

Асташкин Ю.С.

ДИНАМИКА ДИСПЕРСНЫХ ЧАСТИЦ В РАСПЛАВАХ ЛЕГКОПЛАВКИХ МЕТАЛЛОВ

Представлены расчетные оценки скорости седиментации частиц в расплавах легкоплавких металлов в зависимости от размера, сферичности и количества твердой фазы частиц. Сопоставлены гравитационные и броуновские смещения частиц.

Дисперсные частицы, легкоплавкие металлы. седиментация

Astashkin U.S.

Dynamics of dispersed particles in melts of low-melting metals

The calculated estimates of the sedimentation rate particles depending on the the particles size, sphericity and quantity of the solid phase are presented. Brownian and gravitational particles displacement are compared

Dispersed particles, low-melting metals, sedimentation

Известно, что для расплавов легкоплавких металлов характерно присутствие примесей в виде дисперсных частиц, концентрация и динамика которых, влияет на свойства литого металла[1-4].. Среди физико-химических факторов важными являются, температура плавления, термостойкость, смачиваемость поверхности частицы расплавом и химическое взаимодействие жидкого металла с материалом частиц [1-4]. Динамика дисперсных частиц для случая расплава алюминия подробно изучалась в большом количестве работ, ссылки на которых приведены в [1-4].

В данной работе произведены расчетные оценки динамики мелкодисперсных частиц в расплавах технически чистых легкоплавких металлов: галлия, цинка, кадмия, олова, индия, свинца и висмута в зависимости от размеров частиц. Расчеты произведены в рамках разбавленных систем на ос-

новании известных соотношений гидродинамики при малых числах Рейнольдса [5,6]. В качестве материала тяжелых частиц был выбран молибден [7]. По условию, определенному Смолуховским в теории двойного электрического слоя, материал частиц не должен быть электропроводным. Электропроводность молибдена, $18,5 \cdot 10^6$ См/м, (выше электропроводности цинка, олова, свинца, железа), и на этом основании расчеты проводились без учета влияния электрокинетических явлений [8].

Свойства некоторых тугоплавких материалов и молибдена, определяющие долговременность их существования в жидком металле приведены в таблице 1.

Таблица 1

Свойства некоторых тугоплавких окислов и металлов [7,9]

№	Материал	T_e °C	T_{max} °C	ρ_s кг/м ³	λ $\frac{\text{кал}}{\text{см} \cdot \text{ч} \cdot \text{°C}}$	Прочность 1000°С кг/см ²	Качественная оценка Термическая устойчивость
1	Al_2O_3	2030	1900	3970	0,014	15,4	хорошая
2	CaO	2600	2000	3320	0,017	–	посредственная
3	SiO_2	1710	1100	2200	0,012	16,8	отличная
4	Mo	2625	2000	10220	0,21	40	хорошая –

В гидродинамике несжимаемой вязкой жидкости для случая малой величины инерционных сил по сравнению с вязкими членами, применяются упрощения уравнения Навье – Стокса [5,6]. Для установившегося течения несжимаемой жидкости и учета массовых сил в давлении – p это приводит уравнение Навье – Стокса к виду :

$$\nabla^2 \mathbf{v} = \frac{1}{\mu} \nabla p, \quad (1)$$

вместе с уравнением непрерывности:

$$\nabla \cdot \mathbf{v} = 0 \quad (2)$$

Где \mathbf{v} – локальная средняя массовая скорость

Уравнения (1,2) представляют собой уравнение Стокса. Отношение инерциальных членов к вязким определяется числом Рейнольдса. При малых числах Рейнольдса уравнение Стокса справедливо также для случая – седиментации и течения жидкости в дисперсной системе, содержащей мелкодисперсные частицы [5]. Некоторые свойства легкоплавких металлов, необходимые для расчетов, приведены в таблице 2.

Таблица 2.

