

А. М. Турдукожаева, В. П. Малышев

О ВЗАИМОСВЯЗИ ОБОБЩЕННЫХ ПОЛУЭМПИРИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ДИНАМИЧЕСКОЙ И КИНЕМАТИЧЕСКОЙ ВЯЗКОСТЕЙ

Показана возможность определения дополнительной энергии активации разуплотнения расплава с повышением температуры при анализе температурных зависимостей динамической и кинематической вязкостей и расчета энергии активации вязкого течения по классическому и модифицированному уравнениям Френкеля. Исследованы 16 металлов, для которых имеются согласованные по плотности справочные данные двух видов вязкости. Полученное значение энергии активации разуплотнения расплава указывает на ослабление энергии ван-дер-ваальсовского притяжения частиц.

E-mail: vpmamm@nursat.kz; astra_man@mail.ru

Ключевые слова: динамическая вязкость, кинематическая вязкость, плотность, энергия активации, уравнение Френкеля, жидкость, металлы.

Широко известно уравнение Френкеля

$$\eta = A \exp \frac{E_{\eta}}{RT}, \quad (1)$$

которое выведено для динамической вязкости; здесь A и E_{η} — постоянные предэкспоненциальный множитель и энергия активации вязкого течения, смысл которых различными авторами трактуется в зависимости от предполагаемого характера межчастичного взаимодействия и квазикристаллической структуры жидкости [1].

Поскольку кинематическая вязкость связана с динамической по формуле $\nu = \rho/\eta$ (ρ — плотность жидкости), то из-за весьма слабой зависимости плотности от температуры (несколько процентов во всем диапазоне жидкого состояния) в сравнении с трех- или четырехкратным изменением вязкости в том же диапазоне [1] можно в уравнении (1) напрямую заменить η на ν , соответственно параметры A и E_{η} на A' и E_{ν} :

$$\nu = A' \exp \frac{E_{\nu}}{RT}. \quad (2)$$

Отметим, что уравнение (1) справедливо для узкого диапазона температур и непригодно для полного описания жидкого состояния. Отсюда следует необходимость представления обобщенных зависимостей (1) и (2) в координатах $\ln \eta^{-1}/T$ и $\ln \nu^{-1}/T$ для выделения псевдопрямолнейных участков в целях обработки их по классическому (1) и модифицированному (2) уравнениям Френкеля и определения соответствующих значений энергии активации вязкого течения.

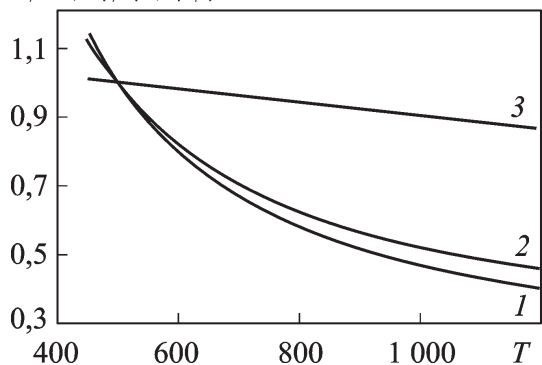
$\nu/\nu_r; \eta/\eta_r; \rho/\rho_r$ 

Рис. 1. Зависимости динамической (1); кинематической (2) вязкостей и плотности (3) для лития от температуры

таем их отношения к значениям одной какой-либо выбранной реперной точки: ν/ν_r , η/η_r и ρ/ρ_r , которые выбраны, например, при температуре 500 К.

В табл. 1 и на рис. 1 приведены температурные зависимости исследуемых характеристик.

Чтобы определить, насколько E_η будет отличаться от E_ν , предварительно оценим температурные зависимости кинематической (ν) и динамической (η) вязкостей и плотности ρ на примере лития — одного из самых тугоплавких и высококипящих щелочных металлов, для которого имеются данные по двум видам вязкости и плотности [1]. Поскольку все три характеристики имеют различные единицы измерения, то для приведения их к безразмерным величинам рассчита-

Таблица 1

Экспериментальные значения кинематической и динамической вязкостей и плотности для лития [1]

$T, \text{ К}$	$\nu \cdot 10^{-7}, \text{ м}^2/\text{с}$	ν/ν_r	$\eta \cdot 10^{-4}, \text{ Па}\cdot\text{с}$	η/η_r	$\rho, \text{ г}/\text{см}^3$	ρ/ρ_r
453,7	11,561	1,124	5,99	1,134	518,37	1,01
500	10,285	1,000	5,28	1,000	513,64	1,00
600	8,408	0,818	4,23	0,801	503,43	0,98
700	7,218	0,702	3,56	0,673	493,22	0,96
800	6,387	0,621	3,09	0,584	483,01	0,94
900	5,789	0,563	2,74	0,518	472,80	0,92
1000	5,335	0,519	2,47	0,467	462,59	0,90
1100	4,985	0,485	2,25	0,427	452,38	0,88
1200	4,704	0,457	2,08	0,394	442,17	0,86

Как следует из рис. 1, с повышением температуры плотность лития изменяется незначительно, а кинематическая вязкость по сравнению с динамической имеет несколько завышенные значения.

Рассчитаем энергию активации вязкого течения расплава по уравнениям (1) и (2), основываясь на данных о динамической и кинематической вязкостях. Логарифмические зависимости кинематической и динамической вязкостей от обратной температуры приведены на рис. 2. Энергия активации для экспериментальных значений

динамической вязкости составляет 6377 Дж/моль, по кинематической вязкости — 5463 Дж/моль. Значение энергии активации, найденное по динамической вязкости, выше примерно на 14 %, чем значение энергии активации, найденное по кинематической вязкости. Это завышение может быть отнесено к дополнительной энергии активации разуплотнения расплава с повышением температуры, что следует из взаимосвязи двух видов вязкости через плотность вещества. Это позволяет рассматривать разность $E_\eta - E_\nu$ как энергию активации разуплотнения расплава E_p .

