

РАСПРОСТРАНЕНИЕ ПЛАМЕНИ ВДОЛЬ ПОВЕРХНОСТИ КОНТАКТА ГОРЮЧЕГО И ОКИСЛИТЕЛЯ

Н. Н. Балман

(Москва)

За последние 20—25 лет в науке о горении появилось новое направление — исследование распространения пламени вдоль поверхности контакта слоев горючего и окислителя. Рассматривались следующие случаи слоевых систем:

- 1) горючий газ — воздух;
- 2) горючая жидкость — воздух;
- 3) твердое горючее — газообразный окислитель;
- 4) твердое горючее — жидкий окислитель;
- 5) твердое горючее — твердый окислитель.

Основная часть экспериментальных работ относится к случаям 2 и 3, наиболее важным с точки зрения профилактики и тушения пожаров. Теоретически первым был изучен случай 5 [1].

При горении подавляющего большинства слоевых систем реакция протекает в газовой фазе. Если один или оба компонента конденсированные, то они предварительно полностью или частично газифицируются. Вдоль поверхности контакта движется зона горения, причем лидирует достаточно острый носик пламени.

Распространение пламени вдоль поверхности контакта слоев горючего и окислителя имеет ряд специфических особенностей. Прежде всего, такое пламя существенно неоднородно. Если при одномерном горении тепло, поступающее от фронта горения в свежую смесь, всегда возвращается обратно в зону горения, то при двумерном часть тепла уходит в толщу слоев компонентов. С точки зрения процессов, идущих на носике пламени (в зоне, влияющей на скорость горения), это эквивалентно теплотерям. Поэтому, например, при горении листа полимера, теплоизолированного с обратной стороны, увеличение толщины листа Δ снижает скорость пламени w и лишь при достаточно больших Δ значения w выходят на плато.

Нужно отметить также сложный характер теплопередачи от пламени к свежему веществу при горении слоевых систем. Так, в случаях 2 и 3 прогрев слоя горючего впереди носика пламени происходит как через газ (главным образом конвекцией), так и через конденсированную фазу (теплопроводностью, а для жидкостей и плавящихся твердых горючих — еще и конвекцией).

Скорость пламени вдоль поверхности контакта горючего и окислителя. Система 1 изучена лишь в очень ограниченном числе работ, причем окислителем в них служил воздух, а горючим — метан [2, 3] или пропан [3]. Значения $w = 1 \div 3$ м/с.

При горении жидких горючих на воздухе (система 2) w очень сильно зависит от упругости пара жидкости при данной температуре. Чем ниже температура кипения $T_{кип}$ жидкости (и соответственно чем выше упругость ее пара при данной температуре T_0), тем быстрее она горит (рис. 1). С ростом T_0 (и соответствующим ростом упругости пара жидкости) скорость пламени быстро повышается. Так, для изопентанола при увеличении T_0 от 25 до 50°C упругость его пара возрастает в 5,5 раза, а скорость пламени — в 86 раз [4]. При 50°C

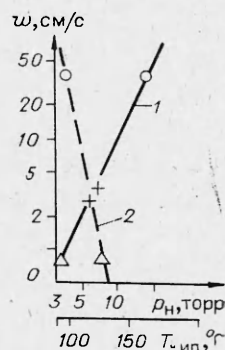


Рис. 1. Зависимость w от температуры кипения (2) и давления насыщенного пара (при 25°C жидкости (1) (термостатированная латунная ювета длиной 1 м, шириной 33 мм; толщина слоя жидкости 2,5 мм) [4].

— пропанол; + — бутанол; Δ — изопентанол.

для изопентанола, бутанола и пропанола $w \sim 1$ м/с [4.] Для бутанола при увеличении $T_0 = 26 \div 38^\circ\text{C}$ упругость пара возрастает в 2,2 раза, а скорость пламени — в 21 раз и доходит до 65 см/с [5].

В системах 3 наиболее подробно изучено горение полимеров (при этом основная часть данных относится к ПММА). Здесь скорость пламени очень низка. Для толстых горизонтальных листов ПММА в спокойной атмосфере она не превышает десятых долей миллиметра в секунду, т. е. на 2—4 порядка меньше, чем для жидких горючих.

