

эффективный масштаб гетерогенности системы и снижает скорость горения. Последнее делает понятным соотношение $u_a \ll u_k$ (к, а — индексы, относящиеся соответственно к смесям с кристаллическим и аморфным бором) при $d_n > 200$ мкм на рис. 2, так как процессы диспергирования кристаллического бора и агломерации аморфного могут приводить к инверсии эффективных масштабов гетерогенности системы, несмотря на большой размер частиц исходного Вк.

Таким образом, показана возможность реализации комплекса структурных превращений в волне безгазового горения порошковой смеси: различных типов перераспределения расплава легкоплавкого компонента, диспергирования и агломерации тугоплавкого, а также установлено существенное влияние структурных превращений на закономерности реакции. Полученные результаты могут быть полезны при математическом моделировании процессов горения гетерогенных систем с конденсированными продуктами реакции.

В заключение следует подчеркнуть, что динамика структурных превращений в существенной мере зависит от главной особенности волны горения — неоднородности температурного поля (до 10^7 — 10^8 град/м). За счет градиента температуры сильно активируются процессы спекания [8], диспергируют не только крупные частицы исходных компонентов, но и промежуточные продукты взаимодействия (например, отслоение твердофазных диффузионных слоев от частиц в результате термических напряжений). Может возникать дополнительное перераспределение жидкости в направлении теплового потока. Последнее связано с наличием термокапиллярного давления ($p \sim \frac{\partial \sigma}{\partial T} \text{ grad } T$), которое, как показывают оценки, для каналов размером $> 10^{-6}$ м соизмеримо или намного превышает уровень обычного капиллярного давления ($\sim \sigma/r$). Данная специфика процессов в волне горения пока практически не изучена и требует исследований.

ЛИТЕРАТУРА

1. Некрасов Е. А., Максимов Ю. М., Зиятдинов М. Х. и др. ФГВ, 1978, 14, 5, 26.
2. Кирдяшкин А. И., Максимов Ю. М., Мержанов А. Г. ФГВ, 1981, 17, 6, 10.
3. Алдушин А. П., Хайкин Б. И., Шкадинский Р. Г. ФГВ, 1976, 12, 6, 819.
4. Мержанов А. Г. Закономерности и механизм горения пиротехнических смесей типа пана и бора/АН СССР. ОИХФ.— Препр.— Черноголовка, 1978.
5. Боровинская И. П., Мержанов А. Г., Повиков Н. Г. и др. ФГВ, 1974, 10, 11, 4.
6. Доронин В. И., Итин В. И., Барелко В. В. Докл. АН СССР, 1986, 286, 5, 1155.
7. Гегузин Я. Е. Физика спекания.— М.: Наука, 1984.
8. Сумм Б. Д., Горюнов Ю. В. Физико-химические основы смачивания и растекания.— М.: Химия, 1976.

Поступила в редакцию 18/I 1988,
после доработки — 22/VI 1988

УДК 534.222.2 + 536.46

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ И ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ВЗРЫВА НА ФРОНТ ВЕРХОВОГО ЛЕСНОГО ПОЖАРА

А. М. Гришин, Ю. М. Ковалев

(Томск)

Известно какой огромный урон наносят лесные пожары лесам во всем мире [1]. Поэтому представляют интерес новые способы борьбы с лесными пожарами, особенно для наиболее опасных верховых лесных пожаров. Многочисленные экспериментальные исследования [1, 2] зако-

померностей распространения лесных пожаров показали, что во фронте верхового лесного пожара сгорают в основном хвоинки и тонкие, диаметром менее 7 мм, веточки (лесные горючие материалы — ЛГМ). Учет этого факта позволил предложить способ тушения верховых лесных пожаров путем взрыва зарядов, расположенных в пологе леса [3]. Суть этого способа заключается в том, что взрывные волны быстро обрывают тонкие веточки и хвоинки, в результате чего быстро уменьшается запас лесных горючих материалов и реализуется концентрационный предел распространения верховых лесных пожаров [4]. При экспериментальном исследовании тушения в полунатурных условиях обнаружен эффект усиления взрывных волн [5, 6].

