

О ПОТУХАНИИ ЛЕСНЫХ ГОРЮЧИХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ПОСТОЯННЫХ И ПЕРЕМЕННЫХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ ПОТОКА ИНЕРТНОГО ГАЗА НА ЗОНУ ГОРЕНИЯ

А. М. Гришин, А. Н. Голованов

Томский государственный университет, 634050 Томск

Установлено, что при обдуве элементов ЛГМ инертным потоком со скоростью, превышающей некоторые значения, происходит срыв пламени. Теоретически это объясняется охлаждением газа в зоне горения. Показано, что расчетные значения температуры горения согласуются с экспериментальными данными. Впервые рассмотрен вопрос о влиянии колебаний элементов ЛГМ на прекращение газофазного горения.

Известны критические условия распространения лесных пожаров, полученные теоретически из анализа устойчивости распространения фронта лесного пожара [1]. В работе [2] сделаны попытки экспериментального определения предельных условий распространения на основе изучения горения отдельных элементов лесных горючих материалов (ЛГМ) — тонких веточек и хвоинок. В данной работе проведены экспериментальные исследования продуктов горения элементов ЛГМ; для объяснения прекращения диффузионного газофазного и гетерогенного горения элементов ЛГМ мы использовали результаты работы [1] и теории Я. Б. Зельдовича [3] и Д. А. Франк-Каменецкого [4].

Постановка задачи. Под потуханием — предельными условиями распространения лесного пожара — понимается прекращение процесса горения. Лесной пожар прекращается при выполнении следующих условий [1]:

$$\rho < \rho_*, W > W_*, \underline{v}_* < v_e < \bar{v}_*, \alpha_V < \alpha_V^*, \quad (1)$$

где ρ — плотность слоя ЛГМ, W — влагосодержание, α_V — коэффициент объемного тепло- и массообмена элемента ЛГМ со средой, ρ_* , W_* , α_V^* — критические значения соответствующих параметров, \bar{v}_* , \underline{v}_* — верхний и нижний пределы распространения лесного пожара по скорости ветра (v_e). Обычно горение ЛГМ прекращается при одновременном воздействии нескольких факторов. Как показали результаты теоретического исследования и некоторые

эксперименты [1], при выполнении любого из условий (1) происходит потухание ЛГМ.

Согласно [2] при лесных пожарах имеет место газофазное (пламенное) и гетерогенное (беспламенное, тление) горение ЛГМ. В результате пламенного горения ЛГМ выделяется до 70 % полной тепловой энергии. В соответствии с физической моделью лесных пожаров [1] горючие газы возникают в результате пиролиза ЛГМ, затем они смешиваются с воздухом и сгорают в соответствии с теорией горения неперемешанных газов [3]. Согласно этой теории фронт пламени устанавливается там, где окислитель и горючий газ находятся в стехиометрическом соотношении. Потухание пламени в воздушной среде обусловлено резким уменьшением скорости химической реакции из-за падения температуры ΔT при расширении зоны горения Δx . Критическое значение перепада температур имеет вид

$$\Delta T = T_b - T_* = 3RT_b^2/E, \quad (2)$$

где T_b , T_* — адиабатическая температура горения и температура потухания, E — энергия активации реакции горения, R — универсальная газовая постоянная.

Потухание диффузионного пламени происходит из-за неустойчивости зоны горения Δx , обусловленной действием охлаждающих агентов или теплопотерь излучением. Если выполняется условие

$$\Delta T > 3RT_b^2/E, \quad (3)$$

то диффузионное горение прекращается.

Горение тлеющих частиц (ЛГМ) происходит в результате их тепло- и массообмена с

Работа доложена на 3-й Международной научной конференции «Пожары в лесу и на объектах лесохимического комплекса: возникновение, тушение и экологические последствия» (4–10 июля 1999 г., Красноярск).

