

Краевая задача (10), (11) сводится с помощью функции Грина к функциональному уравнению

$$F(\theta) = 0 \quad (12)$$

Здесь

$$F(\theta) = [\theta_1 - \theta(\xi, \tau) + \int_0^1 G(\xi, z) \frac{\partial \theta}{\partial \tau} dz] + S \left\{ (1 - \xi) [1 - \theta^4(0, \tau)] \times \right. \\ \left. \times \left[1 + \frac{16}{3h} S \theta^3(0, \tau) \right] + \frac{4}{3h} [\theta_1^4 - \theta^4(\xi, \tau)] \right\}, \quad G(\xi, z) = \begin{cases} (\xi - 1), & z \leq \xi \\ (z - 1), & z \geq \xi \end{cases}$$

Функциональное уравнение (12) содержит две неизвестные функции $\theta(\xi, \tau)$ и $\theta(0, \tau)$. Полагая $\xi = 0$, получаем из (12) еще одно уравнение, которое замыкает систему. Таким образом, исходная краевая задача (10), (11) свелась к системе их двух функциональных уравнений

$$F[\theta(\xi, \tau), \theta(0, \tau)] = 0, \quad F_1[\theta(\xi, \tau), \theta(0, \tau)] = 0 \quad (13)$$

Как и раньше, путем арифметизации сводим (13) к системе из $(m + 1)$ нелинейных алгебраических уравнений, к которой для численного решения применяется итерационный метод Ньютона.

Ниже представлены некоторые результаты численного решения системы (13) применительно к условиям $\theta_0 = 0$, $\theta_1 = 1$, $S = 10$ при различных значениях h .

На фиг. 3а, и в представлены результаты расчета в случае, когда $h = 40$, $h = 4$. Здесь отчетливо проявляется роль оптической толщины в формировании температурного поля в условиях закрепленного параметра S , характеризующего радиационно-кондуктивное соотношение в суммарном потоке тепла.

Это находит отражение в характере температурных профилей по всему слою, включая и весьма характерные скачки температуры во времени на границе. Как видно, при увеличении h темп прогрева всего слоя существенно понижается.

Поступила 25 V 1970

ЛИТЕРАТУРА

1. L i c k W. Transient energy transfer by radiation and conduction. Internat. J. Heat and Mass Trans., 1965, vol. 8, No. 1.
2. Х р о м о в А. В., Л и б и н Ю. В. Плотность источников тепла и температурное поле в кристалле рубинового ОКГ. Инж.-физ. ж., 1966, т. 11, № 4.
3. F o w l e A. A., S t r o n g P. F., C o m s t o c k D. F., S o x C. Computer program to predict heat transfer through glass. AIAA Journal, 1969, vol. 7, No. 3.
4. Р у б ц о в Н. А. К переносу теплового излучения в плоском слое поглощающей среды. ПМТФ, 1965, № 5.
5. К а н т о р о в и ч Л. В. О методе Ньютона. Тр. матем. ин-та АН СССР, 1949, т. 28.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЯЗКОСТИ ЦЕЗИЯ, НАТРИЯ И КАЛИЯ ВБЛИЗИ ТЕМПЕРАТУРЫ ЗАТВЕРДЕВАНИЯ

В. Н. Генрих, А. Б. Каплун

(Новосибирск)

При помощи вибрационного вискозиметра исследована вязкость чистого и технического цезия до 200°C и влияние кислорода на вязкость цезия. Растворенный кислород значительно увеличивает вязкость расплава, и вблизи температуры затвердевания вызывает резкое уменьшение амплитуды колебаний погруженной в расплав пластины за счет выпадения окислов на ее поверхность. Исследована вязкость натрия от 400°C до затвердевания и калия от 250°C до затвердевания. В исследуемых металлах, очищенных от газовых примесей вакуумной дистилляцией, аномалий температурного хода вязкости не обнаружено.

