

Рис. 5. Сопоставление опытных и расчетных данных по распределению температуры вдоль оси составного диффузионного факела.  
 $N$  равно: 1 — 0,0013, 2 — 0,008, 3 — 0,015, 4 — 0,06.

В целом расчет по методу эквивалентной задачи теории теплопроводности [3] правильно отражает качественную картину развития составного диффузионного факела и обеспечивает при соответствующем выборе значений эмпирических постоянных удовлетворительную сходимость с экспериментом. Расчет составных гомогенных факелов должен учитывать наличие заметных градиентов давления, ускорение газа в окрестности фронта пламени и т. д. Решение такой задачи требует привлечения более общих методов расчета сложных турбулентных течений и дальнейшего накопления данных о структуре гомогенных пламен.

Ленинградское высшее  
военно-морское инженерное  
училище им. В. И. Ленина

Поступила в редакцию  
28/IV 1975

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Л. А. Вулис, Л. П. Ярин. ФГВ, 1974, 10, 2.
2. В. А. Коваленко, Л. П. Ярин. IV Всесоюзный симпозиум по горению и взрыву. Аннотации докладов, Черногловка, 1974.
3. В. А. Коваленко, Л. П. Ярин.— В сб.: Теория и практика сжигания газа. Т. 6 Л., «Недра», 1975.
4. Л. А. Вулис, В. П. Кашкаров. Теория струй вязкой жидкости. М.—Л., «Наука», 1965.
5. Я. А. Ваграменко. МЖГ, 1971, 6.

### К ОЦЕНКЕ ОГНЕГАСЯЩЕЙ И ОГНЕЗАДЕРЖИВАЮЩЕЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ХИМИЧЕСКИХ АГЕНТОВ

Е. К. Кисляхов, Э. В. Конев

Известно, что тушить кромку лесного пожара можно как в активном, так и в пассивном режиме. Тушение включает в себя стадии потухания пламени и тлеющих обугленных остатков [1, 2 и др.]. При этом потухание тлеющих остатков при пассивных методах тушения, т. е. после предварительной обработки горючего материала некоторыми агентами, происходит еще до погасания факела, что создает предпосылки для предотвращения повторного воспламенения горючего материала. В связи с этим представляются полезными дальнейшие поиски соответствующих огнегасящих агентов и оптимальных условий их применения.

Ниже описана методика, позволяющая определять огнезадержива-

ющие, огнегасящие, а при необходимости, углегасящие свойства химических агентов непосредственно на лесных горючих материалах. В основе ее лежит нанесение агента тем или иным способом на характерную частицу горючего материала с последующим измерением скорости распространения пламени вдоль нее. Уменьшение скорости распространения пламени в расчете на 1% агента по отношению к весу сухого материала характеризует при этом огнезадерживающие свойства агента. Если при постепенном увеличении количества агента наступает тот предел, при котором горение частицы или ее тление становится невозможным, то соответствующее содержание агента характеризует его огне- и углегасящие свойства в режиме пассивного тушения. Сравнивая агенты между собой, можно выявить наиболее эффективные.

При разработке методики было учтено, что вблизи предельных условий пламя распространяется по напочвенному покрову практически по отдельным частицам и что при воздействии многих агентов тление горючего материала прекращается еще до потухания факела. В качестве горючего материала была выбрана хвоя сосны обыкновенной как широко распространенный и достаточно хорошо изученный проводник горения. Для опытов отбирались хвоинки с одинаковым весом на единицу длины ( $3,3 \pm 0,2$  мг/см), предварительно высушенные при  $105 \pm 5^\circ\text{C}$ . Скорость распространения пламени вдоль частиц (их располагали горизонтально) определялась электросекундомером по времени между моментами перегорания двух нитей, расположенных на заданном расстоянии.

Были опробованы два способа нанесения агентов на частицу: 1) выдержка частицы в растворе с последующей сушкой до абсолютно сухого состояния и 2) нанесение жидкого или порошкообразного агента на поверхность абсолютно сухой частицы.