В данной работе приводятся систематизированные экспериментальные данные, полученные с помощью более совершенных датчиков давления [7, 8], на основании которых можно утверждать, что существует эффект усиления взрывных волн при их взаимодействии с зоной пиролиза фронта верхового лесного пожара. На основании результатов математического моделирования взаимодействия ударной волны (УВ) с модельной зоной пиролиза дано теоретическое объяснение эффекта усиления ударных волн иницированием взрыва газообразных горючих продуктов пиролиза лесных горючих материалов.

Постановка задачи и методика экспериментального исследования

Рассмотрим взаимодействие взрывных волн с пологом леса и фронтом верхового лесного пожара. Методика проведения экспериментов заключается в следующем. На ровной площадке вкапывались молодые свежесрубленные сосенки и создавались две лесные полосы размером $3 \times 10 \times 3$ м, где первый размер — ширина, второй — длина, третий — высота (рис. 1). Первая контрольная полоса не зажигалась. Во второй на подстилающей поверхности выкладывался лишайник *Cladonia* для того, чтобы полностью воспроизводилась естественная структура типичного соснового подроста. За зоной подрыва размещались датчики различных конструкций для регистрации полного давления [7, 8].

Впереди второй полосы выкладывалась из сусняка, политого соляркой, зона зажигания, горение которой инициировало при достаточной скорости ветра верховой пожар. При скорости ветра < 3 м/с реализовывался покатный верховой пожар, кроны деревьев зажигались от пламени низового пожара, распространявшегося по напочвенному покрову. Для того чтобы в любом случае имело место горение крон деревьев, расстояние между нижней границей крон и поверхностью лишайника бралось равным 15 см, что меньше высоты пламени низового пожара. В зонах подрыва размещали заряд ВВ — ПЖВ-20 или ЭШ-1П, применяемый при тушении низовых лесных пожаров [9]. Заряды ВВ инициировались электродетонаторами. Вначале проводился опыт с контрольной полосой. Предварительно за зоной подрыва выделялась контрольная группа деревьев, каждое из которых взвешивалось до и после опыта и после отжига оставшихся от взаимодействия с ударной волной тонких

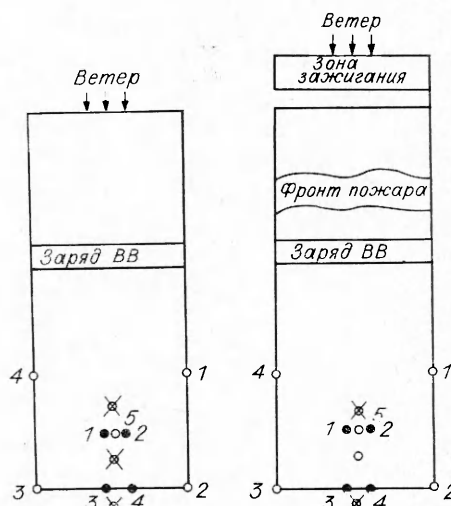


Рис. 1. Схемы проведения экспериментов.
× — пьезокерамические датчики; ○ — датчики АИДА (светлые точки — первая схема опытов, темные — вторая).

веточек и хвои. Такая методика позволяла определить массу хвои и тонких веточек, степень их обрыва для каждого дерева по формуле

$$\varepsilon = \frac{P_1 - P_3}{P_1 - P_2}, \quad (1)$$

где P_1 , P_2 , P_3 — масса дерева первоначальная, после взрыва и после отжига. Взвешивание проводилось на весах с точностью до 0,05 кг. Определенная по (1) степень обрыва ЛГМ позволяет судить об интенсивности взрывных волн. Заряды ВВ подбирались и устанавливались так, чтобы не разрушались стволы и толстые ветви деревьев. Затем проводился эксперимент с полосой, по которой распространялся верховой пожар. При этом масса заряда, его конфигурация и структура полосы выбирались такими же, как и в опыте с контрольной полосой.

