

ИЗЭНТРОПИЧЕСКОЕ РАСШИРЕНИЕ  
ПРОДУКТОВ ДЕТОНАЦИИ ГЕКСОГЕНА

Н. М. Кузнецов, К. К. Шведов  
(Москва)

В работе [1] было получено уравнение состояния продуктов детонации гексогена, которое пригодно для расчетов параметров состояния и движения продуктов детонации (ПД) во всем диапазоне плотностей — от точек Жуге (для любой возможной плотности заряда) до плотности, равной нулю.

Уравнение состояния [1] выражает в трансцендентной форме зависимость между внутренней энергией  $E$ , давлением  $p$ , плотностью  $\rho$  и температурой  $T$  и позволяет получить любую из этих функций по двум другим. Оно не содержит энтропии  $S$  в явном виде и для получения с его помощью каких-либо изэнтропических зависимостей необходимо использовать дифференциальное соотношение, выражающее условие постоянства  $S$ , например,

$$dE = p \frac{d\rho}{\rho^2}. \quad (1)$$

Интегрирование (1) или другого эквивалентного соотношения с уравнением состояния [1] аналитическим путем невозможно и требует применения численных методов.

В настоящей работе приведены результаты численного интегрирования уравнения (1) с уравнением состояния [1]. В результате машинных расчетов получены зависимости  $p$ , тепловой части давления  $p_t$ , ра-

боты адиабатического расширения ПД  $R = - \int p \frac{d\rho}{\rho^2}$ , скорости звука  $c$  и показателя изэнтропы  $n$  от плотности для семейства адиабат. В соответствии с наиболее типичными задачами, в которых полученные данные могут быть использованы, проведено два варианта расчетов.

Первый вариант (табл. 1) описывает изменение указанных параметров при изэнтропическом расширении ПД из точек Жуге. Каждая отдельная часть табл. 1 характеризуется своим значением плотности заряда  $\rho_1$ , что соответствует определенным значениям плотности ПД  $\rho_2$  и других параметров в точке Жуге. (Связь между  $\rho_1$  и  $\rho_2$ , использованная в заголовках к каждой таблице, взята из работы [1].) Линии постоянной энтропии табл. 1 необходимы при изучении газодинамики и кинетики разлета ПД.

Второй вариант (табл. 2) представляет изэнтропическое расширение из начальных состояний, в которых плотность продуктов равна плотности заряда, а внутренняя энергия — теплоте взрыва («мгновенный