В первом случае хвоя погружалась в растворы агентов различной концентрации (зависимость содержания нанесенного агента по отношению к весу сухого материала  $m$  от времени выдержки показана на рис. 1, 1). После этого хвоя снова высушивалась при температуре  $105^\circ\text{C}$  и взвешивалась. Параллельно навеска хвои помещалась в дистиллированную воду для определения веса  $\Delta P$  тех компонентов, которые за время выдержки переходят из хвои в раствор (рис. 1, 2). Содержание нанесенного агента определялось по формуле

$$m = [P_m - (P_0 - \Delta P)] / (P_0 - \Delta P),$$

где  $P_0$  — первоначальный вес частицы (как и другие параметры, его брали в расчете на единицу длины),  $P_m$  — линейный вес нанесенного агента. Оказалось, что агент при таком способе нанесения частично

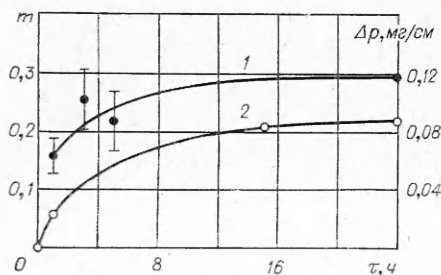


Рис. 1. Зависимость количества нанесенной соли и убыли веса хвои от времени выдержки.

1 —  $m(\tau)$  для насыщенного раствора фосфата мочевины, 2 — убыль веса.

проникает внутрь частицы (в насыщенном растворе фосфата мочевины, например, после 1-й выдержки его вошло внутрь частиц  $\approx 0,09$  мг/см), частично оседает после высушивания раствора на ее поверхности. Доля первого зависит от времени выдержки и концентрации раствора, второго — от смачивающих свойств горючего материала и концентрации раствора. Поэтому во всех опытах время выдержки было взято одно и то же ( $\approx 16$  ч).

Результаты изучения огнезадерживающих свойств некоторых химических агентов приведены на рис. 2.

Скорость распространения пламени  $u$  вдоль частиц с увеличением содержания агента уменьшается у многих из них примерно по линейному закону. Соответственно их огнезадерживающие свойства могут быть охарактеризованы средним значением производной  $du/dm$ . Точки на рис. 2 — средние значения из нескольких измерений, прямые для некоторых из агентов проведены методом наименьших квадратов.

В табл. 1 приведены средние значения  $du/dm$ , предельные содержания агента, необходимые для потухания пламени  $m_{пл}$  и углеродистого остатка  $m_y$ , а также предельные скорости распространения пламени вдоль частиц  $u_{пр}$  для исследованных агентов. Видно, что огнезадерживающие и огнегасящие свойства у большинства из них коррелируют между собой (с увеличением  $du/dm$  величина  $m_{пл}$  имеет тенденцию к увеличению), хотя имеются и исключения (ФА).

К недостаткам описанного способа нанесения агента относится продолжительность подготовки образцов к опыту и неравномерность нанесения агента по длине образца (из-за стекания раствора и неравномерности кристаллизации агентов во время сушки). Последнее может привести к потуханию еще до наступления действительного предела горения.

В связи с этим был испытан другой способ нанесения агента: тонко измельченный агент или жидкость наносили равномерно по длине желобка, имеющегося у хвои сосны обыкновенной. Продолжительность проведения опыта в этом случае резко сокращалась и составляла около двух минут (увлажнение горючего материала за это время было пренебрежимо мало и к тому же одинаково для всех агентов). Такой способ нанесения агента позволяет испытывать в одинаковых условиях как жидкие агенты (в том числе растворы), так и порошки (в том числе кристаллогидраты и нерастворимые в воде соли). Особенно удобным он оказался для определения предела потухания факела пламени  $m_{пл}$ , т. е. для изучения огнегасящих свойств агентов. Полученные результаты приведены в табл. 2 (здесь  $P_0$  — линейный вес хвоинок).