Составы 4 и 5 не удается корректно сопоставить с тремя первыми. Действительно, в системе 5 использовались такие твердые окислители, как KClO_4 , NH_4ClO_4 , BaO_2 и другие, не имеющие аналога в 1—3. В системе 4 обычно речь идет о жидком кислороде, т. е. окислителе с высокой плотностью и низкой температурой (при $p = 1$ ата для O_2 (ж) $T_{\text{кип}} = -183^\circ\text{C}$, $\rho = 1,14$ г/см³). Очевидно, что скорости горения в жидком и газообразном кислороде должны существенно отличаться. Кроме того, в случаях 4 и 5 почти все имеющиеся данные относятся не к атмосферному давлению, а к повышенным давлениям (от нескольких атмосфер до ~ 100).

При горении прутков полимеров в жидком O_2 (система 4) при $p = 40$ атм в [6] получено $w = 20 \div 160$ мм/с. Исключение составлял фторопласт-4, который горел гораздо медленнее (~ 4 мм/с).

Горение систем 5 рассмотрено в [7—9]. Величина w существенно зависела от природы компонентов и давления. В частности, для системы ПММА — твердый окислитель в [7] получено:

| | KClO_4 | KClO_3 | BaO_2 | KMnO_4 |
|------------|--------------------|--------------------|-----------------|-------------------|
| w , мм/с | $\frac{9,4}{15,4}$ | $\frac{5,6}{11,0}$ | $\frac{5,0}{-}$ | $\frac{0,7}{0,8}$ |

Здесь цифры в числителе соответствуют $p = 40$ атм, в знаменателе — $p = 75$ атм.

Таким образом, рассмотренные данные по абсолютной величине скорости пламени свидетельствуют о наличии двух качественно различных режимов распространения пламени:

1) высокоскоростного (порядка метра в секунду), характерного для систем газ — газ и легколетучая жидкость — газ;

2) низкоскоростного (10^{-4} — 10^{-2} м/с), характерного для остальных перечисленных систем.

Столь резкое различие в величине w связано с существенными отличиями механизмов распространения пламени в этих двух случаях.

В опытах с системой газ — газ компоненты разделены заслонкой, которая сдвигается непосредственно перед поджиганием системы. Как только заслонка убирается, газы начинают перемешиваться. Если воспользоваться соотношением $d(\bar{y}^2) \sim Ddt$ (где y — ширина области смешения; D — коэффициент диффузии; t — время) и рассматривать только молекулярную диффузию, то для системы метан — воздух ширина области смешения (при температуре исходных газов 20°C) составит 0,5; 1,5 и 4,5 мм для времени смешения 0,01; 0,1 и 1 с соответственно. Если при убирании заслонки на границе газ — газ возникает турбулентность, то перемешивание может существенно усиливаться, а ширина области перемешанной смеси — существенно возрастать.

В [2, 3] возможность возникновения турбулентности при убирании заслонки не обсуждается. Отметим, что в условиях [3], когда средняя скорость движения заслонки составляла $v \approx 6$, м/с, а путь, проходимый заслонкой (ширина сосуда), — 10 см, число Рейнольдса для слоя воздуха $\text{Re} = vl/\nu \sim 4 \cdot 10^4$ ($l = 10$ см — расстояние от данной точки пластины до стенки, сквозь прорезь в которой убирается заслонка; ν — кинематическая вязкость газа). Это на порядок величины меньше $\text{Re}_{\text{кр}} \approx 3 \cdot 10^5$ для пластины в неограниченном потоке газа. Однако в рассматриваемом случае заслонка движется внутри замкнутого сосуда и увлекаемый ею слой газа наталкивается на стенку сосуда.

Таблица 1

| Горючее | Т _{кип} , °С | Давление паров горючего (торр) | | | |
|-------------|-----------------------|------------------------------------|-------|---------------------------------|-----------|
| | | насыщенных при T ₀ , °С | | парциальное в смесях с воздухом | |
| | | 25 | 50 | на НКП | при α = 1 |
| Эталон | 78,3 | 55,6 | 216,3 | 24,9 | 49,6 |
| Пропанол | 97,2 | 19,3 | 86,5 | 19,4 | 33,8 |
| n-Бутанол | 117,7 | 6,9 | 33,1 | 12,9 | 25,6 |
| Изопентанол | 130 | 3,2 | 17,8 | 9,1 | 20,7 |

Это может оказывать существенное влияние на возникновение турбулентности.

