

Жуге однороден, переобогащение системы приводит к увеличению скорости распространения  $D$  и давления  $\pi$  (см. выше).

Расчетное значение скорости распространения гетерогенной детонации  $D^* = 1938$  м/с хорошо согласуется с экспериментальной величиной  $D = 1870$  м/с, полученной в переобогащенных системах декан — кислород в трубах достаточно большого диаметра [7].

Поступила в редакцию  
23/V 1979

#### ЛИТЕРАТУРА

1. В. Е. Гордеев, В. Ф. Комов и др. Промышл. энергетика, 1964, 12.
2. В. Ф. Комов, Я. К. Трошин. Докл. АН СССР, 1967, 175, 1.
3. С. А. Лесняк, В. Г. Слущкий. ПМТФ, 1974, 3.
4. К. И. Щелкин, Я. К. Трошин. Газодинамика горения. М., Изд-во АН СССР, 1963.
5. Ю. А. Николаев, М. Е. Топчиян. ФГВ, 1977, 13, 3.
6. L. Lees. Combust. and Propulsion. N. Y., Pergamon Press, 1959. (Рус. перев.: Газодинамика и теплообмен при наличии химических реакций. М., ИЛ, 1962).
7. J. R. Bowen, K. W. Ragland et al. 13-th Sympos. (Internat.) on Combust. Utah, 1970.

### РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ДЕТОНАЦИИ СМЕСЕЙ ГОРЮЧИХ ВЕЩЕСТВ С ВОЗДУХОМ

*В. М. Васильев, А. И. Вольперт, Л. В. Клычников,  
Ю. М. Петров, Л. С. Салакатова, Л. П. Стесик*

*(Черноголовка)*

Расчет параметров детонации представляет как научный, так и практический интерес. Наиболее достоверными являются результаты расчета для систем, продукты детонации которых описываются уравнением состояния идеального газа. Это подтверждено рядом исследований, в которых сопоставлялись расчетные и экспериментальные данные [1—3]. Смеси горючих газов с воздухом, а также аэрозвеси распыленных твердых или жидких горючих веществ при начальных давлениях, не превышающих несколько десятков атмосфер, относятся к таким системам. Параметры детонации указанных смесей можно рассчитывать, используя уравнение состояния идеального газа, и в том случае, если часть образующихся продуктов находится в конденсированном состоянии [4].

Применяемый в настоящей работе метод термодинамического расчета равновесного состояния в точке Чепмена — Жуге в некоторых чертах заметно отличается от использованных в работах [3, 5—7]. Сочетание метода Ньютона с движением по параметру (температура — плотность) позволяет рассчитать единым методом ряд аналогичных задач и экономить затраты труда на программирование. Проведение расчетов для систем с произвольным набором химических элементов, с автоматическим выбором всех возможных продуктов реакции, по данным [8], требует применения универсального начального приближения: высокая температура, плотность, близкая к нулю, диссоциация всех продуктов на атомы. Этот метод применяется авторами при решении нескольких задач, в которые в качестве составной части входил расчет термодинамического равновесия. В данной работе метод используется при расчете параметров детонации. Время счета для одного состава на ЭВМ БЭСМ-4 равно 20—30 с, на ЭВМ БЭСМ-6 — менее 3 с.

**Постановка задачи.** Рассматривается одномерное распространение плоской детонационной волны в идеализированных условиях. Предполагается, что в плоскости Чепмена — Жуге устанавливается термодинамическое и газодинамическое равновесие; молекулярный состав продуктов детонации определяется температурой, давлением и составом исходной смеси; газовая и конденсированные фазы имеют одинаковые температуры и скорости массового потока.