Таблица 1

$\rho$ , г/см <sup>3</sup>	$T \cdot 10^3$ , °K	$\rho_T$ , тыс. атм	$\rho$ , тыс. атм	$R$ , кдж/г	$c$ , км/сек	$n$
1	2	3	4	5	6	7
$\rho_1=1,8$ г/см <sup>3</sup> , $\rho_2=2,4$ г/см <sup>3</sup>						
2,4	4,16	208,1	348,4	0,000	6,32	2,75
2,2	3,83	171,0	274,0	1,18	5,87	2,77
2,0	3,51	137,5	210,3	2,28	5,41	2,79
1,8	3,20	107,5	156,5	3,29	4,95	2,82
1,6	2,91	81,10	111,9	4,21	4,48	2,87
1,4	2,64	58,43	75,99	5,03	3,99	2,97
1,2	2,40	39,67	48,14	5,75	3,46	2,99
1,0	2,18	25,04	27,84	6,36	2,89	3,00
0,8	1,96	14,54	14,36	6,87	2,28	2,90
0,6	1,74	7,654	6,445	7,27	1,68	2,64
0,4	1,49	3,463	2,433	7,59	1,14	2,16
0,2	1,16	1,068	0,687	7,90	0,73	1,54
0,05	0,71	0,134	0,104	8,27	0,51	1,26
$\rho_1=1,66$ г/см <sup>3</sup> , $\rho_2=2,2$ г/см <sup>3</sup>						
2,2	4,26	187,2	290,2	0,00	6,02	2,75
2,0	3,91	150,3	223,1	1,17	5,56	2,77
1,8	3,58	117,3	166,3	2,24	5,09	2,81
1,6	3,27	88,30	119,1	3,22	4,61	2,85
1,4	2,98	63,47	81,04	4,10	4,10	2,91
1,2	2,72	43,05	51,53	4,87	3,56	2,95
1,0	2,48	27,25	30,06	5,23	2,97	2,94
0,8	2,24	15,96	15,78	6,07	2,35	2,81
0,6	2,00	8,518	7,308	6,52	1,75	2,52
0,4	1,72	3,917	2,887	6,90	1,22	2,06
0,2	1,36	1,232	0,851	7,27	0,80	1,52
0,05	0,86	0,160	0,130	7,73	0,57	1,26
$\rho_1=1,51$ г/см <sup>3</sup> , $\rho_2=2,0$ г/см <sup>3</sup>						
2,0	4,35	163,9	236,7	0,00	5,71	2,76
1,8	4,00	127,6	176,6	1,15	5,24	2,79
1,6	3,67	95,89	126,7	2,19	4,74	2,84
1,4	3,36	68,79	86,36	3,13	4,22	2,89
1,2	3,08	46,65	55,12	3,95	3,66	2,92
1,0	2,82	29,64	32,43	4,65	3,05	2,88
0,8	2,56	17,50	17,32	5,25	2,43	2,72
0,6	2,29	9,462	8,252	5,74	1,82	2,42
0,4	1,98	4,415	3,385	6,18	1,29	1,98
0,2	1,57	1,412	1,032	6,63	0,88	1,49
0,05	1,02	0,189	0,159	7,18	0,63	1,26
$\rho_1=1,34$ г/см <sup>3</sup> , $\rho_2=1,8$ г/см <sup>3</sup>						
1,8	4,46	138,5	187,5	0,00	5,39	2,79
1,6	4,10	103,8	134,6	1,12	4,88	2,83
1,4	3,78	74,35	91,91	2,11	4,34	2,87
1,2	3,48	50,44	58,91	2,99	3,76	2,88
1,0	3,19	32,18	34,97	3,75	3,14	2,82
0,8	2,91	19,16	18,98	4,39	2,50	2,64
0,6	2,60	10,49	9,276	4,94	1,90	2,33
0,4	2,26	4,955	3,925	5,44	1,37	1,92
0,2	1,81	1,608	1,227	5,97	0,95	1,48
0,05	1,19	0,220	0,190	6,63	0,69	1,26
$\rho_1=1,18$ г/см <sup>3</sup> , $\rho_2=1,6$ г/см <sup>3</sup>						
1,6	4,58	111,9	142,7	0,00	5,02	2,82
1,4	4,23	80,04	97,60	1,07	4,46	2,86
1,2	3,91	54,35	62,83	2,00	3,86	2,85
1,0	3,75	43,84	49,09	2,42	3,54	2,82
0,8	3,44	27,23	28,25	3,17	2,90	2,67