окружающей средой и экзотермических гетерогенных химических реакций. В случае одной гетерогенной реакции первого порядка условие потухания имеет вид [4]

$$\delta = \delta(\xi), \quad \delta = \frac{Q}{\alpha} \frac{Ek(T_e)}{RT_e^2}, \quad (4)$$

$$k(T_e) = k_0 \exp\left(-\frac{E}{RT_e}\right), \quad \xi = \frac{Q}{\alpha} \frac{E}{RT_e^2} \beta C,$$

где k и Q — константа скорости и тепловой эффект гетерогенной химической реакции, k_0 и E — предэкспоненциальный множитель и энергия активации в выражении для скорости гетерогенной реакции, C — молярно-объемная концентрация окислителя, α и β — коэффициенты тепло- и массообмена, T_e — температура окружающей среды, δ и ξ — безразмерные параметры.

В монографии [4] показано, что основная причина прекращения гетерогенного горения (тления) — охлаждение зоны горения.

Цель работы — экспериментальное исследование условий потухания элементов ЛГМ в результате постоянного воздействия на зону пламенного и беспламенного горения инертного потока газа и малых энергетических возмущений (пульсаций газового потока и вибраций элементов ЛГМ), а также объяснение полученных результатов на основе известных теоретических представлений [1, 3, 4].

Методика проведения экспериментов. Эксперименты проводились в рабочей части аэродинамической трубы МТ-324 ТГУ и в струях воздуха и аргона при температуре $T_e = 298 \div 302$ К. Объекты исследования — слой ЛГМ, состоящий из опада хвои сосны, а также охвоенные сосновые веточки. Варьировались влажностное содержание хвои W , плотность укладки ρ и скорость газового потока v_e . После зажигания ЛГМ на объект исследования направлялся газовый поток и фиксировалось потухание. Пульсации газового потока создавались с помощью лопастей вентилятора, установленного в рабочей части аэродинамической трубы. Амплитуда δv и частота f пульсаций изменялись за счет выбора расстояния от вентилятора до слоя ЛГМ и за счет числа лопастей вентилятора.

Вибрации элементов ЛГМ создавались с помощью вибростенда, схема которого приведена на рис. 1.

Охвоенная веточка сосны (высотой $0,05 \div 0,08$ м) крепилась основанием к подвижной

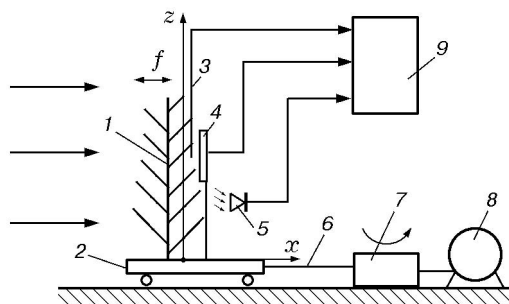


Рис. 1. Схема вибростенда:

1 — охвоенная веточка сосны, 2 — подвижная тележка, 3 — хромель-алюмелевая термопара, 4 — датчик суммарного теплового потока, 5 — фотодиод ФД-6, 6 — кривошип, 7 — вращающийся диск, 8 — электродвигатель, 9 — КСП-4

тележке, которая соединялась кривошипом с вращающимся диском, приводимым в движение электродвигателем. Вращательное движение диска преобразовывалось в возвратно-поступательное движение тележки с ЛГМ. Частота вибраций f варьировалась в пределах $0 \leq f \leq 6,2$ Гц, амплитуда — в диапазоне $\delta x = (0 \div 14) \cdot 10^{-3}$ м. Охвоенная веточка поджигалась и в зависимости от интенсивности вибраций разгоралась или потухала. В процессе экспериментов температуру в зоне горения T регистрировали с помощью хромель-алюмелевой термопары, плотность теплового потока q_w — экспоненциальным методом [5] с помощью датчика суммарного теплового потока, частоту вибраций — фотодиодом ФД-6. Амплитуда линейных вибраций ЛГМ задавалась кривошипом. Сигналы термопары, датчика и фотодиода поступали на потенциометр КСП-4.

