АКАДЕМИЯ НАУК СССР
ТЕПЛОФИЗИКА ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУР

Том 4 *1966* *№ 3*

УДК 669.88:532.14

ПЛОТНОСТЬ ЛИТИЯ, НАТРИЯ И КАЛИЯ ДО 1500—1600°С

Е. И. Гольцова

Приведены описание экспериментальной установки и результаты измерений плотности лития, натрия и калия до 1500 ÷ 1600° С. Работа выполнена методом пикнометра. Приведены результаты сравнения с данными других авторов до 700° С.

Литий, натрий и калий представляют интерес как высокотемпературные жидкометаллические теплоносители, применяющиеся в атомной энергетике и космической технике. В связи с этим необходимо знание их теплофизических свойств, в том числе плотности, при высоких температурах. В настоящее время имеются данные по плотности указанных металлов лишь до 700° С [1—3].

Нами было проведено экспериментальное исследование лития, натрия и калия до температуры 1500 ÷ 1600° С. При таких высоких температурах эксперименты с жидкими щелочными металлами связаны с большими трудностями, обусловленными их высокой химической активностью, большой испаряемостью и резким повышением давления насыщения с температурой. В связи с этим возникает необходимость применения экспериментальной установки высокого давления и такого метода исследования, при котором испарение металла не оказывает существенного влияния на точность измерения.

Определение плотности лития, натрия и калия производилось методом пикнометра. Величина плотности ρ при этом определялась как отношение массы металла m, заключенной в тигле — пикнометре при данной температуре t, к его объему V, т. е. $\rho = m / V$, или после подстановки величин, определяющих m и V,

$$\rho = (m_м - m_т)\,\rho_в / (m_в - m_т)(1 + \beta t),\ г/см^3,$$

где $m_м$ — масса тигля с металлом, $г$; $m_т$ — масса пустого тигля, $г$; $m_в$ — масса тигля с водой, $г$; β — коэффициент объемного расширения материала тигля, $град^{-1}$; $\rho_в$ — плотность воды при комнатной температуре, $г/см^3$.

При исследовании применялись молибденовые тигли, сваренные аргонодуговой сваркой. Конструкция тигля изображена на рис. 1. Измерения производились следующим образом.

Тигель *1* заполнялся под вакуумом исследуемым металлом; затем на него навинчивалась дополнительная емкость *2* с массивным подвижным конусным штоком *3* и крышкой *4*, и тигель на специальной подставке помещался в высокотемпературную электропечь. При нагревании металл расширялся и вытекал из тигля через узкое выходное отверстие $d = 1$ *мм* в емкость *2*. При достижении нужной температуры отключался нагрев печи, при этом конусный шток *3* опускался вниз, закрывая выходное отвер-

стие и отсекая каплю металла. После охлаждения тигель вынимался из печи; с него снималась емкость *2* и определялась масса тигля с оставшимся металлом, тем самым определялась масса металла m, занимавшая объем V при температуре t. После этого тигель снова помещался в печь, и опыты повторялись при другой, более высокой температуре. Объем тигля V определялся перед опытами заполнением его водой с последующим вве-

