

УДК 536.4

ПОДАВЛЕНИЕ ТЕРМИЧЕСКОГО РАЗЛОЖЕНИЯ И ПЛАМЕННОГО ГОРЕНИЯ КОНДЕНСИРОВАННЫХ ВЕЩЕСТВ ПРИ РАЗНОЙ ВЫСОТЕ НАЧАЛА ДВИЖЕНИЯ МАССИВА ВОДЫ

Р. С. Волков, Г. В. Кузнецов, П. А. Стрижак

Томский политехнический университет, 634050 Томск, kuznetsov@tpu.ru, <http://hmtslab.tpu.ru>

Приведены результаты экспериментального исследования процессов тепло- и массопереноса и фазовых превращений при подавлении термического разложения и пламенного горения конденсированных веществ (КВ) на примере типичных лесных горючих материалов (смеси листьев, хвоинок и веточек) путем воздействия на них нераспыленным водяным массивом на разных стадиях его трансформации. Объем жидкости и высота сброса относительно поверхности КВ варьировались с учетом известных стадий трансформации водяных массивов для иллюстрации возможных отличий площадей поперечного сечения последних, которые определяют площадь контакта воды с КВ. Получены зависимости характеристик прекращения горения КВ от высоты начала движения водяного массива.

Ключевые слова: конденсированное вещество, лесной горючий материал, термическое разложение, пламенное горение, подавление, водяной массив, трансформация, измельчение.

DOI 10.15372/FGV20200110

ВВЕДЕНИЕ

Лесные горючие материалы (ЛГМ) представляют собой сложные по структуре конденсированные вещества (КВ) [1–4]. Это обусловлено тем, что элементы лесного опада перемешиваются, некоторые фрагменты переносятся ветром, смываются дождями и оползнями, уплотняются в зимних условиях под слоем снега. Как следствие, в летний период структура таких КВ существенно неоднородна [3, 4]. Теплофизические свойства и термокинетические характеристики КВ даже в рамках одного лесного массива существенно различаются [3, 4]. Это приводит к значительно отличающимся скоростям процессов прогрева, влагоудаления, термического разложения и пламенного горения. В этих условиях разработать унифицированную и эффективную (по основным критериям, в частности по необходимому времени, средствам, уровню безопасности) технологию подавления пламенного горения и термического разложения КВ крайне сложно. Как следствие, нередко применяют авиационное пожаротушение [5] с целью не столько подавления горения, сколько локализации очагов возгорания (препятствия движению фронтов го-

рения). При этом условия сброса воды часто выбираются исходя не из характеристик пожара, а из имеющихся ресурсов (основное ограничение — одновременно переносимый объем воды) и соблюдения требований безопасности (высота и длительность сброса воды в зону горения) [5, 6].

Применение систем авиационного тушения сводится к сбросу, как правило, больших массивов не распыленной на выходе из емкости воздушного судна воды — практически в виде монолитной массы (до $40 \div 45$ т) [5, 6]. Рекомендуемая высота сброса воды составляет для самолетов-танкеров $80 \div 200$ м, для вертолетов $20 \div 60$ м [5, 6]. В [7, 8] приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований, свидетельствующие, что при локальном сбросе воды в зону пожара более 90 % жидкости расходуется нерационально, так как не успевает испариться в зоне пламенного горения и термического разложения. При этом не обеспечиваются условия одновременной реализации группы основных механизмов подавления пламенного горения и термического разложения ЛГМ [9–11]: блокирование доступа кислорода в зону горения водяными парами; снижение температуры в зоне горения за счет конвективного охлаждения водой и энергозатратных (вследствие высокой теплоты парообразования 2.2 МДж/кг) эндотермических фазо-

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (№ 18-19-00056).

© Волков Р. С., Кузнецов Г. В., Стрижак П. А., 2020.

вых превращений; снижение скоростей физико-химических превращений за счет интенсивного вдува водяных паров, приводящего к уменьшению концентраций продуктов термического разложения и окислителя в зоне горения.

Целесообразным является использование распыленной воды (создание аэрозольного облака), эффективность применения которой для тушения лесных пожаров любой категории в несколько раз выше [7, 8]. Но в этом случае возникают сложности, связанные с уносом капель из зоны горения восходящим потоком высокотемпературных продуктов сгорания [12, 13], а также с необходимостью длительного времени работы воздушных судов в зоне пожарной опасности (зависание вертолета при распылении или движение самолета по замкнутой траектории). Результаты [8] можно использовать для прогнозирования оптимальных характеристик аэрозольного облака. На практике же, как правило, не всегда учитывают рекомендации [8], руководствуясь лишь таким параметром, как удельный расход воды (на единицу площади поверхности), который традиционно рекомендуется поддерживать в диапазоне $3 \div 5$ л/м² для эффективного подавления пламенного горения лесного массива [5, 6]. Но в [8] показано, что этот параметр можно уменьшить в $1.3 \div 2.5$ раза с гарантированным подавлением горения ЛГМ при оптимизации условий и характеристик распыления жидкости.