Таблица 1

Результаты тушения ЛГМ потоком воздуха

Тип ЛГМ	v_e , м/с	W , %	f , Гц	δv_e , м/с
Слой хвои	0,85	7,5	0	0
— " —	0,69	50,0	0	0
Охвоенная веточка	0,38	10,3	0	0
Слой хвои	0,79	7,5	3,2	0,3
— " —	0,79	7,5	5,1–6,0	0,2
Охвоенная веточка	0,28	10,3	20–25	0,2
— " —	0,28	10,3	6,4–7,2	0,2

Таблица 2

Результаты тушения ЛГМ струями газов

Тип ЛГМ	Газ	W , %	ρ , кг/м ³	G_1 , 10 ³ кг/с	G_2 , 10 ³ кг/с	$v_{e,1}$, м/с	$v_{e,2}$, м/с
Слой сосновой хвои	Воздух	7,5	11,9	0,21	0,25	6,2	7,3
— // —	— // —	10,3	11,9	0,19	0,23	5,6	6,7
— // —	— // —	50,0	11,9	0,13	0,18	4,6	6,4
— // —	— // —	7,5	5,97	0,19	0,25	5,6	7,3
— // —	— // —	7,5	23,8	0,23	0,26	6,7	7,7
Охвоенная веточка	— // —	10,3	—	0,16	0,21	4,7	6,2
Слой сосновой хвои	Аргон	10,3	11,9	0,14	0,30	3,1	4,4

Погрешности измерения температуры и тепловых потоков составляли $\delta T \leq 5,1\%$, $\delta q \leq 9,9\%$.

Характеристики пульсационного потухания ЛГМ. В табл. 1 представлены критические (минимальные) значения скоростей потока воздуха v_* , обеспечивающие потухание слоя ЛГМ и охвоенной веточки (прекращение пламенного и беспламенного слоя горения), при плотности слоя ЛГМ $\rho = 11,9$ кг/м³, заданном влагосодержании W , частоте пульсаций f и амплитуде пульсаций скорости δv_e . До проведения огневого эксперимента определялось влагосодержание ЛГМ

$$W = (m - m_0)/m_0, \quad (5)$$

где m и m_0 — массы ЛГМ во влажном и сухом состоянии, а во время его проведения измерялись значения v_e и δv_e .

Следует отметить, что для серии опытов (см. четыре последние строки табл. 1) наложение частот пульсаций, лежащих вне указанного в табл. 1 диапазона частот, приводило к раздуванию пламени либо к прекращению пламенного горения.

Из анализа данных табл. 1 следует, что потухание ЛГМ более эффективно в присутствии пульсаций потока воздуха, так как наступает при меньших значениях скорости потока. Это особенно проявляется для охвоенной веточки. Частоты пульсаций потока воздуха совпадают с собственными частотами колебаний ЛГМ и являются резонансными. Поэтому амплитуда колебаний и колебательная скорость элементов ЛГМ должны возрасти, что, вероятно, и служит причиной потухания

ЛГМ. По-видимому, пульсации потока воздуха способствуют интенсификации тепловых потерь из пламени в окружающую среду. Частоты пульсаций потока, не равные резонансным, обеспечивают поступление кислорода к элементам ЛГМ и приводят к раздуванию пламени.

Роль окислителя (кислорода воздуха) в процессе потухания ЛГМ наглядно иллюстрируют результаты, приведенные в табл. 2. Тушение ЛГМ осуществлялось струей воздуха и струей аргона. Струи газа через насадок диаметром $1 \cdot 10^{-2}$ м направлялись перпендикулярно поверхности слоя ЛГМ с расстояния 0,2 м. Варьировались плотность укладки ρ и влагосодержание слоя ЛГМ W . В табл. 2 значения расходов G_1 , G_2 и скоростей газа $v_{e,1}$, $v_{e,2}$ в струе, обеспечивающие прекращение пламенного горения (индекс 1) и полного потухания ЛГМ (индекс 2), соответствуют критическим (значения $v_{e,1}$, $v_{e,2}$ относятся к срезам насадков).

Из анализа данных табл. 2 следует, что влагосодержание и плотность укладки слоя хвои существенно влияют на расход газа, обеспечивающий потухание ЛГМ. Потухание ЛГМ наступает при меньшем расходе инертного газа по сравнению с расходом воздуха. Эти результаты не противоречат данным, полученным авторами работы [6], где исследовалось потухание ЛГМ в инертном потоке.

