

УДК 536.4

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ АЭРОЗОЛЯ С ФРОНТОМ ГОРЕНИЯ ЛЕСНЫХ ГОРЮЧИХ МАТЕРИАЛОВ

И. С. Войтков, Р. С. Волков, А. О. Жданова,
Г. В. Кузнецов, В. Е. Накоряков*

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
634050 Томск, Россия

* Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, 630090 Новосибирск, Россия
E-mails: vojtkov12@mail.ru, romanvolkov@tpu.ru, zhdanovaao@tpu.ru,
kuznetsovgv@tpu.ru

Выполнено экспериментальное исследование основных характеристик процессов тепло-массопереноса и фазовых превращений при взаимодействии капельного потока с фронтом горения высокопористого конденсированного вещества. Изучены макроскопические закономерности прекращения процессов пламенного горения и термического разложения типичных лесных горючих материалов за счет отвода теплоты в результате ее поглощения при парообразовании и конвективного охлаждения. Рассмотрены три варианта взаимодействия капельного аэрозоля с лесным горючим материалом в процессе его горения. Определены время прекращения пламенного горения и время термического разложения лесных горючих материалов. Изучены механизмы основных физико-химических процессов, происходящих при взаимодействии капельного потока с фронтом горения типичных лесных горючих материалов.

Ключевые слова: аэрозоль, лесной горючий материал, фронт горения, прекращение горения, термическое разложение, пламенное горение.

DOI: 10.15372/PMTF20180517

Введение. Процессы горения лесных горючих материалов (ЛГМ) не всегда являются управляемыми [1–5]. Возможно возникновение и распространение пожаров различного типа (нередко крупных) [3, 4]. Несмотря на то что проблема борьбы с пожарами существует в течение длительного времени, научно обоснованная теория эффективного (по критериям минимального затраченного объема воды, малого объема выгоревшего материала и минимального времени тушения) полного подавления и локализации процесса горения отсутствует. К настоящему времени разработана теория распространения лесных пожаров [6–12], позволяющая прогнозировать скорости их продвижения в зависимости от внешних условий, но не описывающая физико-химические процессы, происходящие при взаимодействии капельного потока воды с фронтом горения [13–16]. Отсутствие теории такого взаимодействия обусловлено, в частности, отсутствием достоверных экспериментальных данных о процессах теплообмена и фазовых превращений, происходящих при взаимодействии массива капель воды с фронтом горения в условиях, соответствующих, например, типичным лесным пожарам. Поэтому целесообразно проведение экспери-

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

© Войтков И. С., Волков Р. С., Жданова А. О., Кузнецов Г. В., Накоряков В. Е., 2018

ментальных исследований основных закономерностей процессов теплопереноса, имеющих место при взаимодействии аэрозольных потоков воды с фронтом горения ЛГМ, а также изучение влияния водного аэрозоля на подавление как пламенного горения, так и процессов термического разложения типичных ЛГМ. Полученные результаты могут быть использованы при анализе процессов горения не только ЛГМ, но и других высокопористых конденсированных веществ [17].

Целью настоящей работы является экспериментальное определение закономерностей физико-химических процессов, происходящих при различных вариантах взаимодействия капельного потока воды с фронтом горения лесных горючих материалов.

Экспериментальный стенд и методы исследований. Эксперименты проведены с навесками типичных лесных горючих материалов: опадками хвои сосны, листьев березы, смесью ЛГМ (веточки, листья, хвоинки) (рис. 1). Использовалась смесь ЛГМ со следующим соотношением компонентов: листья березы — 25 %, хвоя сосны — 15 %, ветки лиственных пород деревьев — 60 %. Масса навесок составляла приблизительно 50 г, плотность — 0,018 38 г/см², микропористость хвои сосны в абсолютно сухом состоянии — 0,79, листьев березы — 0,33 [7]. Пористость задается плотностью частиц ЛГМ. Навески ЛГМ предварительно подсушивались в течение 3–5 дней при температуре $T \approx 300$ К. Непосредственно перед проведением экспериментов определялась влажность материалов (методом термической сушки). Для этого исследуемый ЛГМ взвешивался и затем подвергался суш-



Рис. 1. Навески ЛГМ:

а — листья березы, б — хвоя сосны, в — смесь ЛГМ

ке в сушильной печи при температуре $T \approx 375$ К в течение $2 \div 3$ ч. После сушки навеска охлаждалась и повторно взвешивалась. Относительная влажность ЛГМ определялась по формуле $\gamma_f = (m_{fw} - m_{fd})/m_{fw} \cdot 100$, где m_{fw} , m_{fd} — масса ЛГМ до и после термической сушки соответственно, кг. В результате расчетов для листьев березы получены значения $\gamma_f = 5 \div 8$ %, для хвой ели — $\gamma_f = 7 \div 10$ %, для веточек осины — $\gamma_f = 10 \div 14$ %. Материал выкладывался равномерно в металлический поддон длиной 310 мм, шириной 195 мм, глубиной 45 мм. На различных уровнях по высоте навески ЛГМ размещались три хромель-алюмелевые (диапазон измеряемых температур $223 \div 1473$ К, систематическая погрешность ± 3 К) малоинерционные (время запаздывания менее 0,1 с) термопары. Термоэлектрические преобразователи располагались на высоте от поверхности раздела ЛГМ — внешняя среда $H = 5, 20, 40$ мм.

Движение фронта горения ЛГМ при воздействии на него потока капель воды исследовалось на экспериментальном стенде, внешний вид и схема которого показаны на рис. 2, 3. Целью экспериментов являлось воспроизведение для рассмотренных ЛГМ значений температуры (не менее 780 К) и тепловых потоков ($0,5 \div 1,5$ кВт/м²), соответствующих горению растительных материалов в условиях продвижения лесных пожаров [6–8] с умеренной скоростью (до 3 м/с).

Рассмотрены три варианта воздействия аэрозоля на процесс горения ЛГМ (рис. 4). В первом варианте (см. рис. 4,а) поток капель воды с фиксированными значениями концентрации ζ_f (в каждом сечении) и ширины полосы L_a создавался заранее. Горение ЛГМ инициировалось пьезоэлектрическими горелками (в виде зажигательных элементов для газовых плит). Навеска ЛГМ поджигалась равномерно по всей свободной поверхности. Предполагалось, что процессы пламенного горения и термического разложения ЛГМ прекращаются, если они происходят в зоне воздействия жидкостного аэрозоля. Контролировалось выполнение условия уменьшения температуры ЛГМ до значения, меньшего температуры начала термического разложения.