Окончание табл. 1

1	2	3	4	5	6	7
0,6	2,95	11,57	10,36	4,12	1,97	2,26
0,4	2,56	5,531	4,500	4,68	1,45	1,87
0,2	2,07	1,817	1,436	5,29	1,03	1,47
0,05	1,38	0,254	0,224	6,07	0,75	1,25
$\rho_1=1,01 \text{ г/см}^3, \rho_2=1,4 \text{ г/см}^3$						
1,4	4,70	85,73	103,3	0,00	4,57	2,84
1,2	4,35	58,31	66,78	1,00	3,95	2,81
1,0	4,02	37,54	40,34	1,87	3,30	2,70
0,8	3,68	22,73	22,56	2,62	2,65	2,49
0,6	3,31	12,70	11,49	3,29	2,05	2,19
0,4	2,88	6,126	5,10	3,92	1,53	1,83
0,2	2,33	2,032	1,65	4,62	1,10	1,46
0,05	1,58	0,288	0,259	5,11	0,81	1,25
$\rho_1=0,85 \text{ г/см}^3, \rho_2=1,2 \text{ г/см}^3$						
1,2	4,81	62,20	70,67	0,00	4,04	2,77
1,0	4,45	40,23	43,03	0,93	3,38	2,65
0,8	4,07	24,55	24,37	1,74	2,72	2,44
0,6	3,67	13,82	12,61	2,46	2,12	2,14
0,4	3,21	6,724	5,695	3,16	1,60	1,80
0,2	2,60	2,252	1,870	3,95	1,17	1,45
0,05	1,77	0,323	0,294	4,97	0,86	1,25
$\rho_1=0,7 \text{ г/см}^3, \rho_2=1,0 \text{ г/см}^3$						
1,0	4,88	42,89	45,69	0,00	3,45	2,60
0,9	4,68	33,88	34,89	0,45	3,12	2,50
0,8	4,47	26,34	26,16	0,87	2,79	2,38
0,7	4,26	20,09	19,19	1,27	2,48	2,25
0,6	4,04	14,94	13,73	1,66	2,19	2,10
0,5	3,80	10,73	9,509	2,04	1,92	1,93
0,4	3,53	7,320	6,290	2,42	1,67	1,77
0,3	3,23	4,591	3,872	2,83	1,44	1,60
0,2	2,88	2,468	2,088	3,30	1,23	1,45
0,1	2,37	0,915	0,804	3,93	1,03	1,31
0,05	1,97	0,358	0,329	4,43	0,91	1,25
$\rho_1=0,54 \text{ г/см}^3, \rho_2=0,8 \text{ г/см}^3$						
0,8	4,88	28,16	27,98	0,00	2,86	2,34
0,7	4,65	21,55	20,65	0,44	2,55	2,20
0,6	4,41	16,08	14,87	0,86	2,26	2,06
0,5	4,15	11,59	10,36	1,27	1,99	1,90
0,4	3,87	7,927	6,896	1,69	1,74	1,75
0,3	3,54	4,986	4,268	2,14	1,50	1,58
0,2	3,15	2,690	2,309	2,65	1,28	1,44
0,1	2,61	1,002	0,891	3,35	1,08	1,31
0,05	2,17	0,394	0,364	3,91	0,96	1,25
$\rho_1=0,38 \text{ г/см}^3, \rho_2=0,6 \text{ г/см}^3$						
0,6	4,83	17,33	16,12	0,00	2,33	2,02
0,5	4,54	12,53	11,30	0,46	2,06	1,87
0,4	4,24	8,594	7,564	0,92	1,81	1,72
0,3	3,89	5,422	4,704	1,41	1,57	1,58
0,2	3,46	2,935	2,554	1,98	1,35	1,44
0,1	2,87	1,098	0,987	2,76	1,14	1,31
0,05	2,39	0,433	0,403	3,38	1,01	1,25
$\rho_1=0,3 \text{ г/см}^3, \rho_2=0,5 \text{ г/см}^3$						
0,5	4,77	13,07	11,85	0,00	2,09	1,86
0,4	4,45	8,984	7,954	0,50	1,85	1,71
0,3	4,09	5,677	4,959	1,02	1,61	1,57
0,2	3,64	3,078	2,697	1,62	1,39	1,43
0,1	3,02	1,154	1,043	2,44	1,17	1,31
0,05	2,52	0,456	0,426	3,09	1,03	1,25