Из анализа данных табл. 2 также следует, что для прекращения беспламенного горения требуются гораздо большие значения G_2 и $v_{e,2}$, чем значения G_1 и $v_{e,1}$ для срыва факела пламени над слоем ЛГМ. Для выяснения

роли беспламенного горения в процессе тушения ЛГМ были проведены специальные опыты по зажиганию и потуханию слоя ЛГМ горячим аргоном по методике, изложенной в работе [7]. Струя аргона при температурах $T_e = 850$ и 1200 К, больших температуры зажигания ЛГМ, направлялась на горящий слой хвои сосны. При этом в струю аргона подмешивался воздух из окружающего пространства, так как эксперименты проводились на открытом пространстве. В обоих опытах происходило полное прекращение пламенного и беспламенного горения ЛГМ. Следовательно, основная причина более эффективного использования инертных газов для тушения ЛГМ по сравнению с кислородсодержащими — вытеснение кислорода, необходимого для гомогенных газофазных реакций окисления горючих продуктов пиролиза и гетерогенных реакций на поверхности пиролизуемых элементов ЛГМ.

Зажечь слой ЛГМ горячей струей аргона при температуре $T = 1200$ К не удалось. В этой серии экспериментов наблюдались активные сушка и пиролиз ЛГМ, но пламенное и беспламенное горение отсутствовало. Полученные результаты можно объяснить тем, что аргон вытесняет кислород из зоны горения, а кислорода в микропорах внутри конденсированной фазы недостаточно для того, чтобы загорелись газообразные горючие продукты пиролиза ЛГМ при их фильтрации через поры. Гетерогенные химические реакции протекают только на поверхности хвоинок (беспламенное горение) при поступлении кислорода за счет диффузии или конвекции из окружающего воздуха.

Сравнение результатов, представленных в табл. 1 и 2, показывает влияние турбулизации течения на процесс потухания. Значение v_* в турбулентной струе газа на порядок больше, чем в ламинарном потоке.

Представляет интерес критическая температура горения T_* во фронте пламенного (газофазного) горения при низовом лесном пожаре. Температуру горения T_b при нормальном распространении низового лесного пожара можно оценить по формуле, полученной из [1] с учетом полноты сгорания ЛГМ:

$$T_b = T_e \left(1 + \frac{\bar{q}}{\pi + 1} \right),$$

$$\pi = \frac{\rho_1 \varphi_{1,in} c_{p,1} + \rho_2 \varphi_{2,in} c_{p,2}}{\rho_5 \varphi_{5,in} c_{p,5}},$$

$$\bar{q} = \left[\left(q_3 \frac{M_1}{M_C} \alpha_c + q_5 (1 - \alpha_c) \nu_g \right) \times \right. \\ \left. \times \varkappa \rho_1 \varphi_{1,in} - q_2 \rho_2 \varphi_{2,in} \right] (\rho_{5,in} c_{p,5} T_{in})^{-1}, \quad (6)$$

$$\varphi_{5,in} = 1 - \varphi_{1,in} - \varphi_{2,in}, \quad \rho_2 \varphi_{2,in} = \rho_c (1 - \zeta) W.$$

Здесь $T_{in} = T_e$ — начальная температура слоя ЛГМ; $c_{p,1}$, $c_{p,2}$ и $c_{p,5}$ — теплоемкости сухих элементов ЛГМ, воды в микропорах ЛГМ и воздуха; M_1 , M_C — молекулярные массы кислорода и углерода; \bar{q} — безразмерный тепловой эффект горения слоя ЛГМ; $q_3 = 1,2 \cdot 10^7$ Дж/кг — тепловой эффект гетерогенного горения коксика; $q_5 = 10^7$ Дж/кг — тепловой эффект газофазного горения оксида углерода; $\varphi_{1,in}$, $\varphi_{2,in}$, $\varphi_{5,in}$ — объемные доли (в начальном состоянии) сухих элементов ЛГМ, воды, связанной с этими элементами, и газовой фазы; ρ_1 , ρ_2 — истинные плотности сухих элементов ЛГМ; $\rho_{5,in}$ — начальная (невозмущенная) плотность воздуха; $\rho_c = \rho_1 \varphi_{1,in}$ — плотность слоя сухих элементов ЛГМ; ν_g — доля газообразных горючих газов при пиролизе; α_c — коксовое число ЛГМ; \varkappa — коэффициент полноты сгорания ЛГМ; ζ — зольность ЛГМ.