При реализации второго варианта (см. рис. 4,б) обеспечивался подвод воды в виде аэрозольной завесы непосредственно во фронт горения. На первом этапе инициировалось горение ЛГМ. С использованием высокоскоростной видеорегистрации контролировалось перемещение фронта горения по поверхности ЛГМ. Генерация капельного потока осуществлялась при достижении фронтом горения положения, соответствующего середине полосы, покрываемой водяной завесой ($L_a/2$).

Третий вариант (см. рис. 4,в) является комбинированным (смешанным по способу распыления): вода распыляется одновременно перед фронтом и во фронт горения ЛГМ. В этом варианте подвод жидкостного аэрозоля осуществляется в момент достижения пламенем передней кромки зоны предварительного воздействия капельного потока на ЛГМ перед движущимся фронтом горения ЛГМ.

Закономерности взаимодействия водного аэрозоля с пламенем и ЛГМ [18] во многом определяются распределением капель жидкости по площади горения материала. Установлено, что подавление реакции термического разложения ЛГМ происходит при концентрации воды в диапазоне $3 \div 5$ л/м² [19]. Эта характеристика зависит от скорости и направления движения воздуха [18]. Как правило, скорость реального воздушного потока не превышает $2 \div 3$ м/с [3–9], поэтому в экспериментах скорость воздушного потока, создаваемого нагнетателем, также не превышала 3 м/с. Рассмотрены условия сопутствующего и противоположного направлений движения потока воздуха относительно направления перемещения фронта горения. Поток воздуха создавался с помощью канального водонепроницаемого вентилятора (нагнетателя) класса IPX2 осевого типа с семью лопастями (напряжение $220 \div 240$ В, частота 50 Гц, мощность 22 Вт, расход воздуха 320 м³/ч). Скорость потока воздуха определялась с помощью анемометра.

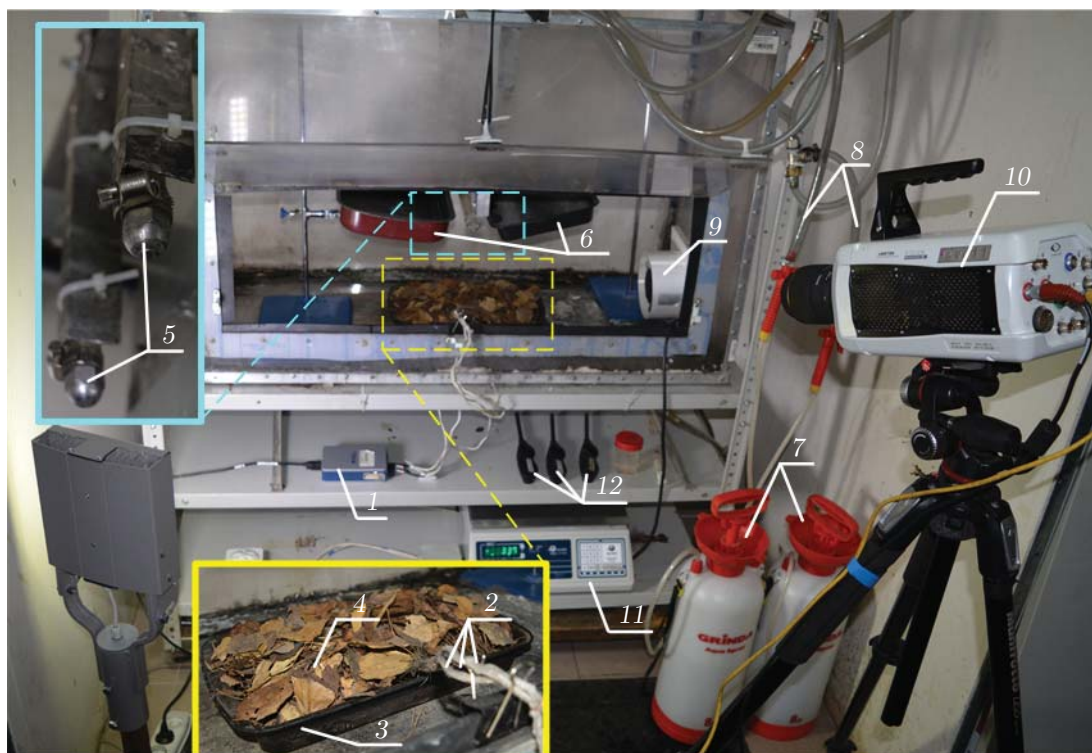


Рис. 2. Экспериментальный стенд:

1 — цифровой измеритель температуры, 2 — термоэлектрические преобразователи (термопары), 3 — поддон с ЛГМ, 4 — навеска ЛГМ, 5 — распылительные форсунки, 6 — емкости для воды, 7 — баллоны, 8 — каналы подачи жидкости, 9 — вентилятор, 10 — высокоскоростная видеокамера, 11 — весы, 12 — пьезоэлектрические горелки

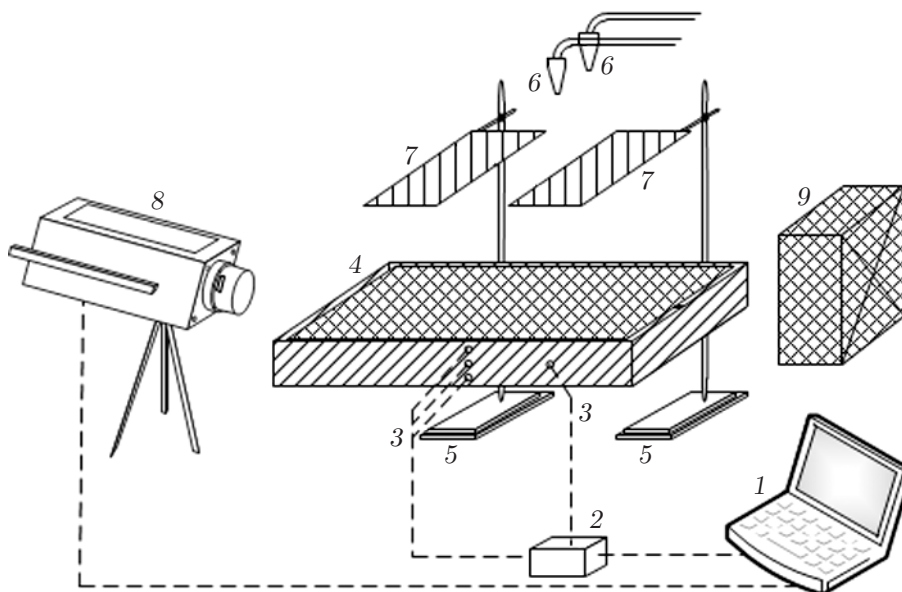


Рис. 3. Схема стенда:

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

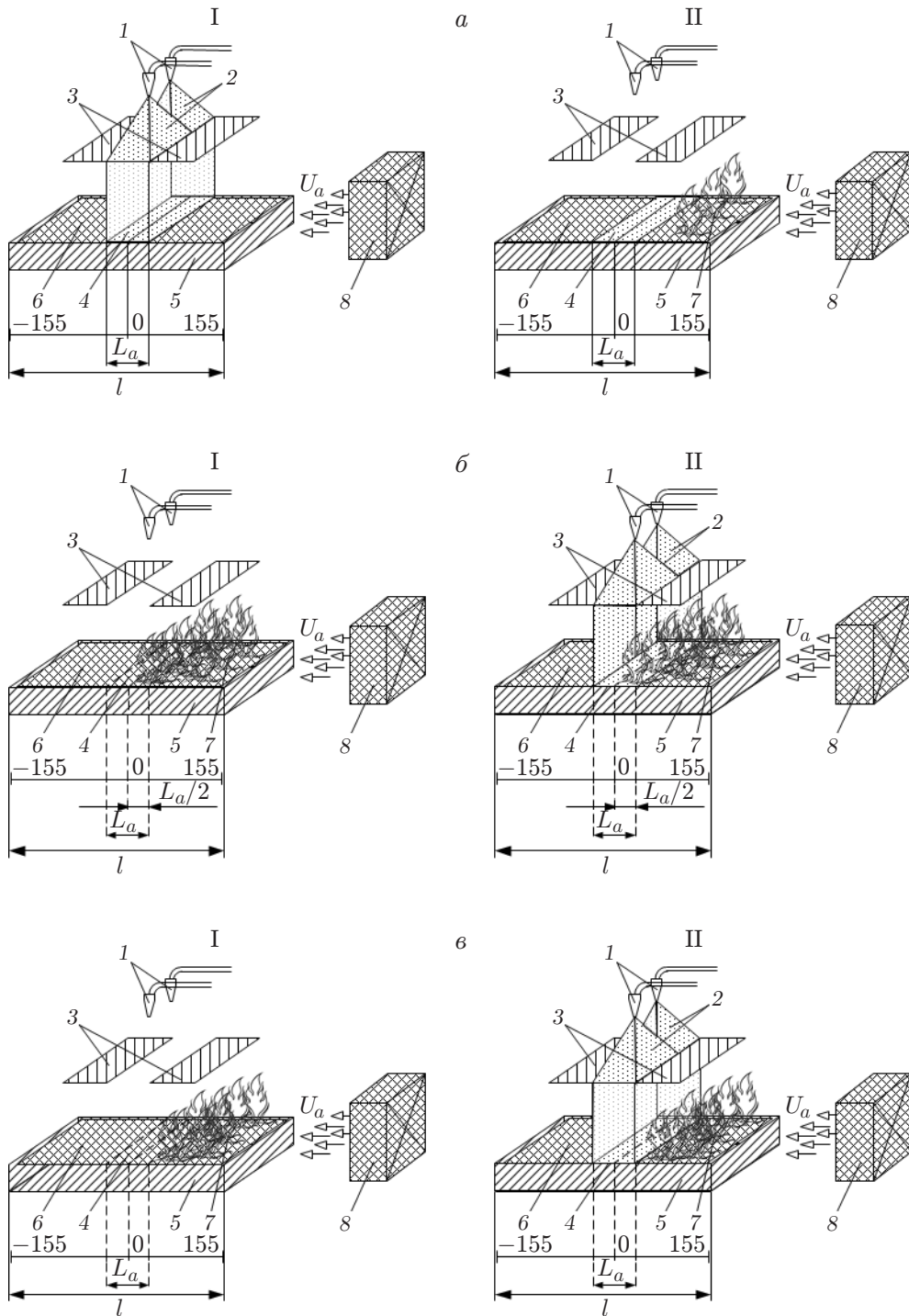


Рис. 4. Варианты распыления воды:

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

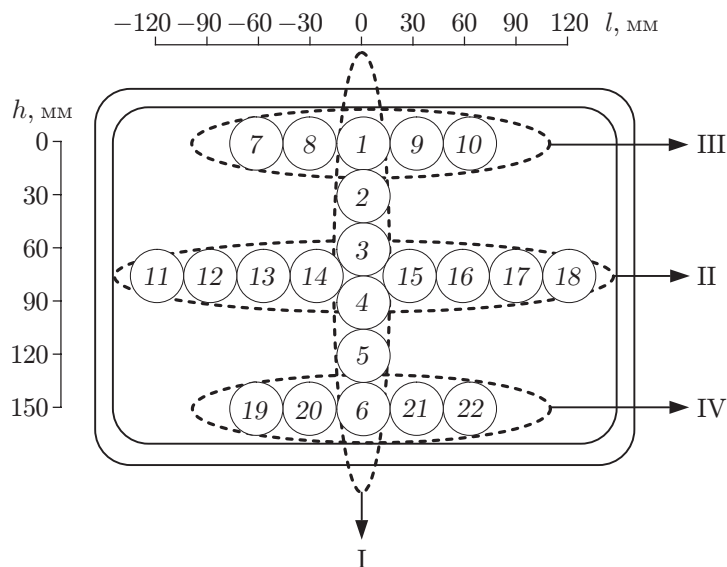


Рис. 5. Схема расположения (вид сверху) мерных емкостей на металлическом поддоне:

1–22 — мерные емкости, I — первое сечение, II — второе сечение, III — третье сечение, IV — четвертое сечение

Предварительно выполнены эксперименты по методике [20] с целью определения удельной плотности орошения ζ_f . Использовались две стационарно закрепленные распылительные форсунки, размеры (радиусы) формируемых ими капель составляли $R_d \approx 0,01 \div 0,12$ мм. Под форсунками устанавливались мерные емкости объемом 100 мл. На рис. 5 показаны сечения, в которых определялись удельные плотности орошения. Процедура распыления продолжалась в течение фиксированного промежутка времени (30 с). По окончании каждого эксперимента измерялся объем воды в соответствующих мерных емкостях. Зная площадь поверхности емкостей, объем воды в них, время распыления, а также взаимное расположение и расстояния между мерными емкостями, можно вычислить значения ζ_f . Эти значения определялись при отсутствии направленного движения воздуха ($U_a \approx 0$) и регулируемом его движении в направлении, совпадающем с направлением движения фронта горения, при $U_a \approx 0,5; 2,5$ м/с.