Для подавляющего большинства околостехиометрических углеводородно-воздушных смесей скорость ламинарного пламени (при нормальных условиях) лежит в интервале 30—60 см/с, а скорость турбулентного пламени может достигать до ~10 м/с. Таким образом, экспериментальные значения w вдоль поверхности контакта слоев метана (или пропана) и воздуха (1—3 м/с) совпадают со скоростью турбулентного пламени в заранее перемешанной смеси тех же компонентов.

Рассмотрим систему жидкость — газ. Из табл. 1 видно, что для многих жидкостей уже при комнатной температуре упругость пара сравнима с парциальным давлением паров горючего на нижнем концентрационном пределе горения (НКП), а для низкокипящих жидкостей даже с парциальным давлением паров горючего в стехиометрической смеси. Тем самым над поверхностью таких жидкостей еще до поджигания имеется гомогенная смесь, способная к горению, и значение w будет равно скорости пламени в данной гомогенной смеси.

Если упругость пара жидкости при данной начальной температуре T_0 недостаточна для образования горючей смеси, горение распространяется за счет теплопередачи вперед от носика пламени. Это низкоскоростной режим. Однако при достаточном увеличении T_0 вновь приходим к горению в гомогенной смеси. В момент перехода от низкоскоростного режима к высокоскоростному температурный коэффициент скорости пламени $\beta = d \ln w / dT_0$ очень велик. Так, в [5] для бутанола в момент перехода $\beta = 0,25$ 1/град, что в 100—200 раз больше значений β для ламинарного гомогенного пламени.

Для типичных твердых горючих при комнатной температуре образование гомогенной горючей смеси над поверхностью образца исключено — здесь возможен только низкоскоростной режим. Однако в условиях пожара, когда листы горючего сильно прогреваются, скорость их пиролиза резко возрастает, и горение может перейти на высокоскоростной режим.

Следует учитывать, что сгорание газовой смеси не обязательно должно приводить к устойчивому распространению пламени вдоль поверхности горючего. Так, в [10] описаны периодические колебания при горении нонана, декана и ряда других жидкостей. Такой режим характерен для определенного интервала T_0 , когда для образования горючей смеси достаточен небольшой подвод тепла от носика пламени. В этом случае смесь образуется в некоторой, не слишком узкой зоне, примыкающей к носику пламени. Порция смеси быстро выгорает, затем за счет теплопередачи от носика накапливается новая порция паров и т. д.

Зависимость w от толщины (диаметра) слоя горючего. На рис. 2 показана зависимость $w(\Delta)$ для слоя бутанола в плоской горизонтальной металлической кювете. С уменьшением Δ скорость пламени падает и при $\Delta = 1 \div 2$ мм горение затухает. Падение w связано с ростом теплопотерь в дно кюветы (для жидкостей имеется и второй фактор — ослабление конвекции по мере уменьшения Δ). На рис. 3 показаны аналогичные

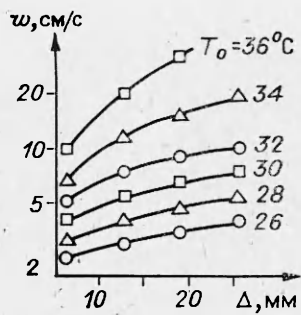


Рис. 2. Зависимость $w(\Delta)$ для слоя бутанола [5] (термостатированная кювета длиной 61 см и шириной 20,6 мм; боковые стенки — стекло, дно — алюминий).

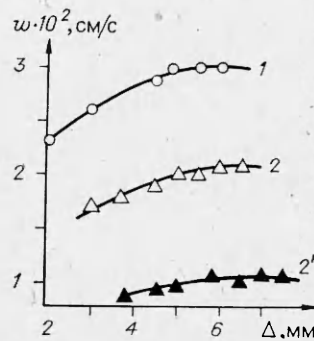


Рис. 3. Зависимость $w(\Delta)$ для горизонтального слоя порошкообразного ПММА на массивной дюралевой подложке [11] (толщина подложки 15, длина 198, ширина 26 мм; горение на воздухе, $T_0 = 18 \div 20^\circ\text{C}$).
1, 2 — ПММА; 2' — 90% ПММА + 10% тетрабромпараксилола; плотность слоя, г/см³; 1 — 0,3; 2, 2' — 0,7.