Физические свойства легкоплавких металлов и воды [8,10-13]

Металл	Al	Ga	Zn	Sn	Cd	In	Pb	Bi	H ₂ O
T _e °C	660	30	419	231	321	156	327	271	0
ρ_l кг/м ³	2369	6095	7692	8683	7796	7261	10510	10030	1000
σ_{lv} , 10 ⁻³ Н/м	520	720	785	526	564	340	442	271	73
μ , 10 ⁻³ Па·сек	2,9	1,82	3,17	1,67	2,30	2,0	2,12	1,66	1,00
t °C	700	30	450	300	350	170	340	285	20

Такая частица радиуса – R_s при принятии сферической формы перемещается в неограниченной жидкости с плотностью – ρ_l в условиях действия силы тяжести $F = 4/3\pi R_s^3 \rho_l g$ и силы вязкого сопротивления по закону

Стокса– $F_\mu = 6\pi\mu R_s U$. При условии $F = F_\mu$ установившаяся скорость падения такой частицы U определится [5,12]:

$$U = \frac{2}{9} R_s^2 \frac{\rho_s - \rho_l}{\mu} g, \quad (3)$$

Плотность молибдена – $\rho_s = 10220$ кг/м³, больше чем плотность расплавов галлия, цинка, кадмия, олова, индия и висмута Bi (кроме свинца) $\rho_s > \rho_l$ и поэтому тяжелые частицы молибдена в этих расплавах будут падать со скоростью U в зависимости от радиуса частицы и вязкости расплава (рис.1а). Для качественного сравнения приведены результаты для частиц из оксида – Al_2O_3 (рис.1б). Плотность оксида алюминия $\rho_s = 3970$ кг/м³ меньше плотности расплавов металлов, поэтому частицы оксидов, согласно выражению (3), будут всплывать в расплавах со скоростью U в зависимости от радиуса R_s (рис.1б). В случае жидкого алюминия $\rho_l = 2369$ кг/м³, плотность оксида больше плотности расплава $\rho_s > \rho_l$ и частицы (в разбавленных системах), будут падать в расплаве алюминия со скоростью U .

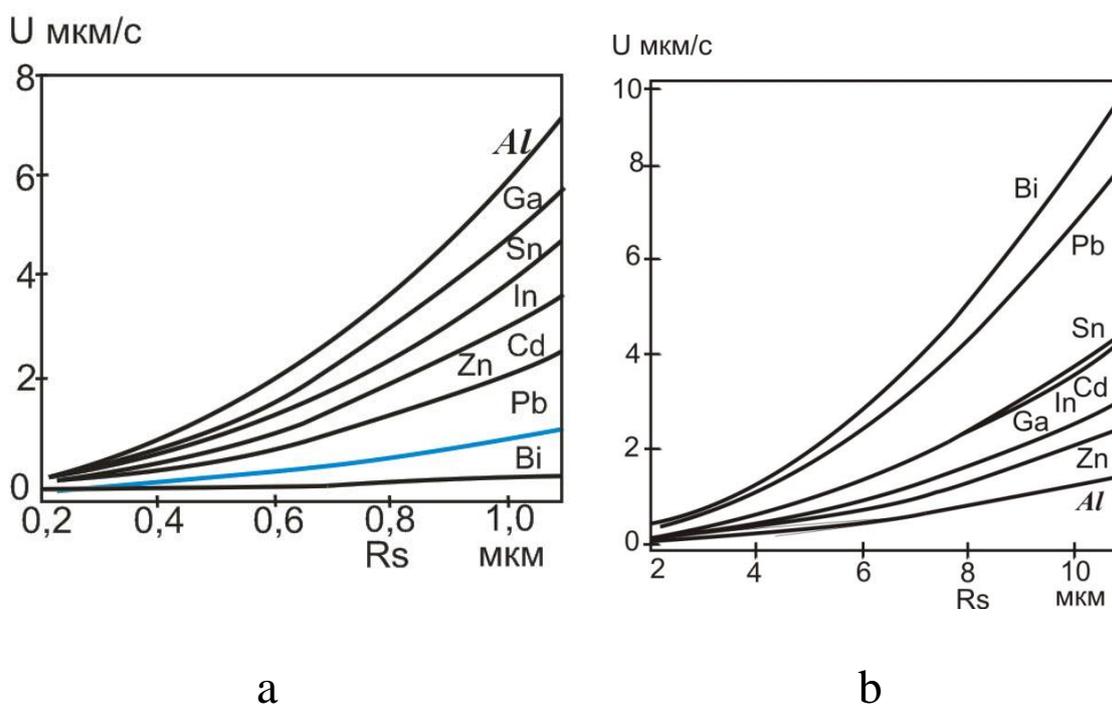


Рис. 1 а,в. Установившаяся скорость падения дисперсных частиц U в расплавах легкоплавких металлов. а) Материал частиц молибден, $\rho_s = 10220 \text{ кг/м}^3$, б) материал частиц – оксид Al_2O_3 .