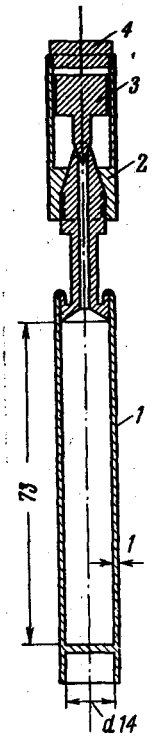

Рис. 1

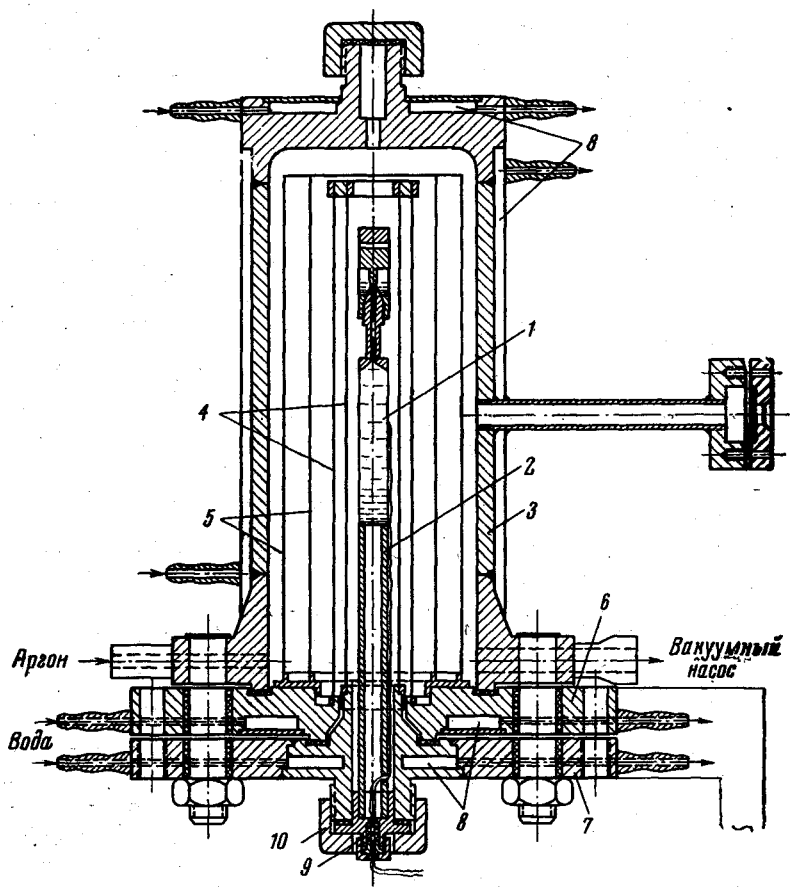

Рис. 2

Рис. 1. Тигель — пикнометр из молибдена

Рис. 2. Схема экспериментальной установки

1 — тигель, *2* — подставка, *9* — уплотнение для вывода термопары, *10* — накидная гайка

дением поправки на термическое расширение материала тигля. Коэффициент термического расширения для молибдена брался из [4].

Температура металла t до 1200° С измерялась хромель-алюмелевой термопарой, выше 1200° С — платина-платинородиевой. Спай термопары плотно прижимался к боковой поверхности тигля молибденовым кольцом. С внутренней стороны кольца делался конусный надпил, в который входил спай термопары, покрытый молибденовой ленточкой. Поворотом кольца по окружности тигля обеспечивалось плотное прижатие спая термопары к поверхности тигля. Предварительно было проведено измерение поля температур по высоте нагревателя. После этого тигель был установлен на такой высоте относительно нагревателя, где имело место достаточно равномерное температурное поле, и температура измерялась одной термопа-

рой в середине тигля. Отклонение этой температуры от средней составляло приблизительно ±0,5% от измеряемой температуры.

Печь, в которой производился нагрев металла (рис. 2), была изготовлена из толстостенной трубы *3* из нержавеющей стали $d = 100$ *мм* и длиной $l = 250$ *мм*, рассчитанной на давление 150 *ата*. В центре печи располагался двойной трубчатый нагреватель *4* из молибденовой фольги толщиной 0,1 и 0,3 *мм*, окруженный двумя экранами *5* из нержавеющей стали. Диаметр внутреннего нагревателя 22 *мм*, высота 230 *мм*. Ток к нагревателю подводился через фланцы *6*, *7*, к которым подсоединялись медные шины от силового трансформатора. Фланцы и корпус печи охлаждались водой *8*.

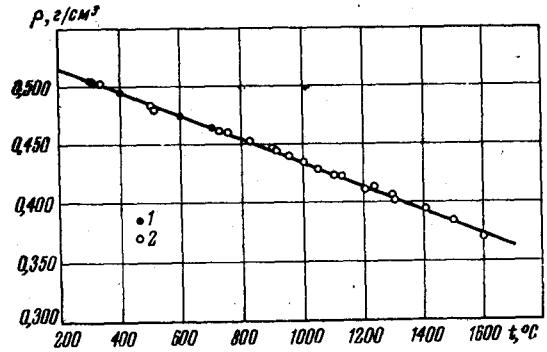

Рис. 3. Плотность лития в зависимости от температуры: *1* — [1]; *2* — данные автора