Таблица 2

$\rho, \text{ г/см}^3$	$T \cdot 10^3, \text{ }^\circ\text{K}$	$p_T, \text{ тыс/атм}$	$p, \text{ тыс. атм}$	$R, \text{ кдж/г}$	$c, \text{ км/сек}$	$n$
1	2	3	4	5	6	7
$\rho_1 = 1,8 \text{ г/см}^3$						
1,8	3,63	118,6	167,6	0,00	5,11	2,80
1,5	3,32	89,25	120,01	1,00	4,63	2,85
1,4	3,03	64,14	81,71	1,88	4,12	2,91
1,2	2,77	43,51	51,97	2,66	3,57	2,95
1,0	2,52	27,55	30,35	3,33	2,98	2,93
0,8	2,28	16,15	15,97	3,88	2,36	2,80
0,6	2,03	8,634	7,425	4,33	1,76	2,50
0,4	1,75	3,979	2,949	4,71	1,23	2,05
0,2	1,38	1,254	0,874	5,10	0,81	1,51
0,05	0,88	0,163	0,134	5,57	0,58	1,26
$\rho_1 = 1,6 \text{ г/см}^3$						
1,6	3,82	98,72	129,5	0,00	4,79	2,84
1,4	3,51	70,78	88,35	0,97	4,27	2,89
1,2	3,22	48,01	56,47	1,81	3,70	2,91
1,0	2,95	30,53	33,33	2,54	3,09	2,86
0,8	2,68	18,09	17,91	3,15	2,45	2,69
0,6	2,40	9,824	8,615	3,66	1,85	2,38
0,4	2,08	4,606	3,576	4,12	1,32	1,96
0,2	1,66	1,481	1,100	4,59	0,91	1,49
0,05	1,08	0,200	0,171	5,19	0,66	1,26
$\rho_1 = 1,4 \text{ г/см}^3$						
1,4	4,02	77,38	94,94	0,00	4,41	2,86
1,2	3,71	52,52	60,98	0,92	3,82	2,86
1,0	3,41	33,57	36,37	1,70	3,18	2,79
0,8	3,11	20,09	19,91	2,38	2,54	2,60
0,6	2,79	11,06	9,850	2,96	1,94	2,29
0,4	2,42	5,259	4,229	3,49	1,41	1,89
0,2	1,95	1,718	1,337	4,06	0,99	1,47
0,05	1,29	0,238	0,209	4,78	0,72	1,26
$\rho_1 = 1,2 \text{ г/см}^3$						
1,2	4,20	56,92	65,39	0,00	3,92	2,82
1,0	3,87	36,58	39,38	0,86	3,27	2,72
0,8	3,54	22,10	21,92	1,59	2,63	2,52
0,6	3,18	12,30	11,09	2,24	2,02	2,21
0,4	2,77	5,916	4,886	2,84	1,50	1,84
0,2	2,24	1,957	1,576	3,51	1,07	1,46
0,05	1,51	0,276	0,247	4,36	0,79	1,25
$\rho_1 = 1,0 \text{ г/см}^3$						
1,0	4,33	39,51	42,31	0,00	3,36	2,66
0,9	4,15	31,08	32,11	0,42	3,03	2,57
0,8	3,97	24,06	23,88	0,80	2,70	2,45
0,7	3,77	18,26	17,37	1,17	2,39	2,31
0,6	3,57	13,52	12,31	1,51	2,10	2,15
0,5	3,36	9,667	8,443	1,85	1,83	1,98
0,4	3,12	6,563	5,533	2,19	1,58	1,80
0,3	2,85	4,098	3,379	2,55	1,35	1,62
0,2	2,53	2,192	1,811	2,96	1,15	1,45
0,1	2,08	0,807	0,697	3,50	0,96	1,31
0,05	1,72	0,314	0,285	3,94	0,84	1,25
$\rho_1 = 0,8 \text{ г/см}^3$						
0,8	4,40	26,01	25,83	0,00	2,78	2,39
0,7	4,19	19,82	18,93	0,40	2,47	2,25

Окончание табл. 2

1	2	3	4	5	6	7
0,6	3,97	14,74	13,53	0,78	2,18	2,10
0,5	3,73	10,58	9,354	1,16	1,91	1,94
0,4	3,47	7,211	6,180	1,54	1,66	1,77
0,3	3,18	4,519	3,801	1,94	1,43	1,61
0,2	2,83	2,428	2,047	2,40	1,22	1,45
0,1	2,33	0,899	0,789	3,01	1,02	1,31
0,05	1,93	0,352	0,322	3,51	0,90	1,25
$\rho_1=0,6 \text{ г/см}^3$						
0,6	4,39	16,03	14,82	0,00	2,26	2,06
0,5	4,13	11,55	10,32	0,42	1,98	1,90
0,4	3,85	7,899	6,868	0,84	1,73	1,75
0,3	3,53	4,968	4,750	1,29	1,50	1,59
0,2	3,14	2,680	2,299	1,80	1,29	1,44
0,1	2,60	0,998	0,887	2,50	1,08	1,31
0,05	2,16	0,392	0,363	3,05	0,95	1,25
$\rho_1=0,5 \text{ г/см}^3$						
0,5	4,36	12,10	10,87	0,00	2,03	1,89
0,4	4,07	8,289	7,259	0,45	1,77	1,73
0,3	3,73	5,223	4,505	0,93	1,54	1,58
0,2	3,32	2,823	2,442	1,47	1,33	1,44
0,1	2,75	1,054	0,943	2,21	1,11	1,31
0,05	2,29	0,415	0,385	2,80	0,98	1,25

