

УРАВНЕНИЕ СОСТОЯНИЯ ЖИДКОСТИ

Е. Р. Лихачев

Воронежский государственный университет

Поступила в редакцию 01.06.2014 г.

Аннотация: найдено уравнение состояния жидкости, которое хорошо согласуется с экспериментальными данными, имеющимися в справочной литературе. Вычислены значения постоянных величин, входящих в уравнение, для одиннадцати жидкостей (неон, аргон, криптон, ксенон, водород, азот, кислород, метан, бензол, вода, тяжелая вода). Приведено сравнение расчетных величин с экспериментальными для трех жидкостей разного типа. Расхождение между расчетными и экспериментальными данными становится заметным только, когда объем жидкости приближается к половине критического объема. Получены значения постоянных параметров приведенного уравнения, подтверждающие, что для жидкостей также как и для газов выполняется закон соответственных состояний.

Ключевые слова: жидкость, уравнение состояния.

EQUATION OF LIQUID STATE

E. R. Likhachev

Abstract: the equation of liquid state has been derived. It is in good agreement with the experimental data from references. The values of the constants of the equation have been calculated for eleven liquids (neon, argon, krypton, xenon, hydrogen, nitrogen, oxygen, methane, benzene, water, heavy water). Comparison of the calculated data with experimental values is given for three liquids of different type. The discrepancy between the calculated and experimental data becomes appreciable only when the liquid volume approaches to half of the critical volume. The values of the constants of the reduced equation have been calculated. These values confirm that the law of corresponding states is satisfied for liquids as well as for gases.

Keywords: liquid, equation of state.

В работе [1] была впервые получена температурная зависимость объема жидкости

$$V = A + BT + CT^2 + V_e \cdot \exp(-E/RT), \quad (1)$$

которая хорошо согласуется с экспериментальными данными. В уравнении (1) A , B , C , V_e , E — постоянные величины. До этого сведений о каком-либо общем уравнении, связывающем между собой параметры состояния жидкости, не было [2]. В то же время в ряде источников указывалось, что поведение жидкости качественно следует уравнению Ван-дер-Ваальса [3, с. 339], [4, с. 301].

В работе [1] показано, что степенная часть формулы (1) обусловлена ангармоничностью колебаний молекул, а экспоненциальная — образованием в жидкости дырок вследствие перехода молекул из внутренних областей на поверхность. Так как такой переход связан с преодолением потенциального барьера, то в уравнении (1) появляется экспоненциальная зависимость от температуры [5].

Представляет интерес найти общую формулу, выражающую зависимость объема жидкости от температуры и давления. Из самых общих соображений следует, что в новой формуле

по сравнению с уравнением (1) должны появиться члены, содержащие давление. Фактически эти члены являются подгоночными элементами, поэтому обосновать каждый из них по отдельности невозможно. Подобная методика уже применялась при получении уравнения для вязкости [6-8].

В настоящей работе найдено следующее уравнение, передающее указанную зависимость:

$$V = A + BT - A_1P - CPT + C_1P^2 + C_2PT^2 + V_e \exp \left[-A_2P - \frac{E + A_3P}{RT} \right], \quad (2)$$

где $A, A_1, A_2, A_3, B, C, C_1, C_2, V_e, E$ — постоянные величины. В уравнении учтены только члены, содержащие температуру и давление в первой и второй степени, так как проведенные исследования показали, что члены, содержащие T и P в более высокой степени, не улучшают результат.

Для нахождения констант, входящих в уравнение (2) была использована та же методика, что и в работе [5]. Находился минимум среднего относительного отклонения расчетных величин от экспериментальных данных при варьировании постоянных коэффициентов. В результате оказалось, что для разных жидкостей не все слагаемые уравнения (2) существенно влияют на результат. Поэтому в дальнейшем эти слагаемые не учитывались, а в таблицах для постоянных коэффициентов этих слагаемых стоят нули.

Для расчетов были использованы экспериментальные данные из следующих справочников: [9] — для воды, [10] — для четырех сжиженных инертных газов, [11] — для остальных жидкостей.

Полученные значения постоянных коэффициентов для различных жидкостей приведены в таблице 1. Все величины в этой таблице выражены в тех единицах, в которых приводятся справочные данные: P в барах, V в м³/кг (для водорода в см³/моль), T в К, E в кДж/моль. Для универсальной газовой постоянной в расчетах использовалось стандартное значение $R = 8.3144 \cdot 10^{-3}$ кДж·моль⁻¹·К⁻¹.

