

УДК 66.017:543.2:532.6

Ю. В. Найдич, И. И. Габ, В. А. Евдокимов,  
Д. И. Куркова, Т. В. Стецюк, Н. Ф. Григоренко,  
Е. П. Черниговцев, В. С. Журавлев, В. П. Красовский

Институт проблем металознавства ім. І. М. Францевича Національної академії наук України, Київ

**Форма поверхности жидкости  
и капиллярные явления при пониженной силе  
тяжести или в невесомости применительно  
к проблемам космического материаловедения  
(технологии порошковой металлургии:  
пропитка, жидкофазное спекание; сварка, пайка)**

Надійшла до редакції 03.02.04

Вивчено капілярні явища, форми поверхонь та менісків рідин, процесів змочування при зниженому та нульовому значенні прискорення вільного падіння тяжіння (невагомість). Теоретично — на основі комп'ютерного інтегрування класичних рівнянь капілярності за створеними програмами та вар'їрування значення прискорення  $g$ , та експериментально, моделюючи невагомість на Землі (застосовуючи малі об'єми — краплі рідини з пониженою гравітаційною дією — або створюючи міжфазні границі між рідинами рівної густини, що не змішуються між собою), знайдені форми поверхні рідких фаз (для розплавлених металів) в найбільш характерних системах: крапля на поверхні твердого тіла, меніск рідини в циліндричному каналі. Проведені експерименти відносно дискусуючої сьогодні залежності крайового кута від сили тяжіння (показана незмінність крайового кута від величини та напрямку дії гравітаційного вектору). Спеціально виміряні також крайові кути в модельних системах при гравітаційному нульовому тиску, що має принципове значення для теорії капілярності. Результати використані в технології паяння матеріалів, порошкочерметалургії, при виготовленні пористих капілярних структур теплових труб, маючи на увазі реалізацію цих технологій в умовах космічного простору (мікрогравітації).

Поверхностные и капиллярные явления играют ключевую роль при пайке материалов и в ряде процессов порошковой металлургии как технологии дисперсных систем. При получении паяных соединений кварцевого стекла и металла (иллюминаторы космических кораблей) для уменьшения напряжений в соединениях, снижающих необходимые высокие оптические свойства прозрачного элемента, применяются широкие, не капиллярные в земных условиях, зазоры — 3—10 мм и более. При толщине стекла от 10 до 50 мм возникают трудности удержания припоя в таком зазоре: припой вытекает

из зазора под действием гидростатического давления. В условиях невесомости эти трудности автоматически устраняются.

Высота поднятия жидкости в цилиндрической трубе (или плоском зазоре) определяется известной формулой:

$$H = \frac{2\sigma \cos\theta}{r\rho g}, \quad (1)$$

где  $\sigma$  — поверхностное натяжение жидкости,  $\theta$  — краевой угол смачивания,  $r$  — радиус трубы,  $\rho$  — плотность жидкости,  $g$  — ускорение свободного падения.

Расчеты для жидких металлов показывают, что при хорошем смачивании в плоском зазоре значительного сечения (3—5 мм) высота поднятия расплава при нормальной гравитации составляет всего 2–3 мм. В условиях невесомости высота подъема жидкости становится бесконечной (разумеется, при хорошем смачивании жидкостью стенок трубы) и определяется только количеством жидкой фазы, а пропитка пористого каркаса, например жидким металлом, осуществляется на неограниченную высоту (длину) изделия при любом размере частиц твердой фазы. Кинетические зависимости пропитки для двух крайних случаев схематически представлены на рис. 1. Кривые 1 ( $g = 9.81 \text{ м/с}^2$ ) и 2 ( $g = 0$ ) при небольших  $H$  близки, поэтому, если технология пропитки осуществляется для производства небольших изделий, то влияние силы тяжести невелико. Однако в ряде случаев, когда длина изделия, например тепловой трубы, составляет порядка метра, гравитационные эффекты могут быть существенными. Форма сечения сварного шва, выполненного в космических условиях (микрогравитация), будет отличаться от формы валика расплава, полученного при земной силе тяжести.

Таким образом, изучение капиллярного поведения жидкостей (форма поверхностей и менисков,

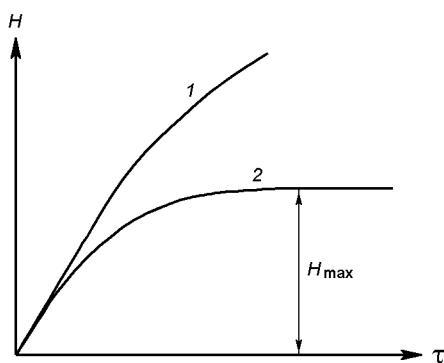


Рис. 1. Кинетика пропитки снизу: высота фронта жидкости, поднимающейся по пористому телу, в зависимости от времени — 1 — сила тяжести отсутствует, 2 — при действии силы тяжести

капиллярные процессы) в условиях изменяющейся гравитации или при ее отсутствии представляется весьма важным элементом космических технологий. Разумеется, наиболее полное изучение этих явлений возможно только в условиях космических полетов или на Луне, либо в сложных специальных экспериментах, где невесомость создается в течение короткого периода времени (падающая капсула или специальная траектория полета самолета). Тем не менее, ряд важных результатов может быть полу-

чен как путем теоретического анализа уравнений, описывающих форму жидкой поверхности, так и в специально поставленных наземных экспериментах. В таких экспериментах условия невесомости могут моделироваться двумя путями.

