

детонации не образуются [6]. В этом случае в островках находится газ, сгоревший до столкновения за поперечными фронтами АС. Островки сгоревшего газа обычно не видны из-за малых градиентов плотности на их границе. Но иногда и при самоподдерживающейся детонации в данной смеси удается зафиксировать как прямую, так и обратную струи.

Следует отметить, что возникновение струй связано только с газодинамическими особенностями течения и наблюдается также в нереагирующих газах. Так, в работе [8] наблюдалось искривление контактного разрыва и сворачивание его в вихрь в опытах по исследованию отражения сильных ударных волн от клина.

Таким образом, экспериментально установлено, что при симметричном столкновении поперечных волн возникают струи, направленные вдоль оси симметрии столкновения: одна из них (прямая) направлена к переднему фронту, вторая (обратная) в противоположную сторону. При несимметричном столкновении прямая струя отклонена от вертикали в направлении движения более сильной поперечной волны.

Указанная особенность течения проявляется при столкновении поперечных волн любой структуры.

Экспериментально определено расположение локальных объемов несгоревшего газа, в которых после столкновения начинается самовоспламенение смеси.

*Поступила в редакцию
10/X 1974*

ЛИТЕРАТУРА

1. К. И. Щелкин, П. К. Трошин. Газодинамика горения. М., Изд-во АН СССР, 1963.
2. Б. В. Войцеховский, В. В. Митрофанов, М. Е. Топчийн. Структура фронта детонации в газах. Новосибирск, Изд-во АН СССР, 1963.
3. R. A. Strehlow, C. D. Engel. AIAA 1969, 7, 2—3.
4. Р. И. Солоухин. Ударные волны и детонация в газах. М., Физматгиз, 1963.
5. Ю. Н. Денисов, Я. К. Трошин. ПМТФ, 1960, 1.
6. В. А. Субботин. ФГВ, 1975, 11, 1.
7. М. А. Лаврентьев. УМН, 1957, XII, 4.
8. Л. В. Баженова, Т. Г. Гвоздева и др. Ударные волны в реальных газах. М., «Наука», 1968.

УДК 532.593

К РАСЧЕТУ УДАРНЫХ АДИАБАТ В АЗОТЕ

В. П. Замураев, Г. А. Ковальская, Р. И. Солоухин

(Новосибирск)

Расчету ударных адиабат в азоте посвящен ряд публикаций [1—9], причем наиболее полные табличные данные представлены в [2—4, 7, 8]. Диапазон температур и давлений за прямой ударной волной, охватываемый этими расчетами, показан на диаграмме рис. 1. Сплошная кривая ограничивает область параметров за падающей ударной волной, а штриховая — за отраженной. Данная работа предпринята с целью расширить этот диапазон в сторону более высоких температур, где расчет существенно усложняется рядом дополнительных физических эффектов. Некоторые данные этого диапазона, полученные для падающей ударной волны, представлены графически в [6], однако сильно упрощенные

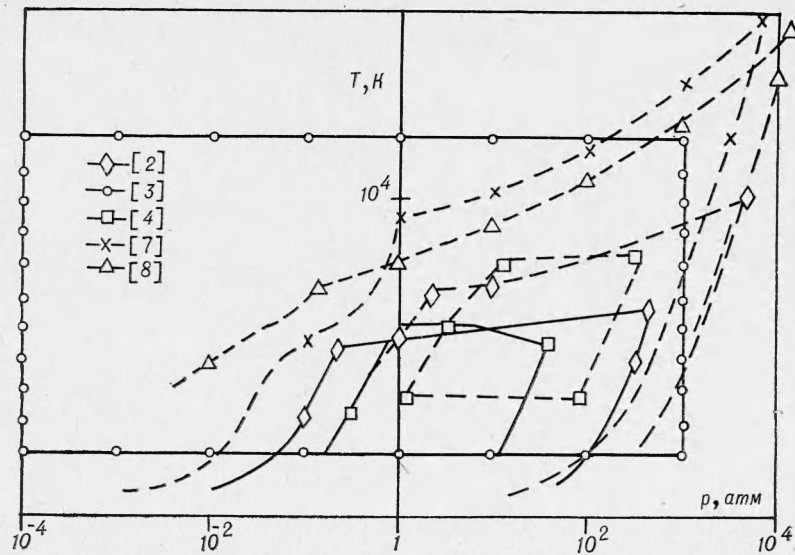


Рис. 1.