В таблицах 2-4 приведено сравнение рассчитанных по формуле (2) объемов V_p с экспериментальными $V_э$ для трех разнотипных жидкостей: аргона, воды и бензола. Из таблиц 2-4 видно, что при заданном давлении до определенной температуры наблюдается хорошее согласие между рассчитанными и экспериментальными объемами. Максимальное расхождение между ними в этом интервале не превышает 0.5 %. Указанные температуры тем выше, чем больше давление. Соответствующие данным температурам объемы жидкостей в зависимости от жидкости и давления составляют $(0.35-0.5) \cdot V_c$, где V_c — критический объем. Выше этих температур экспериментальные значения объема начинают превышать расчетные значения. При этом расхождение между экспериментальными и расчетными значениями быстро увеличивается с ростом температуры. Это связано с постепенным переходом вещества из жидкого состояния в газообразное [12]. Кроме того, для воды отклонение расчетных объемов от экспериментальных значений наблюдается вблизи температуры плавления, что связано с аномальным поведением воды в этой области.

В таблице 5 на примере азота выполнено сравнение объемов, вычисленных по формулам (1) и (2) при давлении 500 бар. Объемы V_1 рассчитаны по уравнению (1) со значениями коэффициентов, взятыми из [1], а объемы V_2 рассчитаны по уравнению (2) с коэффициентами, взятыми из таблицы 1. Из таблицы 5 видно, что формула (1) дает более хорошее совпадение расчетных объемов с экспериментальными в небольшом температурном интервале. Формула (2) дает обобщенный результат в более широком интервале температур, благодаря учету влияния большого числа экспериментальных данных, полученных при различных давлениях.

Также представляет интерес проверка выполнения для жидкостей закона соответственных состояний [2], [4]. Для этого было рассмотрено приведенное уравнение

$$\varphi = a + b\tau - a_1\pi - c\pi\tau + c_1\pi^2 + c_2\pi\tau^2 + \varphi_e \exp \left[-a_2\pi - \frac{\varepsilon + a_3\pi}{\tau} \right], \quad (3)$$

где $\varphi = \frac{V}{V_c}$, $\tau = \frac{T}{T_c}$, $\pi = \frac{P}{P_c}$ — приведенные параметры, V_c, T_c, P_c — критические параметры, $a, a_1, a_2, a_3, b, c, c_1, c_2, \varphi_e, \varepsilon$ — постоянные безразмерные величины.

Константы, входящие в уравнения (2) и (3), связаны между собой следующими соотношениями: $A = aV_c, B = \frac{bV_c}{T_c}, A_1 = \frac{a_1V_c}{P_c}, C = \frac{cV_c}{P_cT_c}, C_1 = \frac{c_1V_c}{P_c^2}, C_2 = \frac{c_2V_c}{P_cT_c^2}, V_e = \varphi_eV_c, A_2 = \frac{a_2}{P_c}, A_3 = \frac{a_3RT_c}{P_c}, E = \varepsilon RT_c$.

Значения критических параметров V_c, T_c, P_c взяты из [11]. Округленные значения этих параметров, использованные в расчетах, приведены в таблице 6. Найденные значения безразмерных констант приведены в таблице 7. Из таблицы 7 видно, что константы уравнения (3) для различных жидкостей действительно значительно ближе друг к другу по величине, чем константы уравнения (2).

Следует еще отметить, что для неона и водорода в уравнении состояния (2) учитывается больше слагаемых по сравнению с однотипными веществами. Это связано с тем, что у неона и водорода критические давления P_c наименьшие среди однотипных веществ. Поэтому при равных интервалах изменения внешнего давления у неона и водорода будут наибольшие интервалы изменения приведенного давления π , а это влияет на результаты расчетов [12].