1. Путем применения малых объемов жидкости, когда вектор силы тяжести  $\rho gh$  мал, а кривизна поверхности значительна, лапласово давление велико (число Бонда, равное отношению силы тяжести к капиллярным силам, мало); здесь  $h$  — высота столба жидкости в трубе или высота капли жидкости, расположенной на твердой поверхности;

2. Путем помещения жидкости в среду (также жидкую, но не смешивающуюся с первой) с равной плотностью.

В настоящей работе рассмотрены теоретические подходы и методы моделирования невесомости для определения капиллярных свойств систем жидкость — твердая поверхность и некоторые результаты теоретических исследований и модельных экспериментов, которые могут быть использованы в технологиях пайки и сварки материалов и порошковой металлургии.

Термодинамика и устойчивость капиллярных систем изложена в работах Эверета и Хейнса [3, 5, 7] и Педдея [8]. В частности, Хейнс предлагает в качестве основного комплексного параметра использовать величину «эффективной площади»:  $S_{\text{эф}} = S_{\text{жг}} - S_{\text{жт}} \cos \theta$ , где  $S_{\text{жг}}$  и  $S_{\text{жт}}$  — площади контакта жидкости с газовой и твердой фазой соответственно;  $\theta$  — краевой угол смачивания. Устойчивость системы определяется знаком вторых производных от этой величины по некоторым параметрам. Следует отметить, что величина  $S_{\text{жг}} - S_{\text{жт}} \cos \theta$  автоматически входит в формулы при расчете свободной энергии капиллярной системы, однако такой подход (вычисление эффективной площади) и использование его в теории распространения в литературе не получили.

Характеризуя данные исследований капиллярных явлений при  $g \rightarrow 0$ , можно отметить, что вопросам степени смачиваемости жидкостью твердой фазы уделялось недостаточно внимания.

В большинстве случаев краевой угол полагается равным нулю (стенки топливного контейнера ракеты, например, действительно полностью смачиваются жидким водородом и кислородом). В то же время во многих системах краевой угол может быть большим. Исследования смачивания, формы поверхности и менисков в расплавленных металлах при высоких температурах практически не проводились.

Отметим наконец, что тематика нашей работы относится к статике капиллярных явлений при

$g \sim 0$ . Вопросы динамики жидкостей здесь не затрагиваются.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Форма поверхности жидкости описывается уравнением Лапласа—Эйлера, которое для капли жидкости, покоящейся на твердой поверхности, может быть записано в виде:

$$\sigma \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) = \frac{2\sigma}{R} + gz(\rho_1 - \rho_2), \quad (2)$$

где  $R_1$  и  $R_2$  — главные радиусы кривизны в данной точке поверхности,  $R$  — радиус кривизны при вершине капли (или мениска),  $z$  — вертикальная координата точки,  $\sigma$  — поверхностное натяжение жидкости,  $\rho_1$  и  $\rho_2$  — плотность жидкости и окружающего газа соответственно ( $\rho_2$  можно считать близким к нулю) (рис. 2).

Величины кривизны выражаются через первые и вторые производные функции  $z$ :

$$R_1 = \frac{(1 + z'^2)^{3/2}}{z''}, \quad (3)$$

$$R_2 = \frac{x(1 + z'^2)^{1/2}}{z'}, \quad (4)$$

(рассматривается оссиметричная задача; ось проходит через вершину капли).

Таким образом, уравнение (2) является дифференциальным уравнением в частных производных второго порядка и не интегрируется в элементарных функциях. Мы использовали компьютерное интегрирование уравнения (2). Использовался метод Башфорта [4], а расчеты осуществлялись с помощью алгоритма, который входит в программное обеспечение. По значению координат  $x, z, \varphi$  точек поверхности капли вычисляется коэффициент  $\beta$  формы капли по заранее найденным коэффи-

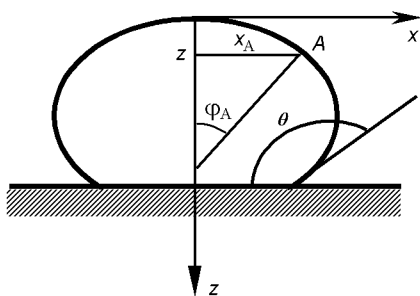


Рис. 2. Капля жидкости на твердой поверхности

циентам полинома:  $\beta = \sum a_i (x/z)^i$  (ошибка определения  $\beta$  меньше  $5 \cdot 10^{-3} \%$ ). Затем с использованием угла  $\varphi$  как независимой переменной по методу Рунге—Кутта—Фельдберга четвертого порядка с автоматическим изменением шага (модифицированный вариант программы [1]) интегрируется указанное уравнение. Оно связывает координаты  $x, z, \varphi$  с поверхностным натяжением  $\sigma$  жидкости на границе со средой, плотностью  $\rho$  жидкости и ускорением свободного падения  $g$ . То есть, измерив координаты точки на поверхности жидкости, можно определить капиллярную постоянную  $a^2 = \sigma/\rho g$  и поверхностное натяжение жидкости. Но можно решить и обратную задачу: по заданному поверхностному натяжению, плотности и величине ускорения земного тяготения построить координаты точек поверхности капли. Именно эта последняя задача и решалась в данной работе. Величина  $g$  рассматривалась как переменный параметр. Варьируя его, можно определить форму поверхности жидкости и капель для каждого значения ускорения силы тяжести.