данные для плоских слоев ПММА различной плотности на массивной подложке с высокой теплопроводностью. Форма кривых $w(\Delta)$ та же, что и на рис. 2.

Напротив, если теплопроводность подложки очень мала, то при уменьшении Δ величина w растет (рис. 4, а). Смысл этого результата достаточно понятен: если волна прогрева уже на достаточно малом удалении от носика пламени наталкивается на теплонепроницаемую подложку, то чем меньше Δ , тем сильнее прогревается слой полимера. Тем самым уменьшение Δ эквивалентно повышению начальной температуры образца, что и приводит к росту w .

Аналогичный результат наблюдается при горении листа полимера с обеих сторон (рис. 4, б). В этом случае волны прогрева, распространяющиеся от левой и правой сторон пластины, схлопываются; чем тоньше пластина, тем сильнее она прогревается и тем быстрее горит. Разумеется, рост w по мере уменьшения Δ будет происходить лишь до тех пор, пока этому не положат конец теплотери в окружающий воздух (их роль растет при уменьшении Δ и соответствующем снижении тепловыделения при сгорании единицы поверхности слоя полимера).

Для цилиндрических стержней твердых горючих скорость пламени растет по мере уменьшения диаметра стержня d (рис. 5). Конечно, к стержням также можно применить только что рассмотренные соображения об увеличении степени их прогрева по мере уменьшения d . Однако для стержней нужно учесть еще один фактор: чем меньше d , тем короче путь диффузии окислителя в зоне горения. Роль этого фактора хорошо известна при горении капель жидкостей (из диффузионной теории Варшавского следует, что скорость горения капли растет обратно пропорционально диаметру капли $\left| \frac{\partial d}{\partial t} \right| = \frac{K}{2d}$).

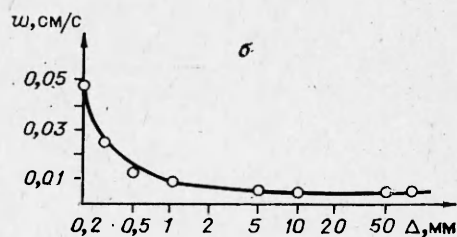
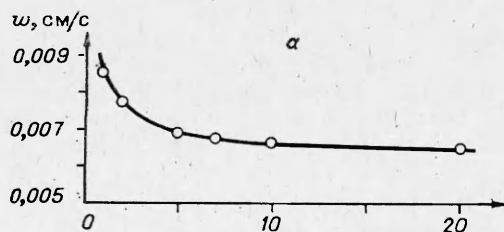


Рис. 4. Зависимость $w(\Delta)$ для пластин ПММА [12] (длина пластины 30, ширина 10 см, горение на воздухе).

а) горизонтальная пластина на подложке из асбеста (толщиной 25,4 мм); б) вертикальная пластина, горящая вниз с обеих сторон.

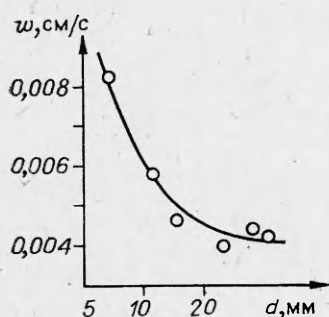


Рис. 5. Зависимость $w(d)$ при горении вертикально вниз стержней ПММА [15] (воздух, $T_0 = 18 \div 20^\circ\text{C}$).

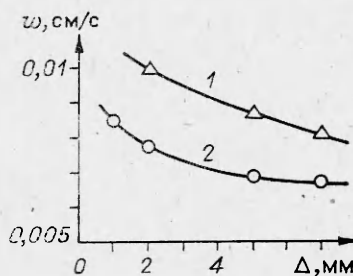


Рис. 6. Зависимость $w(\Delta)$ для горизонтального листа ПММА [12]

1 — между ПММА и асбестом проложена медная фольга (толщиной 25 или 100 мкм); 2 — подложка из асбеста (толщиной 25,4 мм).

