

I. N. Sergeev^{1,*}, A. Kh. Khokonov² and Z. A. Akhmatov¹

¹Kabardino-Balkarian State University

Chernyshevsky Street 173, Nalchik, Kabardino-Balkaria 360004, Russia

²Institute for Nuclear Research of the Russian Academy of Science,

Prospekt 60-letiya Oktyabrya 7a, Moscow 117312, Russia

@ pirlfix@mail.ru

A new technique for measuring the dynamic and geometric characteristics of strongly curved interfaces has been developed and implemented. The method based on capillary vibrations of a microliter droplet, "sessile" on a substrate in a gaseous medium, vacuum or liquid. To study the capillary properties of low-melting alloys, an experimental setup has been designed and manufactured. The surface tension of gallium and its eutectic alloys with tin and indium in vacuum and inert medium, as well as at the interface with aqueous solutions of hydrochloric acid and sodium hydroxide, has been measured for the first time by the method based on measuring the spectrum of capillary oscillations.

Методика эксперимента

Для изучения межфазного натяжения легкоплавких металлов методом капиллярных колебаний на границе с жидкостью, в вакууме или газовой среде нами использовались измерительные ячейки двух типов. На рис. 1 показан вариант размещения капли в жидкой среде [1], а рис. 2 иллюстрирует случай, когда металлическая капля граничит с вакуумом или газовой средой.

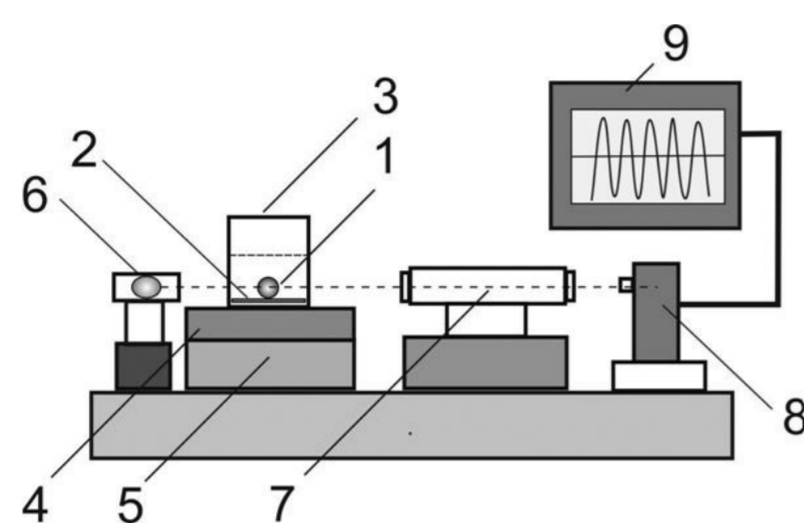
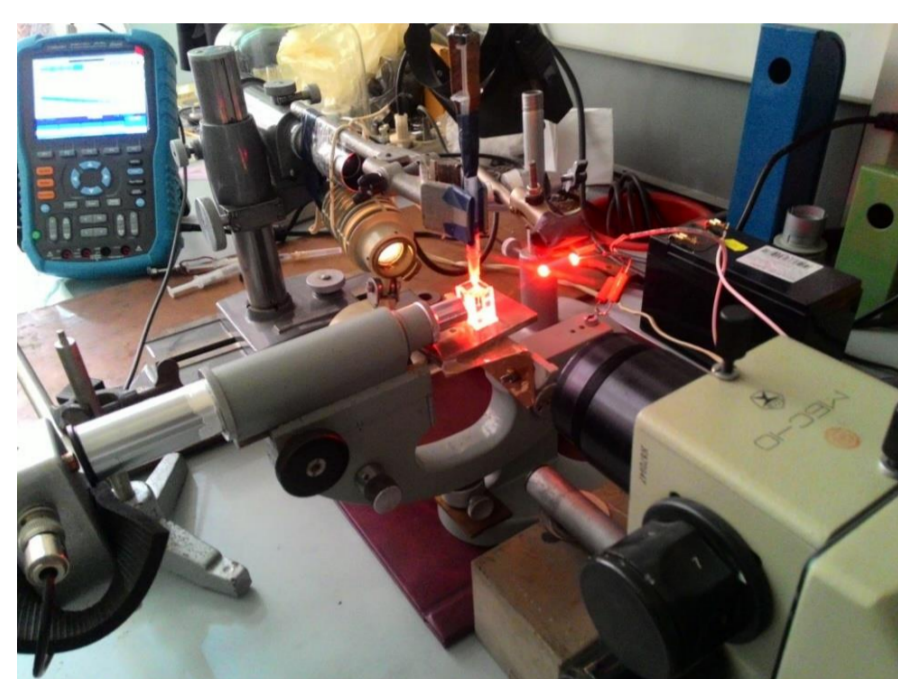