предположения при расчете состава и энтальпии существенно ограничивают применимость результатов этой работы.

В существующих расчетах ионизация играла существенную роль только в области низких давлений. Для рассматриваемых температур (до 30—50 тыс. К) ионизация значительна и при высоких давлениях, поэтому важным становится учет кулоновского взаимодействия. Итак, определяется состояние азота и газодинамические параметры за фронтом прямой падающей и отраженной ударных волн. Считается, что газ перед и за фронтом ударной волны находится в термодинамическом равновесии. Охлаждение газа в ударной волне излучением и предшествующие явления не рассматриваются. Расчет состава и термодинамических свойств азота проводится с учетом реальных физических процессов, имеющих при высоких температурах.

При расчете ударных адиабат задаются параметры газа перед фронтом падающей ударной волны и ее скорость. Искомыми величинами являются температура и давление за волной. На ударной волне записываются законы сохранения. После исключения скорости газа за скачком уплотнения на падающей ударной волне получается система уравнений:

$$1 + \frac{p_1 - p_2}{\rho_1 D^2} - \frac{\rho_1}{\rho_2} = 0, \quad 1 + 2 \frac{H_1 - H_2}{D^2} \left(\frac{\rho_1}{\rho_2} \right)^2 = 0. \quad (1)$$

(Обозначения здесь и ниже общепринятые.) Из системы (1) по заданным ρ_1 , T_1 и D методом последовательных приближений вычисляются температура T_2 и давление p_2 газа за падающей ударной волной. Затем из уравнения неразрывности находится скорость газа за скачком уплотнения.

Для отраженной ударной волны можно получить систему уравнений

$$\left(\frac{H_5 - H_2}{V_2^2} + \frac{1}{2} \right) \frac{\rho_2}{\rho_5} - \left(\frac{H_5 - H_2}{V_2^2} - \frac{1}{2} \right) = 0, \quad (2)$$

$$\left(\frac{H_5 - H_2}{V_2^2} + \frac{1}{2} \right)^2 \frac{\rho_2}{\rho_5} - \left(\frac{H_5 - H_2}{V_2^2} - \frac{1}{2} \right)^2 + \frac{p_2 - p_5}{\rho_5 V_2^2} = 0.$$

Вид ее аналогичен выражению, использованному в работе [8]. Система (2) решается относительно p_5 и T_5 после того, как проведен расчет для

падающей волны. Из уравнения неразрывности может быть найдена затем скорость отраженной ударной волны.

Для расчета ударных адиабат необходимо с достаточной степенью точности знать состав и термодинамические свойства азота в рассматриваемой области температур и давлений. При расчете состава учитывались молекулы, атомы, однозарядные и двухзарядные ионы и электроны. Оценки показали, что концентрация третьих ионов для рассматриваемых условий мала. Расчет производился в предположении квазинейтральности и термодинамического равновесия плазмы.

Исходная система уравнений имеет следующий вид:

$$\frac{n_0^2}{n_{N_2}} = K_0, \quad \frac{n_e n_1}{n_0} = K_1, \quad \frac{n_e n_2}{n_1} = K_2, \quad (3)$$

$$n_e = n_1 + 2n_2,$$

$$n_e + n_{N_2} + n_0 + n_1 + n_2 = N = \frac{p + \Delta p}{kT}, \quad (4)$$

где n_{N_2} , n_0 , n_1 , n_2 , n_e — концентрации молекул, атомов, однозарядных положительных ионов, двухзарядных ионов и электронов соответственно. Уравнения (3) — уравнения равновесия для реакций диссоциации и ионизации. Расчет производился с учетом кулоновского взаимодействия. Его влияние на сдвиг ионизационного равновесия учитывалось с помощью введения снижения потенциала ионизации, обрезания статистических сумм и поправки на давление Δp [10, 11].