На рис. 6 приведены значения ζ_f , полученные в экспериментах при отсутствии вынужденной конвекции, а также при минимально и максимально возможных значениях скорости воздушного потока в четырех сечениях металлического поддона. В экспериментах форсунки располагались над ЛГМ на высоте $H_n = 0,4$ м, давление в подводящем воду канале равно $P = 2,5 \cdot 10^5$ Па. Угол раскрытия форсунок составлял приблизительно 30° , расстояние между форсунками в экспериментах — 100 мм, диаметр площади покрытия каждой форсунки — 200 мм, длина зоны наложения струй из двух форсунок — 100 мм.

На рис. 6, а, б видно, что в поперечном и продольном сечениях металлического поддона значения ζ_f в зоне совместного воздействия струй форсунок увеличиваются на 25 и 40 % соответственно. Также из рис. 6 следует, что при увеличении скорости воздушного потока значения ζ_f уменьшаются. По-видимому, это обусловлено уносом капель потоком воздуха. Капли мелких размеров уносились воздушным потоком за пределы водной капельной завесы, при этом площадь области воздействия аэрозоля увеличивалась.

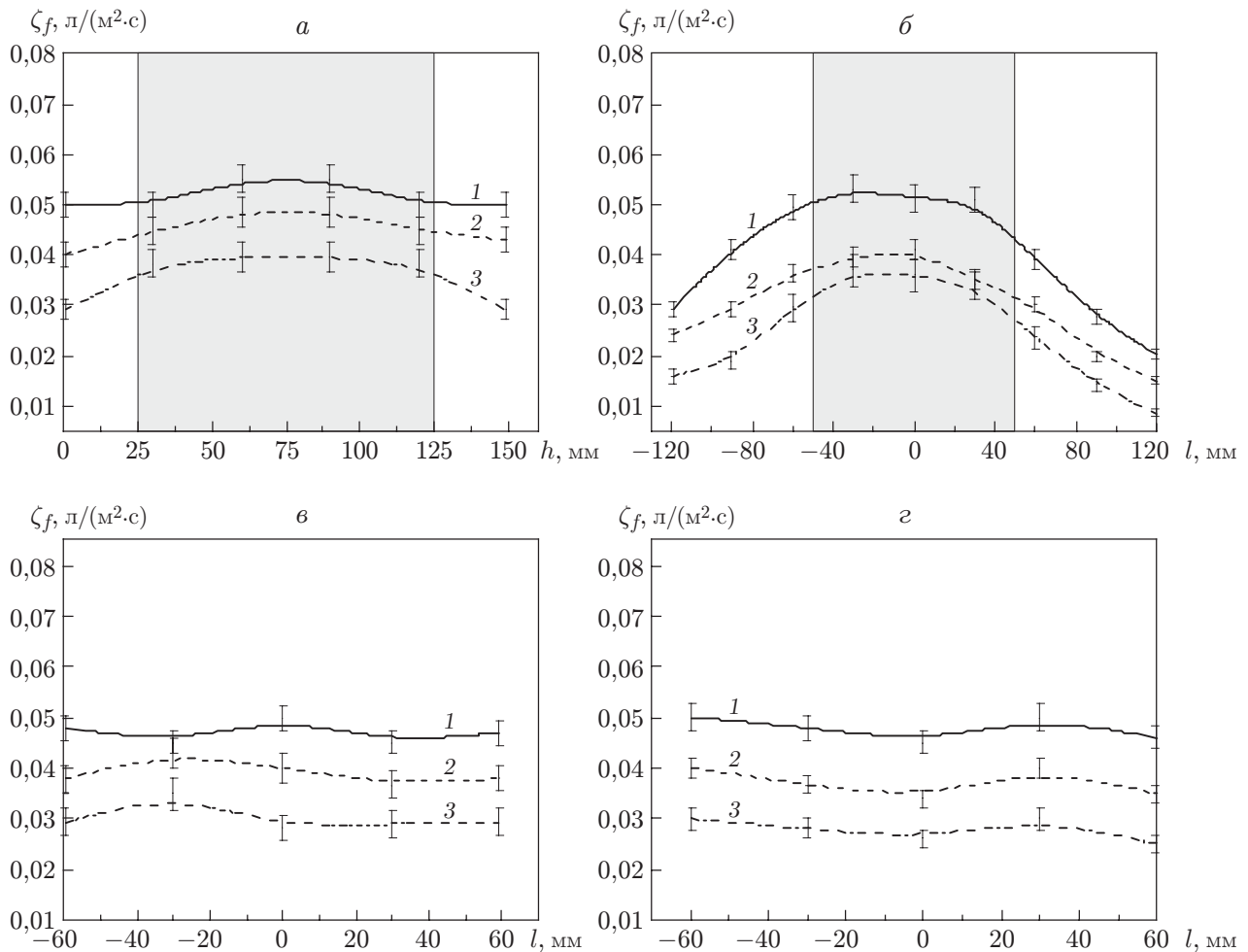


Рис. 6. Распределения удельной плотности орошения ЛГМ в сечениях I (а), II (б), III (в), IV (г) при различных значениях скорости воздушного потока: 1 — $U_a = 0$, 2 — $U_a = 0,5$ м/с, 3 — $U_a = 2,5$ м/с; заштрихованная область — зона перекрытия факелов распыления форсунок

На основе результатов, полученных в первом варианте экспериментов, значение ζ_f принято равным $0,05$ л/(м²·с). Значения ζ_f для второго и третьего вариантов зависят от скорости воздушного потока U_a . В таблице приведены средние значения ζ_f для исследованных вариантов воздействия на ЛГМ.