С помощью указанных приемов были построены контуры капель жидких металлов при  $g = 9.81 \text{ м/с}^2$  и для разных значений объема  $V$ , а также капель одинакового объема для разных  $g$ . Построены контуры капель разных металлов и воды для разной

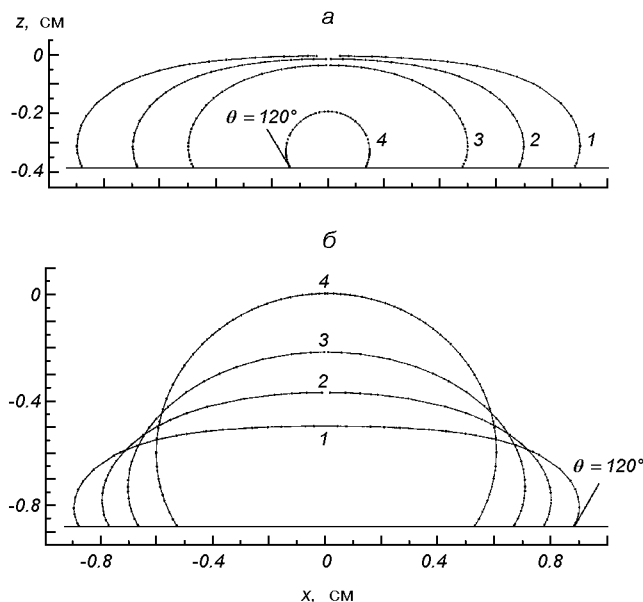


Рис. 3. Рассчитанные формы капель расплавленного свинца ( $\sigma = 447 \text{ мДж/м}^2, \rho = 10.69 \text{ г/см}^3, \sigma/\rho = 41.81$ ), опирающегося на твердую поверхность: а — для капель 1—4 разного объема  $V = 0.76, 0.43, 0.20, 0.0099 \text{ см}^3$  соответственно при  $g = 981 \text{ см/с}^2$ ; б — для одной капли  $V = 0.76 \text{ см}^3$  при разных значениях ускорения  $g = 980, 490, 196, 9.8 \text{ см/с}^2$  (случаи 1—4)

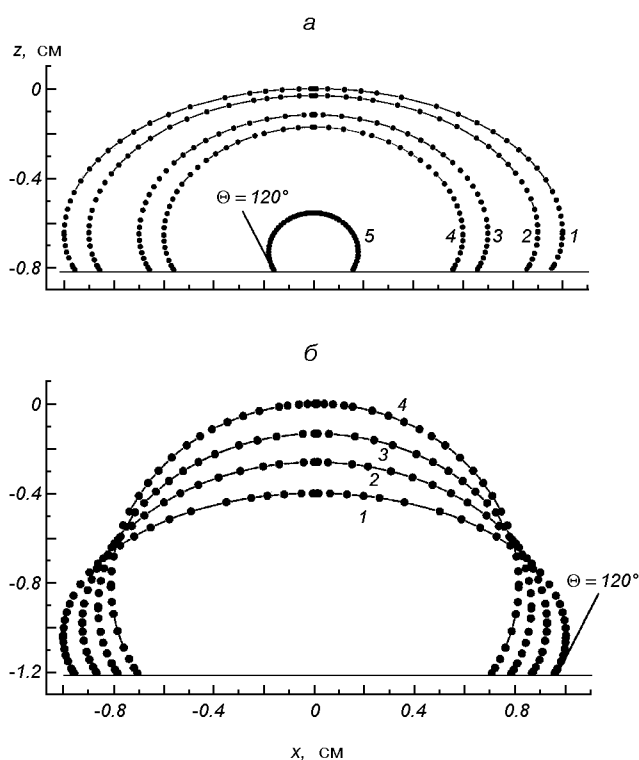


Рис. 4. Рассчитанные формы капель расплавленного железа ( $\sigma = 1856 \text{ мДж/м}^2$ ,  $\rho = 7.05 \text{ г/см}^3$ ,  $\sigma/\rho = 263.26$ ), опирающегося на твердую поверхность: *а* — для капель 1–5 разного объема  $V = 1.87, 1.45, 0.78, 0.53, 0.02 \text{ см}^3$  соответственно при  $g = 981 \text{ см/с}^2$ , *б* — для одной капли  $V = 1.87 \text{ см}^3$  при разных значениях ускорения свободного падения  $g = 981 (1g), 490 (0.5g), 196 (0.2g), 9.81 \text{ см/с}^2 (0.01g)$  (случаи 1–4)

степени смачивания твердой поверхности. Результаты для свинца и железа представлены на рис. 3, 4.

Форма капли (для  $\theta > 90^\circ$ ) может быть охарактеризована параметром сферичности — отношением  $x/z$ , где  $x$  — половина экваториального диаметра капли,  $z$  — расстояние от экватора до вершины. При малом значении  $g$  или малом объеме капли имеют форму, близкую к сфере. При  $g = 0$  образуется идеальная сфера. Экспериментально ситуацию для газовой окружающей среды можно наблюдать лишь в условиях космического полета. Эксперимент для капли с малым объемом можно провести на земле, изменяя объем капли. Малые капли с  $x/z \approx 1$  эквивалентны каплям с малым  $g$  (при том же значении  $x/z$ ). Таким образом, возникает возможность моделирования в земных условиях разного гравитационного воздействия на жидкость.

