramuhadi G., Rivai M., Hambali E., Suryani A.** Foaming performance test of palm oil foaming agent solution for prevention and fire extinguishing on peatland surface // IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. — 2020. — V. 460. — 012029. — DOI: 10.1088/1755-1315/460/1/012029.
9. **Ratnasari N. G., Dianti A., Palamba P., Ramadhan M. L., Prayogo G., Pamitran A. S., Nugroho Y. S.** Laboratory scale experimental study of foam suppression on smouldering combustion of a tropical peat // J. Phys.: Conf. Ser. — 2018. — V. 1107. — 052003. — DOI: 10.1088/1742-6596/1107/5/052003.
10. **Santoso M. A., Cui W., Amin H. M. F., Christensen E. G., Nugroho Y. S., Rein G.** Laboratory study on the suppression of smouldering peat wildfires: effects of flow rate and wetting agent // Int. J. Wildland Fire. — 2016. — V. 30, N 5. — P. 378–309. — DOI: 10.1071/WF20117.
11. **Ramadhan M. L., Palamba P., Imran F. A., Kosasih E. A., Nugroho Y. S.** Experimental study of the effect of water spray on the spread of smoldering in Indonesian peat fires // Fire Saf. J. — 2016. — V. 91. — P. 671–679. — DOI: 10.1016/j.firesaf.2017.04.012.
12. **Климчик Г. Я., Усеня В. В., Мухуров Л. И.** Особенности пирологической характеристики и загораемости лесных горючих материалов в сосняках // Лесн. хоз-во. — 2012. — Т. 1. — С. 90–92.
13. **Batista A. C., Beutling A., Pereira J. F.** Fire behavior evaluation in experimental fires on forest fuels of Pinus elliottii plantations // Rev. Árvore. — 2013. — V. 37. — P. 779–787. — DOI: 10.1590/S0100-67622013000500001.
14. **Rakowska J., Szczygieł R., Kwiatkowski M., Porycka B., Radwan K., Prochaska K.** Application tests of new wetting compositions for wildland firefighting // Fire Technol. — 2017. — V. 53. — P. 1379–1398. — DOI: 10.1007/s10694-016-0640-0.
15. **Ивченко О. А., Панкин К. Е.** Тушение лесных горючих материалов гидрогелями на основе гидроксида алюминия // Лесотехн. журн. — 2019. — Т. 9, № 1. — С. 76–84. — DOI: 10.12737/article_5c92016e1314b2.49705560.
16. **Коробейничев О. П., Шмаков А. Г., Чернов А. А., Большова Т. А., Шварцберг В. М., Куценогий К. П., Макаров В. И.** Тушение пожаров с помощью аэрозолей растворов солей // Физика горения и взрыва. — 2010. — Т. 46, № 1. — С. 20–25.
17. **Козаченко М. А., Удалова О. Г., Ивченко О. А., Тютин А. В., Панкин К. Е.** Процессы пожарного созревания лесных горючих материалов в лесах Саратовского лесничества Саратовской области // Успехи современного естествознания. — 2021. — № 9. — С. 5–12. — DOI: 10.17513/use.37678.
18. **Nabipour H., Shi H., Wang X., Hu X., Song L., Hu Y.** Flame retardant cellulose-based hybrid hydrogels for firefighting and fire prevention // Fire Technol. — 2022. — V. 58. — P. 2077–2091. — DOI: 10.1007/s10694-022-01237-y.
19. **Гришин А. М.** Математические модели лесных пожаров. — Томск: Изд-во Томск. ун-та, 1981.
20. **Kuznetsov G. V., Antonov D. V., Voitkov I. S., Islamova A. G., Kropotova S. S., Shlegel' N. E.** Mechanisms of heat and mass transfer in the localization of ground forest fires with the use of barrier strips // J. Eng. Phys. Thermophys. — 2021. — V. 94. — P. 775–789. — DOI: 10.1007/S10891-021-02355-0.
21. **Antonov D. V., Volkov R. S., Voitkov I. S., Zhdanova A. O., Kuznetsov G. V.** Influence of special additives in a water aerosol on the suppression of a forest fire with it // J. Eng. Phys. Thermophys. — 2018. — V. 91. — P. 1250–1259. — DOI: 10.1007/s10891-018-1855-3.
22. **Rabinovich S. G.** Measurement Errors and Uncertainties: Theory and Practice. — New York: Springer, 2005. — DOI: 10.1007/0-387-29143-1.
23. **Копылов Н. П., Москвилин Е. А., Федоткин Д. В., Стрижак П. А.** Влияние вязкости огнетушащего раствора на эффективность тушения лесных пожаров с помощью авиации // Лесотехн. журн. — 2016. — Т. 6, № 4. — P. 62–67. — DOI: 10.12737/23436.
24. **Hernangil A., Ballestero J., Rodriguez M., Alonso J. R., León L. M.** Experimental design of halogenated polyester resins Zinc compounds as fire retardants and as fume and smoke suppressants // Plast. Rubber Compos. Process. Appl. — 2000. — V. 29, N 5. — P. 216–223.
25. **Kuznetsov G. V., Kropotova S. S., Voytkov I. S., Strizhak P. A.** Influence of the component composition of extinguishing fluids on the droplet distribution in an aerosol cloud // Powder Technol. — 2022. — V. 395. — P. 838–849. — DOI: 10.1016/J.POWTEC.2021.10.032.

Поступила в редакцию 29.12.2022.
Принята к публикации 01.02.2023.