Параметры детонационной волны определялись в результате расчета равновесного состава продуктов детонации при фиксированных температуре  $T$  и плотности  $\rho$  с выделением замыкающих соотношений. Скорости детонации  $D$  и массового потока  $U$  вычисляются по известным формулам

$$D = c_1 v_0 \sqrt{(p - p_0)/(v_0 - v)},$$

$$U = c_1 \sqrt{(p - p_0)(v_0 - v)},$$

где  $p$ ,  $p_0$ ,  $v$  и  $v_0$  — давления и удельные объемы продуктов в точке Чепмена — Жуге и исходной смеси;  $c_1$  — переходный коэффициент.

Система уравнений для расчета термодинамического равновесия аналогично работам [3, 5] содержит уравнения атомного баланса

$$\sum_{j=1}^N a_{ij} n_j + \sum_{j=1}^m a'_{ij} \bar{n}_j = \alpha_i, \quad i = 1, \dots, n, \quad (1)$$

уравнения закона действующих масс для газообразных продуктов

$$k_i p_i = \prod_{j=1}^n p_j^{a_j^i}, \quad i = n + 1, \dots, N, \quad (2)$$

уравнения состояния идеального газа для каждого из газообразных продуктов

$$p_i = n_i R T \rho, \quad i = 1, \dots, N. \quad (3)$$

Кроме того, в систему вводятся соотношения давления насыщенных паров

$$p_i \leq \pi_i, \quad i = 1, \dots, m_1, \quad (4)$$

и равновесия с газообразными продуктами для конденсированных продуктов, не имеющих газовой фазы того же состава

$$k'_i \geq \prod_{j=1}^n p_j^{a_j^i}, \quad i = m_1 + 1, \dots, m. \quad (5)$$

Соотношения (4), (5) следует понимать следующим образом: если некоторое  $\bar{n}_i > 0$  ( $i = 1, \dots, m$ ), то соответствующее соотношение (4) или (5) является уравнением, в противоположном случае оно заменяется неравенством.

Уравнение сохранения энергии имеет вид

$$c_2(p - p_0)(v_0 + v) - (I - I_0) = 0, \quad (6)$$

а условие минимума энтропии при выполнении системы (1) — (6):

$$S = S_{\min}. \quad (7)$$

Исходные данные:  $n$  — число химических элементов;  $N$  — число газообразных продуктов;  $m$  — число конденсированных продуктов;  $m_1$  — число конденсированных продуктов, для которых уравнение равновесия задается давлением насыщенных паров того же состава;  $n \leq m_1 \leq m$ ;  $a_{ij}$ ,  $a'_{ij}$  — стехиометрические коэффициенты;  $\alpha_i$  — количество грамм-молей химического элемента;  $p_0$  — начальное давление;  $v_0$  — начальный объем;  $I_0$  — энтальпия исходной смеси;  $R$ ,  $R_0$ ,  $c_1$ ,  $c_2$  — константы, связанные с размерностью. Искомые величины:  $T$  — температура;  $\rho$  — плотность газо-

вой смеси;  $p_i$  — парциальное давление газообразного продукта;  $n_i$  — число молей газообразного продукта;  $\bar{n}_i$  — число молей конденсированного продукта.

Давление вычисляется по закону Дальтона

$$p = \sum_{i=1}^N p_i.$$

Объем  $v$  состоит из объемов газообразных и конденсированных продуктов

$$v = 1/\rho + \sum_{i=1}^m \bar{v}_i \bar{n}_i,$$

где  $\bar{v}_i$  — удельный объем моля конденсированного продукта.

Энтальпия  $I$  и энтропия  $S$  вычисляются по формулам

$$I = \sum_{i=1}^N I_i n_i + \sum_{i=1}^m \bar{I}_i \bar{n}_i,$$

$$S = \sum_{i=1}^N n_i (S_i - R_0 \ln p_i) + \sum_{i=1}^m \bar{S}_i \bar{n}_i.$$

Константы равновесия  $k_i, k'_i$ , давления насыщенных паров  $\pi_i$ , мольные энтальпии и энтропии продуктов  $I_i, \bar{I}_i, S_i, \bar{S}_i$  являются известными функциями температуры, которые вычисляются по данным [8].