Константа равновесия диссоциации K_0 взята из [12]. Для промежуточных точек она подсчитывалась с помощью линейной интерполяции логарифма от константы равновесия, что дает ошибку менее 1%. Константа равновесия ионизации имеет следующий вид:

$$K_i = 2 \left(\frac{2\pi m_e kT}{h^2} \right)^{3/2} \frac{Z_i^*}{Z_{i-1}^*} \exp \left(-\frac{I_i - \Delta I_i}{kT} \right), \quad (5)$$

где Z_i^* — статистическая сумма соответствующей компоненты. Снижение потенциала подсчитывалось по теории Дебая — Хюккеля. Вычисление статистической суммы производилось с учетом статистических микрополей в плазме. При этом сходимость статистической суммы обеспечивается уменьшением статистических весов электронных состояний, вызванным влиянием неуравновешенных зарядов в малых областях. Этот

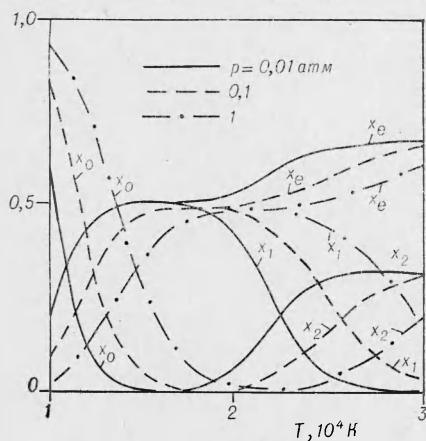


Рис. 2.

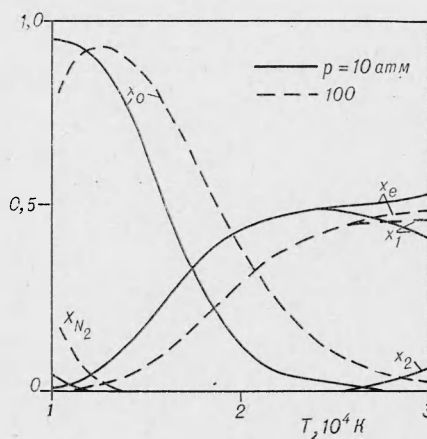


Рис. 3.

Т а б л и ц а 1

T, K	x_{N_2}	x_0	x_1	x_2	x_3	x_e	$N, \text{см}^{-3}$
$p=0,01 \text{ атм}$							
10 000	—	0,609	0,196	—	—	0,196	7,328(15)
12 500	—	0,072	0,464	—	—	0,464	5,850(15)
15 000	—	0,006	0,497	—	—	0,497	4,880(15)
17 500	—	0,001	0,493	0,005	—	0,502	4,185(15)
20 000	—	—	0,413	0,058	—	0,529	3,662(15)
22 500	—	—	0,189	0,207	—	0,604	3,250(15)
25 000	—	—	0,049	0,300	—	0,650	2,924(15)
27 500	—	—	0,012	0,323	0,002	0,663	2,659(15)
30 000	—	—	0,003	0,317	0,011	0,669	2,438(15)
$p=0,1 \text{ атм}$							
10 000	—	0,852	0,074	—	—	0,074	7,331(16)
12 500	—	0,348	0,326	—	—	0,326	5,829(16)
15 000	—	0,054	0,473	—	—	0,473	4,851(16)
17 500	—	0,009	0,495	—	—	0,496	4,163(16)
20 000	—	0,002	0,488	0,007	—	0,503	3,648(16)
22 500	—	0,001	0,419	0,054	—	0,527	3,243(16)
25 000	—	—	0,245	0,170	—	0,585	2,910(16)
27 500	—	—	0,096	0,269	—	0,635	2,642(16)
30 000	—	—	0,033	0,310	0,001	0,657	2,423(16)
$p=1 \text{ атм}$							
10 000	0,005	0,946	0,025	—	—	0,025	7,334(17)
12 500	—	0,700	0,150	—	—	0,150	5,830(17)
15 000	—	0,284	0,358	—	—	0,358	4,805(17)
17 500	—	0,072	0,464	—	—	0,464	4,113(17)
20 000	—	0,019	0,489	—	0,001	0,491	3,609(17)
22 500	—	0,006	0,486	—	0,007	0,501	3,217(17)
25 000	—	0,002	0,443	—	0,037	0,517	2,895(17)
27 500	—	0,001	0,331	—	0,113	0,556	2,623(17)
30 000	—	—	0,188	—	0,208	0,604	2,394(17)
$p=10 \text{ атм}$							
10 000	0,047	0,952	0,001	—	—	0,001	7,337(18)
12 500	0,003	0,886	0,056	—	—	0,056	5,842(18)
15 000	—	0,639	0,180	—	—	0,180	4,794(18)
17 500	—	0,324	0,338	—	—	0,338	4,037(18)
20 000	—	0,127	0,437	—	—	0,437	3,517(18)
22 500	—	0,048	0,475	—	0,001	0,476	3,138(18)
25 000	—	0,020	0,482	—	0,005	0,493	2,838(18)
27 500	—	0,009	0,465	—	0,020	0,506	2,585(18)
30 000	—	0,004	0,409	—	0,059	0,527	2,364(18)
$p=100 \text{ атм}$							
10 500	0,185	0,807	0,004	—	—	0,004	6,988(19)
12 500	0,033	0,928	0,019	—	—	0,019	5,852(19)
15 000	0,004	0,849	0,073	—	—	0,073	4,811(19)
17 500	0,001	0,650	0,175	—	—	0,175	4,012(19)
20 000	—	0,411	0,294	—	—	0,294	3,414(19)
22 500	—	0,226	0,387	—	—	0,387	2,996(19)
25 000	—	0,117	0,440	—	0,001	0,442	2,698(19)
27 500	—	0,061	0,464	—	0,003	0,471	2,467(19)
30 000	—	0,033	0,467	—	0,011	0,489	2,274(19)