Результаты исследования и их обсуждение. На первом этапе экспериментов определялись времена полного выгорания навесок ЛГМ (рис. 7) в отсутствие воздействия капельного аэрозоля. После иницирования горения навесок регистрировались две фазы выгорания: фаза пламенного горения и фаза тления. В режиме пламенного горения основным процессом являлось горение газообразных продуктов деструкции, сопровождаемое движением горячих газов из очага горения. Время прекращения пламенного горения ЛГМ t_f оценивалось по степени угасания пламени. В фазе тления (термического разложения) доминирующим процессом является горение твердых продуктов пиролиза. При горении в режиме тления наблюдалось движение воздуха вглубь навески. В соответствии с данными работ [3, 7] полагалось, что термическое разложение происходит при температуре ЛГМ $T_{it} \geq 370$ К. Момент достижения во всех точках зоны пиролиза значения температуры меньше этого значения считался моментом завершения термического

Средние значения удельной плотности орошения
в зависимости от скорости движения воздушного потока

Вариант взаимодействия аэрозоля с ЛГМ	U_a , м/с	ζ_f , л/(м ² ·с)
Первый	0,5 ÷ 2,5	0,0500
	0,5	0,0500
	1,5	0,0375
Второй и третий	2,5	0,0350

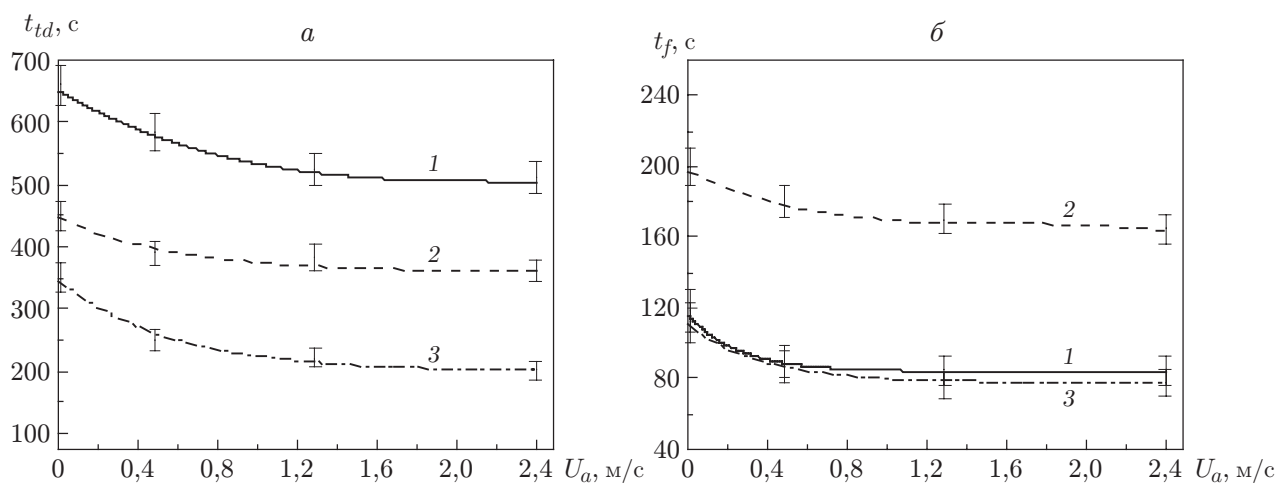


Рис. 7. Зависимости времени выгорания ЛГМ с учетом термического разложения (а) и пламенного горения (б) от скорости воздушного потока:
1 — хвоя сосны, 2 — смесь ЛГМ, 3 — листья березы

разложения t_{td} . В этот момент все размещенные в ЛГМ термопары показывали значения температуры меньше T_{it} .

На основе результатов выполненных экспериментов можно сделать вывод, что при движении фронта горения со скоростью $U_a \leq 1$ м/с зарегистрировано уменьшение (на 15 ÷ 35 %) времени пламенного горения и термического разложения трех рассмотренных типов ЛГМ. В первую очередь это вызвано тем, что приток окислителя в зону горения газообразных продуктов термического разложения ЛГМ интенсифицирует процесс взаимодействия горючего и окислителя (ЛГМ горит быстрее). Направленный поток воздуха способствует также ускоренному продвижению фронта пламени по слою ЛГМ, увеличивая площадь поверхности участка горящего ЛГМ. Однако время выгорания трех исследуемых наиболее распространенных ЛГМ слабо зависит от скорости движения сопутствующего воздушного потока. При изменении скорости U_a в диапазоне 1,0 ÷ 2,4 м/с значения времени выгорания ЛГМ различаются не более чем на 11 %. По-видимому, установленная закономерность обусловлена тем, что движение холодного воздуха вызывает уменьшение теплового потока из внешней высокотемпературной среды в зону, где завершился процесс пиролиза ЛГМ. Увеличение скорости воздушного потока на 1 м/с и более не приводит к значительному уменьшению времени выгорания ЛГМ.

Для трех вариантов взаимодействия ЛГМ и аэрозоля (см. рис. 4) определено время горения трех рассмотренных ЛГМ при ширине водоаэрозольной полосы 50 мм и различных значениях скорости воздушного потока ($U_a \approx 0,5 \div 2,5$ м/с). Зависимости времени деструкции рассмотренных ЛГМ от скорости приведены на рис. 8. Из рис. 8 следует, что на