**Преобразование системы уравнений.** Введем новые неизвестные

$$\bar{q}_i = (n_i + \bar{n}_i) RT \rho, \quad i = 1, \dots, m. \quad (8)$$

Теперь (4) можно записать в виде

$$\dot{p}_i = \pi_i \chi(\bar{q}_i / \pi_i), \quad i = 1, \dots, m_1, \quad (9)$$

где

$$\chi(\bar{t}) = \begin{cases} \bar{t} & \text{при } 0 \leq \bar{t} < 1, \\ 1 & \text{при } \bar{t} \geq 1. \end{cases}$$

Путем подстановки величин  $n_i$  ( $i = 1, \dots, N$ ) из (3) и  $p_i$  ( $i = m + 1, \dots, N$ ) из (2) в уравнения (1) с использованием (8), (9) система (1)–(5) из  $2N + m$  соотношений сводится к системе  $m$  соотношений относительно  $\bar{q}_1, \dots, \bar{q}_m, \rho, T$

$$f_j(\bar{q}_1, \dots, \bar{q}_m, \rho, T) = 0, \quad j = 1, \dots, m. \quad (10)$$

Левые части (10) получаются из (1) для  $i \leq j \leq n$  первых  $m_1 - n$  уравнений (2) при  $n + 1 \leq j \leq m_1$  и из (5) — при  $m_1 + 1 \leq j \leq m$ .

Величины  $p_i$  и  $k_i$ , входящие в (2), при понижении температуры стремятся к нулю. Для работы с этими величинами на ЭВМ возможно либо введение логарифмов этих величин, либо их нормировка. Воспользуемся одной из возможных нормировок. Неизвестные  $\bar{q}_i$  ( $i = 1, \dots, m$ ) нормируются по формуле

$$q_i = \bar{q}_i \cdot 2^{\beta_i},$$

где  $\beta_i$  — целые;  $0,5 \leq q_i < 1$ . В соответствии с этим нормируются  $\pi_i$  так, чтобы  $q_i / \pi_i$  не изменило величины. В силу (9)  $p_i$  ( $i = 1, \dots, m_1$ ) получат соответствующую нормировку. Нормировка  $k_i$  ( $i = n + 1, \dots, N$ ) производится так, чтобы не изменилась величина  $p_i$  в (2). Обозначим пропормированные величины  $p_i$  и  $k_i$  через  $\bar{p}_i$  и  $\bar{k}_i$ . Величины  $k_i$  ( $i = n + 1, \dots, m_1$ ) дополнительно нормируются по формуле

$$\bar{k}_i = k_i p_i / \bar{p}_i.$$

При изменении температуры нормировка проводится на основании результатов, полученных при предыдущей температуре.

**Метод решения.** Решаем систему (10) при фиксированных  $T, \rho$ . Решение замыкающих соотношений (6) и (7) не требует подробного описания. Решение (6) выполняется шагами по  $\rho$  и  $T$  до перемены знака, а затем методом хорд в сочетании с делением пополам. Из уравнения (6) определяется кривая в плоскости  $T, \rho$ . Минимум энтропии (7) ищется вдоль этой кривой шагами в направлении убывания, а затем последовательным делением пополам отрезков в районе текущего минимального значения.