Результаты экспериментов и их анализ

Все проведенные эксперименты можно разделить на три типа по массе заряда, марке ВВ и фиксируемым характеристикам.

В первой серии экспериментов использовался заряд ПЖВ-20 массой 1,8 кг, который прикреплялся к стержню так, что все патроны располагались впритык друг к другу, а сам стержень с зарядом подвешивался параллельно подстилающей поверхности на высоте 1,5 м к одному ряду деревьев лесной полосы в зоне подрыва (см. рис. 1). Опыты проводились без горения и при наличии фронта пожара. В последнем случае заряд подрывался в момент, когда положение передней кромки фронта пожара совпадало с положением заряда. В результате взрыва фронт пожара прекращал распространяться, происходил срыв пламени и обрыв хвои. Давление не определялось. Ниже представлены результаты измерений действия взрыва в лесной полосе без горения (первая строка) и с горением (вторая и третья); ε_i — степень обрыва ЛГМ i -го ряда; $\bar{\varepsilon}$ — средняя степень обрыва ЛГМ по всем рядам; $h_3 = 1,5$ м — высота, на которой расположен заряд; $m_3 = 1,8$ кг — масса заряда:

ε_1	ε_2	ε_3	$\bar{\varepsilon}$
0,77	0,54	0,18	0,49
0,90	0,61	0,15	0,58
0,92	0,53	0,36	0,66

Анализ результатов показывает, что при пожаре имеет место усиление действия взрыва на лесную растительность, что отчетливо прослеживается в увеличении степени обрыва ЛГМ.

Второй этап экспериментов отличается от первого массой $m_3 = 2,4$ кг. Для регистрации давления использовались пьезокерамические датчики давления [7], чувствительные элементы которых располагались посредине полосы на высоте 1,5 м и расстояниях $l = 2,5$, 3,5 и 4,5 м от линейного заряда. Скорость ветра не превышала 1 м/с, кроны деревьев сгорали от пламени низового пожара, который распространялся со средней скоростью $\omega = 0,025$ м/с. Результаты экспериментов:

$(\Delta P)_1 \cdot 10^{-5}$, Па	$(\Delta P)_3 \cdot 10^{-5}$, Па	$\bar{\varepsilon}$
21,6	—	0,41
22,5	3,5	0,72

Здесь $(\Delta P)_i$ — разность между максимальным полным и атмосферным давлениями, зарегистрированная i -м датчиком; $h_3 = h_g = 1,5$ м; $m_3 = 2,4$ кг. Пропуски означают отсутствие соответствующих данных. Анализ данных показывает, что и в этом случае имеет место увеличение максимального полного давления и степени обрыва ЛГМ при наличии фронта пожара. В экспериментах с фронтом пожара к датчику давления, $l = 2,5$ м, крепилась термопара. Установлено, что к моменту подрыва температура в окрестности датчика не превышает. Погрешность

Рис. 2. Зависимости $p(t)$, измеренные датчиками давления без огня (2, 4, 6) и при наличии фронта пожара (1, 3, 5).

1, 2 — измерения датчиком 1; 3, 4 — датчиком 2.

измерения давления 3 %.