Аналогично были рассчитаны формы менисков жидкости в цилиндрической трубе для разной сте-

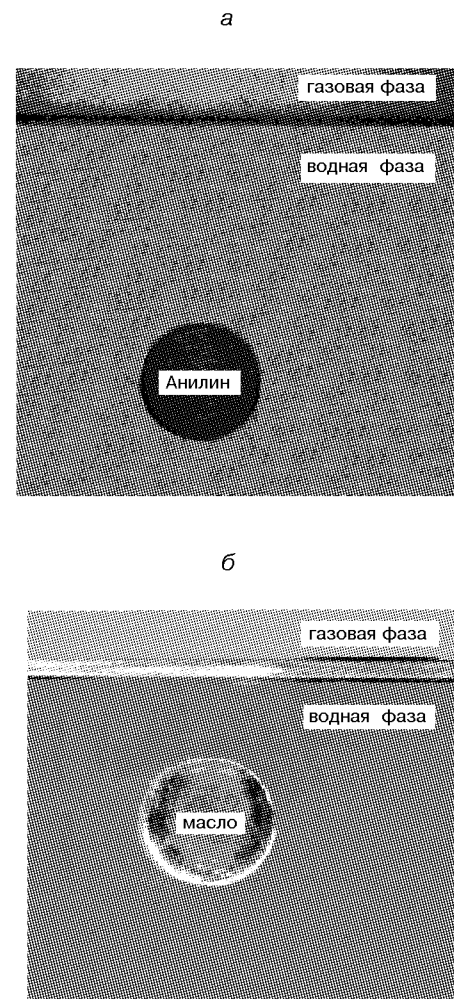


Рис. 5. Капли анилина (*а*) и масла (*б*), взвешенные в водной среде той же плотности

пени смачивания. Был предложен упрощенный, но столь же точный, метод расчета формы мениска для случая малых  $g$  и его расположения по сравнению с мениском для  $g = 9.81 \text{ м/с}^2$ . Для случая  $g = 0$  форма мениска является сферичной для любого диаметра трубы.

#### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Были проведены опыты типа Плато, но для систем с участием твердой фазы, смачиваемость которой была различной (в зависимости от свойств твердой фазы).

Первоначальные опыты (их можно рассматривать как калибровочные) были проведены для двухфаз-

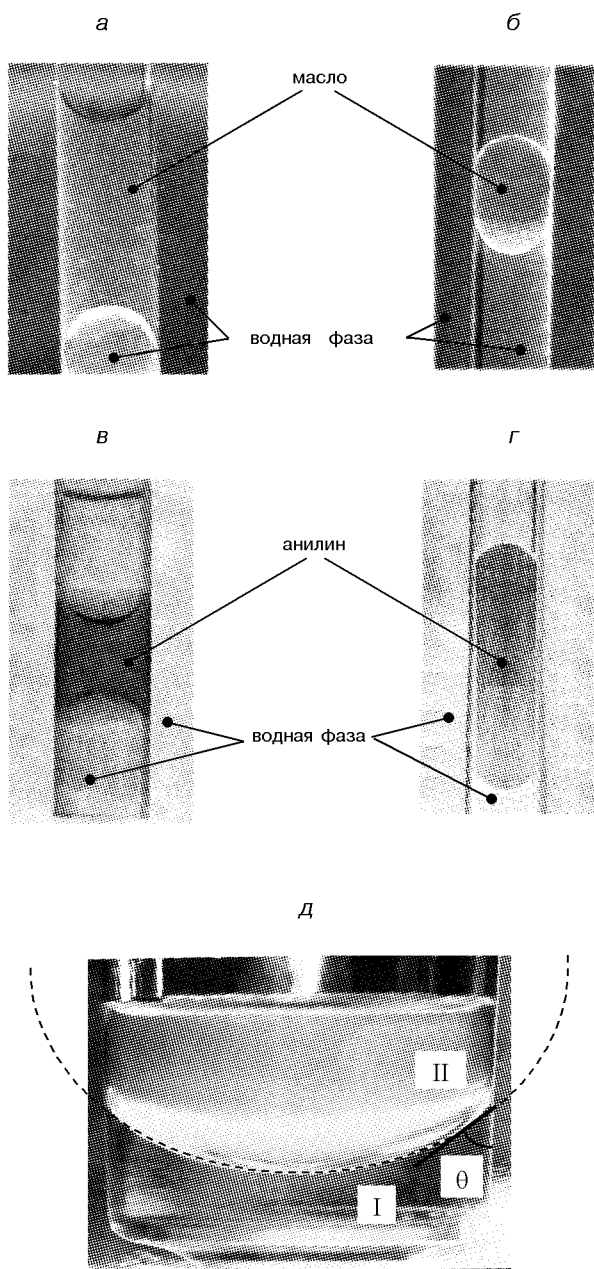


Рис. 6. Формы менисков жидкости в условиях невесомости в цилиндрической трубе диаметром 20 мм (использованы прозрачные материалы — стекло и органическое стекло): *a, в* — случай высокой смачиваемости основной жидкостью стенок трубы органического материала ( $\theta \approx 0$ ); *б, г* — несмачивание основной жидкостью стенок стеклянной трубы ( $\theta = 120^\circ$ ); *д* — формы менисков на границе масло — водная среда в стеклянном сосуде I и масло — воздух II

ных систем — двух жидкостей равной плотности: масло — смесь воды со спиртом и анилин — раствор NaCl в воде.

Получены строго сферические капли ( $\varnothing$  2–3 см) масла и анилина в водной среде, не движущиеся по вертикали, что подтверждает равенство плотностей обеих жидких фаз. Капли фотографировались на специально созданной установке, используя прозрачность жидких сред (рис. 5). Затем были проведены опыты по определению формы менисков анилина и масла в водной среде в трубах разных диаметров: 13–40 мм (рис. 6). При равенстве плотностей обеих жидких фаз мениск имеет точно сферическую форму для разных краевых углов смачивания. Координаты трехфазной линии контакта совпадают с вычисленными теоретически (рис. 7).

Для расчета капиллярных систем (расплавы металлов в паяном зазоре, жидкая фаза в пористом каркасе) кроме поверхностного натяжения жидкости необходимо знать краевой угол смачивания жидкостью поверхности твердого тела, определяемый уравнением Юнга:

$$\cos\theta = \frac{\sigma_{ТГ} - \sigma_{ТЖ}}{\sigma_{ЖГ}}, \quad (5)$$

где  $\theta$  — краевой угол смачивания,  $\sigma_{ТГ}, \sigma_{ТЖ}, \sigma_{ЖГ}$  — поверхностные энергии на границах твердое тело—газ, твердое тело—жидкость, жидкость—газ.