Таблица 1. Значения констант уравнения (2)

Жидкость	A	A ₁	A ₂	A ₃	B	C	C ₁	C ₂	V _e	E
Ne	6.75·10 ⁻⁴	8.2·10 ⁻⁸	1.9·10 ⁻³	8.0·10 ⁻⁴	3.54·10 ⁻⁶	3.3·10 ⁻¹⁰	0	0	3.1·10 ⁻³	0.89
Ar	5.71·10 ⁻⁴	5.1·10 ⁻⁸	2.0·10 ⁻³	7.5·10 ⁻⁴	1.31·10 ⁻⁶	0	0	0	4.6·10 ⁻³	3.6
Kr	3.28·10 ⁻⁴	3.0·10 ⁻⁸	2.5·10 ⁻³	5.6·10 ⁻⁴	6.13·10 ⁻⁷	0	0	0	4.8·10 ⁻³	5.9
Xe	2.66·10 ⁻⁴	2.6·10 ⁻⁸	2.9·10 ⁻³	2.2·10 ⁻⁴	3.97·10 ⁻⁷	0	0	0	5.3·10 ⁻³	8.8
H ₂	23.6	1.5·10 ⁻²	2.0·10 ⁻³	3.8·10 ⁻³	0.156	9.0·10 ⁻⁵	9.2·10 ⁻⁶	0	113	0.7
N ₂	9.79·10 ⁻⁴	1.0·10 ⁻⁷	2.6·10 ⁻³	6.0·10 ⁻⁴	2.37·10 ⁻⁶	0	0	0	8.3·10 ⁻³	3.0
O ₂	7.06·10 ⁻⁴	5.7·10 ⁻⁸	1.4·10 ⁻³	1.2·10 ⁻³	1.45·10 ⁻⁶	0	0	0	6.3·10 ⁻³	3.72
CH ₄	1.82·10 ⁻³	1.8·10 ⁻⁷	2.2·10 ⁻³	8.4·10 ⁻⁴	3.95·10 ⁻⁶	2.3·10 ⁻¹⁰	0	0	1.5·10 ⁻²	4.7
C ₆ H ₆	8.23·10 ⁻⁴	6.5·10 ⁻⁹	6.2·10 ⁻³	-1.4·10 ⁻²	1.0·10 ⁻⁶	2.2·10 ⁻¹⁰	0	0	3.4·10 ⁻²	20.0
H ₂ O	9.45·10 ⁻⁴	4.8·10 ⁻⁸	4.4·10 ⁻⁴	7.1·10 ⁻⁴	1.61·10 ⁻⁷	0	0	1.6·10 ⁻¹³	1.5·10 ⁻²	18.5
D ₂ O	8.82·10 ⁻⁴	6.7·10 ⁻⁸	6.6·10 ⁻⁴	1.2·10 ⁻³	5.53·10 ⁻⁸	0	0	3.9·10 ⁻¹³	1.9·10 ⁻²	19.3

Таблица 2. Сравнение объемов, рассчитанных по формуле (2), с экспериментальными значениями для аргона

P, бар	T, К	V _p , 10 ⁻⁶ м ³ /кг	V _э , 10 ⁻⁶ м ³ /кг	P, бар	T, К	V _p , 10 ⁻⁶ м ³ /кг	V _э , 10 ⁻⁶ м ³ /кг
1	85	710	710	400	130	777	776
2	90	726	726	400	150	838	838
4	85	710	710	400	160	870	873
4	90	726	726	400	170	904	911
4	95	743	744	400	180	939	952
4	100	762	763	600	100	682	682
10	85	709	709	600	120	722	722
10	95	742	742	600	140	767	767
10	105	780	782	600	160	816	817
10	115	825	832	600	170	842	843
50	90	719	719	600	180	869	871
50	100	752	752	600	200	924	931
50	110	791	792	800	120	701	702

50	115	812	815	800	140	739	739
50	120	834	841	800	160	779	780
100	90	712	711	800	180	822	823
100	100	742	742	800	200	866	868
100	110	778	778	800	220	912	917
100	120	818	820	800	230	935	942
100	130	862	872	1000	120	685	685
200	90	699	699	1000	140	718	718
200	100	726	726	1000	160	753	753
200	110	756	755	1000	180	790	789
200	120	790	789	1000	200	828	826
200	130	827	828	1000	220	866	865
200	140	867	873	1000	240	905	906
200	150	910	926	1000	260	944	948
400	95	690	690	1000	280	983	992
400	110	724	724	1000	300	1026	1037

Таблица 3. Сравнение объемов, рассчитанных по формуле (2), с экспериментальными значениями для воды