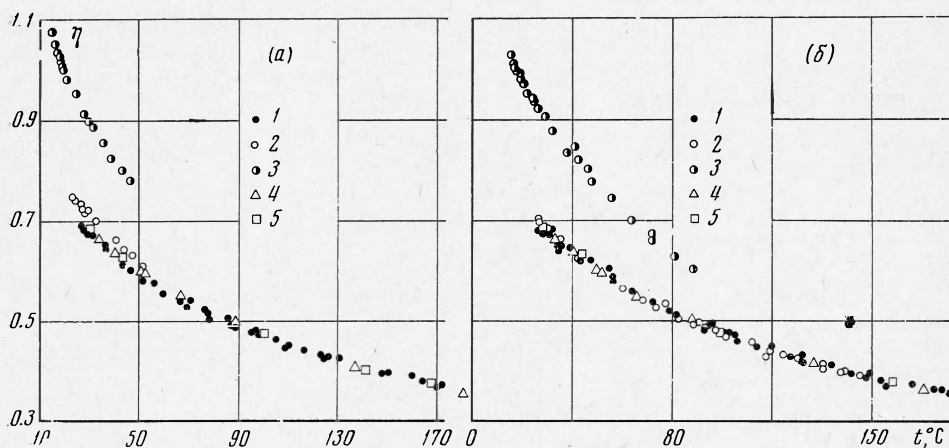
Наличие аномалий температурного хода и гистерезисов вязкости вблизи температуры затвердевания может свидетельствовать о структурных перестройках в жидкости и о так называемых явлениях «предкристаллизации» и «послеплавления».

Вязкость жидких металлов вблизи температуры затвердевания t^* изучена недостаточно.

Вязкость цезия, натрия и калия измерялась вибрационным методом, который является автоматическим и непрерывным и позволяет тщательно изучить поведение вязкости вблизи температуры затвердевания t^* и приблизиться к точке затвердевания меньше чем на 0.001°C .

Теория вибрационного метода измерения вязкости жидкостей, электрическая измерительная схема, схема измерений и методика измерений описаны ранее [3-6].

Цезий. По вязкости цезия в литературе имеются немногочисленные данные [1, 2], хорошо согласующиеся между собой, однако вблизи температуры затвердевания получено всего лишь несколько экспериментальных точек.



Фиг. 1

Исследовался цезий высокой чистоты с содержанием основного вещества не менее 99.996%; состав металлических примесей: $\text{K} < 0.0018\%$, $\text{Na} < 0.0003\%$, $\text{Ca} < 0.003\%$, $\text{Rb} < 0.0012\%$.

Для очистки от газовых примесей металл подвергался вакуумной дисцилиции при давлении 10^{-5} мм рт. ст. Исследования проводились в атмосфере очищенного гелия чистоты 99.97% при давлении в объеме над расплавом 1.2 ат. Тарировка вискозиметра проводилась также в атмосфере гелия при том же давлении.

На фиг. 1, а приведены результаты измерения вязкости (η , сПз) цезия от 180°C до затвердевания; точки 1, 2, 3, соответствуют измерениям $\text{Cs} + 0\% \text{O}_2$, $\text{Cs} + 0.4\% \text{O}_2$, $\text{Cs} + 1.5\% \text{O}_2$.

При температурах ниже 100°C температура устанавливалась с помощью жидкостного термостата, выше 100°C — с помощью печи сопротивления. Измерения проводились в различных температурных режимах: по стационарным точкам, при медленном (до $0.05^\circ\text{C}/\text{мин}$) и при быстром (до $10^\circ\text{C}/\text{мин}$) охлаждении и нагревании. Результаты всех серий измерений совпали. Среднеквадратичное отклонение экспериментальных точек от осредняющей кривой $\pm 0.5\%$, погрешность измерения вязкости в исследуемом диапазоне температур оценивается $\pm 1.0\%$. Измеренные значения вязкости цезия совпадают с данными из работ других авторов [1] и [2] (точки 4 и 5) с погрешностью, не превышающей погрешность эксперимента. Усредненные значения вязкости цезия описываются зависимостью (вязкость в сПз , температура в $^\circ\text{K}$)

$$\ln \eta = -2.322 + 584/T$$

Для расчета вязкости использовались данные А. С. Басина [8] по плотности.

Особенно тщательно исследовалась вязкость цезия вблизи температуры затвердевания t^* . В данном эксперименте имела возможность производить измерения через 0.01°C . Последний замер производился непосредственно перед затвердеванием, определяемым по срыву колебаний пластинки, а температура, при которой производился замер, отличается от температуры затвердевания t^* не более чем на 0.01°C .