Рис. 1. Общий вид и схема экспериментальной установки для исследования капиллярных свойств металлических микрокапель, помещенных в жидкость: 1 – капля, 2 – исследуемая подложка, 3 – стеклянная кювета с жидкостью, 4 – нагревательный элемент с термопарой для поддержания заданной температуры в стеклянной кювете, 5 – пьезовибратор, 6 – светодиод для освещения микрокапли, 7 – микроскоп, формирующий увеличенное в 10...100 раз изображение контура капли на активной площадке фотодиода, 8 – фотодиод, 9 – осциллограф для регистрации капиллярных колебаний.

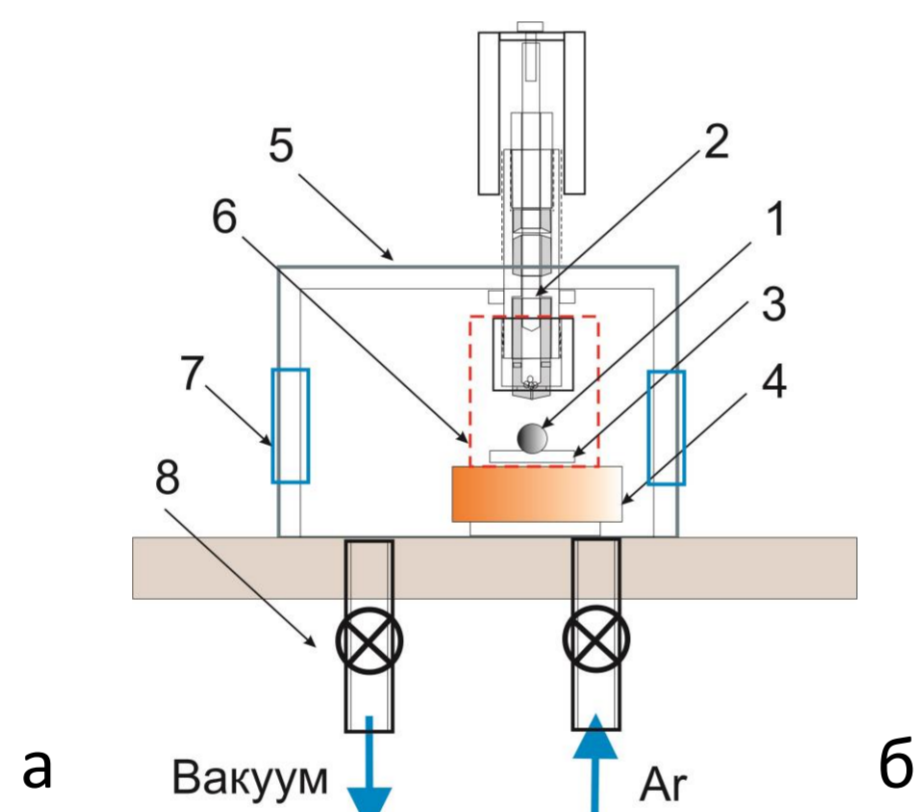
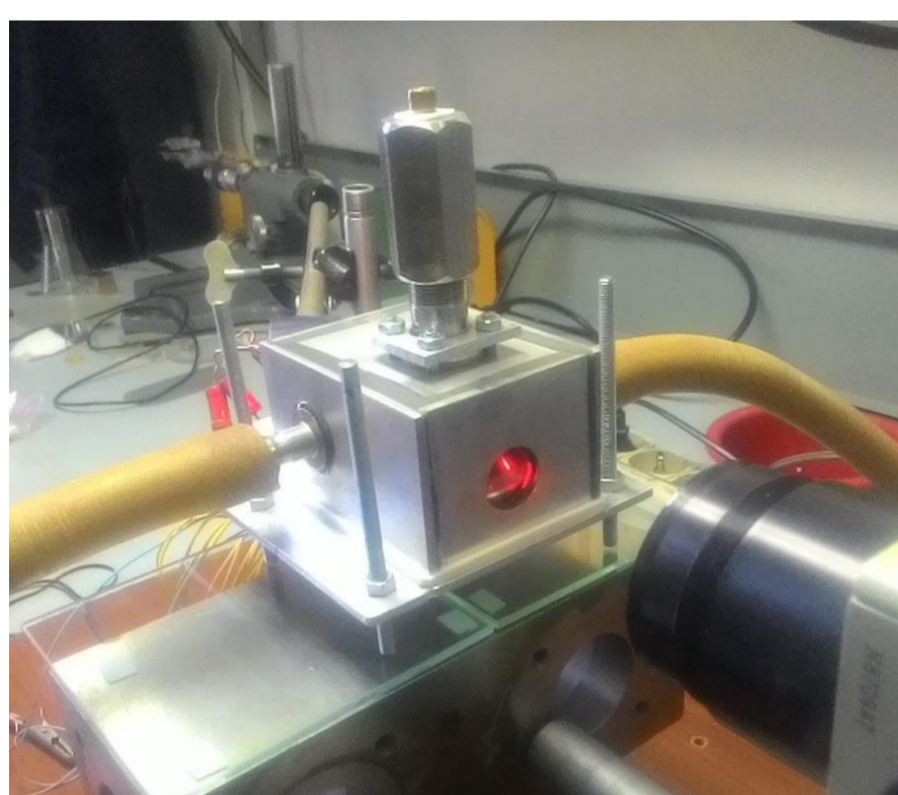
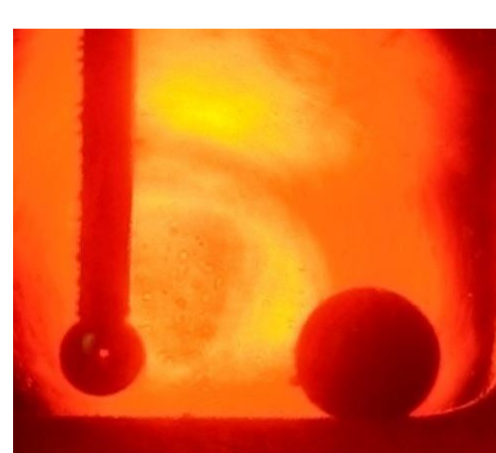
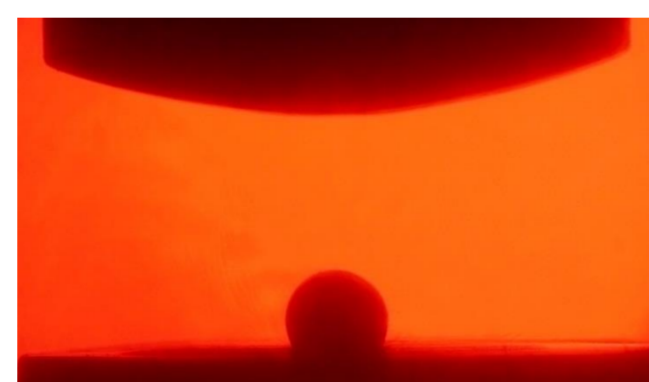