P , бар	T , К	V_p , 10^{-6} м ³ /кг	$V_э$, 10^{-6} м ³ /кг	P , бар	T , К	V_p , 10^{-6} м ³ /кг	$V_э$, 10^{-6} м ³ /кг
1	273	993	1000	400	373	1024	1024
1	303	1003	1004	400	423	1066	1066
1	323	1012	1012	400	473	1122	1122
1	363	1036	1036	400	523	1195	1198
10	273	993	1000	600	273	970	972
10	303	1003	1004	600	303	980	980
10	373	1043	1043	600	323	988	988
10	443	1114	1114	600	373	1015	1016
40	273	992	998	600	423	1055	1055
40	303	1003	1002	600	473	1107	1107
40	373	1042	1042	600	523	1175	1176
40	423	1088	1088	600	563	1239	1248
40	473	1153	1154	800	273	963	964
100	273	988	995	800	303	973	972
100	303	1000	1000	800	323	981	980
100	323	1008	1008	800	373	1007	1008
100	373	1039	1039	800	423	1044	1045
100	423	1084	1084	800	473	1094	1094
100	473	1148	1148	800	523	1157	1157
200	273	986	990	800	543	1186	1187
200	303	996	996	800	573	1234	1240
200	323	1004	1003	1000	273	955	957
200	373	1034	1034	1000	323	973	973
200	423	1078	1078	1000	373	999	1000
200	473	1139	1139	1000	423	1035	1036
200	523	1217	1225	1000	473	1082	1082

Уравнение состояния жидкости

400	273	978	981	1000	523	1142	1141
400	303	988	987	1000	573	1213	1215
400	323	996	995	1000	623	1296	1311

Таблица 4. Сравнение объемов, рассчитанных по формуле (2), с экспериментальными значениями для бензола

P , бар	T , К	V_p , 10^{-6} м ³ /кг	$V_{\text{э}}$, 10^{-6} м ³ /кг	P , бар	T , К	V_p , 10^{-6} м ³ /кг	$V_{\text{э}}$, 10^{-6} м ³ /кг
1	280	111	111	200	500	146	146
1	300	113	114	200	550	158	158
1	325	117	117	200	600	171	174
1	350	121	121	300	280	109	109
10	280	111	111	300	350	117	117
10	300	113	114	300	400	124	124
10	350	121	121	300	450	132	132
10	400	130	130	300	500	141	141
10	450	143	143	300	550	150	150
50	280	111	111	300	600	160	160
50	350	120	120	400	280	108	108
50	400	129	129	400	350	116	116
50	450	141	141	400	400	122	122
50	500	156	158	400	450	129	129
100	280	110	110	400	500	137	137
100	350	120	120	400	550	144	144
100	400	128	128	400	600	153	152
100	450	139	139	500	280	108	108
100	500	153	153	500	350	115	115
100	550	167	174	500	400	121	121
200	280	110	110	500	450	127	127
200	350	118	118	500	500	133	134
200	400	126	126	500	550	140	140
200	450	135	135	500	600	147	147

Таблица 5. Сравнение объемов, рассчитанных по формулам (1) и (2), для азота при $P = 500$ бар

T , К	V_1 , 10^{-7} м ³ /кг	V_2 , 10^{-7} м ³ /кг	$V_{\text{э}}$, 10^{-7} м ³ /кг
75	1117	1118	1117
80	1136	1134	1135
85	1155	1152	1154
90	1174	1170	1173
95	1193	1189	1193
100	1213	1209	1213
105	1234	1229	1234
110	1255	1251	1255
115	1276	1273	1276
120	1298	1296	1298

125	1320	1320	1320
130	1343	1344	1343
135	1367	1369	1366
140	1390	1394	1390
150	1444	1445	1442
160	1490	1498	1497
170	1543	1551	1554
180	1597	1605	1614
190	1653	1659	1675
200	1709	1714	1737

Таблица 6. Значения критических параметров

Жидкость	$V_c, 10^{-3} \text{ м}^3/\text{кг}$	$T_c, \text{ К}$	$P_c, \text{ бар}$
Ne	2.07	45	26
Ar	1.87	151	49
Kr	1.1	209	55
Xe	0.91	290	58
H ₂ *		33	13
N ₂	3.3	126	34
O ₂	2.46	155	51
CH ₄	6.16	191	47
C ₆ H ₆	3.3	563	49
H ₂ O	3.15	647	221
D ₂ O	3.0	645	218

* $V_c(\text{H}_2) = 64 \text{ см}^3/\text{моль}$

Таблица 7. Значения безразмерных констант уравнения (3)