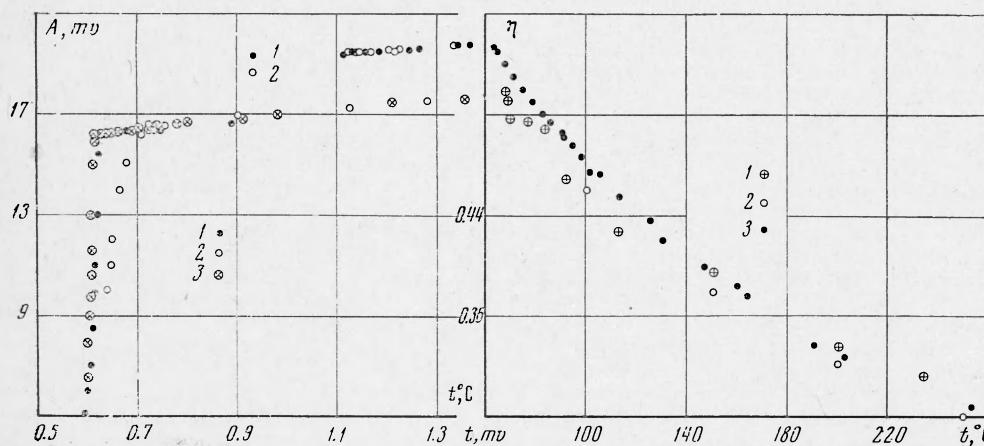
На фиг. 2 (верхние точки 1, 2 — чистый цезий, точки 1 — охлаждение, 2 — нагрев) приведена зависимость амплитуды колебаний пластинки от температуры расплава. Как видно, никаких аномалий этой зависимости и, следовательно, температурной зависимости вязкости чистого цезия нет вплоть до температуры затвердевания t^* .

В данной работе проводилось также качественное исследование влияния кислорода на вязкость цезия. Кислород вводился в объем над поверхностью металла. Окон-

чение растворения кислорода в металле определялось по уменьшению давления в объеме над расплавом до первоначального.

Кислород, растворенный в металле, вызывает увеличение вязкости (фиг. 1, а) и понижение температуры затвердевания t^* . С увеличением содержания кислорода в цезии Cs + 0% O₂, Cs + 0.4% O₂, Cs + 1.5% O₂ вес. соответственно уменьшалась температура затвердевания расплава $t^* = 27.8, 22.9, 14.5^\circ \text{C}$, а измеренная при температуре 35°C и данных концентрациях кислорода вязкость расплава $\eta = 0.63, 0.66, 0.82 \text{ спз}$.

После растворения кислорода в металле наблюдалось уменьшение амплитуды колебаний пластинки при приближении к температуре затвердевания. На фиг. 2 нижние точки — результаты измерения для Cs + 1.5% O₂: точки 1 — медленное охлаждение, 2 — медленный нагрев, 3 — охлаждение по стационарным точкам. Это связано с выпадением окислов из расплава на поверхность пластины. Выпадение твердой фазы из расплава визуально наблюдалось в специальном тигле со смотровыми окнами. Зависимость амплитуды колебаний пластины от температуры расплава t определялась по стационарным точкам с выдержкой на каждой точке 15–20 мин и с шагом 0.1°C . Амплитуда колебаний непрерывно менялась с уменьшением температуры от значений, определяемых вязкостью расплава, до нуля. Это, по-видимому, означает, что концентрация твердой фазы в расплаве изменяется от нуля до единицы. Тогда перегиб на кривой температурной зависимости амплитуды колебаний определяет температуру ликвидуса, а срыв колебаний соответствует температуре солидуса.



Фиг. 2

Фиг. 3

Перегиб на кривой $A = A(t)$ при нагреве лежит при более высоких температурах, чем при охлаждении, т. е. имеет место гистерезис зависимости $A = A(t)$. Это связано либо с различиями между процессами выпадения и растворения твердой фазы, либо с явлением концентрационного переохлаждения при охлаждении.

Заметим, что на термограмме жидкого цезия (время охлаждения от 40 до 15°C 1.5 час) не обнаружено никаких особенностей. Это связано в основном с малым количеством примеси в расплаве и малой величиной теплового эффекта при выпадении твердой фазы из расплава.

Аналогичные результаты были получены и при исследовании технического цезия очищенного вакуумной дисцилляцией. Исследовался цезий РЭТУ-117-59 с содержанием основного вещества не менее 98%; основные примеси: K < 0.5%, Ca < 0.1%, Na < 0.05%, Rb < 1%; состав очищенного цезия: K < 0.013%, Na < 0.018% и Rb < 0.12%. Вязкость технического цезия, очищенного вакуумной дисцилляцией, совпала в пределах погрешности эксперимента ($\pm 1.5\%$) во всем исследованном температурном интервале с данными по вязкости цезия высокой чистоты и с данными других авторов (фиг. 1, б).

Вязкость технического очищенного цезия измерялась дважды на двух пробах металла. В обоих случаях никаких аномалий температурного хода вязкости вплоть до затвердевания не обнаружено.