Задачи достоверного прогнозирования рациональной высоты начала движения (сброса) водяной массы и, как следствие, покрываемой ею площади чрезвычайно сложны. Известные расчетные алгоритмы (например, рассмотренные в [5, 6]) не учитывают группу значимых факторов и процессов, а натурные и полевые испытания небезопасны и затратны. Необходимы достоверные экспериментальные оценки влияния параметров сброса воды авиационной техникой на условия и характеристики подавления пламенного горения и термического разложения КВ. Варьирование в экспериментах высоты сброса и объема монолитного на начальной стадии движения массива позволяет изучить условия взаимодействия КВ и достигающей его поверхности воды. Эксперименты целесообразно проводить с использованием высокоскоростных следящих программно-аппаратных комплексов.

Результаты опытов [12], выполненных в лабораторных и полевых условиях, позволили

установить стадии трансформации и разрушения достаточно больших (до 1 л), не распыленных на начальной стадии водяных массивов. В частности, показано, что под действием аэродинамических сил, инерции, поверхностного натяжения и т. д. водяной массив, проходя последовательно несколько стадий разрушения, трансформируется в аэрозольное облако [12] (см. таблицу). Следовательно, достичь условий образования аэрозоля можно и без специализированных распылительных устройств [12], если обеспечить оптимальную высоту сброса. Поэтому целесообразным представляется проведение экспериментальных исследований по установлению условий сброса (непосредственно начальной высоты и объема тушащей жидкости) водяного массива, при которых образуется аэрозольное облако, подавляющее горение КВ.

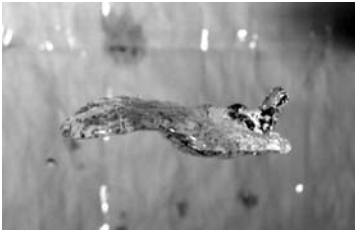
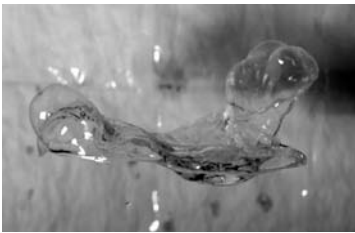
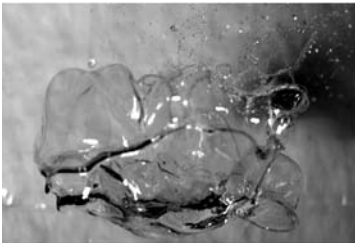
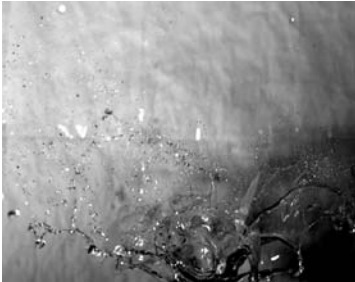
Цель настоящей работы — определение условий и характеристик подавления пламенного горения и термического разложения типичных конденсированных веществ из числа ЛГМ не распыленным на начальной стадии движения водяным массивом при его свободном падении с варьируемой высотой.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Аналогично опытам [8], при создании модельного очага низового лесного пожара в лаборатории использовался металлический поддон диаметром 230 мм и высотой 20 мм. Выбор размеров и формы очага связан с особенностями разрушения водяных массивов. Начало движения водяного массива ограничено высотой 3 м.

В качестве КВ использовалась смесь типичных ЛГМ в массовом соотношении: листья березы — 25 %, хвоя сосны — 15 %, ветки — 60 %. Выбор этой смеси обусловлен тем, что такие составные части характерны для большинства хвойных и лиственных лесов. В [8] установлены зависимости времен подавления пламенного горения и термического разложения КВ (листья, хвоя, веточки, их смесь) от объема жидкости, дисперсности аэрозоля, времени впрыска последнего и группы других параметров. Соответственно, зная время подавления горения смеси ЛГМ, с применением данных [8] можно прогнозировать время подавления горения очагов, состоящих из листьев, веточек или хвои по отдельности. Относительная влажность природного материала в экспе-

Характеристики стадий разрушения (трансформации) больших водяных массивов различных начальных объемов (в формате представления результатов опытов [12])

Стадия трансформации	V , л	l , м	Типичные видеogramмы эксперимента при $V \approx 0.2$ л
1. Сплюсчивание массива	0.05	$0 \div 1$	 $u_m = 2.3$ м/с $t = 0.215$ с $l = 0.38$ м
	0.2	$0 \div 0.75$	
	0.5	$0 \div 0.5$	
2. Образование пузырей	0.05	$1.25 \div 1.5$	 $u_m = 4.7$ м/с $t = 0.465$ с $l = 1.10$ м
	0.2	$1 \div 1.25$	
	0.5	$0.75 \div 1.0$	
3. Разрушение пузырей и образование водяных цепочек	0.05	$1.75 \div 2.25$	 $u_m = 5.8$ м/с $t = 0.620$ с $l = 1.75$ м
	0.2	$1.5 \div 2.0$	
	0.5	$1.25 \div 1.5$	
4. Образование облака мелких капель	0.05	>2.5	 $u_m = 6.3$ м/с $t = 0.725$ с $l = 2.25$ м
	0.2	>2.25	
	0.5	>1.75	

риментах составила $\gamma_f = 8 \div 12$ %. Насыпная плотность навески КВ изменялась в довольно узком диапазоне $\rho_f = 30 \div 87$ кг/м³, типичном

для бореального массива [1–3].

