

Характерное время химической реакции может быть также выражено [6] через максимальную скорость тепловыделения:  $t_x = \rho_0 c_p T_1 \times \left[ 1 - \frac{T_0}{T_1} \right] / \Phi_{\max}(T_1)$ . Отметим также, что (15), (20) и (22) могут быть использованы для обратной задачи, а именно для оценок по скорости изменения акустического давления и его максимальной величине изменения скорости тепловыделения при переходе к объемному механизму химических реакций и максимальной скорости тепловыделения.

В случае очень быстрых реакций (что возможно, однако, не для условий обычных газовых пламен), когда  $c_1^2 A_1^2 t_x^2 \ll 1$ , пренебрегая левой частью (13), получим, что акустическое давление от монопольного источника звука равно нулю по формуле (12). Это, строго говоря, корректно с различных точек зрения. Во-первых, в этом приближении, соответствующем приближению мгновенного точечного взрыва, давление мгновенно возрастает внутри объема источника, но в этот момент «взрыва» нет никакого давления у измеряющего акустический шум микрофона. Во-вторых, линейная теория вообще не справедлива в этом случае, так как эффект существенно нелинеен, но можно использовать известное автор-модельное решение задачи о точечном взрыве.

В заключение отметим, что, по мнению авторов, такой механизм перехода от фронтального горения к реакциям в объеме, сопровождающегося мощным излучением звука, может играть существенную роль при описании шума турбулентных пламен и приводить к дополнительной турбулизации пламени.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. A. Thomas, G. Williams. Proc. Roy. Soc. A, 1966, 294, 1439, 449.
2. I. R. Hurler, R. V. Price, T. M. Sugden a. o. Proc. Roy. Soc. A, 1968, 303, 1475, 409.
3. D. S. Smith, M. L. Vuillemoz. Noise generated by a premixed vibrating flame. Polytechnic of the South Bank. Technical Mem., London, 1982.
4. B. Dalamagos, N. Kidin, V. Librovich a. o. IX International Colloquim on Gasdynamics and Explosion of Reactive Systems. Poitiers, 1983.
5. Л. Д. Ландау. Механика сплошных сред. М.: Гостехиздат, 1953.
6. Я. Б. Зельдович, Г. И. Баренблатт, В. Б. Либрович и др. Математическая теория горения и взрыва. М.: Наука, 1980.
7. Л. И. Седов. Методы подобия и размерности в механике. М.: Гостехиздат, 1951.

УДК 662.215.1

### ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ КОНДЕНСИРОВАННЫХ СРЕД С ПОГЛОЩАЮЩИМИ ДОБАВКАМИ ПРИ КОНЦЕНТРИРОВАННОМ ПОДВОДЕ ЛУЧИСТОЙ ЭНЕРГИИ

*В. Е. Александров, А. В. Долголаптев, В. Б. Иоффе,  
В. М. Ковальчук, Б. В. Левин, А. П. Образцов*

*(Люберцы)*

Закономерности воспламенения конденсированных сред при воздействии таких источников энергии, как нагретое тело, ударная волна и т. д., изучены довольно подробно. В значительно меньшей степени исследовано воспламенение лучистой энергией при ее концентрированном подводе. Исследования, выполненные в этом направлении, позволили установить характерные особенности процесса:

— необходимость экранирования облучаемой поверхности, например с помощью оптического стекла, что значительно облегчает процесс воспламенения [1];

— влияние диаметра светового пучка на поверхности сред  $d_{\text{п}}$  на величину критической плотности энергии воспламенения  $q_{\text{кр}}$ , которое становится особенно сильным в области малых значений  $d_{\text{п}}$  [2].

Последняя особенность не позволяла провести сопоставление имеющихся экспериментальных данных для различных конденсированных сред в связи с тем, что опыты проведены при различных значениях  $\bar{a}_n$  [1—5]. Как показал выполненный нами анализ, корректное сравнение результатов можно осуществить, используя обобщенную зависимость

$$q_{кр}/q_{кр}^0 = 1 + \frac{1}{(d_n/d_{кр})^3},$$

где  $q_{кр}^0$  — минимальное (асимптотическое) значение критической плотности энергии, соответствующее  $d_n \rightarrow \infty$ , а  $d_{кр}$  — критический диаметр детонации, характеризующий способность среды к высокоскоростному химическому превращению. Тогда по относительному расположению в ряду воспламеняемости лучистой энергией такие вещества, как азид свинца, тэн, гексоген и тетрил, полностью соответствуют ряду, полученному для тех же веществ при воспламенении их нагретым газом [6]. Некоторые количественные расхождения можно объяснить различием оптических поглощательных свойств этих веществ.

Казалось бы, вполне логично предположение о возможности снижения энергетических порогов воспламенения конденсированных сред лучистой энергией путем введения добавок с высоким коэффициентом поглощения, например, таких, как сажа [2]. Однако опыты показывают, что введение сажи (средний размер частиц  $\sim 5$  мкм) не только не облегчает воспламеняемость, но, напротив, оказывает флегматизирующее влияние. Это свидетельствует, по крайней мере, о том, что не только оптические свойства добавки определяют ее влияние на воспламеняемость конденсированных сред. В настоящей работе сделана попытка выявить причины, обуславливающие эффект воздействия поглощающих добавок на воспламенение сред.