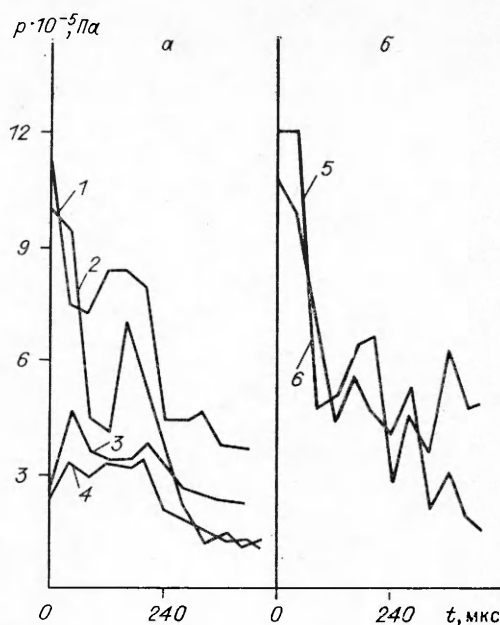
В третьей серии опытов использовался шланговый заряд ЭШ-1П массой 3 кг. Он прикреплялся к стержню и подвешивался параллельно подстилающей поверхности ($h_0 = 1,5$ м) к одному ряду деревьев. Статическое давление измерялось датчиками измерительного комплекса АИДА-М [8], расположенными на поверхности земли. Для уменьшения погрешности измерения давления тарировочная кривая давления — напряжение аппроксимировалась не единой прямой, а ломаной, состоящей из прямых с различными углами наклона. Максимальная погрешность измерения, согласно паспортным данным, равна 1,68 %. Опыты проводились без горения и при наличии фронта пожара. Заряд подрывался так же, как и в первой серии экспериментов. Эксперименты данной серии проводились по двум схемам, отличающимся расположением датчиков давления (см. рис. 1). В первой схеме датчики давления 1, 4 располагались на расстоянии $l = 2$ м от заряда, 2, 3 — $l = 4$ м, 5 — в середине полосы, $l = 3$ м. Датчики 3 и 4 устанавливались для контроля за симметрией процесса относительно плоскости, проходящей посередине полосы, перпендикулярно положению заряда ЭШ-1П. Зафиксированные датчиками 1 и 2 зависимости давления от времени без горения и при наличии фронта пожара представлены на рис. 2, а. Видно, что уровни давления при наличии пожара выше уровней давления в УВ, распространяющейся по лесной полосе без горения. Ниже приведены степени обрыва ЛГМ для семи рядов деревьев, полученные в экспериментах, проведенных по первой схеме, откуда следует, что при наличии фронта пожара (вторая строка) увеличивается и степень обрыва ЛГМ:

ε_1	ε_2	ε_3	ε_4	ε_5	ε_6	ε_7
0,7	0,71	0,39	0,30	0,45	0,24	0,19
0,81	0,79	0,6	0,35	0,41	0,3	0,29

На рис. 2, б приведены зависимости давления от времени, измеренные датчиком 1 (вторая схема экспериментов, см. рис. 1). Здесь также наблюдается увеличение давления при наличии фронта пожара. В таблице приведены значения средних максимальных уровней полного давления, полученных в экспериментах, проведенных по первой и второй схемам, $(p_{i,j})_{ср}$ — среднеарифметическое давление, зафиксированное датчиками с номерами i и j . Вторая строка относится к экспериментам, проведенным при наличии фронта пожара. Из анализа данных таблицы следует, что имеет место увеличение максимального полного давления на 9—13 % при наличии фронта пожара.

В общей сложности проделано более двадцати опытов по воздействию ударных волн на ЛГМ при горении лесных полос и без горения. Во всех случаях наблюдалось потухание фронта пожара и усиление УВ при наличии фронта пожара.

Эффекту усиления действия взрыва можно дать следующее объяснение. Процесс горения ЛГМ многостадийный. Согласно [10], вначале



Результаты записи среднего давления ($p \cdot 10^{-5}$, Па)

$(p_{1,4})_{\text{ср}}$	$(p_{2,3})_{\text{ср}}$	p_5	$(p_{1,2})_{\text{ср}}$	$(p_{3,4})_{\text{ср}}$
10,275	3,256	10,8	10,83	4,1
11,255	4,750	12,1	12,14	5,3