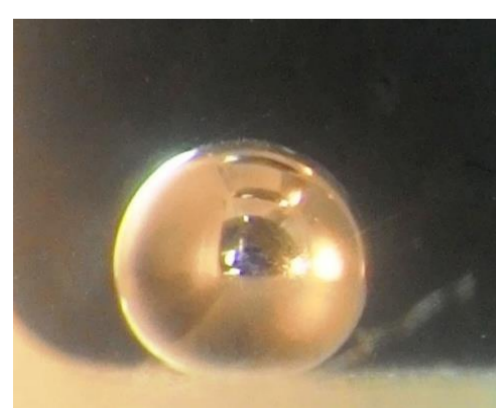
Рис. 2. Общий вид (а) и схема (б) экспериментальной камеры для измерения межфазного натяжения микролитровых капель легкоплавких металлов в вакууме или газовой среде: 1 – капля исследуемого сплава, 2 – устройство для приготовления сплава и высаживания металлических микрокапель заданного размера, 3 – исследуемая подложка, 4 – пьезокерамический вибратор, 5 – герметичная ячейка для создания газовой среды или вакуума, 6 – нагревательный элемент, 7 – окна для освещения и регистрации колебаний капли, 8 – вакуумная и газовая линии.



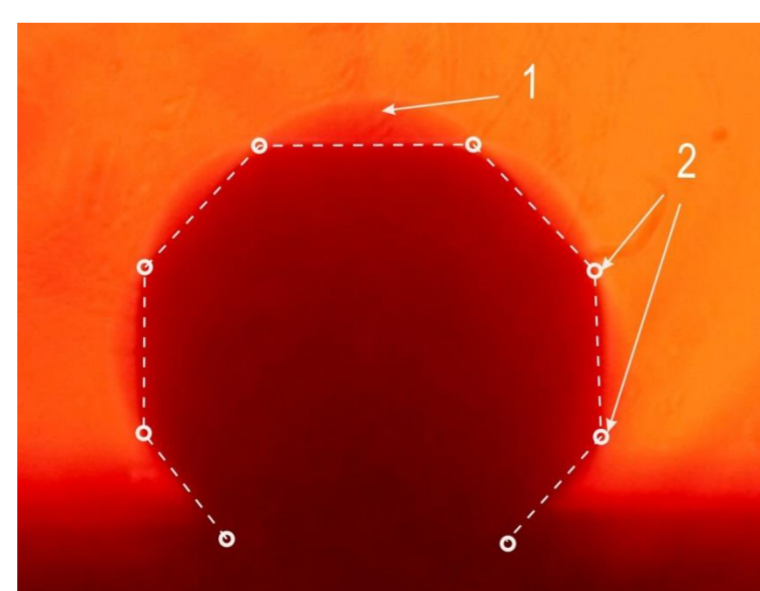
а



в



б



г

Рис. 3. Микрокапли эвтектических сплавов галлия в различных средах: а, б – капля Ga-In диаметром 1,76 мм при различных увеличениях в 0,2 М растворе HCl в состоянии покоя на стеклянной подложке, T=300 K; в – капля Ga-Sn диаметром 1,03 мм в состоянии покоя, г – та же капля в состоянии резонанса при f = 1040 Гц, T=300 K, 1 – стоячая волна, 2 – узлы колебаний.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ № 18-02-01042 а.

1. Sergeev I.N, Khokonov A.Kh, Akhmatov Z.A. Experimental setup for determining the surface tension of highly curved interfaces by static and dynamic methods // J. Phys.: Conf. Ser. 2020, 1556, 012056.

2. M. Strani and F. Sabetta. Free vibrations of a drop in partial contact with a solid support. J. Fluid Mech. (1984), vol. 141, pp. 233-247.