Аналогично опытам и огневым испытаниям [12], в качестве водяного массива в на-

стоящей работе использовалось водяное «ядро» сферической формы, создаваемое, так же как и в [12], с помощью резиновой оболочки толщиной менее 0.2 мм, заполняемой тушащей жидкостью. Объем водяного массива варьировался от 0.1 до 0.2 л. Рассчитывались: скорость движения массива u_m ; время его свободного падения t ; расстояние l , пройденное массивом с момента сброса; поперечный размер массива d ; размеры фрагментов жидкости d_p , на которые распадается массив; площадь поперечного сечения S последнего (соответствует площади контакта КВ с водой). Систематические погрешности определения размеров массива, оторвавшихся капель и их агломератов не превышали 0.1 мм, времен движения массива и его трансформации — $2 \cdot 10^{-4}$ с. Максимальная погрешность определения скорости движения массива составила 0.05 м/с. Для анализа видеogramм опытов применялось программное обеспечение Tema Automotive.

Эксперименты выполнялись на стенде, схема которого приведена на рис. 1, и вклю-

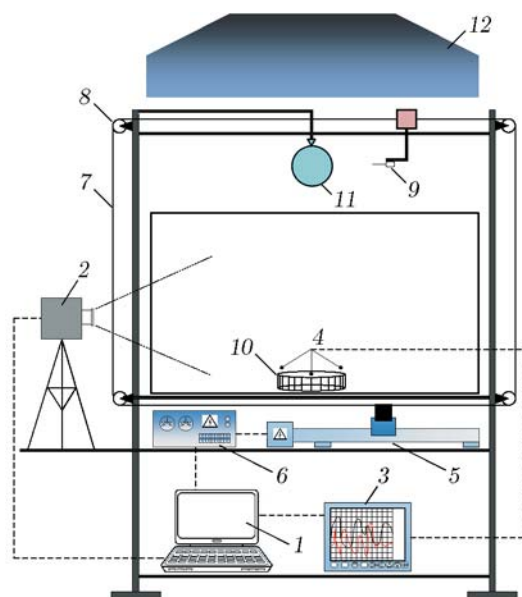


Рис. 1. Схема стенда по подавлению горения модельных очагов КВ (аналогичного использованному в опытах [7, 8]):

1 — компьютер, 2 — высокоскоростная видеокамера, 3 — цифровой измеритель температуры, 4 — термопары, 5 — моторизированное координатное устройство, 6 — блок питания координатного устройства, 7 — тросы, 8 — роликовые механизмы, 9 — держатель с закрепленной иглой, 10 — навеска КВ, 11 — жидкостное «ядро», 12 — вытяжная система

чали в себя следующие процедуры:

- по периметру навески КВ размещались игольчатые хромель-алюмелевые термопары (верхняя граница измеряемой температуры 1473 К, систематическая погрешность ± 3 К, тепловая инерционность не более 1 с); максимальные случайные погрешности определения температуры КВ в процессе термического разложения не превышали 30 К;

- зажигание навески осуществлялось равномерно по всей площади поверхности КВ одновременно тремя газовыми горелками;

- термопарами регистрировался период времени от начала горения до момента, когда показания всех трех термопар (температур) становились выше значения, соответствующего завершению процесса сушки материала: $T_{if} = 370$ К. Выбор этого значения обусловлен предельными температурами термического разложения КВ [7, 8]. Критерием устойчивого горения КВ считалось превышение этого значения температурой слоя;

- в момент превышения температурой слоя значения T_{if} водяной массив сбрасывался с фиксированной высоты;

- время взаимодействия водяного массива с очагом возгорания регистрировалось с помощью высокоскоростной видеокамеры;

- определялась площадь покрытия модельного очага водой, и анализировались последствия воздействия жидкости на процесс горения (ликвидация горения или его продолжение).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 2 приведены типичные видеogramмы подавления пламенного горения и термического разложения в модельном очаге массивом воды на разных стадиях его трансформации. Результаты серии опытов при разных начальных объемах массива представлены на рис. 3. Высокоскоростная регистрация процессов подавления горения модельного очага на второй (образование пузырей) и третьей (разрушение пузырей и образование водяных цепочек) стадиях трансформации массива (см. таблицу) показала, что для эффективного подавления горения необходимо покрыть водой практически всю площадь свободной поверхности очага (не менее $80 \div 90$ %). Это можно объяснить тем, что при полном покрытии очага возгорания реализуется один из механизмов прекращения горения — блокируется доступ кислорода в зо-