подход представляется в настоящее время наиболее последовательным. Применяемые обычно для обрезания статистических сумм полуэмпирические теории не имеют строгого физического обоснования [11]. Поправка на давление Δp подсчитывалась по теории Дебая — Хюккеля. На рис. 2, 3 графически и (выборочно) в табл. 1 приведен состав азотной плазмы для температур от 10 000 до 30 000 К и давлений 0,01; 0,1;

1; 10 и 100 атм, x_i — мольная доля i -й компоненты. Степень неидеальности азотной плазмы иллюстрируется графиком рис. 4, где в зависимости от температуры для различных давлений приведено относительное отклонение концентрации частиц N от $N_0 = p/kT$.

Формулы для расчета энтальпии и энтропии имеют следующий вид:

$$H = \frac{5}{2} kT (n_e + n_0 + n_1 + n_2) + kT^2 \times \left(n_0 \frac{\partial \ln Z_0^*}{\partial T} + n_1 \frac{\partial \ln Z_1^*}{\partial T} + n_2 \frac{\partial \ln Z_2^*}{\partial T} \right) + \frac{U}{2} (n_0 + n_1 + n_2) + I_1 (n_1 + n_2) + I_2 \cdot n_2 + h_{N_2} - \frac{kT}{6\pi d^3}, \quad (6)$$

где U — энергия диссоциации азота, I_1, I_2 — энергия I и II ионизации соответственно, d — дебаевский радиус, h_{N_2} — вклад в энтальпию молекул. h_{N_2} подсчитывалась с помощью интерполяционных формул [13].

$$S = 5k (n_e + n_0 + n_1 + n_2) + kT \left(n_0 \frac{\partial \ln Z_0^*}{\partial T} + n_1 \frac{\partial \ln Z_1^*}{\partial T} + n_2 \frac{\partial \ln Z_2^*}{\partial T} \right) + \sum_{i=0,1,2} k n_i \ln \left[\frac{Z_i^*}{n_i} \left(\frac{m_i k T}{2\pi (h/2\pi)^2} \right)^{3/2} \right] + S_{N_2} - \frac{k}{24\pi d^3}. \quad (7)$$

S_{N_2} также подсчитывалась по формулам [13]. Последний член в (6) и (7) — кулоновская поправка.

Удельные теплоемкости и скорость звука вычислялись по обычным формулам термодинамики. При вычислении термодинамических производных по p и T использовались центральные разности. Шаги по давлению и температуре составляли 0,001 от p и T соответственно.

Для решения систем алгебраических уравнений (1) и (2) использовался метод Ньютона. Начальное приближение для давления и температуры получалось путем экстраполяции данных для предыдущих значений числа Маха. Расчеты были выполнены для $T_1 = 293$ К, $p_1 = 10^{-5}, 10^{-4}, 10^{-3}$ и 10^{-2} атм и $M_s = \frac{D}{a_1} = 20 \div 50$. Шаг по числу Маха выбирался равным $\Delta M_s = 2,5$, который позволяет путем линейной интерполяции получать давления и температуры за падающей и отраженной ударными волнами для промежуточных чисел Маха M_s с погрешностью, обычно не превышающей 1%. Лишь в отдельных точках ошибка достигает 3% и требуется квадратичная интерполяция. Результаты расчетов представлены в табл. 2, где $p_{i1} = \frac{p_i}{p_1}$, $\rho_{i1} = \frac{\rho_i}{\rho_1}$, $H_{i1} = \frac{H_i}{H_1}$, $a_{i1} = \frac{a_i}{a_1}$ ($i=2, 5$), а удельные теплоемкости и энтропия отнесены к R — газовой постоянной молекулярного азота.