Жидкость	a	a_1	a_2	a_3	b	c	c_1	c_2	φ_e	ε
Ne	0.328	$1.08 \cdot 10^{-3}$	0.051	0.056	0.075	$1.3 \cdot 10^{-4}$	0	0	1.67	2.46
Ar	0.308	$1.4 \cdot 10^{-3}$	0.10	0.027	0.104	0	0	0	2.8	3.0
Kr	0.298	$1.52 \cdot 10^{-3}$	0.14	0.016	0.117	0	0	0	4.4	3.4
Xe	0.292	$1.66 \cdot 10^{-3}$	0.17	0.0036	0.127	0	0	0	5.8	3.65
H ₂	0.369	$3.0 \cdot 10^{-3}$	0.025	0.18	0.079	$5.7 \cdot 10^{-4}$	$2.3 \cdot 10^{-5}$	0	1.7	2.5
N ₂	0.297	$1.1 \cdot 10^{-3}$	0.088	0.019	0.091	0	0	0	2.6	2.9
O ₂	0.286	$1.2 \cdot 10^{-3}$	0.073	0.047	0.093	0	0	0	2.6	2.9
CH ₄	0.296	$1.5 \cdot 10^{-3}$	0.11	0.021	0.124	$3.1 \cdot 10^{-4}$	0	0	2.8	3.1
C ₆ H ₆	0.249	$9.6 \cdot 10^{-5}$	0.31	-0.15	0.171	$1.8 \cdot 10^{-3}$	0	0	10.7	4.3
H ₂ O	0.300	$3.5 \cdot 10^{-3}$	0.098	0.035	0.033	0	0	$5.3 \cdot 10^{-3}$	4.8	3.44
D ₂ O	0.282	$4.0 \cdot 10^{-3}$	0.14	0.040	0.039	0	0	$7.0 \cdot 10^{-3}$	9.0	4.0

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Фогельсон Р.Л. Температурная зависимость объема жидкости / Р.Л. Фогельсон, Е.Р. Лихачев // ЖТФ. — 2009. — Т. 79, Вып. 7. — С. 156–158.

- [2] Рид Р. Свойства газов и жидкостей / Р. Рид, Дж. Праусниц, Т. Шервуд. — Л.: Химия, 1982. — 592 с.
- [3] Леонтович М.А. Введение в термодинамику. Статистическая физика / М.А. Леонтович. — М.: Наука, 1983. — 416 с.
- [4] Ландау Л.Д. Теоретическая физика. Т. 5: Ч. 1. Статистическая физика / Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. — М.: Физматлит, 2005. — 616 с.
- [5] Фогельсон Р.Л. Температурная зависимость вязкости / Р.Л. Фогельсон, Е.Р. Лихачев // ЖТФ. — 2001. — Т. 71, вып. 8. — С. 128–131.
- [6] Лихачев Е.Р. Зависимость вязкости воды от температуры и давления / Е.Р. Лихачев // ЖТФ. — 2003. — Т. 73, вып. 4. — С. 135–136.
- [7] Лихачев Е.Р. Зависимость вязкости сжиженных инертных газов от температуры и давления / Е.Р. Лихачев // Журнал физической химии. — 2004. — Т. 78, № 6. — С. 1142–1143.
- [8] Лихачев Е.Р. Зависимость вязкости сжиженных газов от температуры и давления / Е.Р. Лихачев // Вестн. Воронеж. гос. ун-та. Сер. Физика, математика. — 2009. — № 1. — С. 56–58.
- [9] Вукалович М.П. Таблицы теплофизических свойств воды и водяного пара / М.П. Вукалович, С.Л. Ривкин, А.А. Александров. — М.: Изд-во стандартов, 1969. — 408 с.
- [10] Рабинович В.А. Теплофизические свойства неона, аргона, криптона и ксенона / В.А. Рабинович, А.А. Вассерман, В.И. Недоступ, Л.С. Векслер. — М.: Изд-во стандартов, 1976. — 636 с.
- [11] Варгафтик Н.Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей / Н.Б. Варгафтик. — М.: Наука, 1972. — 720 с.
- [12] Лихачев Е.Р. Критические параметры газа / Е.Р. Лихачев // Вестн. Воронеж. гос. ун-та. Сер. Физика, математика. — 2013. — № 1. — С. 94–98.