Как следует из табл. 2 среди исследованных широко применяемых на практике агентов наиболее эффективной оказалась вода. Остальные

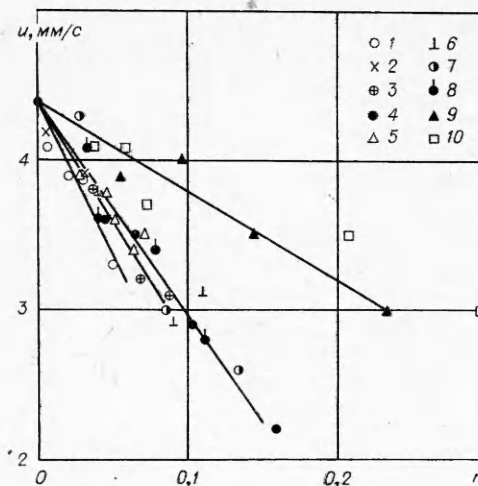


Рис. 2. Зависимость скорости распространения пламени от содержания агента.

1 — фосфат мочевины; 2 — натрий тетраборнокислый; 3 — олово двуххлористое; 4 — аммоний хлористый; 5 — моноаммонийфосфат; 6 — кальций хлористый; 7 — магний хлористый; 8 — медь хлористая; 9 — натрий хлористый; 10 — калий хлористый.

Таблица 1

Огнезадерживающие и огнегасящие свойства некоторых агентов

Параметр	Агент								
	ФМ	SnCl <sub>2</sub>	NH <sub>4</sub> Cl	ФА	CaCl <sub>2</sub>	MgCl <sub>2</sub>	CuCl	NaCl	KCl
$du/dm$ , см/с	2,0	1,6	1,5	1,45	1,43	1,43	1,43	0,57	0,54
$m_{пл}$	0,06	0,10	0,12	0,08	0,12	0,10			
$u_{пр}$ , см/с	0,032	0,028	0,026	0,026	0,024	0,30			
$m_y$	<0,014			≈0,05					

Примечание. ФМ — фосфат мочевины, ФА — моноаммонийфосфат.

Т а б л и ц а 2

## Огнегасящая эффективность некоторых агентов

Агент	$P_0$ , мг/см	$m_{пл}$		По отношению к воде
		мг/см	% от $P_0$	
Вода	3,3	0,7—0,8	23	1,0
Порошок на основе аммофоса	3,25	1,1—1,2	35	0,66
Щавелевая кислота	3,1	1,1—1,2	37	0,62
Углекислый аммоний	3,3	1,2—1,3	38	0,60
Тетраборнокислый натрий	3,1	1,3—1,4	44	0,52
Углекислый натрий (порошок)	3,5	1,5—1,6	44	0,52
Состав П-1	3,1	1,4—1,45	46	0,50
Хлористый аммоний	3,2	1,4—1,5	47	0,49
а) Моноаммонийфосфат	3,0	1,5—1,6	52	0,44
б) после 10-часовой сушки при 105°C	3,4	1,8—1,9	54	0,46
Триаммонийфосфат 3-водный	3,3	1,6—1,7	50	0,44
Сернокислый алюминий 18-водный	3,2	1,6—1,7	52	0,39
Состав ПФ-1	3,1	1,83	59	0,38
Фосфат мочевины	3,0	1,8—1,9	60	0,35
Кислый сернокислый аммоний	3,1	2,0—2,1	66	0,31
Фосфат магния однозамещенный	3,1	2,2—2,3	73	0,31
Бромистый аммоний	3,5	2,5—2,6	73	0,30
Углекислый калий	3,3	2,5—2,6	77	0,27
Бикарбонат натрия	3,1	2,6—2,7	86	
Состав ПСК	3,3	3,1—3,2	95	0,24
Фосфат кальция 1-замещенный, 1-водный	3,0	3,6—3,7	121	0,19
Углекислый натрий (кристаллы)	3,3	≈ 6	182	0,13

агенты, в том числе порошковые огнегасящие составы, в режиме пассивного тушения факела пламени были менее эффективными<sup>1</sup>. Из таблицы следует также, что эффективность агентов зависит от их дисперсности (см. данные для углекислого натрия) и увлажнения перед опытом (см. данные для моноаммонийфосфата). Поэтому в опытах твердые агенты предварительно измельчались в ступке и затем использовались для опытов при их равновесном влагосодержании.