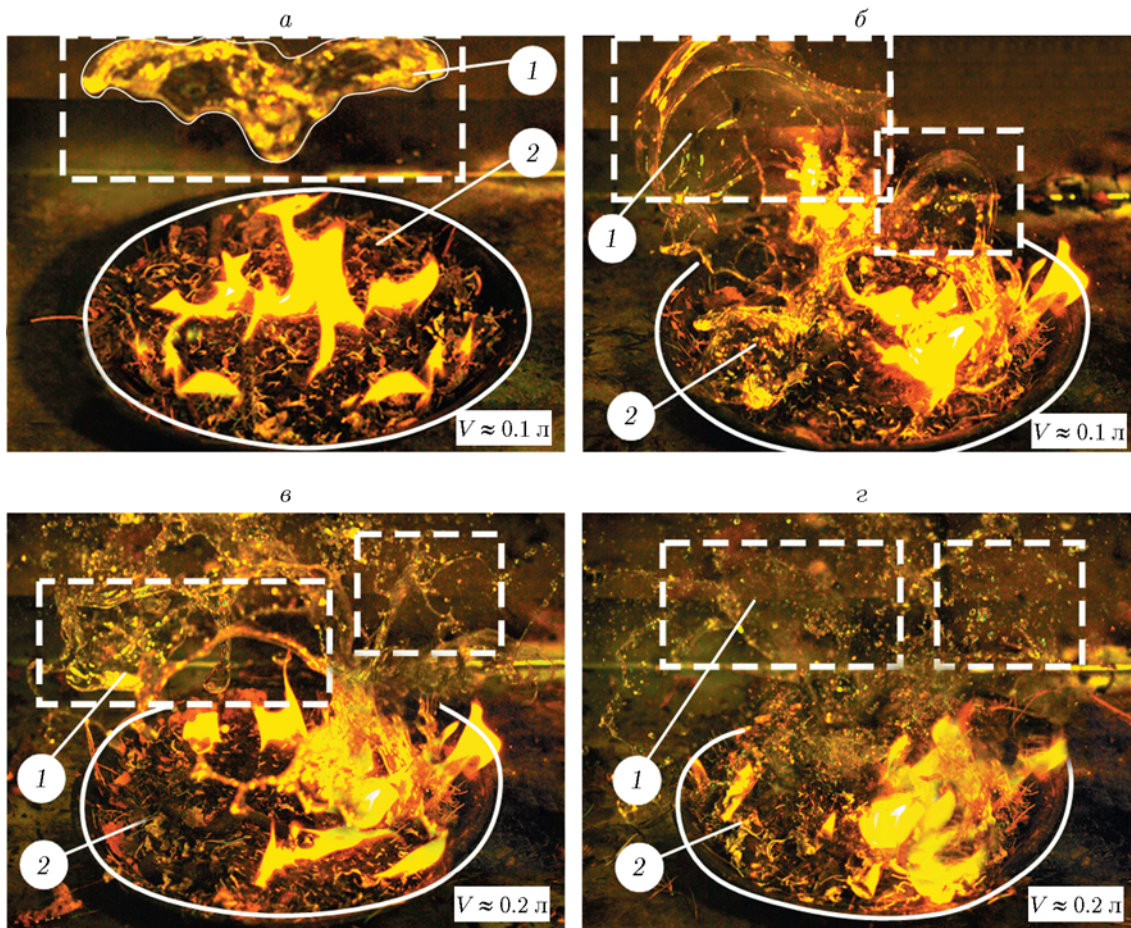


Рис. 2. Видеокadres водяного массива исходного объема 0.1 л (*а, б*) и 0.2 л (*в, г*) на разных стадиях его трансформации перед попаданием на поверхность КВ:

а — сплющивание массива, *б* — образование пузырей, *в* — разрушение пузырей и образование водяных пепочек, *г* — образование облака мелких капель; 1 — водяной массив, 2 — модельный очаг

ну горения и термического разложения (приповерхностный слой КВ). Анализ зависимостей, приведенных на рис. 3, позволяет сделать заключение о том, что объем водяного массива около 0.2 л достаточен для подавления горения в рассматриваемом типичном случае. Если водяной массив не покрывает всей площади горения, то термическое разложение продолжается. Воздействие на модельный очаг облаком мелких капель (четвертый этап трансформации водяного массива) приводило к эффективному подавлению горения даже при объеме жидкости менее 0.2 л. Это обусловлено тем, что в этих условиях температура пламени снижается за счет интенсивного испарения мелких капель и вытеснения водяными парами продуктов сгорания. Воздействие на КВ водяным массивом на четвертой (аэрозоль) стадии его трансформации во всех исследованных слу-

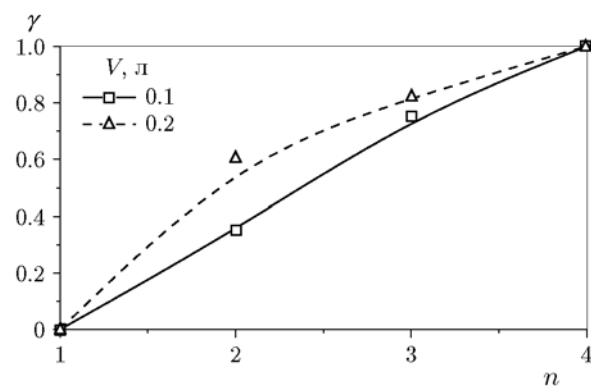


Рис. 3. Вероятность (γ) положительного исхода процесса подавления термического разложения КВ на различных стадиях трансформации ($n = 1-4$, см. таблицу) водяного массива при начальных его объемах 0.1 и 0.2 л