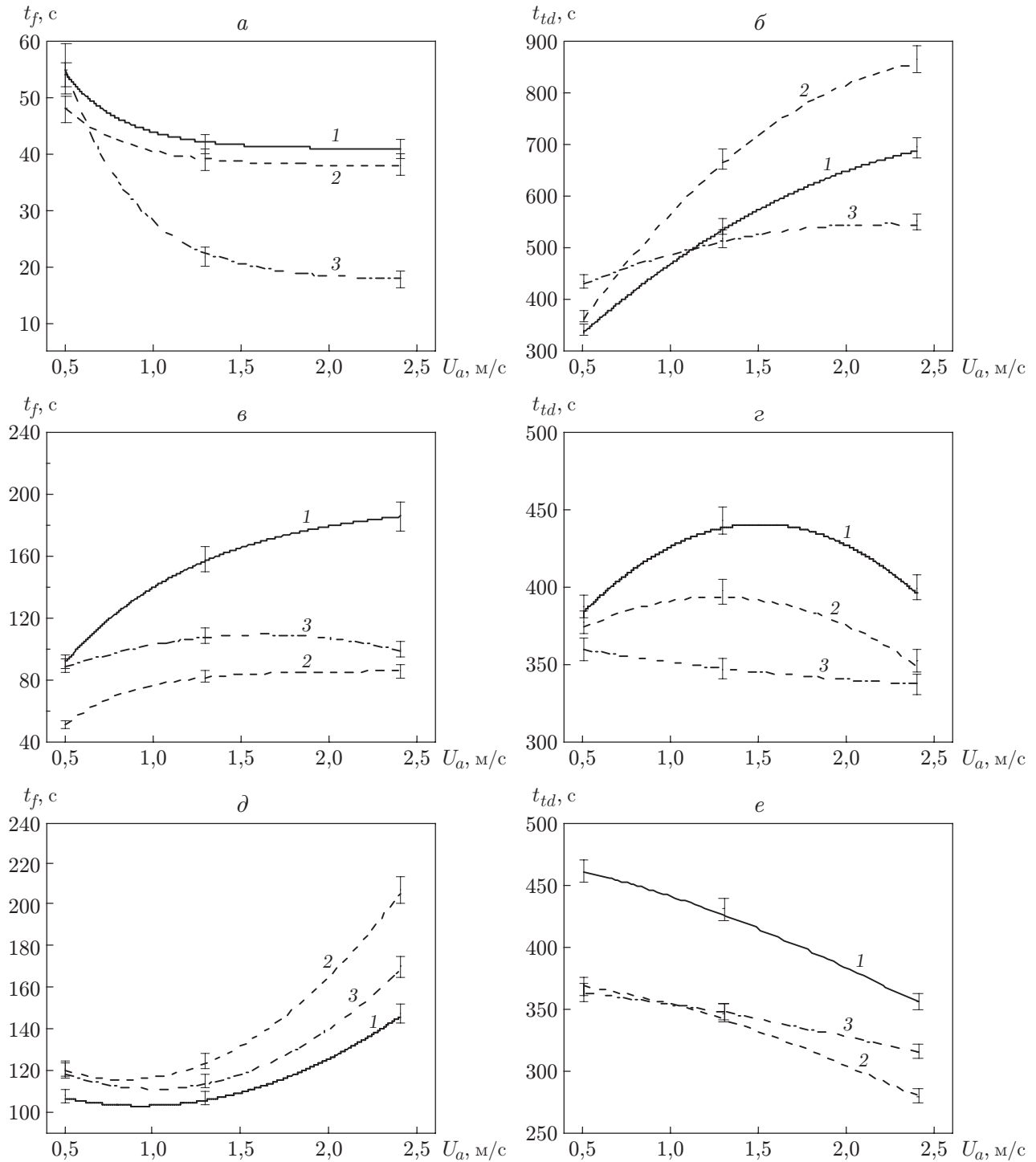


Рис. 8. Зависимости времени пламенного горения t_f (а, в, д) и термического разложения t_{td} (б, г, е) ЛГМ от скорости движения воздуха:
 а, б — листья березы, в, г — хвоя, д, е — смесь ЛГМ; 1, 2, 3 — первый, второй, третий варианты воздействия аэрозоля на ЛГМ

процесс горения ЛГМ существенно влияют не только условия взаимодействия термически разлагающегося ЛГМ с жидкостным аэрозолем, но и структура ЛГМ. Например, листья препятствуют движению капель воды вглубь навески. Происходит нагрев жидкости, а также ее интенсивное испарение в области высоких температур (в приповерхностном слое ЛГМ). При взаимодействии воды с хвоей и веточками капли жидкости быстро проходят через этот высокопористый ЛГМ и достигают слоев с относительно низкой температурой (менее температуры начала термического разложения), причем при испарении и движении листьев начальная масса капель незначительно уменьшается. Таким образом, в случае хвои длительность процесса пламенного горения существенно больше, чем в случае листьев.

В то же время термическое разложение листьев березы происходит в течение более длительного периода по сравнению с хвоей и смесью ЛГМ. Капли воды задерживаются листьями вблизи границы раздела ЛГМ — внешняя среда и достаточно слабо охлаждают глубинные слои навески (так как практически не проникают в них), в которых и происходит процесс пиролиза.

На рис. 8, *a, б* также видно, что при увеличении скорости воздушного потока время пламенного горения листьев существенно уменьшается. Вследствие движения воздушного потока уменьшается тепловой поток в область термического разложения материала. При этом существенно уменьшается скорость пиролиза, и движение фронта области начала пиролиза вглубь материала замедляется (см. рис. 8, *a, б*). Для листьев березы в экспериментах зафиксировано максимальное увеличение значений времени реакции термического разложения t_{td} с ростом U_a . Увеличение значения t_{td} в этом случае можно объяснить тем, что при достаточно интенсивном движении воздуха вдоль слоя воды на листьях происходит интенсивное испарение жидкости, так как воздух уносит пары воды, и с увеличением U_a градиент их концентрации вблизи поверхности парообразования достигает больших значений. В результате при больших скоростях U_a температура нагрева воды меньше, чем в случае испарения при $U_a \approx 0$. Следовательно, с увеличением скорости потока воздуха отток теплоты из области термического разложения уменьшается. При этом в слое листьев березы, не подвергшемся воздействию водяных капель, достаточно интенсивно протекает реакция деструкции.

Также следует отметить существенные различия времени пламенного горения t_f листьев березы при исследованных вариантах взаимодействия капельного потока с ЛГМ. В третьем варианте зафиксировано уменьшение времени t_f по сравнению со значениями t_f в других вариантах приблизительно на 47 % (см. рис. 8, *a*). В первом и втором вариантах во всем диапазоне значений скорости воздушного потока различие времени деструкции листьев березы не превышает 5 %. Данная закономерность обусловлена существенным увеличением толщины пленки воды на листьях. При комбинированном способе подачи жидкостного аэрозоля толщина пленки увеличивается в 1,5 раза (проводились дополнительные измерения объема воды, остающейся в поддоне после каждой серии экспериментов). Вследствие этого интенсифицируется теплоотвод из зоны горения за счет как аккумуляции теплоты в слое воды при нагреве, так и интенсивного испарения воды. При воздействии капельного потока воды на хвою и смесь трех видов ЛГМ (см. рис. 8, *в–e*) такой эффект невозможен, поскольку вода протекает через пористый ЛГМ без интенсивного испарения.

