

УРАВНЕНИЕ СОСТОЯНИЯ ЖИДКОЙ РТУТИ

Е. Р. Лихачев

Воронежский государственный университет

Поступила в редакцию 06.04.2015 г.

Аннотация. Найдено уравнение состояния жидкой ртути, которое хорошо согласуется с PVT-таблицей из монографии “Термофизические свойства ртути”. Эта таблица была получена в результате анализа большого числа различных экспериментальных данных и охватывает широкие интервалы температуры (243–1073 К) и давления (1–20000 бар). Уравнение состояния жидкой ртути оказалось подобным уравнениям состояния жидких газов, которые были найдены ранее. Вычислены значения постоянных величин, входящих в уравнение. Приведено сравнение рассчитанных по найденному уравнению состояния объемов с табличными. Расчетные объемы отличаются от табличных значений не более чем на 0.5 %. Показано, что при очень большом давлении в жидкой ртути отсутствуют дырки.

Ключевые слова: жидкость, ртуть, уравнение состояния.

EQUATION OF STATE OF LIQUID MERCURY

E. R. Likhachev

Abstract. The equation of state of liquid mercury has been found. It is in good agreement with the PVT-table from the monograph “Thermophysical properties of mercury”. This table has been obtained by analysis of a large amount of different experimental data and covers a wide ranges of temperature (243–1073 K) and pressure (1–20000 bar). The equation of state of liquid mercury is similar to the equations of state of liquid gases which were found earlier. The values of the constants of the equation have been calculated. Comparison of volumes calculated by the equation of state with the tabulated values is represented. Calculated volumes deviate from the tabulated values less than 0.5%. It is shown that under very high pressure there are no holes in the liquid mercury.

Keywords: liquid, mercury, equation of state.

В работе [1] было получено следующее уравнение, выражающее зависимость объема жидкости от температуры и давления:

$$V = A + BT - A_1P - CPT + C_1P^2 + C_2PT^2 + V_e \exp \left[-A_2P - \frac{E + A_3P}{RT} \right], \quad (1)$$

где $A, A_1, A_2, A_3, B, C, C_1, C_2, V_e, E$ – постоянные коэффициенты. Это уравнение хорошо согласуется с экспериментальными данными для 11 жидкостей [1]. Однако среди рассмотренных в [1] жидкостей отсутствует жидкий металл. В работе [2] авторы, используя большое число экспериментальных данных, получили PVT-таблицу для жидкой ртути в широких интервалах температуры (243–1073 К) и давления (1–20000 бар). Представляет интерес проверить, согласуются ли табличные значения из [2] с формулой (1).

В настоящей работе было проведено варьирование постоянных коэффициентов уравнения (1) для минимизации среднего относительного отклонения $\delta = \frac{1}{N} \sum_n \left| \frac{V_T - V_P}{V_T} \right|$. Здесь V_T –

табличные значения объема, V_p – расчетные значения объема, N – число использованных в расчете PVT -значений, $n = 1, 2, \dots, N$. В расчетах величины выражались в следующих единицах: P в барах, V в $\text{м}^3/\text{кг}$, T в К, E в $\text{кДж}/\text{моль}$. Для универсальной газовой постоянной использовалось значение $R = 8.3144 \cdot 10^{-3} \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$. Найденные значения постоянных коэффициентов приведены в таблице 1.

Таблица 1. Значения констант уравнения (1)

Константа	Значение
A	$7.15 \cdot 10^{-5}$
B	$7.86 \cdot 10^{-9}$
A_1	$2.2 \cdot 10^{-10}$
C	0
C_1	0
C_2	0
V_e	$3 \cdot 10^{-5}$
A_2	$7.6 \cdot 10^{-5}$
E	14
A_3	$2.8 \cdot 10^{-4}$

В таблице 2 приведено сравнение рассчитанных по формуле (1) объемов V_p с табличными V_T , взятыми из [2]. Максимальное расхождение между ними составляет приблизительно 0.5 %.