Результаты расчета и их анализ показывают, что при определении состава и термодинамических свойств азота в выбранном диапазоне температур и давлений наиболее существенны поправки на неидеальность за счет ξ взаимодействия частиц в плазме. Учтены также некоторые последние данные по расчету диссоциационного равновесия. В итоге удалось существенно расширить диапазон параметров ударных адиабат для азота в области высоких температур и давлений.

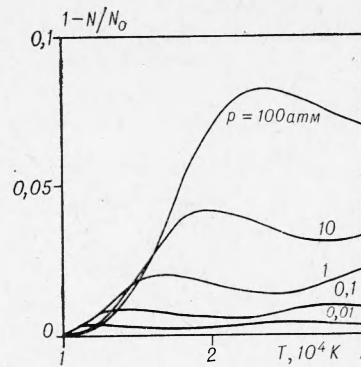


Рис. 4.

Таблица 2

M_s	$\frac{T_2}{T_5}$	$\frac{p_{21}}{p_{51}}$	$\frac{H_{21}}{H_{51}}$	$\frac{\rho_{21}}{\rho_{51}}$	$\frac{a_{21}}{a_{51}}$	$\frac{C_{p2}/R}{C_{p5}/R}$	$\frac{C_{v2}/R}{C_{v5}/R}$	$\frac{S_2/R}{S_5/R}$	$\frac{M_2}{M_5}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$p_1 = 10^{-5}$ атм									
20,0	5,428 8,873	528,3 11167	80,4 168,6	19,05 180,82	4,69 7,29	93,9 18,5	75,7 15,3	49,0 60,1	4,042 0,476
22,5	5,722 10,614	671,2 15424	101,5 214,7	20,64 191,61	5,10 8,18	85,2 43,4	69,0 35,8	53,4 64,2	4,201 0,507
25,0	6,126 11,696	830,0 19833	125,1 264,9	21,49 202,90	5,61 9,02	52,9 65,9	43,8 52,3	58,1 68,3	4,249 0,503
27,5	7,241 12,517	1001,1 22464	151,1 318,6	20,23 194,59	6,61 9,85	14,4 82,3	11,6 63,3	62,7 72,5	3,956 0,459
30,0	8,681 13,289	1187,2 25001	179,6 377,1	19,01 184,84	7,19 10,71	33,0 89,4	27,9 67,4	66,0 76,8	3,956 0,453
32,5	9,464 14,210	1394,0 29701	210,6 442,9	19,22 186,00	7,69 11,73	56,3 82,3	47,0 61,6	69,2 81,2	4,004 0,461
35,0	10,045 15,424	1618,5 35359	244,1 515,7	19,65 185,38	8,19 13,01	77,5 58,6	63,2 44,0	72,4 85,6	4,055 0,481
37,5	10,540 17,801	1859,9 41900	280,1 598,0	20,07 175,26	8,70 15,18	95,2 24,1	76,0 17,6	75,6 90,2	4,094 0,530
40,0	10,998 22,670	2117,9 49426	318,5 693,1	20,42 156,08	9,23 16,96	107,9 30,3	84,5 23,7	78,9 94,4	4,122 0,621
42,5	11,447 24,888	2392,3 56622	359,5 784,4	20,67 155,89	9,77 17,78	113,8 63,2	88,1 50,1	82,3 97,7	4,139 0,633
45,0	11,914 26,319	2682,7 63786	402,9 878,4	20,79 158,24	10,36 18,70	111,0 87,9	85,6 68,2	85,8 101,0	4,134 0,625
47,5	12,436 27,527	2988,6 70800	448,8 976,8	20,75 159,84	11,00 19,64	97,9 102,9	75,7 78,5	89,3 104,2	4,110 0,613
50,0	13,086 28,661	3309,1 77225	497,2 1079,7	20,47 159,41	11,76 20,58	73,7 108,4	57,5 81,9	92,8 107,6	4,045 0,596
$p_1 = 10^{-4}$ атм									
20,0	6,022 9,505	525,5 10198	80,3 168,7	17,39 156,33	4,92 7,56	75,7 16,8	60,6 13,6	46,7 55,6	3,834 0,480
22,5	6,375 11,771	667,8 14097	101,4 215,6	18,79 160,79	5,36 8,64	74,8 32,2	59,5 26,1	50,3 59,5	3,971 0,525
25,0	6,829 13,222	826,1 18174	125,0 266,6	19,57 167,74	5,88 9,63	50,0 49,3	40,7 38,4	54,1 63,0	4,034 0,533
27,5	7,764 14,359	997,9 21375	151,0 321,6	19,07 164,43	6,74 10,62	18,5 62,2	15,0 46,6	58,0 66,7	3,867 0,507
30,0	9,415 15,363	1182,4 23500	179,5 380,6	17,71 152,96	7,51 11,63	24,2 68,8	20,2 50,1	61,2 70,5	3,767 0,493
32,5	10,462 16,534	1387,0 27474	210,5 447,1	17,62 150,25	8,10 12,82	41,6 65,6	34,4 47,0	64,1 74,3	3,787 0,503
35,0	11,228 18,021	1609,7 32420	243,9 520,8	17,84 147,54	8,65 14,26	58,2 50,9	47,0 36,3	66,9 78,2	3,818 0,525
37,5	11,875 20,451	1849,2 38125	279,9 603,6	18,09 140,22	9,23 16,28	72,3 28,1	56,9 20,0	69,7 82,1	3,837 0,568
40,0	12,468 24,973	2105,3 44611	318,4 698,1	18,30 127,64	9,82 18,38	82,9 24,1	63,8 17,7	72,6 85,8	3,849 0,644
42,5	13,044 28,010	2377,5 50985	359,3 792,1	18,43 124,73	10,44 19,32	88,7 46,6	67,2 35,6	75,6 88,9	3,849 0,667
45,0	13,635 29,933	2665,5 57252	402,7 888,2	18,46 124,76	11,10 20,48	88,5 66,7	66,4 49,6	78,6 91,8	3,836 0,666
47,5	14,280 31,513	2968,8 63366	448,5 988,4	18,35 124,61	11,82 21,65	81,1 79,7	60,7 57,7	81,6 94,7	3,800 0,656
50,0	15,044 32,975	3286,6 69036	496,8 1093,2	18,08 123,29	12,63 22,80	66,1 85,7	49,7 61,4	84,6 97,7	3,739 0,642
$p_1 = 10^{-3}$ атм									
20,0	6,740 10,361	522,2 9272	80,3 168,9	15,80 133,28	5,18 7,81	62,9 19,5	49,7 15,5	44,6 51,3	3,617 0,486
22,5	7,170 13,054	663,9 12813	101,4 216,4	17,01 134,48	5,65 9,14	62,6 23,6	49,0 18,7	47,5 54,8	3,748 0,543
25,0	7,691 15,050	821,4 16578	124,9 268,5	17,73 137,31	6,19 10,35	47,8 36,0	38,1 27,2	50,4 58,0	3,809 0,565