Результаты экспериментов показывают также, что во втором и третьем вариантах воздействия аэрозоля (см. рис. 8, *в, д*) пламенное горение и термическое разложение хвои сосны прекращаются быстрее, чем в первом варианте. Установлено, что при $U_a < 1$ м/с в зависимости от скорости сопутствующего потока воздуха время пламенного горения ЛГМ может измениться на 42 %.

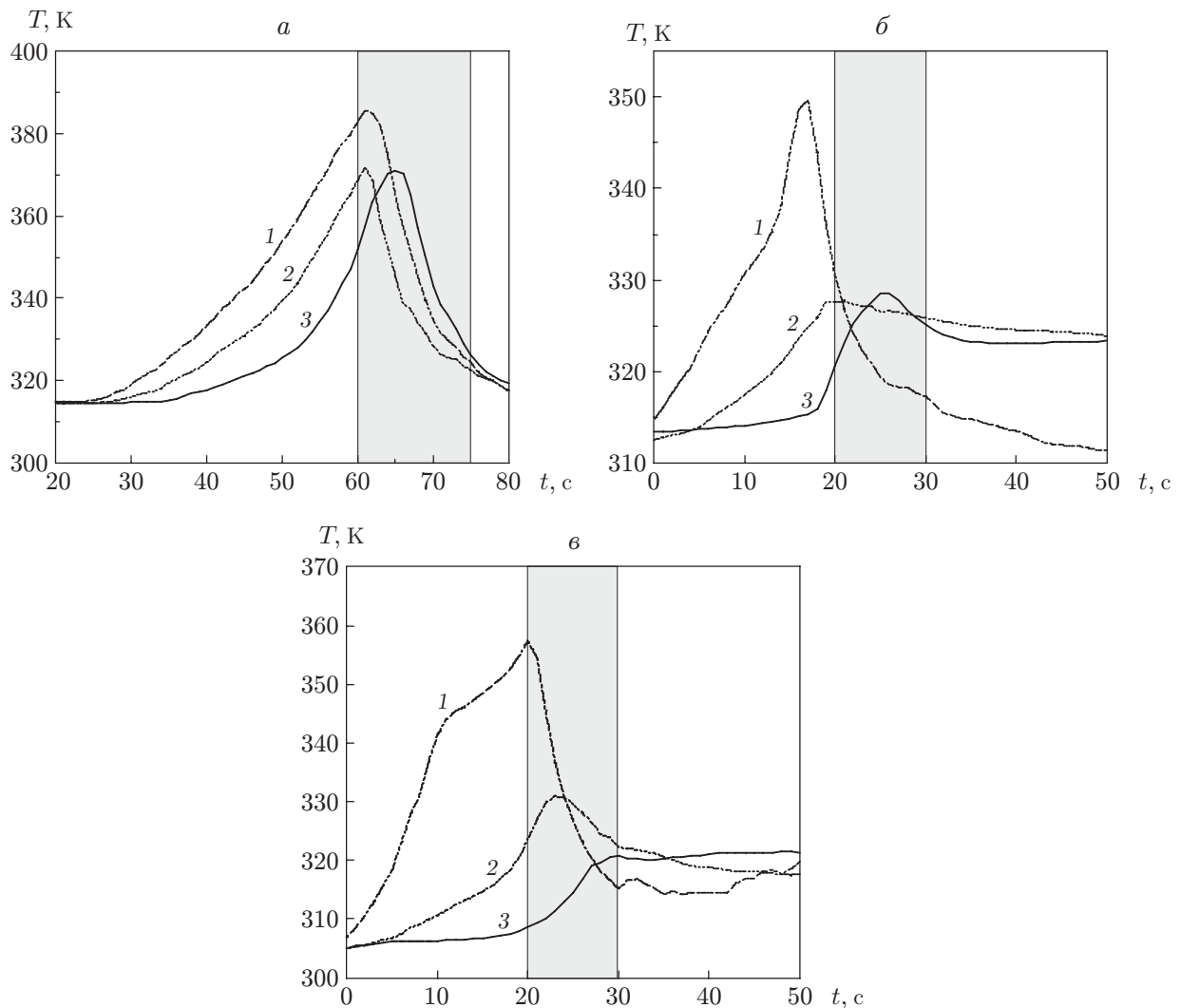


Рис. 9. Распределения температуры при воздействии на модельный очаг жидкостного аэрозоля в третьем варианте при ширине зоны распыления аэрозоля 50 мм:

a — хвоя, $б$ — листья березы, $в$ — смесь ЛГМ; 1 — $H = 5$ мм, 2 — $H = 20$ мм, 3 — $H = 40$ мм; заштрихованная область — зона впрыска воды

В экспериментах с хвоей увеличение скорости до значения $U_a = 2,4$ м/с привело к незначительному (приблизительно на 6 %) увеличению t_f . Наибольшее время пламенного горения хвой при подаче воды в соответствии с первым вариантом (см. рис. 7) обусловлено структурой и размерами компонентов навески ЛГМ. Как правило, длина хвоинок составляет $50 \div 60$ мм [3, 7]. С учетом этого можно предположить, что предварительное смачивание (первый вариант воздействия на пиролизующийся ЛГМ) характерного участка в модельном очаге с поперечным размером L_a приводит к замедлению распространения фронта горения, при этом часть навески выгорает, а приповерхностные слои интенсивно подсушиваются. Стабильное продвижение фронта горения в направлении сопутствующего потока наблюдалось только в экспериментах с хвоей сосны. Установлено, что ее разложение прекращалось вблизи передней кромки предварительно увлажненного участка (часть навески до передней кромки смоченного участка выгорала).