После введения в цезий 1.5% вес. кислорода вязкость увеличивается приблизительно на 30%. Вблизи температуры затвердевания наблюдались те же явления, что и в чистом цезии с добавками кислорода.

Натрий. Вязкость натрия изучена, по-видимому, лучше, чем вязкость всех других металлов. Данные по вязкости натрия разных авторов хорошо согласуются между

собой (см., например, [9-11]). Однако при температурах выше на 5—10° С температуры плавления, имеется считанное количество экспериментальных точек.

Авторами проведено исследование вязкости натрия с содержанием основного вещества не менее 99.974% (основные металлические примеси: K < 0.013%, Rb < 0.002%, Cs < 0.0064% и Ca < 0.005% вес.) от 400° С до затвердевания. Для очистки от газовых примесей металл дисциллировался в вакууме 10⁻⁵ мм рт. ст. Исследование проводилось в различных температурных режимах: по стационарным точкам, при медленном (5—10° С в час) и быстром (до 500° С в час) охлаждении и нагревании. Все серии измерения в пределах разброса точек совпали. В стационарном температурном режиме получено около 40 точек. Погрешность эксперимента оценивается нами ±1.5%. Экспериментальные данные по вязкости натрия описываются уравнением (вязкость в *спз*, температура в °K)

$$\ln \eta = -2.470 + 771/T$$

Измеренные значения вязкости хорошо согласуются с известными данными, и в особенности с усредненными данными, рекомендуемыми в [9].

Особенно тщательно изучалась область вблизи температуры кристаллизации. Здесь наблюдалось небольшое переохлаждение. Температуры кристаллизации и плавления, определяемые по срыву и возникновению колебаний пластинки, равны соответственно 97.7° С и 98.5° С. Никаких аномалий температурного хода вязкости вплоть до кристаллизации не обнаружено.

При исследовании вязкости технического натрия, не очищенного от газовых примесей вакуумной дисцилляцией, наблюдались аномалии на кривой зависимости амплитуды колебаний от температуры расплава. Эти аномалии аналогичны наблюдаемым и подробно исследованным на рубидии [6] и цезия и объясняются выпадением окислов и др. примесей при данных температурах из расплава на поверхности пластинки.

Калий. Вязкость калия исследовалась многими авторами (см., например, [1,7,10,11]). Однако данные разных авторов при низких температурах до 500° С расходятся на 10—15%. Для исследования использовался технический калий марки «чистый» с содержанием основного вещества 98.5%. Основной примесью является натрий. Для очистки от газовых и металлических примесей металл дисциллировался в вакууме 10⁻⁵ мм рт. ст. Основные металлические примеси в очищенном металле: Na < 0.057%, Rb < 0.006%, Cs < 0.003% и Ca < 0.006%. Содержание основного вещества не менее 99.93%. Температурные режимы измерения такие же, как у натрия. Все серии, полученные в различных температурных режимах измерения, совпали между собой в пределах разброса экспериментальных точек ±0.8%.

Полученные данные по вязкости дисциллированного калия (точки 3 на фиг. 3) в интервале температур 150—250° С лежат на 1.5—2.5% выше данных, рекомендованных В. А. Фоминым [1] (точки 2 на фиг. 3), и практически совпадают с данными А. Н. Соловьева [10] (точки 1). В низкотемпературной области наши данные лежат на 3—5% выше данных В. А. Фомина и несколько выше данных А. Н. Соловьева. Погрешность измерения оценивается ±1.5%. Экспериментальные данные по вязкости калия описываются уравнением (вязкость в *спз*, температура в °K)

$$\ln \eta = -2.455 + 636/T$$

Вблизи температуры затвердевания вплоть до кристаллизации никаких аномалий температурного хода вязкости у очищенного калия не обнаружено. При исследовании же технического не очищенного вакуумной дисцилляцией калия наблюдались аномалии на кривой зависимости между амплитудой колебаний пластинки, погруженной в расплав, и температурой расплава. Такие аномалии изучались ранее на рубидии [6], цезии и натрии и объясняются выпадением примесей на поверхность пластинки.