На рис. 3 рассмотрено горение пластины полимера на массивной теплопроводящей подложке, когда скорость пламени падала при уменьшении Δ из-за роста теплотерь в подложку. Если, однако, взять тонкую подложку с высокой теплопроводностью, то такая подложка не только не снижает w , но даже может существенно повышать ее за счет интенсификации теплопередачи от зоны горения к свежему веществу (рис. 6). Такая подложка играет роль теплопроводящего элемента¹.

Существенную роль в понимании смысла зависимости $w(\Delta)$ (или $w(d)$) сыграла теоретическая модель де Риса [14]. В ней рассмотрены два предельных случая: термически тонкого и толстого слоев горючего.

Для термически тонкого слоя Δ мала по сравнению с глубиной проникновения волны прогрева уже на достаточно малом удалении от носика пламени. Поэтому слой прогрет равномерно, градиент температуры поперек слоя отсутствует. В этом случае w обратно пропорциональна площади поперечного сечения образца S : для пластины $w \sim 1/\Delta$, а для стержня $w \sim 1/d^2$. Другой предельный случай — термически толстый слой, когда толщина слоя велика по сравнению с глубиной проникновения волны прогрева в пределах зоны, влияющей на скорость горения. Здесь w вообще не зависит от толщины слоя.

Предсказанная в модели де Риса независимость w от Δ (или d) при больших толщинах образца хорошо согласуется с опытом (см. рис. 4, 5). Что касается термически тонкого слоя, то количественного подтверждения модель де Риса пока не получила. Однако из табл. 2, где приведены данные для тонких стержней ПММА, видна тенденция к увеличению показателя n в эмпирической формуле $w \sim 1/d^n$ по мере уменьшения d .

Влияние давления на скорость пламени. Зависимость $w(p)$ изучена главным образом для систем 3 и 5. В случае твердое горючее — газообразный окислитель скорость пламени возрастала с давлением (табл. 3). При анализе этого результата следует учитывать, что повышение давле-

Таблица 2

| Горючее | d , мм | n | Ссылка |
|---------------------------------|----------|-----|--------|
| Стержни ПММА | 6÷20 | 0,8 | [15] |
| | 1,5÷6 | 1,0 | [16] |
| Пленки ПММА на стеклянных нитях | 0,3÷0,6 | 1,7 | [17] |

Таблица 3

| C_{O_2} | w , мм/с при p , атм | | | |
|-----------|--------------------------|------|------|-------|
| | 2,53 | 5,07 | 7,6 | 13,77 |
| 0,233 | 0,21 | — | 0,26 | 0,37 |
| 0,276 | 0,28 | 0,42 | 0,56 | — |
| 0,329 | 0,46 | 0,67 | 0,92 | — |

Примечание. Горючее — пластина ПММА длиной 25,4 мм, ширина и толщина 6,35 мм; окислитель — смесь $O_2 - N_2$. Горение сверху вниз. C_{O_2} — массовая доля O_2 [22].

¹ Возможность увеличения скорости горения с помощью теплопроводящих элементов достаточно подробно изучена при горении ряда конденсированных систем (см. [13], где приведены дальнейшие ссылки).

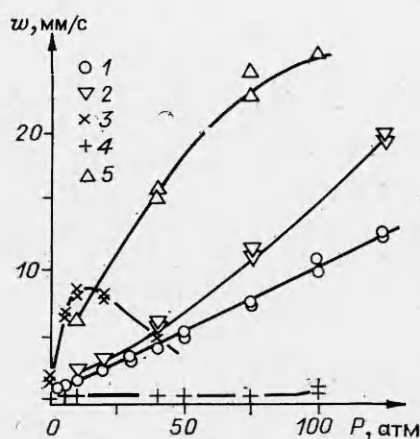


Рис. 7. Влияние давления на скорость пламени в системе ПММА — твердый окислитель [7] (окислители запрессованы в оболочки из ПММА диаметром 6 мм; горение вертикально вниз). 1 — KClO_4 (относительная плотность слоя $\delta = \rho/\rho = 0,84 \div 0,88$); 2 — KClO_3 ($\delta = 0,85 \div 0,89$); 3 — BaO_2 ($\delta = 0,33 \div 0,34$); 4 — KMnO_4 ($\delta = 0,53 \div 0,56$); 5 — стохастическая мелкодисперсная смесь $\text{KClO}_4 + \text{ПММА}$.