Такие расчеты были проведены для 16 металлов, для которых имеются справочные данные по двум видам вязкости. Полученные данные об энергии активации вязкого течения расплава для 16 металлов приведены в табл. 2.

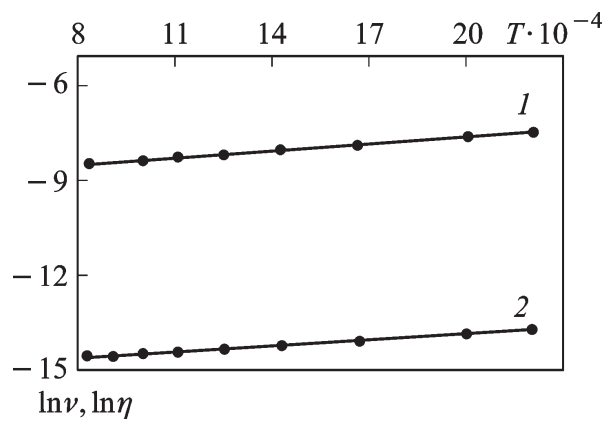


Рис. 2. Логарифмические зависимости динамической (1) и кинематической (2) вязкостей лития от обратной температуры:

точки — экспериментальные данные; прямые — по уравнениям: $\ln \nu = \ln A + E_\nu / (RT)$ и $\ln \nu = \ln A' + E_\nu / (RT)$

Таблица 2

Значения энергии активации вязкого течения расплава E_η и E_ν , рассчитанные по уравнениям (1) и (2) и энергии активации разуплотнения расплава E_p для 16 металлов

Металл	E_η , Дж/моль	E_ν , Дж/моль	E_p , Дж/моль	Металл	E_η , Дж/моль	E_ν , Дж/моль	E_p , Дж/моль
Li	6377	5463	915	Ga	4132	3850	283
Na	6111	5887	224	Pb	4989	4548	441
Mg	25700	22915	2785	Cd	10102	9487	615
Al	10102	9029	1073	Sn	5571	5155	416
K	6061	5022	1039	Cs	5330	4498	831
Fe	52555	49404	3151	Au	17410	16038	1372
Co	42919	41971	948	Hg	2503	2262	241
Ni	30314	28610	1704	Tl	7500	6710	790

В целом наблюдается регулярное занижение экспериментальных данных о E_ν по сравнению с полученными по уравнению Френкеля из экспериментальных значений E_η . При анализе предложенного модифицированного уравнения Френкеля обнаруженное занижение может быть отнесено к неучтенной дополнительной энергии активации разуплотнения расплава. По данным табл. 2 среднее отклонение данных о E_ν от значений E_η составило 8,96 %, и это можно отнести к вкладу

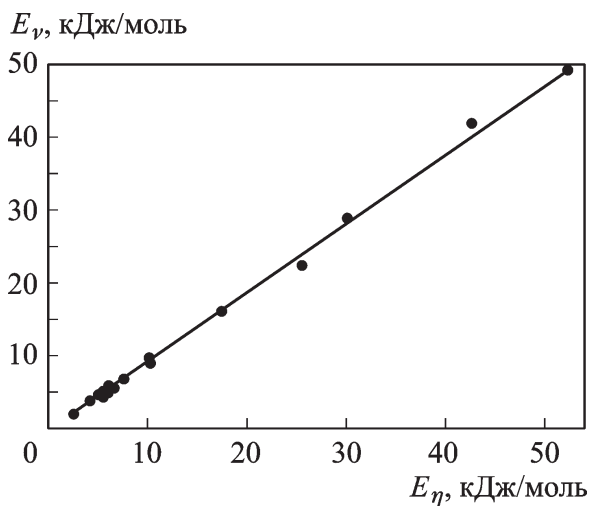


Рис. 3. Зависимость кинематической энергии активации E_{ν} от динамической энергии активации E_{η}

На рис. 3 приведена зависимость кинематической энергии активации вязкого течения от динамической для исследованных 16 металлов. Как следует из рис. 3, эта зависимость прямолинейна и уравнение имеет вид канонической прямой, выходящей из начала координат:

$$E_a = 0,943U. \quad (3)$$

Судя по коэффициенту пропорциональности, регулярное занижение кинематических данных составляет 5,7%.

Таким образом, на основе температурных зависимостей динамической и кинематической вязкостей и расчета энергии активации вязкого течения создается возможность определить дополнительную энергию активации разуплотнения расплава с повышением температуры.

Характерно, что энергия активации разуплотнения расплава (0,2...3,2 кДж/моль) в большинстве случаев оказывается меньше нижнего уровня энергии ван-дер-ваальсовского притяжения частиц (2...20 кДж/моль [2]), тем самым дополнительно раскрывается механизм разуплотнения жидкости, состоящий в ослаблении именно этих сил, поскольку они являются наименьшими и должны преодолеваться в первую очередь.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ш п и л ь р а й н Э. Э., Ф о м и н В. А., С к о в о р о д ь к о С. Н., С о к о л Т. Ф. Исследование вязкости жидких металлов. – М.: Наука. 1983. – 244 с.
2. Д и к е р с о н Р., Г р е й Г., Х е й т Д ж. Основные законы химии. – М.: Мир, 1982. – Т. 1. – 652 с.

Статья поступила в редакцию 19.05.2010