Система (10) решается «осторожным методом Ньютона»; матрица  $\partial f_i / \partial q_j$  вычисляется точным дифференцированием  $f_i$  на каждой итерации. Смысл термина «осторожный метод Ньютона» состоит в том, что обеспечивается неотрицательность всех  $q_i$  ( $i = 1, \dots, m$ ) (в соответствии с их физическим смыслом), и, более того, вводится требование, чтобы ни одно из  $q_i$  за одну итерацию не могло измениться слишком сильно. Точнее, пусть  $\Delta_i^l$  ( $i = 1, \dots, m$ ) — решение системы линейных уравнений на  $l$ -й итерации. Тогда

$$q_i^{l+1} = q_i^l + \Delta_i^l, \quad i = 1, \dots, m.$$

Выберем число  $h > 1$  и рассчитаем величины  $v_j$  ( $0 < v_j \leq 1$ )

$$1/h \leq (q_j^l + v_j \Delta_j^l) / q_j^l \leq h.$$

Вычислим  $\min_j v_j = \mu$ . Пусть  $\mu = v_{i1}$ . Если  $\mu \geq 0,1$ , то принимаем

$$q_j^{l+1} = q_j^l + \mu \Delta_j^l, \quad j = 1, \dots, m.$$

Если  $\mu < 0,1$ , то вычислим  $\mu_1 = \min_{j \neq i1} v_j$ . Пусть  $\mu_1 = v_{i2}$ . Принимаем

$$q_j^{l+1} = q_j^l + \mu_1 \Delta_j^l, \quad j \neq i1,$$

$$q_{i1}^{l+1} = h q_{i1}^l \quad (\text{если } \Delta_{i1}^l > 0),$$

Т а б л и ц а 1

Горючее, %	$v_0$ , л/кг	$p$ , атм	$D$ , м/с	$U$ , м/с	$T$ , К	Горючее, %	$v_0$ , л/кг	$p$ , атм	$D$ , м/с	$U$ , м/с	$T$ , К
Метан						Пропан					
2	842,7	9,40	1320	544	1611	2	823,3	9,15	1288	530	1552
3	849,4	12,39	1520	646	2075	3	820,5	12,20	1484	628	2010
4	856,1	14,94	1666	726	2450	4	817,6	14,92	1630	707	2390
5	862,8	16,90	1768	786	2700	5	814,8	17,19	1734	770	2670
5,45 *	865,4	17,48	1798	804	2761	5,95 *	812,1	18,64	1799	807	2813
6	869,5	17,76	1821	811	2784	7	809,1	19,23	1832	815	2839
7	876,2	17,50	1827	802	2700	10	800,6	18,05	1794	771	2469
8	882,9	16,78	1807	781	2540	12	794,9	16,82	1732	736	2166
10	896,2	15,23	1743	741	2200						
12	909,6	13,51	1658	695	1860						
Углерод						Алюминий					
3	804,5	9,54	1300	535	1634	6	779,3	13,48	1512	652	2352
4	796,2	11,71	1435	603	1979	8	762,9	16,20	1631	720	2820
5	787,9	13,83	1541	664	2294	10	746,3	18,38	1715	766	3212
6	779,6	15,68	1626	713	2550	12	729,7	20,26	1781	800	3562
7	771,3	17,10	1682	749	2726	14	713,1	22,10	1832	832	3880
7,94 *	763,1	18,06	1715	769	2824	16	696,6	23,45	1856	853	4086
9	754,7	18,61	1735	776	2868	18	680,0	24,26	1861	861	4130
10	746,4	18,64	1737	768	2842	20,54 *	658,7	24,85	1854	859	4313
11	738,1	18,16	1720	746	2743	22	646,8	25,03	1846	853	4234
12	729,8	17,43	1686	721	2592	24	630,2	25,26	1832	846	4230
13	721,6	16,66	1642	697	2423	26	613,7	25,49	1815	839	4210
						28	597,1	25,65	1795	831	4160