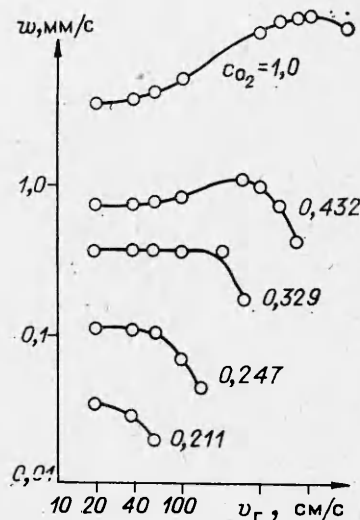


Рис. 8. Зависимость w для толстых листов ПММА от скорости v_r встречного потока смеси $\text{O}_2 - \text{N}_2$ при различной массовой доле O_2 [21] (горение вертикально вниз, $p = 1$ ата).

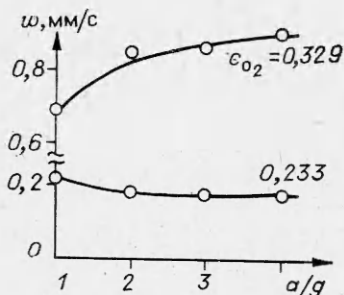


Рис. 9. Влияние перегрузок на скорость горения пластин ПММА при различных C_{O_2} (в смеси $\text{O}_2 - \text{N}_2$) [22] (опыты в камере объемом 37 л на центрифуге, $p = 5,07$ атм, длина пластины 25,4, ширина и толщина 6,35 мм).

ния должно увеличивать скорость химических реакций в гомогенной смеси на носике пламени, но в первом приближении не должно влиять на скорость тепловыделения в диффузионном пламени.

Обращает на себя внимание результат, полученный в [18], где изучено горение листов бумаги. Оказалось, что для толстых листов зависимость $w(p)$ гораздо сильнее, чем для тонких. Если аппроксимировать $w(p)$ степенной функцией $w = a \cdot p^\nu$, то для ν в [18] получено для тонких (0,22 мм) листов $\nu = 0,05 \div 0,1$, а для толстых (1,92 мм) $\nu = 0,63$. Этот результат согласуется с выводами модели де Риса [14], в рамках которой для тонкого слоя $w \neq f(p)$, а для толстого $w \sim p^{2/3}$. Не следует, однако, преувеличивать значимость такого согласия. С одной стороны, опытные данные по зависимости $w(p)$ довольно скудны, а с другой — в модели [14] не учитывается кинетика химических реакций на носике пламени, без чего трудно правильно предсказать вид $w(p)$.

Если в системе твердое горючее — газообразный окислитель скорость пламени монотонно растет с давлением, то при замене газообразного окислителя на твердый вид кривых $w(p)$ гораздо разнообразнее. Так, для системы ПММА — твердый окислитель (рис. 7) скорость пламени монотонно росла с давлением лишь в случае KClO_3 и KClO_4 [7]. Для BaO_2 на кривой $w(p)$ наблюдался максимум (при $p = 10$ атм), вслед за чем величина w убывала с ростом p (при $p = 100$ атм образцы вообще не горели); наконец, для KMnO_4 w практически не зависела от p в интервале $5 \div 75$ атм.

Такое многообразие форм кривых $w(p)$ закономерно. Если при горении ПММА в газообразном кислороде диффузия кислорода в зоне горения ничем не осложнена, то в системе твердое горючее — твердый

окислитель появляются дополнительные факторы. Так, при пиролизе KMnO_4 и BaO_2 образуется слой плотного твердого остатка. Кроме того, пиролиз BaO_2 — обратимая реакция ($\text{BaO}_2 \rightleftharpoons \text{BaO} + 0,5\text{O}_2$), так что увеличение давления тормозит распад BaO_2 .