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
27,5	8 539 16 647	993,5 20000	151,0 325,1	17,65 135,17	6,95 11,61	24,4 45,8	19,7 32,9	53,5 61,2	3,735 0,561
30,0	10 179 18 047	1177,5 22279	179,4 385,7	16,56 125,20	7,86 12,90	18,6 51,3	15,1 35,3	56,5 64,5	3,588 0,547
32,5	11 587 19 583	1379,4 25526	210,3 453,2	16,14 119,06	8,53 14,38	30,1 50,5	24,5 33,7	59,0 67,7	3,573 0,560
35,0	12 624 21 482	1599,6 29763	243,8 528,6	16,13 114,35	9,19 16,10	42,4 42,1	33,6 27,8	61,5 71,0	3,571 0,587
37,5	13 493 24 217	1836,6 34682	279,7 613,1	16,21 107,88	9,86 18,16	53,2 28,9	41,1 19,3	64,0 74,4	3,570 0,631
40,0	14 282 28 324	2090,0 40150	318,1 707,2	16,26 100,13	10,55 20,28	61,7 24,7	46,4 17,0	66,5 77,6	3,559 0,690
42,5	15 042 31 875	2359,3 45631	359,0 803,8	16,26 96,41	11,27 21,57	67,0 37,1	49,2 26,6	69,1 80,4	3,539 0,718
45,0	15 810 34 396	2644,0 51006	402,3 902,9	16,17 94,73	12,04 23,26	68,4 51,3	49,4 35,2	71,6 83,1	3,507 0,722
47,5	16 630 36 491	2943,6 56210	448,1 1006,2	15,99 93,08	12,87 24,89	65,0 61,3	46,5 40,5	74,2 85,7	3,459 0,718
50,0	17 561 38 431	3257,4 61093	496,3 1114,3	15,69 90,89	13,80 26,40	56,6 65,9	40,3 42,9	76,7 88,3	3,393 0,708