Таблица 2. Сравнение объемов, рассчитанных по формуле (1), с табличными значениями

P , бар	T , К	V_p , $10^{-7} \text{ м}^3/\text{кг}$	V_T , $10^{-7} \text{ м}^3/\text{кг}$	P , бар	T , К	V_p , $10^{-7} \text{ м}^3/\text{кг}$	V_T , $10^{-7} \text{ м}^3/\text{кг}$
10	243	734	732	8000	373	728	726
10	273	737	736	8000	473	737	737
10	373	748	749	8000	573	748	748
10	473	761	763	8000	673	759	759
10	573	776	777	8000	773	771	771
10	673	793	792	8000	873	783	783
10	773	810	807	8000	973	796	796
1000	243	732	729	8000	1073	808	809
1000	373	745	746	12000	303	713	710
1000	473	757	759	12000	373	718	717
1000	573	772	773	12000	473	727	727
1000	673	787	787	12000	573	737	737
1000	773	804	802	12000	673	747	747
1000	873	820	818	12000	773	757	757
1000	973	837	836	12000	873	768	768
1000	1073	853	855	12000	973	779	779
3000	253	728	725	12000	1073	790	791
3000	373	740	740	16000	323	705	704
3000	473	751	752	16000	373	709	709
3000	573	764	765	16000	473	718	718
3000	673	778	778	16000	573	727	727
3000	773	793	792	16000	673	736	736

3000	873	808	806	16000	773	746	745
3000	973	823	822	16000	873	755	755
3000	1073	838	839	16000	973	765	765
5000	263	725	721	16000	1073	775	775
5000	373	735	734	20000	343	698	699
5000	473	745	746	20000	373	700	701
5000	573	757	758	20000	473	709	710
5000	673	770	770	20000	573	717	718
5000	773	783	783	20000	673	726	726
5000	873	797	796	20000	773	735	735
5000	973	811	810	20000	873	744	743
5000	1073	825	826	20000	973	753	752
8000	283	720	717	20000	1073	763	762

В *PVT*-таблице обращает на себя внимание то, что при очень больших давлениях в пределах температурного интервала таблицы объем ртути меняется с температурой почти по линейному закону, а влияние экспоненциального члена практически отсутствует. Так при давлении $P = 20000$ бар температурную зависимость объема ртути хорошо передает следующая формула:

$$V = 6.7 \cdot 10^{-5} + 8.47 \cdot 10^{-9}T. \quad (2)$$

Сравнение рассчитанных по формуле (3) объемов с табличными значениями приведено в таблице 3. Отсутствие влияния экспоненциального члена, обусловленного образованием в жидкости дырок вследствие перехода молекул из внутренних областей на поверхность [1], свидетельствует о том, что при очень высоких давлениях в жидкой ртути отсутствуют дырки.

Таблица 3. Сравнение объемов, рассчитанных по формуле (2), с табличными значениями при давлении $P = 20000$ бар

T, K	$V_p,$ $10^{-7} \text{ м}^3/\text{кг}$	$V_t,$ $10^{-7} \text{ м}^3/\text{кг}$
343	699	699
373	702	701
473	710	710
573	719	718
673	727	726
773	735	735
873	744	743
973	752	752
1073	761	762

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лихачев Е.Р. Уравнение состояния жидкости / Е.Р. Лихачев // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Физика. Математика. — 2014. — № 3. — С. 41–48.
2. Теплофизические свойства ртути / М.П. Вукалович, А.И. Иванов, П.Р. Фокин, А.Т. Яковлев. — М.: Изд-во стандартов, 1971. — 312 с.

REFERENCES

1. Likhachev E.R. Equation of Liquid State. [Lixachev E.R. Uravnenie sostoyaniya zhidkosti]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Fizika. Matematika — Proceedings of Voronezh State University. Series: Physics. Mathematics*, 2014, no. 3, pp. 41–48.
2. Vukalovich M.P., Ivanov A.I., Fokin P.R., Yakovlev A.T. Thermophysical Properties of Mercury. [Vukalovich M.P., Ivanov A.I., Fokin P.R., Yakovlev A.T. Teplofizicheskie svoystva rtuti]. Moscow: Izd. Standartov, 1971, 312 p.

Лихачев Евгений Робертович, кандидат физико-математических наук, ассистент кафедры физики твердого тела и наноструктур, Воронежский государственный университет, г. Воронеж, Российская Федерация
E-mail: likhachev@phys.vsu.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: likhachev@phys.vsu.ru
Tel.: (473)220-83-63