В третьем варианте воздействия жидкостного аэрозоля значение t_{td} для хвои уменьшалось на 5 %, для смеси ЛГМ — на 11 % (см. рис. 8, *e*). Умеренное уменьшение значения t_{td} для хвои обусловлено тем, что капли аэрозоля достаточно быстро проникали вглубь навески (вследствие высокой пористости открытой поверхности материала), обволакивая каждую хвоинку, и охлаждали ЛГМ, вследствие чего скорость термического разложения значительно уменьшалась. Аналогичный процесс прекращения пиролиза наблюдается для смеси ЛГМ, поскольку ее основным компонентом являются ветки. Однако в данном случае при всех исследованных вариантах подачи жидкостного аэрозоля значение t_f увеличивалось с 29 до 42 % (см. рис. 8, *d*). По-видимому, это обусловлено тем, что теплоемкость веток существенно больше теплоемкости остальных компонентов. Увеличение скорости воздуха приводит к увеличению скорости движения фронта пламени непосредственно в приповерхностном слое ЛГМ. При этом интенсифицируется горение ЛГМ, находящегося вблизи пиролизующегося материала. Распределения температуры в слое ЛГМ до и после подвода воды в третьем варианте подачи жидкостного потока показаны на рис. 9. На рис. 9, *b* видно, что в случае листьев березы после впрыска капель на поверхность ЛГМ температура в точке, находящейся на расстоянии от поверхности раздела ЛГМ — внешняя среда $H = 5$ мм, быстро уменьшается до значений, меньших температуры на расстояниях от поверхности нагрева $H = 20, 40$ мм. Зависимости, приведенные на рис. 9, характеризуют динамику температурных полей в пористых ЛГМ при их взаимодействии с аэрозольным потоком воды.

Заключение. На основе результатов проведенных экспериментов можно сделать следующие выводы.

При движении капель воды через пористые лесные горючие материалы, нагретые до высокой температуры, происходит их быстрое охлаждение, а также интенсивный нагрев и испарение воды с поглощением теплоты, аккумулированной материалом на стадии термического разложения. В результате прекращаются процессы термического разложения и пламенного горения лесных горючих материалов.

Процесс охлаждения высокопористого лесного горючего материала существенно зависит от его структуры. Так, наличие ориентированных в направлении, ортогональном основному направлению движения капель, компонентов ЛГМ относительно больших размеров (например, листьев), препятствующих движению капель воды, существенно (в $1,5 \div 2$ раза) увеличивает продолжительность процесса термического разложения ЛГМ.

В зависимости от условий воздействия капельного потока и пористости ЛГМ движение воздуха параллельно поверхности раздела ЛГМ — внешняя среда может как интенсифицировать процесс термического разложения лесного горючего материала и соответственно газофазное горение газообразных продуктов пиролиза, так и замедлить его.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Вильямс Ф. А.** Теория горения. М.: Наука, 1971.
2. **Vilyunov V. N.** Ignition of solids / V. N. Vilyunov, V. E. Zarko. Amsterdam: Elsevier Sci. Publ., 1989.
3. **Барановский Н. В.** Прогноз возникновения лесных пожаров и их экологических последствий / Н. В. Барановский, Г. В. Кузнецов. Новосибирск: Изд-во Сиб. отд-ния РАН, 2009.
4. **Dimitrakopoulos A., Gogi C., Stamatelos G., Mitsopoulos I.** Statistical analysis of the fire environment of large forest fires (> 1000 ha) in Greece // Polish J. Environ. Stud. 2011. V. 20. P. 327–332.

5. **Laing J. R., Jaffe D. A., Hee J. R.** Physical and optical properties of aged biomass burning aerosol from wildfires in Siberia and the Western USA at the Mt. Bachelor Observatory // *Atmospher. Chem. Phys.* 2016. V. 16. P. 15185–15197.
6. **Доррер Г. А.** Математические модели динамики лесных пожаров. М.: Лесн. пром-сть, 1979.
7. **Гришин А. М.** Математические модели лесных пожаров. Томск: Изд-во Том. гос. ун-та, 1981.
8. **Гришин А. М., Голованов А. Н., Медведев В. В.** О возникновении колебаний элементов лесных горючих материалов и их влиянии на режимы воспламенения и горения // *ПМТФ.* 2001. Т. 42, № 4. С. 127–135.
9. **Гришин А. М., Шипулина О. В.** Математическое моделирование распространения вершинных лесных пожаров в однородных лесных массивах и вдоль просек // *Физика горения и взрыва.* 2002. Т. 38, № 6. С. 17–19.
10. **Grishin A. M., Filkov A. I.** A deterministic-probabilistic system for predicting forest fire hazard // *Fire Safety J.* 2011. V. 46, N 1/2. P. 56–62.
11. **Reszka P., Borowiec P., Steinhaus T., Torero J. L.** A methodology for the estimation of ignition delay times in forest fire modelling // *Combust. Flame.* 2012. V. 159. P. 3652–3657.
12. **Adou J. K., Billaud Y., Brou D. A., et al.** Simulating wildfire patterns using a small-world network model // *Ecolog. Modelling.* 2010. V. 221. P. 1463–1471.
13. **Коробейничев О. П., Шмаков А. Г., Чернов А. А. и др.** Тушение пожаров с помощью аэрозолей растворов солей // *Физика горения и взрыва.* 2010. Т. 46, № 1. С. 20–25.
14. **Korobeinichev O. P., Shmakov A. G., Shvartsberg V. M., et al.** Fire suppression by low-volatile chemically active fire suppressants using aerosol technology // *Fire Safety J.* 2012. V. 51. P. 102–109.
15. **Dombrovsky L. A., Dembele S., Wen J. X.** A simplified model for the shielding of fire thermal radiation by water mists // *Intern. J. Heat Mass Transfer.* 2016. V. 96. P. 199–209.
16. **Volkov R. S., Strizhak P. A.** The integral characteristics of the deceleration and entrainment of water droplets by the counter flow of high-temperature combustion products // *Experiment. Therm. Fluid Sci.* 2016. V. 75. P. 54–65.
17. **Лоцилова Н. А., Беляев И. В.** Эффективность тушения лесного пожара при комбинировании естественной и искусственной преград // *Фундамент. и прикл. исслед. в соврем. мире.* 2015. № 12-3. С. 31–32.
18. **Ерицов А. М., Гусев В. Г.** Совершенствование технологий создания заградительных и опорных полос при тушении лесных пожаров в зонах лесоавиационных работ // *Вестн. Поволж. гос. техн. ун-та. Сер. Лес. Экология. Природопользование.* 2016. № 1. С. 42–56.
19. **Копылов Н. П., Хасанов И. Р., Кузнецов А. Е. и др.** Параметры сброса воды авиационными средствами при тушении лесных пожаров // *Пожар. безопасность.* 2015. № 2. С. 49–55.
20. **Волков Р. С., Жданова А. О., Няшина Г. С., Хасанов И. Р.** Влияние размеров капель аэрозоля на времена прекращения термического разложения лесного горючего материала // *Пожар. безопасность.* 2017. № 1. С. 73–79.

*Поступила в редакцию 15/VIII 2017 г.,
в окончательном варианте — 29/XI 2017 г.*