Расчетные числа Рейнольдса, Прандтля и Пекле определялись по известным соотношениям [5,15]:

$$Re = \frac{\rho_s U d_s}{\mu}, \quad (4),$$

$$Pr = \nu/a, \quad Pe = Pr \cdot Re, \quad (5)$$

Где d_s – диаметр частицы, a – коэффициент температуропроводности, ν – кинематическая вязкость.

Зависимость чисел Pe и Re от размера частиц приведена на рис.8 а,в. Малая величина полученных значений в основном определяется низкими значениями скорости – U , и характерным размером частиц – d_s для коллоидных частиц.

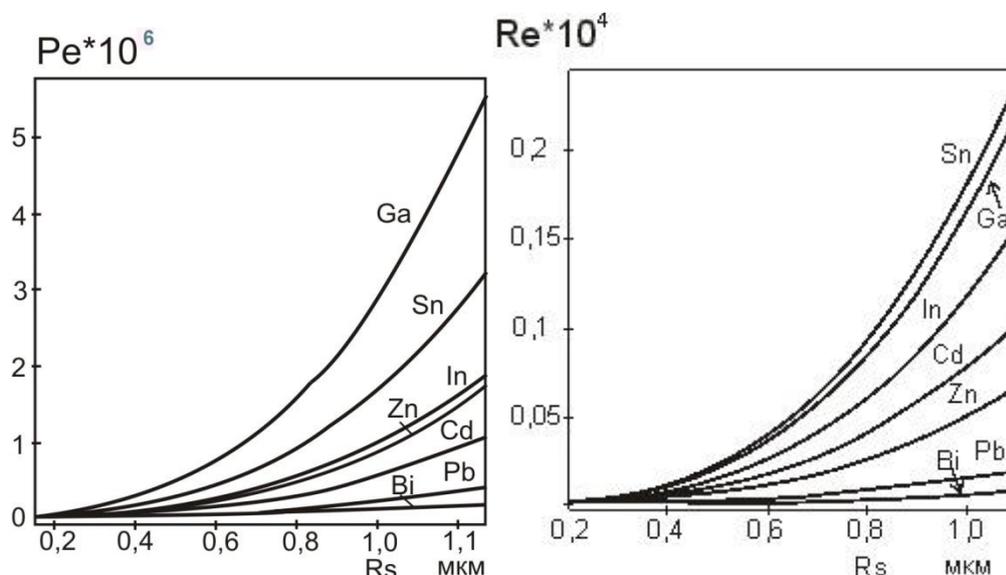


Рис. 2. а) Зависимость чисел Pe и б) чисел Re от размера частиц.

Условия рассмотрения суспензий в разбавленных системах в цилиндрическом контейнере [5, стр.446] в зависимости от соотношения размеров ча-

стиц и контейнера приведены в работе [5]. В случае разбавленных суспензий с хаотическим распределением частиц выражение для скорости оседания сферических частиц – U в зависимости от объемной величины твердой фазы – φ [5]:

$$\frac{U}{U_0} = \frac{1}{1+1,30\varphi^{1/3}}, \quad (6)$$

где U_0 – скорость частицы в центре контейнера. Соотношения (1-6) справедливы для случая малых чисел Рейнольдса. Результаты для легкоплавких металлов приведены на рис.3а

