

Э. РАУД

## МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДВИЖУЩЕЙ СИЛЫ ПРОЦЕССА РАСТЕКАНИЯ ЖИДКОСТИ ПО ПОВЕРХНОСТИ ТВЕРДОГО ТЕЛА

Растекание жидкостей по поверхности твердых тел играет важную роль во многих физико-химических явлениях и технологических процессах. В связи с этим в последнее время значительное внимание уделяют исследованию кинетики растекания в различных системах; особенно подробно изучена кинетика смачивания жидкими металлами.

Растекание термодинамически возможно при условии  $K\sigma_{23} > K\sigma_{13} + \sigma_{12}$ , где  $K$  — коэффициент шероховатости твердой поверхности [1],  $\sigma_{23}$ ,  $\sigma_{13}$ ,  $\sigma_{12}$  — значения удельной свободной поверхностной энергии на границах раздела твердое тело — окружающая среда, твердое тело — жидкость, жидкость — среда. Из количественной теории растекания [2, 3] следует, что произведение убыли удельной свободной поверхностной энергии в процессе смачивания  $\Delta\sigma$  на длину периметра смачивания  $\Delta\sigma a = (K\sigma_{23} - K\sigma_{13} - \sigma_{12})a$  численно равно движущей силе процесса течения смачивающей жидкости по поверхности твердого тела (при отсутствии других внешних сил, способствующих течению). От величины  $\Delta\sigma$  зависят такие важнейшие характеристики растекания, как скорость процесса и размеры площади, которую может смочить капля заданного объема. Таким образом, знание величины  $\Delta\sigma$  принципиально необходимо для количественного описания процесса растекания и различных прикладных задач, например, для оценки некоторых свойств припоев [4].

В большинстве случаев прямой расчет  $\Delta\sigma$  невозможен, так как значения  $\sigma_{13}$  и  $\sigma_{23}$  обычно неизвестны. В связи с этим возникает необходимость в разработке косвенных методов оценки  $\Delta\sigma$ . В работе [5] предложен способ, основанный на измерении высоты подъема жидкости вдоль вертикально расположенной поверхности твердого тела. Окончанию подъема соответствует условие  $\Delta\sigma = \rho g x_0 \delta$ . Здесь  $\rho$  — плотность жидкости,  $\delta$  — толщина поднимающегося слоя жидкости,  $g$  — ускорение силы тяжести,  $x_0$  — конечная высота подъема. Непосредственное измерение толщины слоя непрозрачных жидкостей затруднено. В таких случаях величину  $\delta$  можно определить исходя из теоретической и экспериментальной зависимостей  $x = x(t)$  ( $x$  — высота подъема,  $t$  — время). Основная цель данной работы состоит в количественном описании кинетики подъема смачивающей жидкости по наклонной поверхности твердого тела и развитии метода определения величины убыли удельной свободной поверхностной энергии в процессе растекания.

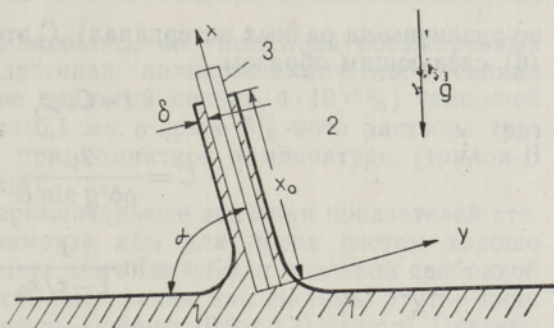
Рассмотрим подъем слоя смачивающей ньютоновской жидкости постоянной толщины  $\delta \ll x$  по наклонной пластине периметра  $a$  от источника массой  $M \gg m$  ( $m$  — масса поднимающегося слоя жидкости) (рисунок). На единицу объема слоя жидкости действуют две внешние силы:

движущая сила растекания

$$\frac{1}{\rho} \dot{f}_s = \frac{\Delta \sigma \alpha}{m} \text{ [}^2\text{]} \text{ и сила тяжести}$$

$$\frac{1}{\rho} \dot{f}_g = g \sin \alpha \text{ (} \alpha \text{ — угол на}$$

клона пластины, причем  $0^\circ < \alpha \leq 90^\circ$ ). Если выполняются условия квазистационарного и безынерционного течения [2], систему уравнений движения слоя можно свести к следующему выражению:



Подъем смачивающей жидкости по наклонной поверхности твердого тела: 1 — жидкость, 2 — среда, 3 — твердое тело.

$$\frac{\mu}{\rho} \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\Delta \sigma \alpha}{m} - g \sin \alpha = 0, \quad (1)$$

где  $u$  — компонента скорости течения жидкости, направленная вдоль поверхности пластины,  $\mu$  — вязкость жидкости.