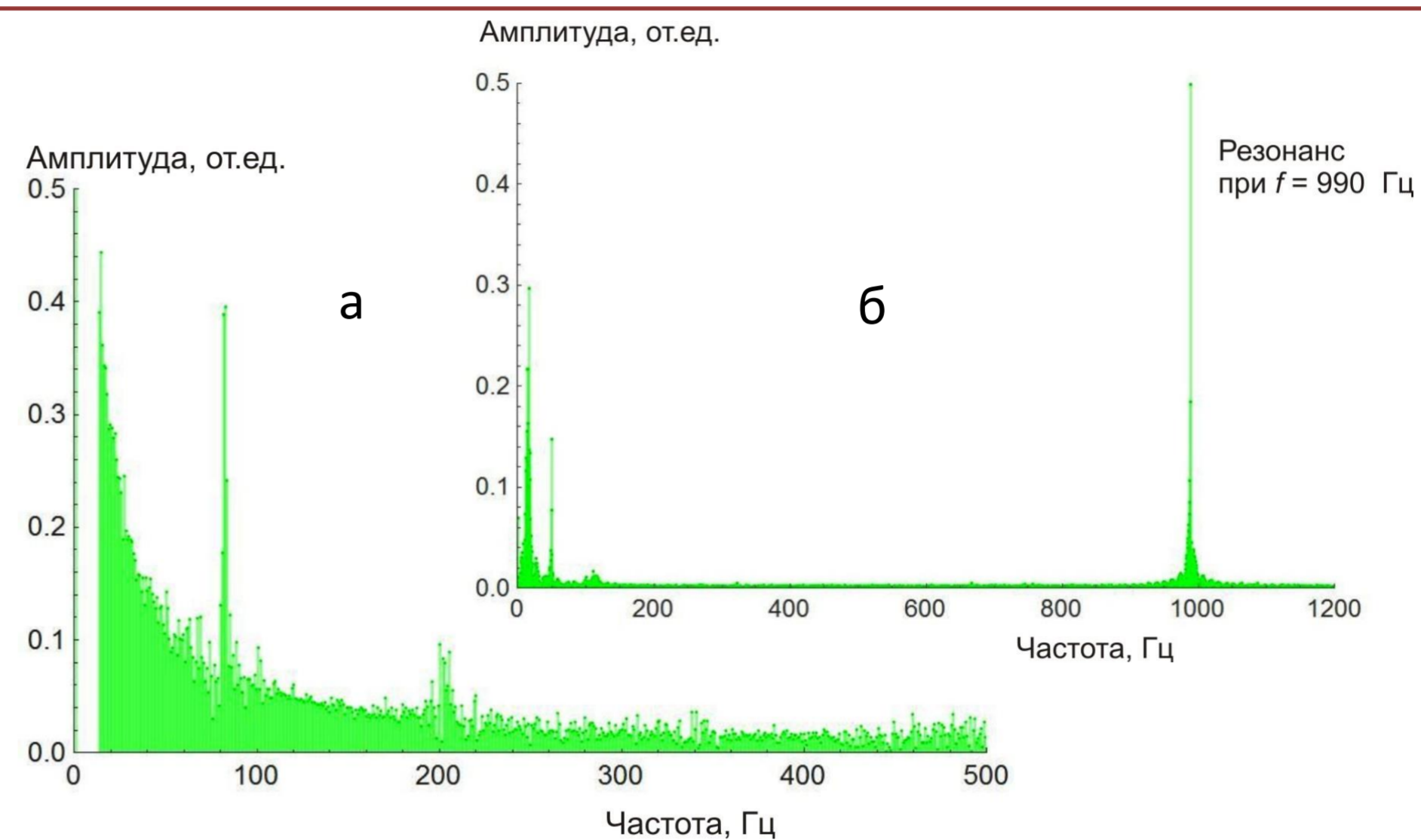
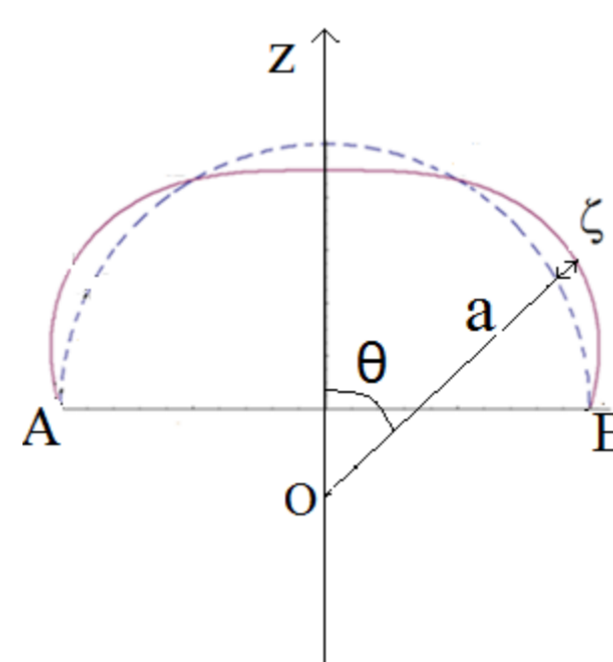