Скорость распространения пламени вдоль частицы может быть представлена в виде отношения теплового потока, поступающего из факела пламени в частицу  $q$ , к количеству тепла, необходимому для нагрева единицы объема материала  $\rho_x Q$  до температуры его газификации  $T_n$ , т. е. применительно к сухой хвое сосны в виде [3, 4]:

$$u = q / \rho_x \cdot Q \approx 4\alpha (\bar{T}_r - \bar{T}_x) \delta / d \rho_x c_x (T_n - T_0).$$

Здесь  $\alpha$  — коэффициент конвективного теплообмена факела пламени с горючим материалом,  $\delta$  — ширина зоны теплообмена (контакта) факела пламени с еще неразложившимся горючим материалом,  $\bar{T}_r$  и  $\bar{T}_x$  — средние в зоне теплообмена температуры пламени и горючего материала,  $d$  — эквивалентный диаметр хвои,  $\rho_x$  — ее плотность,  $c_x$  — теплоемкость,  $T_0$  — начальная температура.

При наличии агента величина  $Q$  складывается из расхода тепла на нагрев сухого горючего материала и на нагрев агента, т. е. может быть рассчитана из уравнения

$$(S_x \rho_x + S_m \rho_m) Q = S_x \rho_x c_x (T_n - T_0) + S_m \rho_m Q_m,$$

где  $S_x \rho_x$  и  $S_m \rho_m$  — масса горючего материала и агента в расчете на единицу длины хвоинки;  $\rho_x$  и  $\rho_m$  — плотность хвои и агента;  $Q_m$  — удельное количество тепла, потребляемое агентом при его нагреве в зоне теплообмена;  $S_x$  и  $S_m$  — площадь поперечного сечения, приходящаяся

<sup>1</sup> Поиски более эффективных агентов предполагается продолжить.

на горючий материал и агент соответственно. Поскольку  $m = S_m \rho_m / S_x \rho_x$ , после простых преобразований получается следующее соотношение

$$Q = 1/(1+m) \cdot [c_x(T_{\pi} - T_0) + m \cdot Q_m],$$

подставляя которое в выражение для скорости распространения пламени, найдем, что при наличии агента

$$u = [4\alpha(T_r - T_x) / d \rho_x c_x (T_{\pi} - T_0)] \cdot (1+m) / (1+bm) = u_0(1+m) / (1+bm). \quad (1)$$

Здесь

$$b = Q_m / c_x (T_{\pi} - T_0).$$

Соотношение (1) показывает, что огнезадерживающие свойства агентов могут быть обусловлены: 1) затратами тепла на нагрев агента, 2) изменением  $\alpha$ , 3) изменением перепада температур  $T_r - T_x$ . Если  $bm \ll 1$ , то (1) может быть представлено в виде

$$u \approx u_0(1+m)(1-bm) \approx u_0[1 - (b-1)m],$$

из которого следует, что

$$du/dm = u_0(b-1) = u_0[Q_m/c_x(T_{\pi} - T_0) - 1],$$

т. е. что огнезадерживающие свойства агентов определяются тогда затратами тепла на его нагрев.

Согласно [5], для потухания диффузионного факела необходимо, чтобы температура горения  $T_r$  уменьшалась на

$$T_r = T_a - (3RT_a^2/\bar{E}),$$

где  $T_a$  — адиабатическая температура горения,  $E$  — энергия активации химической реакции,  $R$  — универсальная газовая постоянная. Температура горения при наличии агента уменьшается:

$$T_r = T_a - (Q_m \cdot m/c).$$

Здесь  $c$  — удельная теплоемкость продуктов сгорания. Таким образом, и огнегасящие свойства агентов должны определяться затратами тепла на их нагрев. Это обстоятельство объясняет наличие корреляции между огнезадерживающими и огнегасящими свойствами агентов.