чаях приводило к прекращению пламенного горения и термического разложения ЛГМ. Также можно отметить, что на первой, второй и третьей стадиях (т. е. в течение времени полета) в основном растет только поперечный характерный размер массива (см. видеограммы в таблице). На последней стадии при образовании облака капель существенно увеличивается и продольный характерный (по высоте) размер массива. В этом случае объемы воды частично являются избыточными. При движении через пламя массив в любом состоянии еще и сжимается. Характеристики этого процесса установлены в экспериментах [12]. С ростом исходного объема воды процесс разрушения интенсифицируется. Переходы между выделенными стадиями реализуются при меньших временах перемещения в воздухе и, соответственно, на меньших пройденных участках траекторий движения. Очевидно, что это обусловлено ростом сил, действующих на массив, при повышении его исходных размеров.

Ранее установлено [7, 8], что чем больше площадь поперечного сечения водяного массива (площадь контакта воды с КВ) и меньше размеры капель R_d в аэрозоле, тем меньше времена подавления пламенного горения и термического разложения КВ. Можно прогнозировать эффективные значения дисперсности аэрозоля для подавления горения КВ и связать характеристики этого процесса с диапазонами размеров капель (рис. 4). Опыты [7, 8] пока-

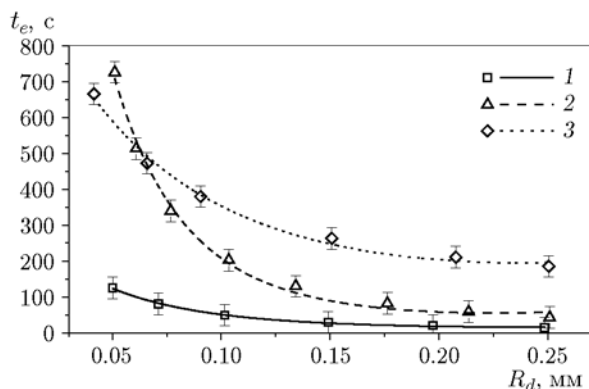


Рис. 4. Время подавления пламенного горения модельных очагов низовых ($S_f \approx 0.63 \text{ м}^2$, кривая 1), верховых ($S_f \approx 0.26 \text{ м}^2$, кривая 2) и комбинированных ($S_f \approx 0.63 \text{ м}^2$, кривая 3) пожаров аэрозолем в условиях, соответствующих варьированию размеров капель в полевых испытаниях [7, 8]

зали, что менее затратным по объему жидкости является использование мелкодисперсного аэрозоля ($R_d = 0.05 \div 0.1 \text{ мм}$). К таким же заключениям можно прийти и при анализе зависимостей на рис. 3, так как образующийся на четвертой стадии трансформации массива аэрозоль во всех экспериментах полностью подавлял не только пламенное горение, но и термическое разложение КВ. В этом случае наибольший вклад в подавление горения внес процесс парообразования (за счет высокой теплоты испарения воды — 2.26 МДж/кг). При интенсивном и длительном испарении капель воды вблизи поверхности ветвей деревьев, горящих до начала воздействия водяного аэрозоля, прекращается прогрев слоя КВ, в котором интенсивно шло термическое разложение, и начинается его охлаждение, даже если вода не успела проникнуть в пористую структуру древесины. Аккумулированная в прогретом слое КВ (в условиях верхового пожара — в веточках) теплота отводится во внешнюю среду (водяной пар с достаточно низкой температурой) и в глубь материала. В результате термическое разложение КВ замедляется, а его газообразные продукты, продолжающие поступать во внешнюю среду, охлаждаются до температур, при которых скорость их реакции с кислородом воздуха, присутствующим в облаке водяного пара, снижается до предельно низких значений (концентрация горючих газов также снижается, что ведет к уменьшению тепловыделения). Если при этом поступление водяного аэрозоля в область вблизи поверхности остывающего КВ прекращается, то возможно возобновление горения последнего. При поступлении водяного аэрозоля в течение длительного времени (например, как в экспериментах [7, 8], до $700 \div 800 \text{ с}$) слой КВ остывает за счет теплоотвода в окружающий его достаточно холодный водяной пар и в глубь слоя до температуры ниже температуры начала термического разложения. В результате термическое разложение КВ прекращается, соответственно, его пламенное горение не возобновляется.