ЛГМ прогревается, затем высушивается, в дальнейшем с ростом температуры происходит пиролиз с выделением газообразных и конденсированных горючих продуктов пиролиза и, наконец, сгорание сначала газообразных, а затем конденсированных продуктов пиролиза. Как показали оценки [6], эффект усиления действия взрыва при наличии фронта пожара может быть обусловлен ускорением УВ химического превращения газообразных продуктов пиролиза, а затем влиянием энерговыделения от химических реакций на амплитуду распространяющихся ударных волн. Наличие нескольких всплесков на кривой зависимости давления от времени для экспериментов в контрольной полосе (см. рис. 2) можно объяснить воздействием на датчики отраженных от растительности УВ. При наличии фронта пожара эти всплески значительно выше, следовательно, в этом случае имеет место дополнительный механизм увеличения давления. Он может быть также связан с неодновременностью протекания реакций в многокомпонентной смеси: сначала инициируются реакции окисления водорода и метана, а затем окиси углерода. В связи с изложенным представляет интерес теоретический анализ эффекта усиления УВ при их взаимодействии с фронтом верхового лесного пожара.

Постановка задачи по инициированию детонации газообразных продуктов пиролиза ЛГМ

На основании предыдущих результатов и данных [5, 6] можно сделать вывод о том, что усиление УВ при их взаимодействии с фронтом лесного пожара обусловлено взрывом газообразных горючих продуктов пиролиза ЛГМ. Поэтому представляет интерес оценка детонационной способности этих продуктов. С этой целью решена задача о распространении УВ, образующихся в результате взрыва цилиндрического заряда твердого ВВ, по продуктам пиролиза ЛГМ. В случае осесимметричного разлета продуктов взрыва законы сохранения в лагранжевых массовых переменных будут иметь вид

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{1}{\rho_i} \right) &= \frac{\partial}{\partial s} (ru_i), \quad \frac{\partial u_i}{\partial t} - r \frac{\partial p_i}{\partial s}, \\ \frac{\partial r}{\partial t} &= u_i, \quad \rho_i \frac{\partial c_{\alpha i}}{\partial t} = R_{\alpha i}, \quad \sum_{\alpha} c_{\alpha i} = 1, \\ \frac{\partial e_i}{\partial t} + p_i \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{1}{\rho_i} \right) &= \sum_j q_j R_j. \end{aligned} \quad (2)$$

Здесь t — время; s — лагранжева переменная; ρ , u , r , p , c_{α} , e , R_{α} , q_j , R_j — плотность, массовая скорость, эйлерова переменная, давление, массовая концентрация компонента с индексом α , удельная внутренняя энергия, суммарная массовая скорость образования компонента α , тепловой эффект j -й независимой реакции, массовая скорость j -й независимой химической реакции; величины с индексами 1, 2 относятся к продуктам взрыва и к смеси продуктов пиролиза с воздухом.

Для решения системы (2) необходимо задать конкретные уравнения состояния и химической кинетики и решать при следующих начальных

Рис. 3. Профили давлений от взрыва цилиндрического заряда ПЖВ-20.

r_r — положение границы раздела продукты взрыва — продукты пиролиза; ● — экспериментальное значение давления; X — положение задней границы зоны химического превращения.

и граничных условиях:

$$\begin{aligned} \rho_i(s, 0) &= \rho_{i0}(s), \quad e_i(s, 0) = e_{i0}(s), \\ p_i(s, 0) &= p_{i0}(s), \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} u_i(s, 0) &= u_{i0}(s), \quad c_{\alpha i}(s, 0) = c_{\alpha i0}(s), \\ p_1(s_r, t) &= p_2(s_r, t), \quad u_1(s_r, t) = u(s_r, t), \end{aligned}$$

s_r — положение границы раздела продукты взрыва — продукты пиролиза.