взрыв»). Такие состояния получаются, например, после выравнивания давления при взрыве заряда в жесткой оболочке. Изменение термодинамических параметров образовавшегося в этих условиях «газового пузыря» продуктов взрыва при достаточно медленном его расширении (таким, чтобы состояние продуктов взрыва в каждый момент времени не зависело от координат) описывается табл. 2. В частности, если известны объем и плотность заряда, то по данным табл. 2 можно найти давление продуктов взрыва как функцию объема расширившегося «газового пузыря». Каждая отдельная часть табл. 2 дает одну адиабату продуктов взрыва с начальной плотностью продуктов взрыва, равной определенной плотности заряда.

Погрешность табличных данных целиком определяется погрешностью уравнения состояния [1]. Связанная с этим неточность в величине  $n$  приводит к тому, что давление в точках  $\rho < \rho_2$  на изэнтропах определяется с некоторой погрешностью, которая при заданном  $\rho_2$  возрастает с уменьшением  $\rho$ . Оценки показывают, что максимальная погрешность  $\Delta p/p$  при расширении до  $\rho=0$  составляет 10–15%.

На рис. 1 приведены для иллюстрации кривые изменения давления, деленного на плотность, при расширении из точек Жуге. Каждой кривой соответствует определенное значение плотности и других параметров в точке Жуге. Подобные кривые получаются и в случае расширения из начальных состояний, отвечающих «мгновенному взрыву».

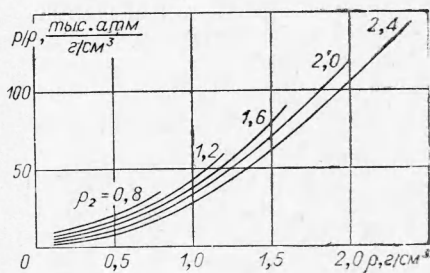


Рис. 1.

Полученные данные дают возможность проследить зависимость  $n$  от плотности на линиях постоянной энтропии. Как известно, для упрощения газодинамических расчетов часто принимается  $n = \text{const}$  или еще более определенно:  $n = 3$ , поскольку в этом случае вычисления становятся наиболее простыми. В качестве обоснования для подобных приближений обычно привлекаются соображения о зависимости между  $p$  и  $\rho$  для состояния вещества, в котором температура столь низка, что тепловое давление мало по сравнению с давлением упругого отталкивания сжатых молекул. В работе [1] показано, что в ПД гексогена даже при максимальной плотности заряда тепловое давление в точках Жуге не меньше упругого. Это еще в большей степени относится к расширяющимся продуктам детонации и меньшим плотностям заряда. Как видно из табл. 1 и 2, отношение тепловой части давления к полному давлению при расширении ПД от максимальных плотностей быстро растет и достигает единицы при  $\rho \approx 0,8 \text{ г/см}^3$ . Соотношение между общим и тепловым давлением и температура расширяющихся ПД для случая  $\rho_2 = 2,2 \text{ г/см}^3$  ( $\rho_1 = 1,66 \text{ г/см}^3$ ) иллюстрируется рис. 2, где приведены отношения  $p/p_0$ ,

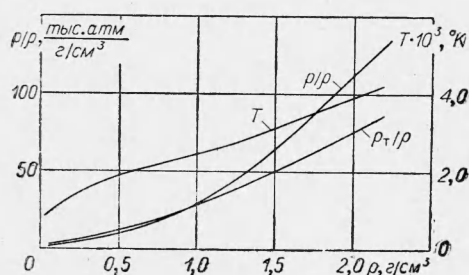


Рис. 2.