Целесообразно рассмотреть баланс энергии в зоне пламенного горения и термического разложения ЛГМ (система КВ — водяной массив). В первом приближении для реагирующего слоя ЛГМ можно записать балансное выражение

$$Q_e + Q_w + Q_v + Q_t = Q_f + Q_c. \quad (1)$$

Для вычисления суммарной теплоты парообразования Q_e ; теплоты, расходуемой на нагрев воды Q_w ; теплоты, расходуемой на нагрев паров воды Q_v ; теплоты, затраченной при термическом разложении ЛГМ Q_t ; аккумулированной теплоты пиролизующегося слоя ЛГМ Q_f ; теплоты сгорания материала Q_c использовались выражения:

$$Q_e = m_w L_e, \quad Q_w = C_w m_w (T_{mw} - T_{iw}),$$

$$Q_v = C_v \rho_v V_v (T_{mv} - T_{iv}), \quad Q_t = \rho_f V_f L_f,$$

$$Q_f = C_f \rho_f V_f (T_{mf} - T_{if}), \quad Q_c = m_f L_c.$$

Здесь m_w — масса воды, кг; m_f — исходная масса навески ЛГМ, г; L_e — тепловой эффект парообразования, Дж/кг; L_c — теплота сгорания ЛГМ, Дж/кг; L_f — тепловой эффект термического разложения ЛГМ, Дж/кг; C_w, C_v, C_f — теплоемкость соответственно воды, пара и ЛГМ, Дж/(кг·К); ρ_v, ρ_f — плотность соответственно водяных паров и навески КВ, кг/м³; V_v, V_f — объем паров воды и ЛГМ, м³; T_{mw}, T_{iw} — максимальная (370 К) и начальная (290 К) температура воды; T_{mv}, T_{iv} — максимальная (измерялась в экспериментах) и начальная (370 К) температура паров воды; T_{mf}, T_{if} — максимальная (измерялась в экспериментах) и начальная (370 К) температура ЛГМ, К.

Проведенные вычисления показали, что в уравнении (1) имеются значимые на различных стадиях компоненты баланса, которые определяют основные характеристики тепло- и массообменных процессов в рассматриваемой системе. Так, например, при прохождении первых трех стадий трансформации водяного массива на поверхности КВ образуется пленка воды, последняя активно проникает в глубинные слои материала. Как следствие, в левой части уравнения (1) доминирует слагаемое, характеризующее теплоту, расходуемую на нагрев воды, проникающей в поры материала Q_w (вследствие ее высокой теплоемкости). При мелкодисперсном распылении воды над поверхностью КВ (на четвертой стадии трансформации массива) доминируют процессы испарения жидкости. Соответственно, в левой части уравнения (1) наибольшее значение имеет слагаемое Q_e , характеризующее теплоту, расходуемую на парообразование. В правой части уравнения (1) в любом случае доминирует слагаемое Q_c , характеризующее тепловыделение при горении материала. Так как во

всех проведенных экспериментах условия подавления пламенного горения и термического разложения КВ реализовывались при достижении поверхности материала водяной массой на четвертой стадии трансформации, то целесообразно рассмотреть балансное соотношение (1) с учетом доминирующего вклада слагаемых Q_e и Q_c . В таком случае станет возможным прогнозирование объемов воды, достаточных для подавления горения КВ известного объема или массы. Так, например, из равенства $Q_e \approx Q_c$ можно сделать вывод, что для подавления горения определенной массы ЛГМ требуется в L_c/L_e большая (по сравнению с реагирующим КВ) масса воды (например, для смеси ЛГМ теплота сгорания может достигать $L_c = 9 \div 12$ МДж/кг, а теплота парообразования воды — $L_e = 2.26$ МДж/кг). Но, как показал анализ видеogramм проведенных экспериментов, в процессе подавления горения далеко не весь объем ЛГМ успевает выгореть и даже прогреться до температуры выше начала термического разложения.

Видеogramмы экспериментов и взвешивание воды, оставшейся на поддоне под ЛГМ после завершения экспериментов, показали, что более 30 % воды, достигшей поверхности навески ЛГМ, прошло через нее в жидком виде. Затраченная на прогрев ЛГМ теплота существенно меньше выделяющейся при испарении 70 % воды в ЛГМ. Поэтому можно сделать вывод, что при свободном падении водяных массивов достаточно выбирать их начальный объем в размере не более 40 % от объема КВ при условии покрытия всей горячей поверхности КВ аэрозолем. Объемы водяного массива, необходимые для подавления пламенного горения и термического разложения, как и в опытах [8], зависели от средних размеров капель, достигающих поверхности КВ. В настоящей работе размеры капель аэрозоля сложно варьировать в широком диапазоне, так как при свободном падении массива с высоты 3 м характерные размеры образующихся капель соответствовали диапазону от 200 мкм до 1 мм. Дальнейшее увеличение высоты сброса не приводило к большему измельчению капель. В экспериментах [8] при варьировании параметров распыления воды над поверхностью КВ оптимальные значения необходимого (обеспечивающего подавление горения и термического разложения) объема воды в случае капель размером $R_d = 0.2 \div 0.35$ мм

при высоте сброса 3 м составляли для низовых пожаров $0.57 \div 0.79$ л, верховых и комбинированных — $1.68 \div 2.15$ л. Если учесть характерные площади поверхности ЛГМ, то удельные расходы для капель с $R_d = 0.05 \div 0.1$ мм находятся в диапазоне $0.2 \div 0.3$ л/м², а для капель с $R_d = 0.2 \div 0.35$ мм — $0.8 \div 0.9$ л/м².