Таблица 2

Содержание горючего, %	Продукты дегонания																
	N <sub>2</sub>	NO	CO <sub>2</sub>	CO	H <sub>2</sub> O	OH	H <sub>2</sub>	H	O <sub>2</sub>	O	Ag	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al (газ)	Al <sub>2</sub> O	Al <sub>2</sub> O	N	
Метано-воздушные смеси																	
CH <sub>4</sub>																	
3,0	25,79	0,215	1,88	—	4,19	—	—	—	3,11	—	0,308	—	—	—	—	—	—
5,45 *	25,12	0,26	0,82	0,82	6,75	0,34	0,31	0,06	0,34	0,04	0,300	—	—	—	—	—	—
8,0	24,56	—	1,36	3,64	7,29	0,042	3,07	0,08	—	—	0,292	—	—	—	—	—	—
10,0	24,03	—	0,93	5,31	6,22	—	6,67	0,024	—	—	0,286	—	—	—	—	—	—
12,0	23,50	—	0,76	6,73	4,86	—	10,54	—	—	—	0,279	—	—	—	—	—	—
Аэрозоль углерода																	
C																	
6,0	24,90	0,408	4,75	0,26	0,42	0,07	—	—	1,65	0,03	0,298	—	—	—	—	—	—
7,94 *	24,39	0,347	5,08	1,59	0,38	0,10	0,02	0,02	0,53	0,06	0,292	—	—	—	—	—	—
10,0	23,97	0,127	4,36	3,98	0,36	0,06	0,05	0,03	0,07	0,02	0,286	—	—	—	—	—	—
12,0	23,49	0,011	2,78	7,22	0,30	0,01	0,12	0,02	—	—	0,279	—	—	—	—	—	—
14,0	22,96	—	1,00	10,67	0,14	—	0,28	—	—	—	0,273	—	—	—	—	—	—
Аэрозоль алюминия																	
Al																	
12,0	22,81	1,37	—	—	0,16	0,35	0,03	0,14	1,82	0,91	0,279	2,22	—	—	—	—	—
16,0	21,87	1,11	—	—	0,05	0,27	0,04	0,39	0,59	1,41	0,267	2,75	0,12	0,17	0,07	—	—
20,51 *	20,90	0,75	—	—	0,03	0,18	0,04	0,47	0,25	1,10	0,253	2,83	0,57	0,40	0,43	0,02	0,02
28,0	19,09	0,26	—	—	0,02	0,08	0,06	0,48	0,03	0,35	0,235	2,62	1,38	0,42	1,68	0,01	0,01
36,0	17,09	—	—	—	—	—	0,17	0,26	—	—	0,200	1,87	1,83	0,05	3,84	—	—

Содержание $C_2H_2$ , %	Параметры					Продукты детонации					
	$v_0$ , л/кг	$p$ , атм	$D$ , м/с	$U$ , м/с	$T$ , К	$N_2$	$NO$	$CO_2$	$CO$	$H_2O$	$OH$
3	831,7	12,28	1498	635	2100	25,8	0,26	2,31	—	1,61	0,04
4	832,7	14,90	1642	714	2500	25,4	0,49	2,98	0,10	1,92	0,15
5	833,6	16,96	1742	773	2790	25,1	0,63	3,45	0,50	2,17	0,31
6	834,6	18,41	1811	809	2970	24,8	0,63	3,36	1,26	2,39	0,45
6,96 *	835,5	19,43	1861	839	3090	24,5	0,57	3,13	2,26	2,57	0,53
8	836,5	20,27	1904	858	3180	24,3	0,47	2,77	3,39	2,78	0,55
10	838,4	21,38	1966	881	3250	23,9	0,26	1,89	5,80	2,77	0,45
12	840,2	21,90	2006	890	3240	23,5	0,10	1,08	8,15	2,36	0,26
16	844,0	22,15	2041	888	3070	22,4	—	0,04	12,3	0,16	—
20	847,9	20,95	1947	880	2835	20,1	—	—	11,9	—	—
24	851,7	21,08	1950	888	2856	18,9	—	—	11,3	—	—
28	855,5	21,15	1953	894	2875	17,7	—	—	10,7	—	—
32	861,2	21,20	1957	901	2900	16,5	—	—	10,1	—	—
40	866,9	21,22	1959	906	2923	14,3	—	—	8,93	—	—
50	876,4	21,19	1962	914	2956	11,5	—	—	7,44	—	—
60	885,9	21,11	1964	919	2987	8,78	—	—	5,95	—	—
70	895,4	21,00	1965	923	3016	6,20	—	—	4,46	—	—
80	904,9	20,85	1966	925	3045	3,76	—	—	2,98	—	—
90	914,4	20,78	1968	931	3077	1,54	—	—	1,49	—	—
100	923,85	20,77	1977	936	3128	—	—	—	—	—	—