В уравнение (5) гравитационный вектор не входит. Тем не менее, некоторые исследователи утверждают, что  $\theta$  должен зависеть от  $g$ . Дискуссии относительно справедливости уравнения Юнга возникают периодически со времени его формулировки [10]. В работе [9] утверждается, что краевой угол несомненно должен зависеть от силы тяжести. Последовательная проверка уравнения Юнга может быть проведена лишь в условиях космического полета путем специальных измерений одного и того

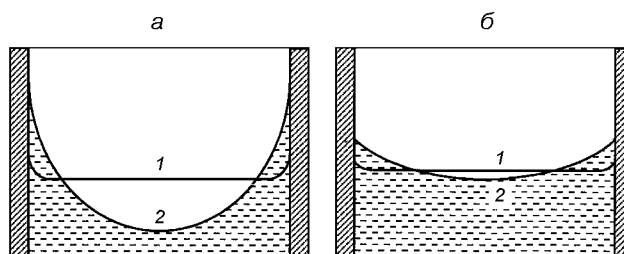


Рис. 7. Форма мениска расплавленного олова ( $T = 232^\circ\text{C}$ ) в трубе при изменении ускорения свободного падения  $g = 981 \text{ см/с}^2$  (1),  $g = 0$  (2) для разных степеней смачивания: *a* —  $\theta \approx 0$ , *б* —  $\theta \approx 60^\circ$

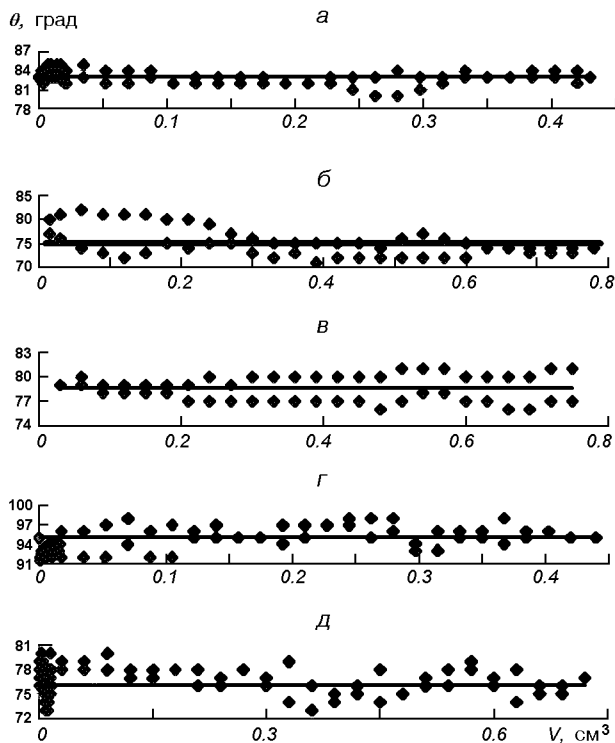


Рис. 8. Значения краевого угла  $\theta$  смачивания капли воды разного объема, находящимися на подложках из разных материалов: *a* — медь, *б* — нержавеющая сталь, *в* — сталь, *г* — парафин, *д* — фторопласт

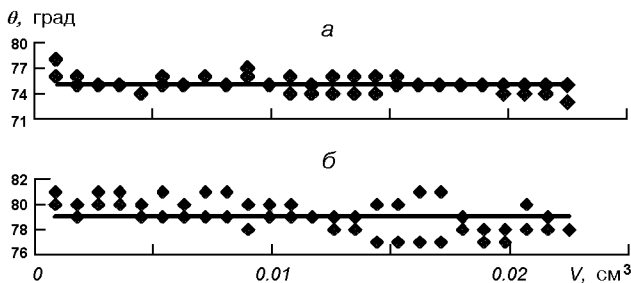


Рис. 9. То же для капель глицерина: *a* — на парафине, *б* — на фторопласте

же образца: капли жидкости на твердой поверхности. Технически это очень трудно, тем более что есть и принципиальные трудности. Наши расчеты формы капель (рис. 3, 4) показывают важную особенность: при *уменьшении g* реализуется краевой угол оттекания, и наоборот, при *увеличении g* наблюдается натекание капли на твердую поверхность. Таким образом, в измерения вносит влияние гистерезис смачивания, что очень затруднит трактовку результатов. Указанные трудности могут быть устранены при моделировании изменения силы тяжести в земных условиях путем изменения