Влияние концентрации окислителя на скорость пламени. Зависимость $w(C_{\text{ок}})$ подробно изучена для системы твердое горючее — газообразный окислитель. Во всех случаях w росла с увеличением концентрации кислорода (см. табл. 3, рис. 8, 9). Смысл этого результата очевиден, так как рост концентрации кислорода увеличивает и скорость реакции в гомогенной смеси на носике пламени, и скорость тепловыделения в диффузионном пламени.

В [18] при горении листов бумаги в атмосфере $\text{O}_2 - \text{N}_2$ получены следующие значения показателя m в эмпирической формуле $w = bC_{\text{O}_2}^m$: для тонких листов (0,22 мм) $m = 0,9$, для толстых (1,92 мм) $m = 2,1$. Таким образом, согласно [18], для толстых листов горючего не только зависимость $w(p)$ (см. выше), но и $w(C_{\text{O}_2})$ более сильная, чем для тонких листов.

Влияние конвекции. При горении жидкостей в горизонтальных кюветах проведены прямые наблюдения конвекции в жидкости с помощью пузырьковых трассеров [5] (могут быть использованы также добавки порошков или краски). В работах [10, 19] говорится о наличии вихря в жидкости перед носиком пламени. В [20] показано, что конвекция в жидкости способствует увеличению скорости пламени. При подавлении конвекции путем увеличения вязкости жидкости с помощью полимерных добавок значения w падали (в ~ 3 раза, при увеличении кинематической вязкости в 6 раз).

При горении плавящихся твердых горючих значительное влияние на скорость пламени может оказывать стекание расплава. Очевидно, что этот эффект должен сильно зависеть от ориентации образца и направления горения. Так, в [17] изучено горение пленок полиэтилена (ПЭ) и ПММА на медных проволоках. При горении вертикально вниз пленки ПЭ горят в 2—4 раза быстрее, так как расплав стекает вдоль проволоки вниз, по направлению горения, и интенсифицирует теплопередачу от факела пламени к свежей пленке (для ПММА стекания расплава не наблюдается). Напротив, при горении вертикально вверх расплав лишь уносит тепло из зоны горения и растягивает ее. Неудивительно поэтому, что вертикально вверх пленки ПЭ горят примерно вдвое медленнее, чем пленки ПММА.

Существенную роль при горении может играть также конвекция в газе. Табл. 4 иллюстрирует влияние ориентации образца и направления горения на величину w для пленок ПММА на медных проволоках диаметром 300 мкм. Максимальная скорость пламени отмечается при горении вертикально вверх, когда горячие продукты сгорания оттекают по направлению горения и нагревают свежую пленку ПММА. Напротив, минимальная скорость пламени наблюдается при горении вертикально вниз, когда газообразные продукты сгорания оттекают в направлении, противоположном горению.

Рассмотрим теперь влияние вынужденной конвекции. Из рис. 8 следует, что при малой концентрации кислорода величина w монотонно убывает по мере роста скорости встречного потока газа v_r вплоть до затухания образца. При высоких концентрациях кислорода w сначала возрастала с ростом v_r и лишь затем проходила через максимум и начинала падать вплоть до затухания.

Причина снижения w по мере роста v_r представляется тривиальной, так как при этом уменьшается теплопередача от зоны горения к све-

Т а б л и ц а 4

| Направление горения | w , мм/с [17] при Δ , мкм | |
|---------------------|---------------------------------------|------|
| | 100 | 350 |
| Сверху вниз | 5,1 | 1,2 |
| Горизонтально | 6,9 | 1,8 |
| Снизу вверх | 36,3 | 15,5 |

му полимеру. Что касается причин увеличения w с ростом v_r при высоких C_{O_2} , то авторы работы [21] связывают его с уменьшением толщины пограничного слоя. При этом, однако, не объясняется, почему данный эффект наблюдается лишь при $C_{O_2} > C_{O_2}^*$ (на рис. 8 $C_{O_2}^* \approx 0,33$).

Данные по влиянию спутного потока газа на скорость пламени в [21] не приводятся. Можно предположить, что это связано с неопределенностью конфигурации и положения фронта пламени при наличии спутного потока (с подобными трудностями приходится сталкиваться и в случае свободной конвекции при горении образцов вертикально вверх [17]).