Граничные условия на свободной поверхности жидкости

$$\frac{\partial u}{\partial y} = 0 \text{ при } y = \delta \quad (2)$$

и на границе жидкость—твердое тело

$$u = 0 \text{ при } y = 0. \quad (3)$$

В случаях, не осложненных химическими реакциями, интенсивным массообменом и т. д., можно принять, что  $\mu$  и  $\Delta \sigma$  постоянны. Тогда из (1), с учетом граничных условий (2) и (3), получим выражение для скорости передвижения фронта жидкости

$$\frac{dx}{dt} = \frac{\rho}{2\mu} \left( \frac{\Delta \sigma \alpha}{m} - g \sin \alpha \right) \delta^2. \quad (4)$$

Учтя начальное условие

$$x = 0 \text{ при } t = 0, \quad (5)$$

получим соотношение между высотой и временем подъема

$$t = \frac{2\mu x_0}{\rho \delta^2 g \sin \alpha} \left[ \ln \frac{x_0}{x_0 - x} - \frac{x}{x_0} \right]. \quad (6)$$

Здесь  $x_0 = \frac{\Delta \sigma}{\rho g \delta \sin \alpha}$  — конечная высота поднятия.

Непосредственный расчет толщины пленки жидкости из соотношения (6) громоздок и трудоемок. Для облегчения расчета разобьем высоту подъема  $x_0$  на несколько интервалов (количество интервалов определяется требуемой точностью расчета). В пределах каждого интервала заменим точное решение уравнения (6) приближенным соотношением вида  $x = At^n$  (значения  $A$  и  $n$  постоянны в пределах каждого интервала,

но различны на разных интервалах). С этой целью запишем соотношение (6) следующим образом

$$t = Cx_0z, \quad (7)$$

где

$$C = \frac{2\mu}{\rho\delta^2g \sin \alpha}, \quad (8)$$

$$z = \ln \frac{1}{1-x/x_0} \frac{x}{x_0}. \quad (9)$$

Выражение (9) можно приближенно заменить соотношением вида  $z = B(x/x_0)^m$ . Тогда задавшись погрешностями коэффициента пропорциональности  $B$  и показателя степени  $m$  ( $m = 1/n$ ), методом наименьших квадратов соответствующие значения  $B$  и  $m$  можно рассчитать на каждом из интервалов. Такие расчеты были проведены на ЭВМ «Минск-22» при абсолютных погрешностях  $\Delta B = 0,04$  и  $\Delta m = 0,03$ . Полученные результаты приведены в таблице.

Расчет			Эксперимент				$\Delta A/A$
			Ртуть—цинк		Ртуть—свинец		
$x/x_0$	$B$	$n$	$n$	$\Delta\sigma,$ эрг/см <sup>2</sup>	$n$	$\Delta\sigma,$ эрг/см <sup>2</sup>	
0,05—0,40	0,83	0,47	0,46	4,3	0,49	1,0	0,3
0,40—0,60	1,47	0,35	0,34	3,9	0,34	0,8	0,2
0,60—0,90	2,15	0,25	0,23	3,9	0,23	0,8	0,1

Таким образом, кинетику подъема смачивающей жидкости можно с заданной степенью точности аппроксимировать следующими степенными соотношениями:

$$x = \left( \frac{x_0^{m-1}}{CB} \right)^{\frac{1}{m}} \frac{1}{t^m} = At^n. \quad (10)$$

Выражение вида (10) позволяет легко найти значение толщины слоя  $\delta$ . Для этого достаточно построить в двойном логарифмическом масштабе зависимость  $x = x(t)$  и подставить найденное значение  $A$  в формулу для толщины слоя

$$\delta = \sqrt{\frac{2\mu A^m B}{\rho g x_0^{m-1} \sin \alpha}}. \quad (11)$$

Вместе с тем, разбив высоту подъема на несколько интервалов, можно в пределах каждого интервала независимо оценить значения  $\delta$  и  $\Delta\sigma$ , что существенно повышает точность и надежность этих оценок. Проведенный расчет позволяет определить величины  $\delta$  и  $\Delta\sigma$  также в тех случаях, когда кинетика подъема жидкости известна только на одном из интервалов высоты подъема.