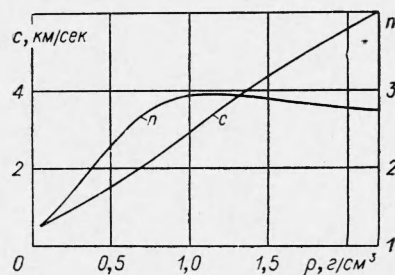


Рис. 3.

$p_t/p_0$  и  $T$  в зависимости от  $\rho_2$ . Такое же соотношение между упругой и тепловой частями давления, по-видимому, имеет место и для других ВВ высокой калорийности.

Несмотря на то, что уравнение состояния [1] имеет мало общего со степенной зависимостью  $p$  от  $\rho$ , значение  $n$ , как следует из табл. 1 и 2, при разгрузках до  $\rho = 0,8 \text{ г/см}^3$  изменяется мало и при больших начальных плотностях близко к 2,7—3.

Величина  $n$  здесь в основном теплового происхождения. В выражении [1] для тепловой части давления  $p_t \sim \rho T \Phi(\rho, T)$  температура и функция  $\Phi$  уменьшаются при изэнтропическом расширении до  $\rho \sim 0,5 \text{ г/см}^3$  так, что изменение  $p_t$  оказывается пропорциональным  $\rho$  в степени 2,5—3.

Из приведенных в таблицах данных видно, что величина  $n$  при изэнтропическом расширении из состояний с большими плотностями ( $\rho \approx 2,4—1,4$ ) проходит через размытый максимум. Изменение  $n$  при расширении ПД для случая  $\rho_2 = 2,2 \text{ г/см}^3$  ( $\rho_1 = 1,66 \text{ г/см}^3$ ) иллюстрируется рис. 3. В качественном отношении наличие максимума  $n$  согласуется с данными, полученными Зубаревым [2] при изучении газодинамической картины разлета ПД за фронтом автотомодельной детонационной волны. Максимум  $n$  выражен весьма слабо и поэтому его величина и положение на каждой адиабате, возможно, значительно отличаются от действительных. Этими ошибками при дифференцировании приближенных выражений, видимо, объясняется некоторое несовпадение значений  $n(\rho_2)$  и положения максимумов функции  $n = n(\rho_2)$ , полученных путем расче-

тов с экспериментальной зависимостью  $n=n(\rho_2)$  в точках Жуге. Расчет дает максимум  $n$  при  $\rho_2=1,5 \text{ г/см}^3$ . В эксперименте же он наблюдается при  $\rho_2 \approx 1,8 \text{ г/см}^3$ .

При построении уравнения состояния [1] скорость звука, определенная из условия Жуге, использовалась только для плотностей, больших  $1,7 \text{ г/см}^3$ , и только для определения коэффициента Грюнайзена. Поэтому экспериментальные данные о скорости звука могут быть использованы для контроля точности уравнения состояния.

Скорость звука, вычисленная путем дифференцирования уравнения состояния [1] (см. табл. 1), в пределах 20% согласуется с экспериментальными данными [1] во всем диапазоне плотностей  $\rho_2$  в точках Жуге от 0,7 до  $2,4 \text{ г/см}^3$ . Если учесть, что при дифференцировании приближенных выражений точность обычно значительно уменьшается, то полученный результат для скорости звука следует считать (по крайней мере в смысле контроля точности уравнения состояния) вполне удовлетворительным. Изменение скорости звука при изэнтропическом расширении ПД из начального состояния показано на рис. 3.

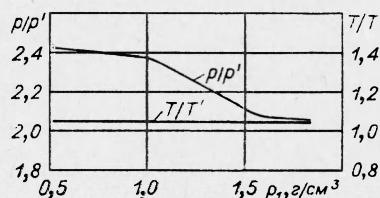


Рис. 4.