Остановимся также на влиянии перегрузок a/g на скорость пламени (здесь a — ускорение, действующее на образец и окружающий газ). Этот случай соответствует естественной конвекции в искусственных (созданных на центрифуге) условиях. Из рис. 9 следует, что при малой концентрации кислорода w падает по мере роста a/g , а при большой концентрации, напротив, увеличивается. Дело в том, что рост перегрузок повышает скорость оттока продуктов сгорания. Это эквивалентно ускорению встречного потока окислителя. Соответственно, можно ожидать, что формы кривых $w(a/g)$ и $w(v_r)$ будут аналогичны. Действительно, такое подобие наблюдается за тем исключением, что на кривых $w(a/g)$ при высокой концентрации кислорода не получено максимума (не исключено, однако, что он будет получен при более высоких a/g).

В заключение отметим, что для распространения пламени по границе контакта слоев горючего и окислителя (так же, как и для других типов пламен) существуют критические условия. Среди них чаще всего рассматривают концентрационный предел по разбавлению окислителя (кислородный индекс), а также пределы по толщине образца, давлению, начальной температуре. Критическим условиям горения слоевых систем посвящено много работ, обзор которых требует отдельной статьи. Равным образом, лишь в специальной статье могут быть рассмотрены методы ингибирования распространения пламени по поверхности контакта слоев горючего и окислителя.

ЛИТЕРАТУРА

1. В. Б. Либрович. ПМТФ, 1962, 4, 33.
2. I. Liebman, J. Corry, H. Perlee. Combust. Sci. Technology, 1970, 1, 4, 257.
3. N. Ishikawa. Combust. Sci. Technology, 1983, 31, 3-4, 109.
4. J. H. Burgoyne, A. F. Roberts. Proc. Roy. Soc., 1968, A 308, 1492, 55.
5. A. M. Kanury. — In: Combustion experiments in a zero-gravity laboratory. N. Y., 1981.
6. Б. А. Иванов, А. С. Мелихов, А. С. Розовский. ФГВ, 1972, 8, 4, 593.
7. Н. П. Бахман. Докл. АН СССР, 1959, 129, 5, 1079.
8. Н. П. Бахман, А. Ф. Беляев. Горение гетерогенных конденсированных систем. М.: Наука, 1967.
9. N. N. Bakhman, V. V. Librovich. Comb. Flame, 1970, 15, 2, 143.
10. R. Mackinven, J. G. Hansel, I. Glassman. Combust. Sci. Technology, 1970, 1, 4, 293.
11. Л. П. Алдабаев, Н. П. Бахман, Б. Н. Кондриков и др. ФГВ, 1981, 17, 2, 82.
12. A. C. Fernandez-Pello, F. A. Williams. 15-th Symp. (Intern.) on Combustion. The Combustion Institute, 1974.
13. Н. П. Бахман, И. П. Лобанов. ФГВ, 1983, 19, 1, 46.
14. J. N. de Ris. 12-th Symp. (Intern.) on Combustion. The Combustion Institute, 1969.
15. Н. П. Бахман, Л. П. Алдабаев. — В кн.: Горение гетерогенных и газовых систем. Черногловка, 1977.
16. M. Sibulkin, C. K. Lee. Combust. Sci. Technology, 1974, 9, 137.
17. N. N. Bakhman, L. I. Aldabaev, B. N. Kondrikov e. a. Comb. Flame, 1981, 41, 1, 17.
18. F. A. Lastrina, R. S. Magee, R. F. Mc Alevy. 13-th Symp. (Intern.) on Combustion. The Combustion Institute, 1971.
19. K. Akita, O. Fujiwara. Comb. Flame, 1971, 17, 2, 268.
20. T. I. Eklund. Combust. Sci. Technology, 1977, 17, 1-2, 73.
21. A. C. Fernandez-Pello, T. Hirano. Combust. Sci. Technology, 1983, 32, 1-4, 1.
22. R. A. Altenkirch, R. Eichorn, A. R. Rizvi. Ibid.

Поступила в редакцию 24/VII 1985,
после доработки — 18/II 1986