Необходимо отметить, что согласно [1] основной газообразный горючий продукт пиролиза — это оксид углерода. Из [1] находим для хвои сосны $\rho_1 = 320$ кг/м³, $\rho_2 = 1000$ кг/м³, зольность хвои сосны 0,033, $\varphi_1 = 0,04$, $c_{p,1} = 200$ Дж/(кг · К), $c_{p,2} = 4180$ Дж/(кг · К), удельная теплоемкость коксика 900 Дж/(кг · К), $c_{p,5} = 1000$ Дж/(кг · К), а из эксперимента $\varkappa \approx 0,95$.

Определив по формуле (6) $T_b = 1202$ К, по формуле (2) легко найдем $T_* = 826$ К. Расчетное значение T_* удовлетворительно согласуется с экспериментальным $T_* = 920$ К.

Вибрационное потухание ЛГМ. На рис. 2 показаны зависимости относительной функции теплообмена $\psi_v = (q_+ - q_-)/q_-$, где q_+ , q_- — плотности теплового потока с вибрациями и без них, от колебательного числа Рейнольдса $Re_v = v_v d/\nu$, где $v_v = (\delta x)f$ — колебательная скорость, d — диаметр веточки ($d = 0,003 \div 0,006$ м), $\nu = 1,45 \cdot 10^{-5}$ м²/с — кинематическая вязкость воздуха, $q_- = 3,2 \cdot 10^4$ Вт/м². Доверительные интервалы рассчитывались при вероятности $P = 0,95$ по результатам 3 ÷ 7 опытов.

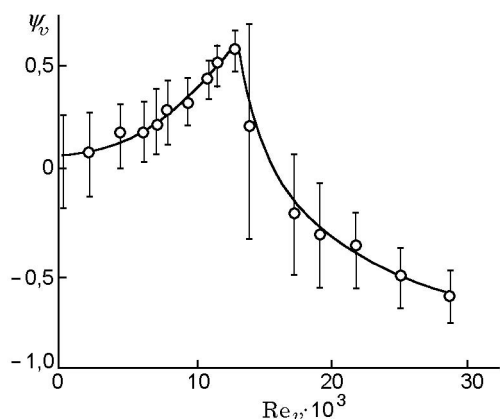


Рис. 2. Зависимость относительной функции теплообмена от колебательного числа Рейнольдса

Анализ результатов, представленных на рис. 2, показывает, что до значений критического числа Рейнольдса, при котором наступает потухание ЛГМ, $Re_* \approx 1,3 \cdot 10^4$ ($f = 2,75$ Гц) наблюдается раздувание (усиление) горения охвоенной веточки, тепловой поток при этом возрастает, что связано с включением в процесс горения большего числа хвоинок. При $Re_* > 1,3 \cdot 10^4$ происходит потухание ЛГМ. Большие значения доверительных интервалов обусловлены различной структурой охвоенных веточек, их геометрией и числом хвоинок (70 ÷ 120). Влажосодержание ЛГМ для всех опытов сохранялось неизменным ($W = 0,17$).

Сравнение колебательной скорости $v_v \approx 0,02$ м/с, при которой наступает потухание охвоенной веточки, со скоростью ламинарного потока $v_e = 0,28$ м/с (см. табл. 1) показывает, что $v_v \ll v_e$. Следовательно, потухание ЛГМ наступает не только при выполнении предельного условия $\bar{v}_* < v_e$, но и при $d\bar{v}_*/dt < dv_e/dt$, т. е. срыв пламени может наступить в результате силового воздействия, обусловленного ускорением пламягасящего газового потока, при этом важное значение имеют инерционные свойства объекта — массы элемента ЛГМ.

Для охвоенной веточки сосны $d\bar{v}_*/dt = 2\pi f v_v \cos(2\pi/f)$ и при $\cos(2\pi/f) = 1$ имеем $d\bar{v}_*/dt = 0,34$ м/с². Наименьшая частота собственных колебаний веточки сосны рассчитывалась по формуле из работы [8]:

$$f_s = \frac{3,52}{l_s^2} \sqrt{\frac{EI}{m_s}}, \quad m_s = \frac{m}{l_s}, \quad I = \frac{\pi d^4}{32}, \quad (7)$$

полученной для консоли цилиндрической формы, где I — момент инерции, $E = 0,9 \cdot 10^{10}$ н/м² — модуль Юнга для веточек сосны [9], $l_s = (50 \div 65) \cdot 10^{-3}$ м — длина, $d = (3,0 \div 4,0) \cdot 10^{-3}$ м — диаметр. Для этих параметров $f_s = 2,8 \div 6,1$ Гц. Совпадение частот собственных колебаний веточек с частотами вибраций, при которых наблюдается потухание ЛГМ, свидетельствует о резонансном механизме воздействия вибраций на процесс прекращения пламенного горения — резонансное возрастание амплитуды колебаний приводит к сбиванию пламени.