На рис. 4 приведены графики отношения давления детонации в точке Жуге к давлению в продуктах при мгновенном взрыве  $p/p'$  и аналогичные отношения температур  $T/T'$  в зависимости от начальной плотности заряда  $\rho_1$ . Значения  $p$ ,  $T$ ,  $p'$  и  $T'$  рассчитывались при одинаковых плотностях заряда. Для идеальных газов с постоянной теплоемкостью  $p/p'$  при всех плотностях одинаково и равно двум, а отношение  $T/T' = k + 1/2k$  и для  $k=9/7$  (двухатомный газ с возбужденной колебательной степенью свободы) равно приблизительно 0,9 [3]. Как видно из рис. 4, отношение  $p/p'$  близко к двум при больших плотностях ( $\rho_1 \approx 1,5-1,8 \text{ г/см}^3$ ) и увеличивается с уменьшением плотности, достигая 2,4 при  $\rho_1 < 1,0 \text{ г/см}^3$ . Отношение  $T/T'$  почти постоянно при всех плотностях и составляет приблизительно 1,1. Такие особенности в поведении отношений  $p/p'$  и  $T/T'$  обусловлены спецификой уравнения состояния ПД (переменной  $n$ , теплоемкости и др.), и их следует учитывать при иногда применяющихся заменах параметров реальной детонации параметрами мгновенного взрыва [4].

Одной из интегральных оценок точности уравнения состояния может служить соотношение между работой и теплотой взрыва. Работа адиабатического расширения до  $\rho=0$  ( $R_\infty$ ) в случае мгновенного взрыва должна равняться теплоте взрыва  $Q$ . Значение  $R_\infty$  может быть вычислено по данным  $R=R(\rho)$  при самой низкой плотности  $\rho=0,05 \text{ г/см}^3$ , приведенной в таблицах, если к величине  $R(\rho)$  прибавить работу расширения идеального газа  $p(\rho)/\rho(k-1)|_{\rho=0,05}$ , где в качестве  $k$  можно взять для оценок значение показателя адиабаты Пуассона ПД  $c_p/c_v$  при низких температурах, т. е. с учетом только поступательных и вращательных степеней свободы молекул. Значение  $k$  при этом условии для ПД гексогена с заданным составом [1] равно 1,38. Вычисленное таким образом значение  $R_\infty = 1440 \text{ ккал/кг}$  при  $\rho_1=1,55 \text{ г/см}^3$  и  $R_\infty = 1290 \text{ ккал/кг}$  при  $\rho_1=1,05 \text{ г/см}^3$ , что удовлетворительно согласуется с экспериментальным значением теплоты взрыва [5], равным соответственно 1480 и 1380 ккал/кг.

В заключение сопоставим рассчитанные значения работы адиабатического расширения  $R(\rho)$  при мгновенном взрыве с имеющимися экспериментальными данными. При таком сопоставлении, как уже отмеча-

лось выше, предполагается медленное расширение «газового пузыря» ПВ в условиях эксперимента, что, по-видимому, осуществляется в опытах с бомбой Трауцля. Работа расширения ПД гексогена до атмосферного давления, полученная этим методом в [6], составила 1190 ккал/кг при  $\rho_1 = 1,55 \text{ г/см}^3$  и 1150 ккал/кг при  $\rho_1 = 1,05 \text{ г/см}^3$ . Расчетные значения работы при расширении до того же давления равны 1380 и 1200 ккал/кг соответственно. Отношение экспериментальных значений  $R$  к вычисленным составляет  $\sim 0,86$  и  $0,96$ . Эти величины близки к максимальному КПД (90—92%), определенному в работе [6] как отношение  $R/Q$ , где  $R$  — работа при расширении до атмосферного давления.

*Поступила в редакцию  
24/XI 1966*

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Н. М. Кузнецов, К. К. Шведов. ФГВ, 1967, III, 1.
2. В. Н. Зубарев. ПМТФ, 1965, 2.
3. Я. Б. Зельдович, А. С. Компанеев. Теория детонации. Гостехиздат, 1955.
4. Ф. А. Баум, К. П. Станюкович, Б. И. Шехтер. Физика взрыва. Физматгиз, 1959.
5. А. Я. Апин, Ю. А. Лебедев. Докл. АН СССР, 1957, 114, 4.
6. А. Ф. Беляев, Р. Х. Курбангалина. Сб. «Физика взрыва», № 5, Изд-во АН СССР, 1956.