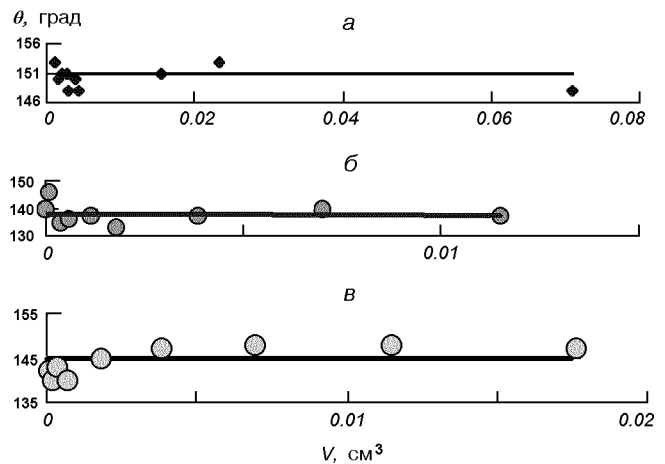


Рис. 10. То же для капель золота (*a*), олова (*б*) и индия (*в*) на кварце

объема капли и определения краевого угла для каждого значения этого объема. На основе предложенного метода в настоящей работе выполнены эксперименты для нескольких высокотемпературных и низкотемпературных систем (Sn—SiO<sub>2</sub>; In—SiO<sub>2</sub>, вода—парафин, фторопласт, некоторые металлы; глицерин—твердая поверхность), где краевой угол измерен для капель разных размеров (объемов). Для экспериментов с низкотемпературными контактными системами была разработана специальная фотооптическая аппаратура, в которой предусматривалась возможность непрерывного изменения объема капли (объем капли менялся в одном опыте в требуемых интервалах) с помощью дозирующего устройства (подачи жидкости снизу или сверху в каплю). Применялась цифровая фотокамера, соединенная с компьютером, так что увеличенное изображение капли воспроизводилось на дисплее. Краевой угол измерялся непосредственно на экране дисплея графическим («компьютерным») методом проведения касательной к контуру капли.

Таким образом, можно было получить большое количество экспериментальных точек на кривых зависимости  $\theta - V$  для одной и той же поверхности твердого тела и данной жидкости. Для расплавленных металлов использовалась имеющаяся вакуумная высокотемпературная фотоаппаратура [2]. Капли расплавленного металла различных объемов получали путем помещения на поверхность твердого тела взвешенных количеств металла. Кроме этих данных были измерены краевые углы смачивания при разных направлениях действия гравитационного вектора — перпендикулярно к поверхности твердой фазы в направлении вдавливания капли (положительное направление) и в обратном направле-

Таблица 1. Краевой угол капли между двумя параллельными горизонтальными пластинами (вектор  $g$  действует «положительно» — нижняя пластина и «отрицательно» — верхняя пластина)

| Система           | Температура $T$ , °C | Зазор, $m$ | Подложка | Время выдержки $\tau$ , мин             |     |    |
|-------------------|----------------------|------------|----------|---|-----|----|
|                   |                      |            |          | 1                                       | 30  | 60 |
|                   |                      |            |          | Краевой угол смачивания $\theta$ , град |     |    |
| Сапфир — вода     | 20                   | —          | верхняя  | 32                                      | 32  | —  |
|                   |                      |            | нижняя   | 33                                      | 33  | —  |
| Кварц — вода      | 20                   | —          | верхняя  | 12                                      | 12  | —  |
|                   |                      |            | нижняя   | 12                                      | 11  | —  |
| Стекло — вода     | 20                   | —          | верхняя  | 11                                      | 11  | —  |
|                   |                      |            | нижняя   | 13                                      | 13  | —  |
| Титан — вода      | 20                   | —          | верхняя  | 16                                      | 18  | 17 |
|                   |                      |            | нижняя   | 17                                      | 17  | 17 |
| Сапфир — глицерин | 20                   | —          | верхняя  | $\tau = 5; 71$                          | 64  | —  |
|                   |                      |            | нижняя   | $\tau = 5; 71$                          | 65  | —  |
| Кварц — глицерин  | 20                   | —          | верхняя  | 41                                      | 38  | 35 |
|                   |                      |            | нижняя   | 41                                      | 39  | 36 |
| Титан — глицерин  | 20                   | —          | верхняя  | 18                                      | 18  | 16 |
|                   |                      |            | нижняя   | 20                                      | 17  | 16 |
| Кварц — олово     | 800                  | 2.71       | верхняя  | —                                       | 148 | —  |
|                   |                      |            | нижняя   | —                                       | 145 | —  |

Таблица 2. Величины краевых углов смачивания при действии вектора  $g$  перпендикулярно к межфазной поверхности твердое тело — жидкость (положительное направление) и параллельно границе твердое тело — жидкость при измерении краевого угла у вертикальной стенки

| Система                                 | Вектор действует «положительно» |    |    | Вектор действует вдоль вертикальной стенки |    |    |
|---|---------------------------------|----|----|--|----|----|
|   | Время выдержки $\tau$ , мин     |    |    |  |    |    |
|   | 1                               | 30 | 60 | 1  | 30 | 60 |
| Краевой угол смачивания $\theta$ , град |                                 |    |    |  |    |    |
| Сапфир — вода                           | 30                              | 30 | 30 | 27   | 26 | —  |
| Кварц — вода                            | 10                              | 10 | 10 | 10   | 10 | —  |
| Стекло — вода                           | 11                              | 11 | 11 | 9  | 10 | 10 |

нии, когда гравитация «отрывала» каплю жидкости от твердой поверхности (отрицательное направление) — при этих опытах капля помещалась между параллельно и горизонтально расположенными пластинами твердой фазы. Краевой угол измерялся также в условиях, когда сила тяжести действовала вдоль межфазной поверхности твердое тело / жидкость — краевой угол мениска жидкости у вертикально расположенной частично погруженной в жидкость пластины твердого тела. Результаты

представлены на рис. 8—10 и табл. 1, 2.

Данные свидетельствуют, что для объемов капель от 0.01 до 2–3 см<sup>3</sup> краевой угол практически не изменялся (систематически), по крайней мере в пределах ошибок эксперимента, обусловленных физико-химическими причинами (некоторая неоднородность смачиваемой поверхности, гистерезисные явления и др.) и составляющих для разных систем 1...3°. Большой разброс для значений краевого угла отмечается для капель особо малых размеров. Нам известна лишь одна работа [6], где краевой угол измерялся для капель ртути разных объемов на поверхности кварцевого стекла. Также обнаружено большее расхождение значений для малых капель. При увеличении размера капель значения краевого угла стабилизируются, и угол остается постоянным. Близкие значения краевых углов получены для капель, расположенных между горизонтальными пластинами для верхней и нижней поверхности (противоположное действие силы тяжести). Те же значения краевого угла сохраняются и для углов мениска жидкости у вертикальной стенки (действие силы тяжести — по касательной к межфазной поверхности, табл. 2).