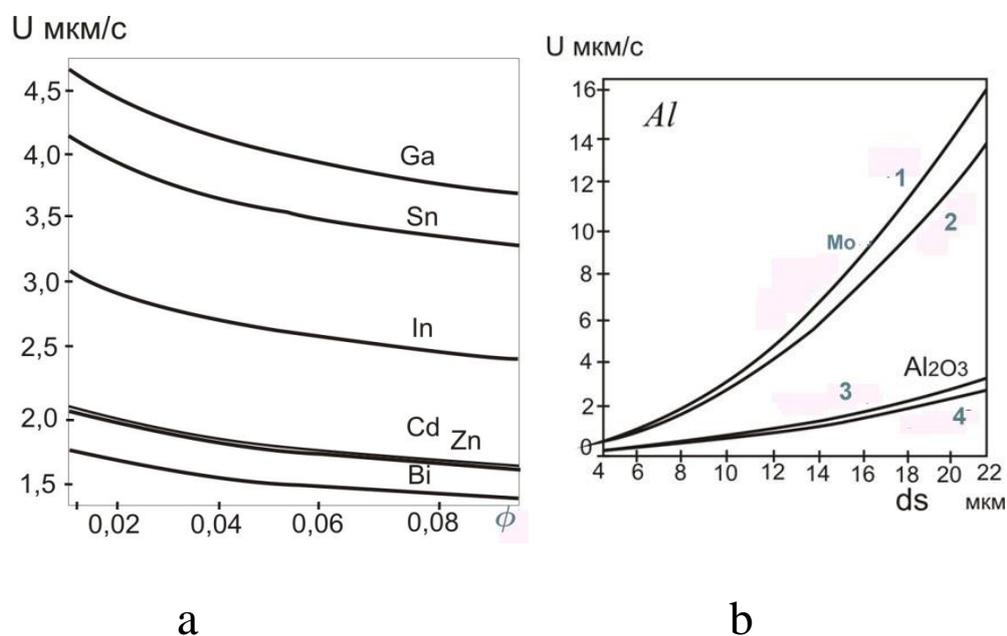


Рис. 3. а) Зависимость скорости частиц от объемной величины твердой фазы – φ , б) от размера d_s и сферичности частиц – ψ в расплаве алюминия. Кривые 1,3 – сфера, 2,4 – тетраэдр.

Эксперименты по влиянию формы несферических (изометрических) частиц на скорость свободного падения показали, что сферичность – ψ для несферических частиц определяется, как отношение площади сферы того же объема, что и у несферической частицы: $\psi = \frac{A_s}{A_{sp}}$ [5]. Сферичность влияет на скорость падения несферических частиц, при условии $Re < 0,05$, в соответствии с выражениями [5]:

$$U = \frac{K(\rho_s - \rho_l)d_s^2 g}{18\mu} \quad (7), \text{ где } K = 0,843lg \frac{\psi}{0,065}, \quad d_s - \text{диаметр сферы, объем}$$

которой равен объему несферической частицы. Эти выражения справедливы для изометрических частиц, представляющих собой правильные многогранники [5].

Для сферы $\psi=1$, для октаэдра – 0,846, для куба – 0,806, тетраэдра – 0,670

На рис. 3b приведены зависимости скорости – U от размера и сферичности частиц из молибдена и оксида Al_2O_3 для сферы и тетраэдра в расплаве алюминия. Скорость – U согласно выражению (3) растет при увеличении размера сферической частицы. Но при нарушении сферичности, как показали проведенные в данной работе расчеты для легкоплавких металлов по выражению (7), скорость U становится меньше с увеличением размера частицы, и при этом увеличивается вероятность пребывания частицы во взвешенном состоянии.

Модифицированное выражение, приведенное в монографии Эйнштейна – Смолуховского, для броуновского смещения частиц имеет вид [5]:

$$\sqrt{\Delta x^2} = \sqrt{\frac{4RTk_m\tau}{3\pi^2\mu Nd}}, \quad (8)$$

Где $\sqrt{\Delta x^2}$ – скалярная величина, представляющая статистическое среднее линейное смещение частицы диаметром – d в заданном направлении за время τ , T – температура °К, k_m – поправка к закону Стокса. Некоторые оценки величины k_m в зависимости от материала и размеров частиц приведены в монографии [256]. В данной работе для оценки броуновского смещения частиц в расплавах рассматриваемых металлов принято эмпирическое значение $k_m = 3,3$. В формуле (8), R – газовая постоянная, N – число Авагадро, $R/N=k$, постоянная Больцмана.

Если принять $U = \frac{\Delta x}{\tau_{\Pi}}$, то для частицы радиуса – R_s , время смещения – τ_{Π} на расстояние Δx под действием гравитации имеет вид:

$$\tau_{\Pi} = 9/2 \frac{\mu \Delta x}{R_s^2 (\rho_s - \rho_l) g} \quad (9),$$

при фиксированном значении $\tau_{\Pi} = 1$ секунда:

$$\Delta x = 2/9 \frac{g (\rho_s - \rho_l) R_s^2}{\mu} \quad (10)$$

В таблице 3 приведены расчетные значения гравитационного и броуновского смещений твердых частиц в расплавах металлов в зависимости от радиуса частицы полученные в данной работе. Данные для воды приведены из работы [5].