С другой стороны, величина  $Q_m$  складывается из расхода тепла на нагрев агента и его разложение (фазовые переходы):

$$Q_m = c_m(T_r - T_0) + a \cdot Q_p$$

( $a$  — доля разложения,  $Q_p$  — тепловой эффект). Величина  $a$  при этом должна зависеть от условий взаимодействия агента с факелом пламени. Это обстоятельство может быть одной из причин отсутствия корреляции между огнезадерживающими и огнегасящими свойствами у некоторых агентов. Для выявления механизма влияния агентов необходимо, таким образом, изучение их теплопоглощающих свойств.

Описанная методика может быть использована для поиска в лабораторных условиях эффективных огне- и углегасящих агентов, определения оптимального состава растворов, выявления оптимальных условий нанесения агентов на горючий материал и решения ряда других задач, связанных с применением пассивных методов тушения.

## ЛИТЕРАТУРА

1. П. П. Серебренников, В. В. Матренинский. Охрана лесов от пожаров. Л., Гослестехиздат, 1973.
2. Н. Н. Красавина.— В сб.: Современные вопросы охраны лесов от пожаров и борьбы с ними. М., «Лесная промышленность», 1965.
3. Э. В. Конев.— В сб.: Вопросы лесной пирологии. Красноярск. ИЛИД СО АН СССР, 1970.
4. А. И. Сухинин, Э. В. Конев.— В сб.: Вопросы лесной пирологии. Красноярск, ИЛИД СО АН СССР, 1972.
5. Я. Б. Зельдович. ЖТФ, 1949, 19, 10.

### ВЛИЯНИЕ КАТАЛИЗАТОРОВ НА СКОРОСТЬ ГОРЕНИЯ СМЕСЕВЫХ СОСТАВОВ С ТЕПЛОПРОВОДЯЩИМИ ЭЛЕМЕНТАМИ

*А. В. Болдырева, Р. П. Митрофанова, В. В. Болдырев*

1. Введение в топливо теплопроводящих элементов (ТПЭ)— один из способов повышения скорости горения физическим путем. При изготовлении в топливную шашку помещается одна или несколько металлических пластин, ориентированных вдоль ее оси. В процессе горения благодаря значительно большей теплопроводности металла по сравнению с теплопроводностью топлива размеры зоны прогрева топлива увеличиваются и появляются дополнительные условия для переноса тепла из зоны горения к поверхности горящего топлива, что приводит к значительному увеличению скорости горения. При этом зона прогрева топлива вблизи теплопроводящего элемента гораздо больше, чем толщина прогретого слоя в обычных топливах [1, 2].

Условия теплообмена между зоной горения и топливом, возникающие в образцах с теплопроводящими элементами, и развитие реакционной зоны вдоль ТПЭ могут быть причиной отличия в эффективности действия добавок на скорость горения.

Если в топливо вводится катализатор, то эффективность его действия зависит от соотношения между временем пребывания катализатора в активной зоне и временем каталитической реакции. Принимая во внимание, что вблизи пластины толщина прогретого слоя существенно увеличивается по сравнению с толщиной прогретого слоя в топливе без теплопроводящих элементов, следует ожидать и увеличения времени пребывания частицы катализатора в активной зоне. Поскольку это время у топлива со скоростями горения от 1 до 10 мм/с мало и равно  $10^{-1} \div 10^{-3}$  с, то при значительном его увеличении за счет теплопроводящих элементов эффективность катализатора должна повыситься. Реакция успеет пройти не только на внешней поверхности катализатора, но и в его порах.

Если добавка есть вещество, способное превращаться в катализатор в процессе горения топлива, то различие между характером влияния добавки на горение топлив, содержащих ТПЭ, и без них должно стать еще большим. Это связано с тем, что время, необходимое для превращения добавки в катализатор, должно быть меньше или, во всяком случае, сравнимо со временем пребывания добавки в зоне горения.

Увеличение времени пребывания в зоне нагрева может привести к тому, что вещество, обычно не являющееся катализатором горения, в условиях горения топлива с теплопроводящими элементами начнет проявлять каталитические свойства.