Эксперименты проводились по схеме, аналогичной приведенной в [3]. Облучаемые образцы имели диаметр 6, длину 30—60 мм и экранировались оптическим стеклом толщиной 1 мм. Параметры излучения: длина волны 0,69 мкм, полная длительность импульса  $\tau \approx 40$  нс. В каждом опыте измерялась энергия импульса, определялась величина  $d_n$  и вычислялась плотность энергии излучения, падающего на поверхность среды. По результатам экспериментов находилась критическая плотность энергии  $q_{кр}^0$ , соответствующая 50% вероятности воспламенения конденсированных сред.

Опыты проводились на модельных смесях тэна с различными добавками, свойства которых, а также результаты экспериментов и расчета приведены в таблице. В связи с тем, что оптические свойства конденсированной среды и большинства добавок существенно различаются, частицу добавки можно рассматривать как очаг интенсивного поглощения лучистой энергии, результатами которого являются нагрев и, при определенных условиях, испарение вещества добавки. Следы испаренного вещества добавки наблюдаются на поверхности оптического экрана при воздействиях, не вызывающих воспламенение (но близких к нему). Естественно предположить, что взаимодействие имеющих высокую температуру паров добавки со средой является основной причиной начала воспламенения.

В дальнейших построениях считаем, что частицы добавки имеют форму сферы с радиусом  $r_d$  и равномерно распределены в объеме смеси. В соответствии с работой [7] запишем приближенное уравнение энергии для испаряемого вещества добавки

$$W_d \approx \rho_d D (c_d T + Q_n), \quad (1)$$

где  $W_d$  — плотность потока энергии излучения;  $\rho_d$  — плотность добавки;  $D$  — скорость границы испарения;  $c_d$  и  $Q_n$  — удельные теплоемкость и теплота испарения вещества добавки;  $T$  — температура на поверхности раздела фаз (можно принять равной температуре кипения  $T_k$ ).

Добавка	Свойства добавок						Результаты эксперимента и расчета			
	$\rho_{д'}$ , г/см <sup>3</sup>	$T_{к'}$ , К	$\frac{C_{д'}}$ , Дж (кг·К)	$\lambda_{д'}$ , Вт (м·К)	$Q_{и'}$ · 10 <sup>-6</sup> , Дж кг	$C_{о'}$ , м/с	$\bar{W}_{кр'}$ <sup>0</sup> , отн. ед.	$F$	$K$	$\frac{W}{\Gamma ВТ}$ , см <sup>2</sup>
Al	2,67	2333	907	211	10,88	5080	0,164	1,00	0,460	38,3
Be	1,84	2750	1823	182,0	32,62	7934	0,466	0,46	0,351	340,3
Zn	7,13	1186	732	113,0	1,75	3030	0,474	0,98	0,380	15,3
Ti	4,51	3533	627	15,1	9,3	4847	0,500	0,41	0,432	142,0
Sn	7,28	2633	251	62,7	2,75*	2761	0,518	0,48	0,306	46,7
Si	2,40	2633	836	105,0	8,24	6200	0,524	0,98	0,523	30,3
Mo	10,2	5073	272	146,4	6,97*	5192	0,560	1,00	0,434	101,8
Mg	1,74	1380	1033	159,0	5,23	4450	0,566	0,23	0,343	65,4
W	19,3	5803	176	167,0	4,34	4050	0,570	0,97	0,376	116,1
V	6,10	3673	481	—	6,98*	5180	0,572	—	0,210	—
PbO	9,50	1743	217	2,1	0,95	—	0,600	0,37	0,192	—
Bi	9,8	1833	125	8,4	0,96*	1790	0,642	0,06	0,205	169,8
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5,25	—	527	1,3	—	—	0,720	—	0,259	—
Pb	11,34	2023	130	34,7	0,87	2029	0,792	0,04	0,202	322,5
Hf	13,03	5673	142	20,9	1,69	2950	0,808	0,16	0,213	296,9
Cr	7,1	2473	460	29,3	7,08*	5150	0,926	0,22	0,192	711,3
C	2,25	3873	669	5,0	59,80	4057	1,176	0,38	0,578	259,3
Cu	8,90	2583	389	385	4,78	3980	1,396	0,19	0,217	495,2
MgO	3,50	3873	962	0,13	—	—	1,790	0,13	0,151	—
SiO <sub>2</sub>	2,65	2863	740	11,7	4,18	3690	2,056	0,36	0,156	109,7

\* Теплота сублимации.

Согласно кинетической теории испарения [7], при достаточно высокой скорости установления фазового равновесия в веществе и малых временах релаксации скорость границы испарения можно представить как функцию скорости звука  $c_0$

$$D \leq c_0 e^{-U_0/kT}, \quad (2)$$

где  $U_0(T)$  — энергия связи;  $k$  — постоянная Больцмана.