ИЛИ

$$q_{i1}^{l+1} = q_{i1}^l / h \quad (\text{если } \Delta_{i1}^l > 0).$$

На следующей,  $l+1$ -й, итерации повторим тот же алгоритм. Если окажется, что наименьшее из  $v_j$  (или следующее за ним по величине) опять имеет номер  $i1$  (или  $i2$ ) и, кроме того,  $\Delta_j^{l+1} \cdot \text{sign } \Delta_j^l < 0$ ,  $j = i1$  или  $i2$  (ситуация отрезка перемены знака), то индивидуально для неизвестной  $q_j$  и только при фиксированных  $T$ ,  $\rho$  величина  $h$  «дробится пополам». В нашем алгоритме принято основное значение  $h = 16$ , а для ее «дробления пополам» предусмотрены величины 4, 2,  $\sqrt{2}$ .

Если одна из  $q_j$  выйдет по ходу итераций из интервала  $10^{-4} \leq q \leq 10^4$ , то производится повторная нормировка всех величин. Точность решения системы (10) проверяется по максимуму  $|f_j|$  и выбирается с несколькими градациями в зависимости от близости к решению уравнения (6).

За начальное приближение при решении очередного варианта принимается решение предыдущего варианта или, если таким решением нельзя воспользоваться, физически естественное начальное приближение — при большой температуре и малой плотности — диссоциация на атомы.

**Результаты расчетов.** Ниже приводятся результаты расчетов параметров детонации смесей или взвесей горючих материалов — метана, пропана, ацетилена, углерода и алюминия — с воздухом. Расчеты приведены при исходном давлении, равном одной физической атмосфере, и температуре 20°C. В расчетах принималось, что воздух имеет относительную влажность 60%. Брутто-формула одного килограмма воздуха имеет вид:  $N_{53,404}O_{14,887}Ar_{0,317}H_{0,988}C_{0,010}$ , теплосодержание ( $\Delta H_{f293,15}$ )

Таблица 3

Продукты детонации											
H <sub>2</sub>	H	O <sub>2</sub>	O	HCN	CN	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	C <sub>2</sub> H	CH <sub>2</sub>	CH <sub>3</sub>	C <sub>контд</sub>	CH <sub>4</sub>
—	—	3,95	—	—	—	—	—	—	—	—	—
0,01	—	2,81	0,04	—	—	—	—	—	—	—	—
0,05	0,02	1,86	0,10	—	—	—	—	—	—	—	—
0,12	0,07	1,20	0,15	—	—	—	—	—	—	—	—
0,24	0,14	0,74	0,18	—	—	—	—	—	—	—	—
0,42	0,23	0,43	0,17	—	—	—	—	—	—	—	—
1,07	0,44	0,11	0,11	—	—	—	—	—	—	—	—
2,24	0,62	0,02	0,04	—	—	—	—	—	—	—	—
6,05	0,67	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
6,33	0,33	—	—	2,39	0,14	0,36	0,02	—	—	0,14	—
7,59	0,38	—	—	2,64	0,16	0,46	0,02	—	—	3,34	—
8,85	0,43	—	—	2,86	0,17	0,58	0,02	—	—	6,54	—
10,1	0,50	—	—	3,04	0,17	0,69	0,03	0,01	—	9,77	—
12,7	0,61	—	—	3,33	0,19	0,96	0,04	0,01	—	16,2	—
15,9	0,76	—	—	3,54	0,20	1,33	0,05	0,02	0,01	24,4	—
19,1	0,92	—	—	3,58	0,20	1,75	0,07	0,03	0,02	32,6	0,012
22,4	1,08	—	—	3,41	0,20	2,23	0,09	0,04	0,03	40,9	0,016
25,7	1,26	—	—	2,98	0,18	2,79	0,12	0,04	0,03	49,4	0,021
29,1	1,48	—	—	2,13	0,13	3,46	0,15	0,06	0,04	58,0	0,026
32,7	1,81	—	—	—	—	4,46	0,22	0,07	0,05	67,3	0,031