Общий вывод, который может быть сделан на основании проведенных опытов, заключается в том, что краевой угол смачивания твердого тела жидкостью не зависит от величины и направления действия силы тяжести как для низкотемператур-

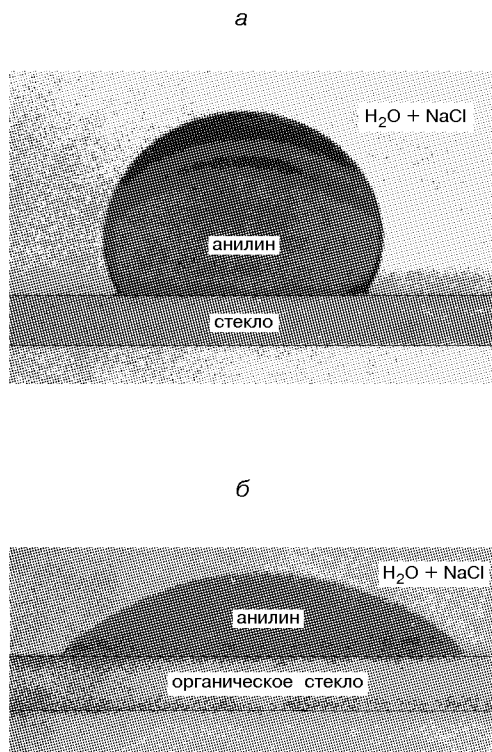


Рис. 11. Смачиваемость твердого тела жидкостью (анилином) в условиях моделированной невесомости (среда —  $H_2O + NaCl$ ): *а* — твердая фаза — стекло ( $\theta = 124^\circ$ ), *б* — твердая фаза — органический материал ( $\theta = 32^\circ$ )

ных, так и для высокотемпературных контактных систем.

Следует подчеркнуть, что во всех опытах условия проведения эксперимента близко соответствуют натеканию жидкости на твердую поверхность (т. е. измерялся краевой угол натекания), таким образом, гистерезисные явления практически не проявлялись. Очевидно, именно гистерезисом краевых углов смачивания можно объяснить наблюдавшиеся давно и приводимые в работе [9] доводы в пользу влияния гравитации на краевой угол явления различий краевого угла смачивания по разные стороны капли, расположенной на наклонной твердой поверхности.

В связи с дискуссией о возможной зависимости краевого угла от величины силы тяжести представляется принципиально важным измерить краевые углы при полном отсутствии тяготения. Мы получили такие данные для систем твердое тело—анилин—водный раствор  $NaCl$ . На рис. 11 представлены фотографии капли анилина на не смачиваемой (стекло,  $\theta = 124^\circ$ ) и смачиваемой (органическое вещество,  $\theta = 32^\circ$ ) твердой поверхности при  $20^\circ C$ .

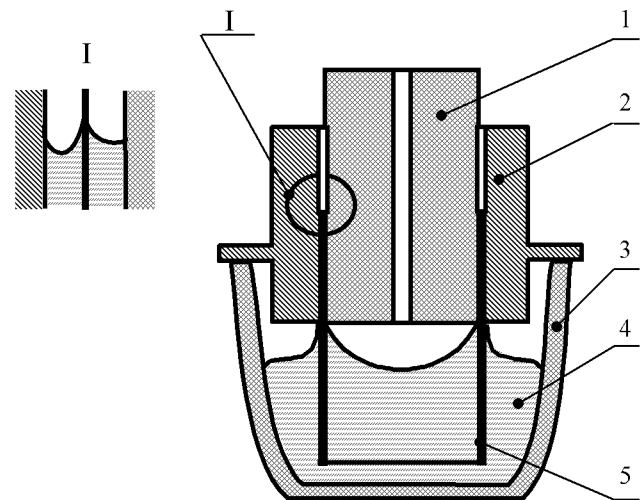


Рис. 12. Схема сборочного узла керамика-металл для принудительной подачи припоя в паяный зазор: 1 — стекло или керамика, 2 — металлическая обойма, 3 — керамический вспомогательный тигель, 4 — припой, 5 — металлические проводники, по которым транспортируется припой

В этих экспериментах сила тяжести на капли не действует. Эти данные имеют фундаментальное значение при рассмотрении зависимости краевого угла от величины дальнедействующих сил жидкость—твердое тело (ван-дер-ваальсово взаимодействие), которые могут маскироваться силой тяжести [8]. Однако тогда дискутируемый вопрос о зависимости краевого угла смачивания от ускорения свободного падения может быть поставлен в совершенно иной плоскости и выходит за рамки настоящей статьи.

Полученные результаты могут быть использованы при создании и развитии космических материаловедческих технологий, в том числе в порошковой металлургии и технике пайки и сварки. Так, найденные формы мениска жидкости в условиях микрогравитации приводят к выводу, что при пайке с широким (кольцевым) зазором при совершенном смачивании ( $\theta = 0^\circ$ ) будут образовываться выемки — пустоты в зазоре, т. е. зазор будет лишь частично заполнен припоем. При необходимости большего заполнения следует применять сплавы или создавать условия для реализации больших (в разумных пределах) значений краевого угла.