Поступила II IX 1969

ЛИТЕРАТУРА

1. Шпильрайн Э. Э., Солдатенко Ю. А., Якимович К. А., Фомин В. А., Савченко В. А., Белова А. М., Коган Д. Н., Крайнова И. Ф. Экспериментальное исследование теплофизических и электрофизических свойств жидких щелочных металлов при высоких температурах. Теплофизика высоких температур, 1965, т. 3, вып. 6, стр. 931—933.
2. Andrade E. N. da C., Dobs E. R. The viscosities of liquid lithium, rubidium and caesium. Proc. Roy. Soc., Ser. A, 1952, vol. 211, No. 1104, pp. 12—30.
3. Соловьев А. Н., Крайнов А. Б. О вибрационном методе измерения вязкости жидкостей. Теплофизика высоких температур, 1965, т. 3, № 1, стр. 139—147.

4. Соловьев А. Н., Каплун А. Б., Генрих В. Н. Вибрационный метод измерения вязкости жидких металлов при высоких температурах. В сб. «Исследования при высоких температурах», Новосибирск, «Наука», 1966.
5. Генрих В. Н., Каплун Л. Б., Соловьев А. Н. Исследование вязкости жидкостей вибрационным методом. В сб. «Исследование теплофизических свойств веществ», Новосибирск, «Наука», 1967.
6. Генрих В. Н., Каплун А. Б. Исследование вязкости рубидия вблизи температуры затвердевания. ПМТФ, 1970, № 6.
7. Liquid-Metals Handbook, Washington, 1954.
8. Басин А. С., Волчкова С. П., Соловьев А. Н. Исследование плотности легкоплавких металлов при переходе через точку плавления. ПМТФ, 1969, № 6, стр. 128—133.
9. Ситтиг М., Натрий. М., Атомиздат, 1961.
10. Новиков И. И., Соловьев А. Н., Хабахпашева Е. М., Груздев В. А., Приданцев А. И., Васенина М. Я. Теплофизические и физические свойства расплавленных щелочных металлов. Атомная энергия, 1956, т. 1, вып. 4, стр. 92—103.
11. Алабышев А. Ф., Грачев К. Я., Зарецкий С. А., Лантратов М. Ф. Натрий и калий. Л., Госхимиздат, 1959.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ СКОРОСТИ ЗВУКА В ПАРАХ ФРЕОНА-113 И ДИЭТИЛОВОГО ЭФИРА

Г. А. Мухачев, О. Ф. Сусекон

(Казань)

Скорость звука как теплофизическая характеристика веществ широко используется непосредственно в расчетах термодинамических процессов. При наличии экспериментальных данных по скорости звука могут быть получены такие важные теплофизические характеристики веществ, как теплоемкости при постоянном объеме и давлении, показатель адиабаты и др. Скорость звука может быть использована для расчета или уточнения индивидуальных констант уравнения состояния.

Ниже приводятся результаты экспериментального исследования скорости звука в области параметров (температуры и давления) от атмосферных до критических в фреоне-113 ($C_2Cl_3F_3$) и диэтиловом эфире ($C_4H_{10}O$).

Исследования проведены с помощью акустического интерферометра на частоте 500 кГц, выполненного с некоторыми усовершенствованиями по сравнению с известными интерферометрами [1-3] и т. д., с учетом специфики исследования, а именно в связи с тем, что исследования проводились при температуре кипения, превышающей температуру окружающей среды; баллон для приготовления пара, все перепускные краны и датчик давления были смонтированы на одном блоке.

С целью сохранения высокой чувствительности интерферометра во всем диапазоне температур и давлений крепление кварца осуществлялось по нейтральной плоскости в держателе цангового типа.

Блок интерферометра помещался в жидкостный термостат ТС-24. Термостатирование осуществлялось с точностью $\pm 0.05^\circ$. Фактическое колебание температуры измеряемой среды было значительно меньше из-за применения массивного блока. Замер температуры производился с помощью образцового платинового термометра, изготовленного в ВНИИФТРИ ($R_0 = 10 \text{ ом}$), и потенциометры Р-307 с точностью $\pm 0.02^\circ \text{ C}$. Замер давления производился грузопоршневым манометром ПМ-60 класса 0.05 для давлений выше 5 бар, в диапазоне от 2 до 5 бар с помощью манометра ПМ-5 класса 0.05 и ниже 2 бар — U-образным ртутным пьезометром. Чувствительность датчика давления сильфонного типа 1 мм рт. ст.

Суммарная расчетная погрешность в замерах скорости звука в области перегрева 0.1%, на линии насыщения 0.2%. Разброс экспериментальных данных в пределах расчетной погрешности.

Исследовались следующие вещества:

фреон = 113

температура кипения при $p=760 \text{ мм. рт. ст.}$ 47.4° C ;

конечная температура перегонки при $p=760 \text{ мм. рт. ст.}$ 48° C ;