 $p_1 = 10^{-2}$ атм

20,0	7 612 11 611	518,5 8405	80,2 169,3	14,29 111,45	5,45 8,13	48,1 22,7	37,7 17,6	42,8 47,4	3,412 0,502
22,5	8 148 14 449	659,3 11582	101,3 217,1	15,33 112,39	5,97 9,69	51,2 18,3	39,6 14,0	44,9 50,2	3,524 0,557
25,0	8 758 17 215	816,1 15069	124,9 270,7	15,98 111,42	6,54 11,30	44,2 25,6	34,3 18,4	47,1 53,1	3,583 0,600
27,5	9 598 19 570	987,8 18523	150,9 329,9	16,11 107,53	7,24 13,13	28,8 32,7	22,8 21,5	49,4 55,9	3,560 0,627
30,0	11 053 21 645	1172,3 21288	179,3 393,8	15,50 99,60	8,17 15,02	17,4 37,1	13,8 22,7	51,8 58,7	3,435 0,633
32,5	12 811 23 776	1371,4 24022	210,2 463,8	14,84 91,37	9,01 17,04	21,8 37,6	17,3 22,0	54,1 61,5	3,364 0,652
35,0	14 241 26 332	1588,2 27571	243,6 542,4	14,56 84,97	9,81 19,23	30,0 33,5	23,2 19,3	56,3 64,3	3,322 0,687
37,5	15 438 29 653	1821,7 31734	279,4 630,2	14,43 78,91	10,62 21,58	37,9 27,6	28,3 16,2	58,5 67,2	3,285 0,735
40,0	16 519 33 682	2071,3 36275	317,8 726,4	14,30 73,36	11,47 24,34	44,4 27,6	32,0 16,0	60,6 70,0	3,242 0,785
42,5	17 552 37 372	2336,1 40924	358,5 828,8	14,14 68,99	12,38 20,55	48,9 26,8	34,1 26,1	62,8 72,6	3,190 0,822
45,0	18 586 40 468	2615,8 45360	401,8 933,1	13,92 66,35	13,34 29,45	50,9 42,1	34,5 23,5	64,9 75,0	3,130 0,831
47,5	19 663 43 243	2909,9 49723	447,4 1043,0	13,65 63,73	14,36 31,95	50,0 47,1	33,2 25,2	67,0 77,4	3,066 0,835
50,0	20 845 45 942	3217,6 53802	495,5 1157,5	13,30 61,14	15,47 33,43	45,9 48,2	30,2 26,6	69,2 79,7	2,990 0,832

ЛИТЕРАТУРА

1. С. А. Лосев. Вестник МГУ, сер. Физика, Астрон., 1960, 5.
2. L. Bernstein. A. R. C. S. P., 1961, 626.
3. А. С. Плешанов. В сб. «Физическая газодинамика, теплообмен и термодинамика газов высоких температур». М., Изд-во АН СССР, 1962.
4. П. П. Лазарев. В сб. «Физическая оптика», М., «Наука», 1964.
5. Льюис, Бургесс III. РТК, 1965, 3.
6. Z. A. Pietrzyk. Arch. mech. stosowanej, 1966, 18, 3.
7. Н. А. Зыков, Р. М. Севастьянов. Тр. ЦАГИ, 1969, вып. 1165.
8. С. К. Law, M. Bristow. UTIAS Technical Note, 1969, No. 148.
9. K. C. Lapworth. A. R. C. S. P., 1970, 1101.
10. P. Fauchais. Etude des proprietes thermodynamiques des plasmas produits par un generateur a arc (These Doctorat es Sciences physiques, Faculte des Sciences de Poitiers, 1968).
11. Г. А. Ковальская, В. Г. Севастьяненко. В сб. «Аэрофизические исследования». Новосибирск, 1973.
12. Термодинамические свойства индивидуальных веществ. М., Изд-во АН СССР, 1962.
13. Л. В. Гурвич, Н. П. Ртищева. ТВТ, 1965, 3, 1.