составляет 28,5 ккал/кг. Соотношение компонентов изменялось в широком диапазоне, выходящем за рамки экспериментально определенных концентрационных пределов детонации. Расчетные данные представлены в табл. 1—3, в которые включены значения массовых концентраций горючего в смеси, удельного объема исходной смеси ( $v_0$ ), давления ( $p$ ), температуры ( $T$ ) и скорости потока ( $U$ ) в плоскости Чепмена — Жуге, скорости детонационного фронта ( $D$ ), а также состав продуктов детонации в точке Чепмена — Жуге, выраженный в грамм-молях на килограмм смеси. Стехиометрические концентрации горючего отмечены звездочкой. Максимальная скорость детонации смесей метана, пропана и углерода с воздухом (см. табл. 1) достигается при концентрациях горючего, превышающих стехиометрические. В случае аэрозвеси алюминия максимум скорости детонации сдвинут в область бедных смесей, что обусловлено наличием в продуктах детонации конденсированной фазы (жидкая окись алюминия). Влияние конденсированной фазы на скорость детонации рассмотрено в работе [4]. В табл. 2 представлены составы продуктов детонации некоторых смесей метана, углерода и алюминия с воздухом. В таблицу включены те вещества, содержание которых превышает 0,005 г-моль на 1 кг смеси.

Детонация смесей ацетилена с воздухом рассмотрена в широком диапазоне концентраций ацетилена (от 3 до 100%), поскольку ацетилен способен к самостоятельной детонации. Результаты расчетов представлены в табл. 3 (содержание аргона в таблице не приводится). Здесь наблюдаются два максимума скорости детонации, соответствующие содержанию ацетилена 16% (2041 м/с) и 100% (1977 м/с). Следует отметить, что тепловыделение в детонационной волне также имеет два максимума — при 12 и 100% ацетилена. Первый максимум тепловыделения сильно сдвинут в область богатых смесей, что обусловлено высоким

положительным теплосодержанием ацетилена. Расположенные между максимумами минимумы скорости детонации и тепловыделения соответствуют практически одному и тому же составу, содержащему около 20% ацетилена.

*Поступила в редакцию  
2/IV 1979,  
после доработки —  
13/XI 1979*

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Б. Льюис, Г. Эльбе. Горение, пламя и взрывы в газах. М., Мир, 1968.
  2. С. Эйзен, Р. Гросс, I. Ривлин. Вопросы ракетной техники, 1961, 1, 20.
  3. W. A. Strauss, J. N. Scott. Comb. and Flame, 1972, 19, 1, 141.
  4. Л. Н. Стесик. ФГВ, 1971, 7, 1, 111.
  5. Ю. А. Николаев, М. Е. Топчийн. ФГВ, 1977, 13, 3, 393.
  6. F. J. Zeleznik, S. Gordon. NASA TND — 1737, 1962.
  7. В. Е. Алемасов, А. Ф. Дрегалин и др. Термодинамические и теплофизические свойства продуктов сгорания. Т. 1. Методы расчета. М., ВИНТИ, 1971.
  8. Термодинамические свойства индивидуальных веществ. Справочник. Под ред. В. П. Глушко. М., Изд-во АН СССР, 1962.
-