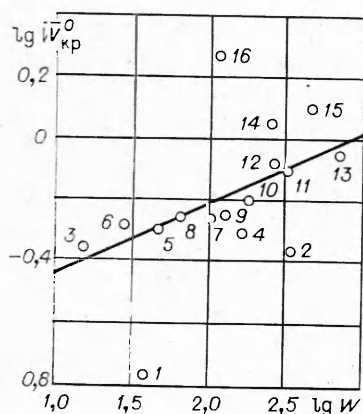
Чтобы учесть влияние размера частиц добавки, введем в выражение (1) рассчитанный по [8] коэффициент  $F = f(\kappa\tau/r_{д'}^2, c_{к.с}/c_{д'})$ , характеризующий теплообмен между частицей добавки и средой, в которой она находится. Здесь  $\kappa$  — коэффициент температуропроводности вещества добавки, а  $c_{к.с}$  — удельная теплоемкость среды. Поскольку корректное описание процесса поглощения излучения смесевыми дисперсными системами представляется затруднительным, долю энергии, поглощаемую смесью конденсированной среды и добавки, оценивали через экспериментально определяемый коэффициент поглощения  $K$ , величина которого определяется в первую очередь оптическими свойствами добавки, размерами и содержанием ее частиц.

С учетом изложенного получим приближенное выражение плотности потока энергии, поглощенной добавкой и переданной в окружающую среду:

$$W \sim \frac{\rho_{д'} c_0 (c_{д'} T_{к'} + Q_{п'})}{FK}, \quad (3)$$

и сопоставим результаты расчета с экспериментально полученными значениями  $W_{кр}^0 = q_{кр}^0/\tau$  (см. рисунок).

В таблице и на рисунке значения  $\bar{W}_{кр}^0$  выражены в относительных единицах (по отношению к  $W_{кр}^0$  для среды, не содержащей добавки).



Сопоставление экспериментальных  $\overline{W}_{кр}^0$  и расчетных  $W$  значений критической плотности потока энергии для сред с поглощающими добавками.

1 — Al; 2 — Be; 3 — Zn; 4 — Ti; 5 — Sn; 6 — Si; 7 — Mo; 8 — Mg; 9 — W; 10 — Bi; 11 — Pb; 12 — Hf; 13 — Cr; 14 — C; 15 — Cu; 16 — SiO<sub>2</sub>.

Анализ графической зависимости показывает, что выбранная модель в целом удовлетворительно описывает воспламенение среды поглощающими дисперсными добавками при концентрированном подводе лучистой энергии. Повышенная активность таких добавок, как Al, Ti и Be, может быть объяснена высокой теплотой сгорания этих веществ.

Таким образом, добавки, способные хорошо поглощать энергию излучения и легко испаряться, заметно повышают воспламеняемость конденсированных сред.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. А. А. Волкова, А. Д. Зинченко, И. В. Санин и др. ФГВ, 1977, 13, 5, 760.
2. А. А. Брип, И. А. Галеев, Б. И. Зайцев и др. ФГВ, 1969, 5, 4, 475.
3. Е. И. Александров, А. Г. Вознюк. ФГВ, 1978, 14, 4, 86.
4. L. C. Jang, V. J. Menichelli. Appl. Phys. Let., 1971, 19, 11, 473.
5. L. C. Jang, V. J. Menichelli. 6-th Symp. (Inter.) on Detonation. V. 2. California, 1976.
6. А. Ф. Беляев, В. К. Боболев, А. И. Коротков и др. Переход горения конденсированных систем во взрыв. М.: Наука, 1973.
7. Ю. В. Афанасьев, О. И. Крохин. Физика высоких плотностей энергии/Под ред. П. Кальдиролы и Г. Кнопфеля. М.: Мир, 1974.
8. J. Taylor. Detonation of condensed Explosives. Oxford at Clarendon Press, 1952.

УДК 536.46

### ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНОГО ГОРЕНИЯ ГАЗИФИЦИРУЮЩЕГОСЯ ТВЕРДОГО ТОПЛИВА ПРИ СПАДЕ ДАВЛЕНИЯ

Б. В. Лидский, Б. В. Новожилов, А. Г. Попов  
(Москва)

**Введение.** Достаточно резкий спад давления в камере сгорания реактивного двигателя может вызывать погасание топлива. Это явление интенсивно изучается как теоретически, так и экспериментально ([1—5], обзоры в [6—7]).

В теоретических работах по гашению спадом давления используются различные модели горения. Наиболее распространенные из них приведены в [8]. Однако чтобы описать горение реального топлива, требуется ввести в модель большое число экспериментально определяемых параметров.

В ряде работ (см. [2, 7, 9]) рассматривается вопрос о критериях погасания топлива при спаде давления, что затрудняется существенной нелинейностью задачи и тем, что погасание определяется не только мгновенными значениями давления и скорости горения, но и всей историей развития процесса во времени. Чтобы воспользоваться предложенными критериями, нужно рассчитать зависимость скорости горения от времени. В связи с этим большое значение приобретает разработка мето-