Полученные значения удельного расхода распыления существенно ниже традиционно рекомендуемых пожарными службами (как правило, не менее 4 л/м²) [5, 6]. До настоящего времени специалисты соответствующих служб из-за ограниченной информационной базы данных с включением результатов фундаментальных исследований, иллюстрирующих рациональность применения малых объемов, ориентировались на такую массу воды, которая обеспечивала гарантированное подавление горения (в том числе с многократным завышением ее объема). Проведенные эксперименты показали, что даже без специализированного распыления в процессе свободного падения водяного массива можно обеспечить эффективное подавление горения и термического разложения за счет рационального выбора высоты сброса и начального объема воды (рис. 5, 6).

Проведенные эксперименты также показали, что эффективность применения мелкодисперсных аэрозолей для подавления пламенного горения и термического разложения КВ зависит от условий их движения в газовой среде (какое количество капель достигает поверхности КВ). В [13] приведены зависимости скорости встречного движения капель от скорости высокотемпературных продуктов сгорания. С применением этих зависимостей можно прогнозировать скорость и количество капель, достигающих поверхности подверженного термическому разложению КВ. В отсутствие ветра восходящий поток продуктов сгорания КВ не может существенно влиять на условия и характеристики движения капель (размером более 0.5 мм) в газовой среде (над поверхностью КВ). Поэтому установленные в [7, 8] зависимости, иллюстрирующие уменьшение времени подавления горения при использовании аэрозоля с малыми размерами капель, можно считать основанием для заключения о том, что для эффективного подавления пламенного горения и термического разложения материала необходим распад массива с образованием совокупности мелких капель. В экспериментах [12, 14] продемонстрированы зарегистрирован-

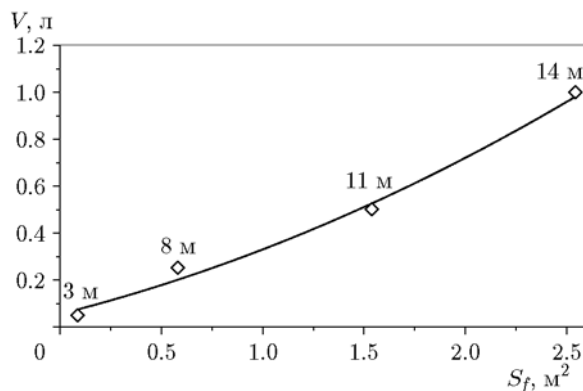


Рис. 5. Зависимость необходимого для подавления горения КВ объема воды от площади поверхности КВ при реализации четвертой стадии трансформации массива (на основе данных настоящей работы и опытов [12])

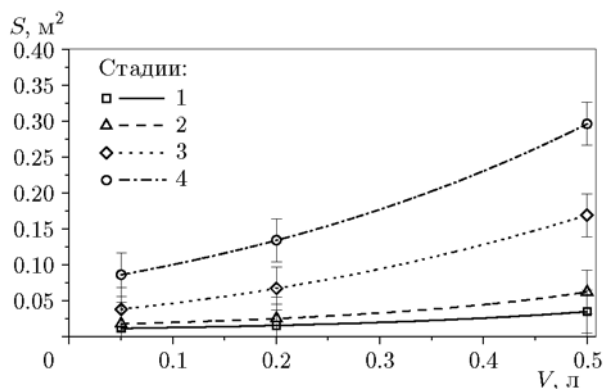


Рис. 6. Зависимости площади поперечного сечения водяного массива от его начального объема на стадиях трансформации массива 1–4, определенных на основе данных настоящей работы и опытов [12]

ные с применением высокоскоростных видеокамер эффекты сжатия водяного массива объемами $0.1 \div 1$ л при движении через высокотемпературные продукты сгорания лесного массива. Установлено [12, 14], что рост поперечных размеров свободно падающего водяного массива на всех четырех стадиях его трансформации сдерживается за счет формирования буферной паровой зоны между продуктами сгорания и фрагментами водяного массива. Как следствие, растет давление парогазовой среды на фрагмент. Это приводит к тому, что тормозится рост не только поперечных размеров, но и соответствующих площадей поверхности. В таких условиях унос капель восходящими продуктами сгорания будет ослабевать.

Представленные в [15] результаты экспериментальных и теоретических исследований также показали, что впередиидущие капли существенно быстрее испаряются по сравнению с последующими. Чем больше последовательных эшелонов капель подается в зону горения конденсированного вещества, тем значительно различаются скорости испарения и время существования (полного испарения) капель во фронте и в следе. Это обусловлено тем, что каждая интенсивно испаряющаяся капля формирует за собой область с высокой концентрацией водяных паров и существенно меньшей температурой парогазовой смеси, чем перед ней, т. е. капля формирует буферную тепловую защиту для каждой последующей. Изменяются скорости прогрева, испарения и движения всех последующих капель в аэрозоле.