Таблица 3. Броуновское и гравитационное смещения частиц (в мкм) за время $\tau = 1$ сек в расплавах металлов и в воде.

d_s , мкм	H_2O , Броун.	H_2O Гравит	Ga Броун.	Ga Гравит.	Zn Броун.	Zn Гравит.	Cd Броун.	Cd гравит.
0,1	2,369	0,005	0,9686	0,0012	1,135	0,0043	1,237	0,0058
0,25	1,498	0,0346	0,612	0,00772	0,718	0,027	0,782	0,036
0,5	1,060	0,1384	0,433	0,309	0,508	0,109	0,553	0,144
1,0	0,749	0,554	0,306	1,235	0,359	0,434	0,391	0,576
2,5	0,474	3,46	0,194	1,772	0,227	2,72	0,247	3,60
5,0	0,335	13,84	0,137	30,86	0,161	10,9	0,175	11,44
10,0	0,2369	55,4	0,0969	123,5	0,1135	43,4	0,1237	57,62

d_s мкм	Sn Броун.	Sn Гравит	In Броун.	In Гравит	Pb Броун.	Pb Гравит.	Bi Броун	Bi Гравит
0,1	1,33	0,011	1,156	0,009	1,1278	0,0007	1,400	0,0006

0,25	0,841	0,069	0,731	0,0504	0,802	0,0046	0,885	0,0039
0,5	0,595	0,276	0,517	0,202	0,572	0,0186	0,626	0,016
1,0	0,420	1,11	0,367	0,807	0,404	0,075	0,442	0,062
2,5	0,266	6,91	0,231	5,04	0,256	0,47	0,280	0,39
5,0	0,188	27,6	0,163	20,17	0,181	1,86	0,198	1,56
10,0	0,133	110,1	0,1156	80,67	0,128	7,46	0,140	6,23

Анализ результатов, приведенных в таблице 7, показал преобладание броуновского смещения частиц диаметром $d_s \leq 0,5$ микрон, над гравитационным смещением и существенное преобладание гравитационного смещения для частиц диаметром $d_s \geq 1,0$ микрона.

Использованные источники:

1. Eskin G.I., Eskin D.G. Ultrasonic treatment light alloy melts.// Gordon and Breach. Amsterdam. 1998, CRC press, Amsterdam, 2014
2. Добаткин В.И., Габидуллин Р.М., Колачев Б.А., Макаров Б.С.// Газы и окислы в алюминевых деформируемых сплавах. М. Металлургия .1976 – 264 с.
3. Макаров Г.С. Рафинирование алюминевых сплавов газами.// М. Металлургия. 1983– 120 с.
4. Эскин Г.И. Ультразвуковая обработка цветных металлов и сплавов.// В кн. Воздействие мощного ультразвука на межфазную поверхность металлов. М. Наука. 1986– 277 с.
5. Хаппель Д.Ж., Бреннер Г. Гидродинамика при малых числах Рейнольдса. М. Мир. 1976– 630 с.
6. Слезкин Н.А. Динамика вязкой несжимаемой жидкости.// М. Госиздат технико
7. Гуляев А.П. Металловедение.// М. Металлургия. 1977– 647 с. -теоретической. лит. 1952– 515 с.

8. Зиновьев В.Е. Теплофизические свойства металлов при высоких температурах. Справ. изд. // М. Металлургия. 1989 –384 с.
9. Кинжери В.Д. Исследования при высоких температурах.// М. Изд-во Инлит., 1962 – 126 с.
10. Андронов В.Н., Чекин Б.В., Нестеренко С.В. Жидкие металлы и шлаки. // Справ. Изд. М. Металлургия. 1977 –128 с.
11. Ершов Г.С. ,Черняков В.А. Строение и свойства жидких и твердых металлов.// М, Металлургия. 1978 –248с
12. Вильсон Д.П. Структура жидких металлов и сплавов.// М. Металлургия. 1972– 245 с.
13. Чиркин В.С. Теплофизические свойства материалов. //М. Госиздат физмат. лит. 1959 – 353 с.
14. Михеев М.А. Михеева И.М. Основы теплопередачи.// М. «Энергия». 1977– 344 с.