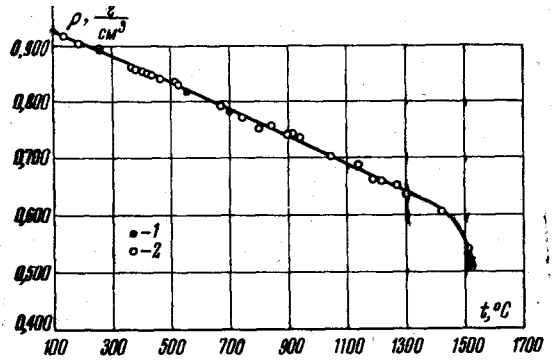

Рис. 4. Плотность натрия в зависимости от температуры: *1*, *2* — см. рис. 3

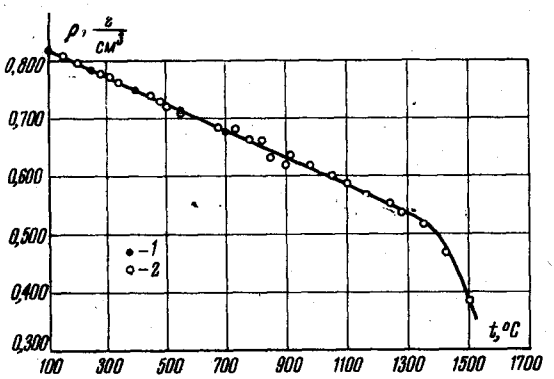

Рис. 5. Плотность калия в зависимости от температуры: *1*, *2* — см. рис. 3

Исследования проводились в атмосфере аргона, давление которого в каждом случае было выше давления насыщенных паров металла на $10 \div 20$ *ат*. (Наибольшее давление было 65 *ата* в опытах с калием при температуре 1500° С). Было замечено, что применение высоких давлений обеспечивает наиболее надежные результаты. Это связано, очевидно, с тем, что увеличение давления замедляет скорость испарения металла, чем всегда обеспечивает наличие металла в дополнительной емкости при ее вскрытии. Последнему способствовало также и то, что опыты проводились сравнительно быстро (подъем температуры, ее измерение и охлаждение занимали меньше 30 мин.), и время подъема металла, по всей вероятности, опережало время испарения. Испарение происходило в основном с поверхности вытекшего металла, что не влияло на результаты измерения, а до момента вытекания — с очень малой поверхности внутреннего отверстия капилляра, что в свою очередь влияло лишь на массу вытекшего металла.

Результаты измерения представлены на рис. 3—5 и в табл. 1. Полученные значения плотности удовлетворительно согласуются с данными справочника [1] и другими литературными данными до 700° С, которые

Таблица 1

Экспериментальные значения плотности

Литий		Натрий		Калий		Литий		Натрий		Калий	
t, °C	ρ, г/см³	t, °C	ρ, г/см³	t, °C	ρ, г/см³	t, °C	ρ, г/см³	t, °C	ρ, г/см³	t, °C	ρ, г/см³
Опыты 1961 г.						Опыты 1963 г.					
						827	0,452	460	0,839	735	0,679
332	0,502	428	0,847	280	0,778	910	0,444	740	0,769	820	0,657
501	0,483	668	0,792	450	0,739	954	0,440	840	0,756	910	0,634
751	0,461	801	0,753	551	0,706	1051	0,423	916	0,742	981	0,616
899	0,447	897	0,739	675	0,683	1130	0,423	1023	0,716	1100	0,586
1003	0,435	941	0,736	779	0,659	1235	0,414	1140	0,685	1163	0,565
1104	0,424	1046	0,702	850	0,632	1300	0,305	1270	0,649	1240	0,550
1205	0,411	1191	0,662	901	0,618	1407	0,395	1122	0,603	1350	0,515
1303	0,402	1213	0,660	1050	0,600	1500	0,384	1512	0,539	1424	0,466
		1300	0,636	1280	0,536	1600	0,368			1500	0,386

Таблица 2

Плотность лития, натрия и калия (сглаженные значения)

t, °C	Плотность ρ, г/см³			t, °C	Плотность ρ, г/см³			t, °C	Плотность ρ, г/см³		
	литий	натрий	калий		литий	натрий	калий		литий	натрий	калий
100	—	0,927	0,819	700	0,464	0,785	0,676	1200	0,414	0,665	0,558
200	0,515	0,903	0,796	800	0,454	0,761	0,653	1300	0,404	0,641	0,534
300	0,505	0,880	0,772	900	0,444	0,737	0,629	1400	0,394	0,616	0,490
400	0,495	0,856	0,748	1000	0,434	0,713	0,606	1500	0,384	0,557	0,386
500	0,484	0,832	0,724	1100	0,424	0,689	0,582	1600	0,374	—	—
600	0,474	0,808	0,700								

на графиках не приводятся. Видно, что линейная зависимость плотности от температуры имеет место для лития во всем исследованном диапазоне температур (до 1600° С), для натрия — приблизительно до 1460 и для калия — до ~1400° С. Далее наступает резкое уменьшение плотности с ростом температуры, аналогичное изменению плотности неметаллических жидкостей вблизи критической области. Однако эта часть кривой нуждается в дальнейшем исследовании.

Зависимость сглаженных значений плотности от температуры выражается уравнениями

для лития до 1600° С

$$\rho_t = 0{,}515 - 0{,}101 \cdot 10^{-3}(t - 200°) \ г/см^3,$$

для натрия до ~1460° С

$$\rho_t = 0{,}927 - 0{,}238 \cdot 10^{-3}(t - 100°) \ г/см^3,$$

для калия до ~1400° С

$$\rho_t = 0{,}819 - 0{,}238 \cdot 10^{-3}(t - 100°) \ г/см^3.$$

Средний разброс экспериментальных точек относительно указанных кривых составляет ±0,3% для лития, ±0,5% для натрия и ±0,7% для калия.

Сглаженные значения плотности лития, натрия и калия в исследованном интервале температур приведены в табл. 2.

Относительная ошибка измерения плотности ~0,3%.

Энергетический институт
им. Г. М. Кржижановского

Поступила в редакцию
20 IX 1965

ЛИТЕРАТУРА

1. R. N. Lyon. Liquid Metals Handbook, 1950.
2. И. И. Новиков, А. Н. Соловьев, Е. Н. Хабахпашева, В. А. Груздев. Атомная энергия, № 4, 1956.
3. Н. А. Никольский, Н. А. Калакуцкая, И. М. Пчелкин, Т. В. Классен, В. А. Вельтищева. Теплоэнергетика, № 2, 1959.
4. Н. Б. Варгафтик. Теплофизические свойства веществ. Госэнергоиздат, 1956.