Интенсифицируются процессы коагуляции и дробления за счет столкновения капель из разных эшелонов. В этих условиях важно достичь четвертой стадии трансформации водяного массива, после которой в газовой среде формируется аэрозоль. При его воздействии на поверхность КВ в случае покрытия всей поверхности, подверженной термическому разложению, удалось достичь подавления горения во всех проведенных экспериментах. Если преследовать цель максимально полного испарения воды в высокотемпературной газовой среде, то следует обеспечить расстояние между последовательно движущимися каплями в диапазоне $(6 \div 7)R_d$ [15].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные эксперименты показали, что подавление пламенного горения и термического разложения типичных лесных горючих материалов при сбросе водяных массивов без их распыления является неоптимальным в плане расходования хладагента. Для эффективного подавления требуется покрытие водой практически всей свободной поверхности подверженного термическому разложению КВ (не менее 80 ÷ 90 %). Возможны два варианта решения данной проблемы: (1) увеличение объема подаваемой в зону горения КВ воды; (2) выбор эффективной высоты сброса для обеспечения распада массива воды в процессе свободного падения до капельных фрагментов (см. рис. 5, 6), при воздействии которых процессы пламенного горения и термического разложения КВ эффективно подавляются. Применение первого вари-

анта сдерживается ограниченными объемами одновременно переносимой воздушными судами жидкости. Второй вариант возможен при адекватном прогнозировании условий достижения четвертой стадии трансформации водяных массивов, обеспечивающей подавление процессов пламенного горения и термического разложения типичных КВ. Результаты настоящей работы являются необходимой экспериментальной базой для разработки соответствующих прогностических моделей, способствующих применению второго варианта использования воды в реальной практике пожаротушения. При этом важно учитывать не только установленное в экспериментах [12] влияние ветра на характеристики трансформации водяных массивов, но и условия проникновения воды в слой КВ с разной структурой и свойствами.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Конев Э. В.** Физические основы горения растительных материалов. — Новосибирск: Наука, 1977.
2. **Доррер Г. А.** Математические модели динамики лесных пожаров. — М.: Лесная промышленность, 1979.
3. **Гришин А. М.** Математические модели лесных пожаров. — Томск: Изд-во ТГУ, 1981.
4. **Барановский Н. В., Кузнецов Г. В.** Прогноз возникновения лесных пожаров и их экологических последствий. — Новосибирск: Изд-во Сиб. отд-ния РАН, 2009.
5. **Москвилин Е. А.** Применение авиации для тушения лесных пожаров // Пожар. безопасность. — 2009. — № 1. — С. 89–92.
6. **Копылов Н. П., Хасанов И. Р., Кузнецов А. Е., Федоткин Д. В., Москвилин Е. А., Стрижак П. А., Карпов В. Н.** Параметры сброса воды авиационными средствами при тушении лесных пожаров // Пожар. безопасность. — 2015. — № 2. — С. 49–55.
7. **Kuznetsov G. V., Strizhak P. A., Volkov R. S., Zhdanova A. O.** Amount of water sufficient to suppress thermal decomposition of forest fuel // J. Mech. — 2017. — V. 33, N 5. — P. 703–711.
8. **Волков Р. С., Кузнецов Г. В., Стрижак П. А.** Экспериментальное исследование процессов подавления пламенного горения и термического разложения модельных низовых и верховых лесных пожаров // Физика горения и взрыва. — 2017. — Т. 53, № 6. — С. 67–78.
9. **Коробейничев О. П., Шмаков А. Г., Чернов А. А., Большова Т. А., Шварцберг В. М., Куценогий К. П., Макаров В. И.**

- Тушение пожаров с применением аэрозолей растворов солей // Физика горения и взрыва. — 2010. — Т. 46, № 1. — С. 20–25.
10. **Гончикжапов М. Б., Палецкий А. А., Коробейничев О. П.** Кинетика пиролиза лесных горючих материалов в инертной / окислительной среде при быстром и медленном темпах нагрева // Сиббезопасность-Спасиб. — 2012. — № 1. — С. 38–44.
 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 J. — 2012. — V. 51. — P. 102–109.
 12. **Strizhak P. A., Volkov R. S., Piskunov M. V., Zabelin M. V.** Transformation of water ball falling in high-temperature gases // Atomization Sprays. — 2017. — V. 27, N 10. — P. 893–911.
 13. **Volkov R. S., Strizhak P. A.** Motion of water droplets in the counter flow of high-temperature combustion products // Heat Mass Transfer. — 2018. — V. 54, N 1. — P. 193–207.
 14. **Волков Р. С., Копылов Н. П., Стрижак П. А., Хасанов И. Р.** Трансформация поверхности массивов огнетушащих жидкостей при их свободном падении с большой высоты // Пожар. безопасность. — 2017. — № 1. — С. 30–37.
 15. **Volkov R. S., Kuznetsov G. V., Legros J. C., Strizhak P. A.** Experimental investigation of consecutive water droplets falling down through high-temperature gas zone // Int. J. Heat Mass Transfer. — 2016. — V. 95. — P. 184–197.

Поступила в редакцию 13.06.2018.

После доработки 03.07.2019.

Принята к публикации 28.08.2019.