Уравнения состояния продуктов пиролиза выбраны в следующем виде:

$$\begin{aligned} e_2 &= T_2 \sum_{\alpha} c_{\alpha 2} c_{V2\alpha}(T_2), \quad p_2 = \rho R_g T_2 \sum_{\alpha} c_{\alpha 2} / M_{\alpha}, \\ c_{V\alpha} &= f_2 - \frac{R_g}{M_{\alpha}} + g_2 T_2 + \frac{h_{\alpha}}{T_2^2}, \end{aligned} \quad (4)$$

где T_2 — температуры смеси продуктов пиролиза; R_g — универсальная газовая постоянная; M_{α} — молекулярная масса компонента α ; f_2, g_2, h_{α} — коэффициенты полинома, определяющего зависимость теплоемкости при постоянном объеме $c_{V\alpha}$ от температуры [11]. В расчетах применялось уравнение состояния, описывающее разлет продуктов взрыва:

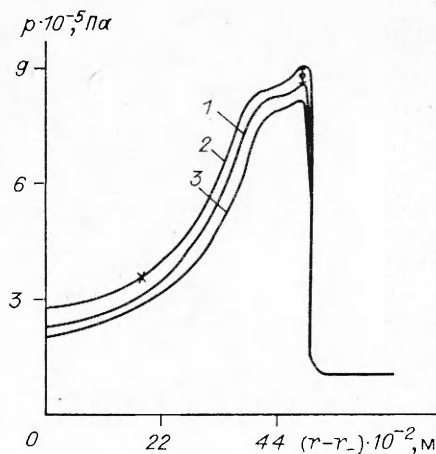
$$e_1 = p_1 / \{\rho_1 [\gamma(\rho_1) - 1]\}, \quad (5)$$

где $\gamma(\rho_1) = \gamma_0 + k(1 + b\rho_1)b\rho_1$; $\gamma_0 = 1,3$; $b = -3,5111076 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{кг}$; $k = -3,4649819$; $\rho_0 = 1100 \text{ кг/м}^3$. Начальное распределение параметров состояния продуктов взрыва определялось из решения задачи о распространении стационарной детонационной волны, инициируемой на оси заряда [12]. Для сравнения с экспериментами решена задача о разлете продуктов взрыва в воздухе. Уравнение состояния воздуха с эффективным показателем адиабаты имеет вид [13]

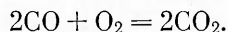
$$\begin{aligned} p_2 &= (\gamma_2 - 1) \rho_2 e_2, \\ \gamma_2 &= \begin{cases} \gamma_{02} - 0,042(e_2 - e_K) & \text{при } e_2 \leq e_K, \\ a_K + (1,36 - a_K) \exp \left[0,223 \left(1 - \frac{e_2}{e_K} \right) \right] & \text{при } e_2 > e_K, \end{cases} \end{aligned}$$

$a_K = 1 + 0,163/[1 - 0,0573 \ln(\rho_2/\rho_K)]$; $e_K = 1,116 \cdot 10^3 \text{ кДж/кг}$; $\rho_K = 1,2921 \text{ кг/м}^3$; $\gamma_{02} = 1,402$. Положение УВ в воздухе определялось с помощью дифференциальных анализаторов [14]. Результаты численного интегрирования системы (1) при распространении УВ в воздухе приведены на рис. 3, 1 на моментах времени, когда УВ проходит расстояние 1,5 м от заряда. Пик давления расчетной кривой лежит ниже экспериментального значения давления всего на $0,1 \cdot 10^{-5}$, что можно считать достаточно хорошим совпадением теории с экспериментом.