В качестве примера приведем расчет убыли удельной свободной поверхностной энергии в процессе растекания для систем ртуть—цинк и ртуть—свинец (см. таблицу). Расчет для первой системы проведен на основе экспериментальных данных [5], для второй на основе собствен-

ных данных. Эксперименты проводились на тщательно обезжиренных наклонных ( $30^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$ ) пластинах поликристаллического свинца марки С-000 (общее содержание примесей меньше  $4 \cdot 10^{-4}\%$ ) толщиной 1 мм и средним размером зерна 0,1 мм в среде 5%-ного раствора трилона-Б ( $C_{10}H_{14}O_8N_2Na_2 \cdot 2H_2O$ ) при комнатной температуре (трилон-Б растворяет пленку окисла свинца).

Из таблицы видно, что экспериментальные значения показателей степени  $n$  на всех интервалах параметра  $x/x_0$  для обеих систем хорошо согласуются с расчетными. Среднее значение убыли удельной свободной поверхностной энергии в процессе растекания для системы ртуть—цинк ( $4,0 \pm 1,2$ ) эрг/см<sup>2</sup>, для системы ртуть—свинец ( $0,9 \pm 0,3$ ) эрг/см<sup>2</sup>. Погрешность в оценке величины  $\Delta\sigma$  определяется прежде всего погрешностью в нахождении коэффициента пропорциональности  $A$  (относительная погрешность  $\Delta A/A$  для рассматриваемых экспериментальных данных приведена для различных интервалов параметра  $x/x_0$  в таблице).

Полученные значения  $\Delta\sigma$  удовлетворительно согласуются с данными о кинетике растекания капли ртути с массой  $m < 20$  мг по поверхности горизонтально расположенных пластин цинка и свинца [2, 3]. Это соответствие можно рассматривать как еще одно экспериментальное подтверждение применимости рассматриваемого метода определения движущей силы процесса растекания жидкости по поверхности твердого тела.

Автор приносит глубокую благодарность Е. Д. Щукину и Б. Д. Сумму за постановку задачи и обсуждение работы.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Дерягин Б. В., ДАН СССР, 51, 357 (1946).
2. Рауд Э. А., Сумм Б. Д., Щукин Е. Д., ДАН СССР, 205, 1134 (1972).
3. Щукин Е. Д., Горюнов Ю. В., Деньщикова Г. И., Перцов Н. В., Сумм Б. Д., Коллоидн. журн., 25, 108 (1963).
4. Лашко-Авакян С. В., Лашко Н. Ф., Пайка металлов, М., 1959.
5. Должикова В. Д., Сумм Б. Д., Горюнов Ю. В., В сб.: Физическая химия поверхностных явлений в расплавах, Киев, 1971, с. 194.

Институт физической химии  
Академии наук СССР

Поступила в редакцию  
8/VIII 1972

E. RAUD

#### VEDELIKU VALGUMIST MÕÖDA TAHKE KEHA PINDA PÕHJUSTAVA JÕU MÄÄRAMISE MEETOD

Töötati välja vedeliku valgumist mõõda tahke keha pinda põhjustava jõu määramise meetod. Leiti, et see jõud on arvuliselt võrdne vaba pindenergia vähenemisega ( $\Delta\sigma$ ) valgumisprotsessi kestel. Meetod tugineb mõõda tahket kaldplaati tõusva njutoonilise vedeliku peene kihi kohta koostatud Navje-Stoksi võrrandi lahendusele. Süsteemide Hg—Zn ja Hg—Pb kohta arvatud  $\Delta\sigma$  väärtused on heas vastavuses katseandmetega.

E. RAUD

#### A METHOD OF CALCULATING THE MOVING FORCE OF THE WETTING PROCESS

A method of calculating the moving force of the wetting process is developed. This force is numerically equal to the decrease of the free surface energy ( $\Delta\sigma$ ) during wetting. The method is based on the analysis and solution of the Navier-Stokes equation for the thin Newtonian liquid layer flowing along inclined and vertical solid plates. The calculated values  $\Delta\sigma$  for systems Hg—Zn and Hg—Pb are in good agreement with experimental data.