При выполнении операций пайки в невесомости возникают и некоторые другие проблемы — подачи припоя в зазор (в земных условиях для этого часто используют гравитацию). В связи с этим были разработаны методы подачи припоя через специальные проводники, смачиваемость которых высока (реализуется положительный коэффициент расте-



кания:  $S = W_A - W_K$ , где  $W_A$  и  $W_K$  — работа адгезии жидкости к твердому телу и работа когезии в самой жидкости). По этим проводникам припой «ползет» в нужном направлении (даже обратном направлению гравитации). Результаты таких экспериментов представлены на схеме (рис. 12).

При исследовании действия гравитации на процесс пайки были также разработаны усовершенствованные методы получения паяных соединений в земных условиях, среди которых отметим следующие.

1. Был разработан метод герметичного сочленения деталей из кварцевого стекла и металла при сборке деталей перед пайкой с помощью специальных уплотнительных паст; это позволило, в частности, получить спай кварцевого окна диаметром 50 мм и толщиной (высотой паяного зазора) 50 мм при ширине зазора около 10 мм и спай кварцевого окна диаметром 260 мм с зазором 6 мм.

2. Было рекомендовано использовать в ряде случаев в качестве припоев более легкие сплавы. Так, для индия ( $\sim 7 \text{ г/см}^3$ ) гидростатическое давление в паяном зазоре будет в 1.7 раза меньше, чем для традиционного припоя свинца ( $\sim 11 \text{ г/см}^3$ ). Такую металлическую жидкость легче удержать в высоком некапиллярном зазоре.

Разработан также ряд других приемов удержания расплавленного припоя в широком и высоком паяном зазоре.

Вычисленные формы капли расплава при пониженном значении ускорения свободного падения (рис. 3) могут быть использованы при реализации электросварочных процессов в условиях микрогравитации. В известном процессе создания утолщений листового материала — нанесение порции расплавленного металла на поверхность листа — в космических условиях форма капли будет существенно отличаться от «земной». Капля будет иметь значительно большую высоту и меньшую площадь основания. Так, для железа при одном и том же объеме капли  $1.87 \text{ см}^3$  высота при  $g = 0$  оказывается на 50 % больше, а диаметр основания — на 26 % меньше, чем для случая  $g = 9.81 \text{ м/с}^2$ .

Таким же образом можно рассчитать форму сварного шва или валика наплавленного металла при ускорении земного тяготения  $g = 9.81 \text{ м/с}^2$  и  $g = 0$ .

Данная работа выполнена по проекту УНТЦ NN-35.

1. Дьяконов В. П. Справочник по алгоритмам и программам для персональных ЭВМ. — М.: Наука, 1987.—240 с.
2. Найдич Ю. В. Контактные явления в металлических расплавах. — Киев: Наук. думка, 1972.—196 с.
3. Хейнс Дж. Капиллярные явления в условиях микрогравитации // Космическая технология / Под ред. Л. Стера. — М.: Мир, 1980.—437 с.
4. Bashforth F., Adams J. C. An attempt to test the theories of capillary action. — Cambridge: Univ. Press, 1883.—139 p.
5. Everet D. H., Haynes J. M. The Thermodynamics of Fluid Interfaces in a Porous of Medium Part. I. General Thermodynamic Considerations with Figures // Z. Phys. Chem.—1972.—82, N 36.—P. 36—48.
6. Frich B., Hargater E. Zur Randwinkelmessung des Liegenden Tropfens, dargestellt am System alpha-Aluminiumoxid-Quecksilber // Dtr. deutsch. Keram. Ges.—1963.—40, N 8.—P. 460.
7. Haynes J. M. Capillary instabilities in 1g and 0g // Proc. of the Second European Symposium on Material Sciences in Space. European Space Agency Special publ.—1976.—N 114.—P. 467—471.
8. Padday J. F. Capillary forces and Stability in Zero-gravity Environments // Proc. of the Second European Symposium on the Material Sciences in Space. European Space Agency Special publ.—1976.—N 114.—P. 447—454.
9. Yixiong Liu, German R. M. Contact angle and solid-liquid-vapor equilibrium // Acta Mater.—1996.—44, N 4.—P. 1657—1663.
10. Young T. An Essay on the Cohesion of Fluids // Trans. Roy. Soc. London.—1805.—94.—P. 65.—(Read December 20, 1804).

---

**THE FLUID SURFACE SHAPE AND CAPILLARY PHENOMENA UNDER LOWERED GRAVITY OR WEIGHTLESSNESS WITH APPLICATION TO SPACE MATERIALS SCIENCE (POWDER METALLURGY TECHNOLOGY; IMPREGNATION, LIQUID-PHASE SINTERING; WELDING, BRAZING)**

Yu. V. Naidich, I. I. Gab, V. A. Evdokimov, D. I. Kurkova, e.T. V. Stetsyuk, N. F. Grigorenko, E. P. Chemigovtsev, V. S. Zhuraviev, V. P. Krasovsky

Some capillary phenomena, shapes of surfaces and menisci of liquids, wetting processes under lowered or zero value of earth gravitation acceleration (weightlessness) are studied. Theoretically, on the basis of computer integration of classic capillarity equations using previously created programs and varying acceleration  $g$  values, and experimentally, modelling weightlessness on the Earth (using small volumes, namely drops of a liquid under lowered gravitation action, or creating interphase boundaries between nonmiscible liquids of equal density), the shape of liquid phases surface (for molten metals) are studied in most typical systems: a drop on a solid surface and liquid meniscus in a cylindrical channel. The experiments concerning to wetting contact angles dependence on gravitation discussed today were carried out (independence of wetting contact angle on value and direction of gravitation vector action is shown). The wetting contact angles in model systems are specially measured also at zero gravitational pressure, which is of basic importance for the theory of capillarity. The results are used in technology of materials brazing, powder metallurgy, in manufacturing of heat pipes porous capillary structures with an eye to implementation of these technologies in space environments (microgravitation).