Рассмотрим далее воздействие УВ на зону пиролиза ЛГМ, возникающую при распространении лесного верхового пожара. Известно [1], что состав продуктов пиролиза существенно зависит от температуры среды, окружающей ЛГМ. Поэтому в расчетах ограничимся той частью зоны пиролиза ЛГМ, в которой выделяется только окись углерода. В этом случае в состав смеси продуктов пиролиза с воздухом входят следующие компоненты: O_2, CO, N_2, CO_2 (в дальнейшем им присваива-



ются индексы 1—4 соответственно). В данной смеси происходит реакция



Массовая скорость окисления CO имеет следующие эффективные кинетические постоянные [15]:

$$R = M_2 k_0 \left(\frac{c_1 M}{M_1} \right)^{0,25} \left(\frac{c_2 M}{M_2} \right) T_2^{-2,25} \exp \left(- \frac{E}{R_g T_2} \right), \quad (6)$$

где $k_0 = 1,1 \cdot 10^{15}$ моль · град^{2,25}/(м³ · с); $E/R_g = 11500$; $q = 10^7$ Дж/кг; $1/M = \sum c_a/M$; $(\sum q_i R_i)_2 = qR$. Данная аппроксимация справедлива при относительно высоких концентрациях кислорода. При $(c_1/M/M_1) < 0,05$ используется выражение

$$R = 9,45 M_2 k_0 \left(\frac{c_1 M}{M_1} \right) \left(\frac{c_2 M}{M_2} \right) T_2^{-2,25} \exp \left(- \frac{E}{R_g T_2} \right). \quad (7)$$

Выражения (6) и (7) позволяют легко получить массовые скорости исчезновения O₂, CO, N₂

$$R_1 = - \frac{M_1}{2M_2} R, \quad R_2 = - R, \quad R_3 = 0.$$

Начальное распределение концентраций продуктов пиролиза ЛГМ и выражения для массовых скоростей химических реакций определены в [4]. Результаты численного решения этой задачи на момент времени, когда УВ находится на расстоянии 1,5 м от места инициирования, приведены на рис. 3, 2 и 3.

Неучет химического превращения при распространении УВ в разогретых газообразных продуктах пиролиза приводит к тому, что давление во фронте УВ на расстоянии 1,5 м от оси заряда (см. рис. 3, 3) становится ниже давления во фронте ударной волны, распространяющейся по холодному воздуху (см. рис. 3, 1) на том же расстоянии от оси заряда. Иницирование же химического превращения в газообразных продуктах пиролиза приводит к увеличению давления во фронте УВ (см. рис. 3, 2).

Из анализа полученных в данной работе результатов следует, что иницирование химического превращения в продуктах пиролиза является основной причиной усиления ударных волн при их воздействии на зону пиролиза фронта верхового лесного пожара, что согласуется с экспериментальными данными.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гришин А. М. Математические модели лесных пожаров.— Томск: Изд-во Том. ун-та, 1981.
2. Валендик Э. П., Матвеев П. М., Софронов М. А. Крупные лесные пожары.— М.: Наука, 1979.
3. А. с. 1136811, МКИ³ А 62 с 1/22. Способ тушения лесного пожара/А. М. Гришин, В. М. Бабаев, А. Д. Грузин и др. // Открытия. Изобрет.— 1985.— № 4.
4. Гришин А. М. // Механизмы распространения лесных пожаров и вопросы внедрения результатов исследований в практику.— Томск, 1984.
5. Гришин А. М., Алексеев Н. А., Ковалев Ю. М. и др. Деп. в ВИНТИ 18.12.87, № 226—В87.
6. Гришин А. М., Зверев В. Г., Ковалев Ю. М. и др. Деп. в ВИНТИ 17.12.86, № 8667—В86.
7. Гавриленко Т. П., Николаев Ю. А. ФГВ, 1982, 18, 3.
8. Автономный измеритель давления. Техническое описание — 84 Ф 4038000Т0.— Новосибирск: Новосибирский опытный завод измерительных приборов, 1986.
9. Орлов О. К., Кустов Ю. В. // Лесные пожары и борьба с ними.— Л., 1986.
10. Гришин А. М., Плюхин В. В. ФГВ, 1985, 24, 1, 5.
11. Мищенко К. П., Равдель А. А. Краткий справочник физико-химических величин.— Л.: Химия, 1972.