REFERENCES

- [1] Fogel'son R.L., Likhachev E.R. Temperature Dependence of Liquid Volume. [Fogel'son R.L., Lixachev E.R. Temperaturnaya zavisimost' ob"ema zhidkosti]. *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki — Technical Physics. The Russian Journal Of Applied Physics*, 2009, Vol. 79, no. 7, pp. 156–158.
- [2] Reid R., Prausnitz J., Sherwood T. The Properties of Gases and Liquids. [Rid R., Prausnic Dzh., Shervud T. Svoystva gazov i zhidkoste]. Leningrad: Khimija, 1982, 592 p.
- [3] Leontovich M.A. Introduction to Thermodynamics. Statistical Physics. [Leontovich M.A. Vvedenie v termodinamiku. Statisticheskaya fizika]. Moscow: Nauka, 1983, 416 p.
- [4] Landau L.D., Lifshitz E.M. Course of Theoretical Physics. Vol. 5: Statistical Physics. [Landau L.D. Teoreticheskaya fizika. T. 5: Ch. 1. Statisticheskaya fizika]. Moscow: Fizmatlit, 2005, 616 p.
- [5] Fogel'son R.L., Likhachev E.R. Temperature Dependence of Viscosity. [Fogel'son R.L., Lixachev E.R. Temperaturnaya zavisimost' vyazkosti]. *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki — Technical Physics. The Russian Journal Of Applied Physics*, 2001, Vol. 71, no. 8, pp. 128–131.
- [6] Likhachev E.R. Dependence of the Water Viscosity on Temperature and Pressure. [Lixachev E.R. Zavisimost' vyazkosti vody ot temperatury i davleniya]. *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki — Technical Physics. The Russian Journal Of Applied Physics*, 2003, Vol. 73, no. 4, pp. 135–136.
- [7] Likhachev E.R. Dependence of the Viscosity of Liquefied Inert Gases on the Temperature and Pressure. [Lixachev E.R. Zavisimost' vyazkosti szhizhennykh inertnykh gazov ot temperatury i davleniya]. *Zhurnal fizicheskoy khimii — Russian Journal of Physical Chemistry A*, 2004, Vol. 78, no. 6, pp. 1142–1143.
- [8] Likhachev E.R. Dependence of the Viscosity of Liquefied Gases on the Temperature and Pressure. [Lixachev E.R. Zavisimost' vyazkosti szhizhennykh gazov ot temperatury i davleniya]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Fizika. Matematika — Proceedings of Voronezh State University. Series: Physics. Mathematics*, 2009, no. 1, pp. 56–58.

[9] Vukalovich M.P., Rivkin S.L., Aleksandrov A.A. Tables of Thermal Properties of Water and Steam. [Vukalovich M.P., Rivkin S.L., Aleksandrov A.A. Tablicy teplofizicheskikh svojstv vody i vodyanogo para]. Moscow: Izd. Standartov, 1969, 408 p.

[10] Rabinovich V.A., Vasserman A.A., Nedostup V.I., Veksler L.S. Thermal Properties of Neon, Argon, Krypton, and Xenon. [Rabinovich V.A., Vasserman A.A., Nedostup V.I., Veksler L.S. Teplofizicheskie svojstva neona, argona, kriptona i ksenona]. Moscow: Izd. Standartov, 1976, 636 p.

[11] Vargaftik N.B. Tables of Thermophysical Properties of Liquids and Gases. [Vargaftik N.B. Spravochnik po teplofizicheskim svojstvam gazov i zhidkostej]. Moscow: Nauka, 1972, 720 p.

[12] Likhachev E.R. Critical Parameters of Gas. [Lixachev E.R. Kriticheskie parametry gaza]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Fizika. Matematika — Proceedings of Voronezh State University. Series: Physics. Mathematics*, 2013, no. 1, pp. 94–98.

Лихачев Евгений Робертович, кандидат физико-математических наук, ассистент кафедры физики твердого тела и наноструктур, Воронежский государственный университет, г. Воронеж, Российская Федерация

E-mail: lih73@mail.ru

Тел.: (473)220-83-63

Likhachev E.R., Candidate of physico-mathematical sciences, assistant of Solid State Physics and Nanostructures Department of Voronezh State University, Voronezh, Russian Federation

E-mail: lih73@mail.ru

Tel.: (473)220-83-63