Влиянию вибраций ЛГМ на характеристики теплообмена обобщено критериальной зависимостью:

$$\frac{Nu_v}{Nu_0} = 1 + 0,01947 Re_v. \quad (8)$$

Погрешность аппроксимации экспериментальных данных с помощью (8) при $0 \leq Re_v \leq 13,2 \cdot 10^4$ не превосходит 6,8%. Число Нуссельта без вибраций составляло $Nu_0 = 908$. Критическое значение коэффициента теплоотдачи, при котором наблюдалось потухание ЛГМ, $\alpha_* = 1220$ Вт/(м² · К) ($Re_v = 13,2 \cdot 10^4$).

Механизм колебаний элементов ЛГМ, рассмотренный в данной работе, отличается от механизма колебаний, которые возникают при постоянном действии однородного потока, скорость которого не изменяется с ростом времени. В описанных экспериментах элементы ЛГМ располагались на подстилающей поверхности, поэтому приведенные выше результаты исследований, прежде всего, соответствуют условиям низовых лесных пожаров. Другое отличие заключается в том, что использовался пульсирующий поток воздуха или инертного газа, который возбуждал колебания ЛГМ в плоскости (xz), где ось x направлена по одной прямой со скоростью потока. Поэтому эти колебания можно называть продольными. В работе [10] основное внимание было уделено поперечным колебаниям в плоскости (yz), которые возникают вследствие несимметричного отрыва потока.

Заключение. Рассмотрены закономерности потухания в присутствии малых энергетических возмущений: пульсаций газового потока и вибраций ЛГМ. Показано, что для потухания ЛГМ необходимо еще одно условие — ускорение пламягасящего потока должно превышать некоторое критическое значение. Проана-

лизированы особенности прекращения пламенного и беспламенного горения ЛГМ в струях инертного и кислородосодержащего газов. Найдены критические значения колебательно-го числа Рейнольдса, необходимые для потухания ЛГМ.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Grishin A. M.** Mathematical modeling of forest fire and new methods of fighting them / Ed. by Frank Albini. Tomsk: Publishing House of the Tomsk State University, 1997.
2. **Конев Э. В.** Физические основы горения растительных материалов. Новосибирск: Наука, 1977.
3. **Математическая** теория горения и взрыва / Я. Б. Зельдович, Г. И. Баренблатт, В. Б. Либрович, Г. М. Махвиладзе. М.: Наука, 1980.
4. **Франк-Каменецкий Д. А.** Диффузия и теплопередача в химической кинетике. М.: Наука, 1987.
5. **Гришин А. М., Абалтусов В. Е., Веснин А. И. и др.** Экспериментальное исследование механизма распространения верховых лесных пожаров и теплообмена фронта пожара с окружающей средой / Том. гос. ун-т. Томск, 1982. Деп. в ВИНТИ, № 4873–82.
6. **Сухинин А. И., Конев Э. В., Курбатский Н. П.** Некоторые закономерности распространения пламени по слою сосновой хвои // Физика горения и взрыва. 1975. Т. 11, № 5. С. 743–750.
7. **Гришин А. М., Голованов А. Н.** О влиянии малых энергетических возмущений на процессы сушки, пиролиза и зажигания лесных горючих материалов // Сиб. физ.-тех. журн. 1992. Вып. 6. С. 27–31.
8. **Ден-Гартог Дж. П.** Механические колебания. М.: ГИФМЛ, 1960.
9. **Кэй Дж., Лэби Т.** Таблицы физических и химических постоянных. М.: ГИФМЛ, 1962.
10. **Жукаускас А. А.** Конвективный перенос в теплообменниках. М.: Наука, 1982.

*Поступила в редакцию 13/IX 1999 г.,
в окончательном варианте — 2/II 2000 г.*