12. Станюкович К. П. Неустановившиеся движения сплошной среды.— М.: Наука, 1971.
13. Селиванов В. В. ФГВ, 1985, 21, 4.
14. Ворожцов Е. В., Фомин В. М., Яценко Н. Н. // ЧММСС, 1976, 7, 6.
15. Гришин А. М., Грузин А. Д., Зверев В. Г. // Математическая теория верховых лесных пожаров.— Новосибирск: ИТФ СО АН СССР, 1984.

Поступила в редакцию 30/III 1988

УДК 536.46

КОЭФФИЦИЕНТ ТЕПЛООБМЕНА ПРИ ГОРЕНИИ БЕЗГАЗОВЫХ СОСТАВОВ В КАНАЛАХ С ПОСТОЯННОЙ ТЕМПЕРАТУРОЙ СТЕНОК

В. В. Александров, Ю. А. Коваленко, Н. П. Поддубный
(Новосибирск)

При горении составов в условиях сильных боковых потерь, когда температура на стенках каналов остается постоянной и равной начальной (например, когда горение происходит в массивных матрицах из высокотеплопроводного металла), моделирование процесса одномерным уравнением теплопроводности встречает затруднения, обусловленные неопределенностью линейного члена, описывающего теплообмен. Различные способы осреднения поперечного распределения температуры [1—3] приводят к разным численным значениям коэффициента теплообмена, поэтому вопрос о его величине остается открытым. В настоящей работе проведено численное исследование этого вопроса применительно к горению безгазовых составов в плоских и цилиндрических каналах.

Предполагаем, что в реальной ситуации установившееся стационарное решение описывается уравнениями, которые в безразмерных переменных в системе координат, движущейся в направлении x со скоростью фронта u , имеют вид:

$$U \frac{\partial \Theta}{\partial \chi} = \frac{\partial^2 \Theta}{\partial \xi^2} + M^{-2} \xi^{-n} \frac{\partial}{\partial \xi} \xi^n \frac{\partial \Theta}{\partial \xi} + U \frac{\partial \eta}{\partial \chi}, \quad (1)$$

$$U \frac{\partial \eta}{\partial \chi} = -\frac{1}{\beta} f(\eta) \exp \left[\frac{1}{\beta} \frac{\Theta - 1}{\Theta + (T_a/T_0)(1 - \Theta)} \right], \quad (2)$$

$$\Theta(-\infty, \xi) = \eta(-\infty, \xi) = \frac{\partial \Theta}{\partial \xi}(\infty, \xi) = \frac{\partial \Theta}{\partial \xi}(\chi, 0) = \Theta(\chi, 1) = 0. \quad (3)$$

Здесь и далее $n=0$ соответствует плоской симметрии задачи, $n=1$ — цилиндрической симметрии; c , ρ , λ и Q — удельная теплоемкость, плотность, коэффициент теплопроводности и тепловой эффект реакции; k и E — предэкспоненциальный множитель и энергия активации; $2h$ — толщина (диаметр) капала; $\theta = (T - T_0)/(Q/c)$; $\chi = x/(a/u_a)$; $\xi = y/h$; $U = u/u_a$; $M = u_a h/a$; $\beta = RT_a^2 c/EQ$; $I = \int_0^1 [(1 - \eta)/f(\eta)] d\eta$; $a = \lambda/(c\rho)$ — коэффициент температуропроводности; $T_a = T_0 + Q/c$ — адиабатическая температура горения; $u_a = [RT_a^2 \lambda k \exp(-E/RT_a)/(EQ\rho I)]^{1/2}$ — адиабатическая скорость в случае узких реакционных зон ($\beta \rightarrow 0$), когда $d\eta/d\chi$ вырождается в δ -функцию, нормированную на 1. Как можно видеть, в этом последнем случае задача (1) — (3) имеет единственный определяющий критерий подобия — адиабатический критерий Михельсона M .

Задача о нахождении эффективного коэффициента теплообмена сводится к описанию реальной ситуации, подчиняющейся уравнениям