Рис. 4. Типичные частотные спектры микролитровой капли при возбуждении «белым шумом» (а) и в процессе резонансной раскочки (б).

Расчет собственных частот колебаний капли



Введем потенциал для скорости жидкости внутри ψ и снаружи $\tilde{\psi}$ капли.

$$\mathbf{v} = \nabla \psi \quad (1)$$

Условие несжимаемости жидкости $\text{div } \mathbf{v} = 0$.

$$\Delta \psi = 0. \quad (2)$$

Уравнение «движения» для нормальных смещений ζ от равновесной формы капли имеет вид

$$\frac{\partial}{\partial \mu} \left[(1 - \mu^2) \frac{\partial \zeta}{\partial \mu} \right] + 2 \zeta = f(\mu), \quad (3)$$

где правая часть определяется функцией $f(\mu)$

$$f(\mu) = \frac{\omega}{\omega_0^2 a} \left(\psi - \frac{\rho'}{\rho} \tilde{\psi} \right),$$

где

$$\omega_0^2 = \frac{\sigma}{a^3 \rho}. \quad (4)$$

Для решения уравнения (1) удобно воспользоваться функцией Грина [2]

$$\zeta(\mu) = \int_{\mu_0}^1 G(\mu, \nu) f(\nu) d\nu, \quad (5)$$

где функция Грина G выражается через полиномы Лежандра первого порядка

$$G(\mu, \nu) = \frac{P_1(\mu)}{\mu_0} \begin{vmatrix} Q_1(\mu_0) & Q_1(\nu) \\ P_1(\mu_0) & P_1(\nu) \end{vmatrix}, \mu \leq \nu, \quad (6)$$

где

$$P_1(\mu) = \mu, \quad Q_1(\mu) = \frac{1}{2} \mu \ln \left(\frac{1 + \mu}{1 - \mu} \right) - 1.$$

Разлагая функцию Грина и смещения ζ по полиномам Лежандра

$$\zeta(\mu) = \sum_{n=1}^{\infty} \zeta_n P_n(\mu).$$

$$G(\mu, \nu) = \sum_{n,l} G_{nl} P_n(\mu) P_l(\nu).$$

Получим систему уравнений для определения частоты собственных колебаний капли.

$$\sum_{l=1}^{\infty} \frac{2}{(2l+1)} \frac{((l+1)\rho + l\rho')}{l(l+1)\rho} \left(\frac{G_{n0} G_{0l}}{G_{00}} - G_{nl} \right) \zeta_l = \lambda \zeta_n$$

$$\lambda = \left(\frac{\omega_0}{\omega} \right)^2$$

Выводы

1. Собрана оригинальная установка, позволяющая реализовать новую методику измерения динамических характеристик сильно искривленных границ раздела, основанную на капиллярных колебаниях микролитровой капли, находящейся в вакууме или жидкости. Предусмотрена возможность размещения капли во внешних электрических и магнитных полях с целью изучения воздействия помехоторных сил на капиллярную динамику жидкости.

2. Результаты капиллярных измерений обрабатывались как с использованием общепринятых, так и авторских аналитических и численных гидродинамических моделей. Были получены значения межфазного натяжения σ_{12} для Ga, Ga-In, Ga-Sn, Ga-In-Sn на границе с вакуумом, аргоном, а также водными растворами HCl и NaOH. В частности, σ_{12} для Ga, Ga-In, Ga-Sn в вакууме при T = 305 K составило 675 дин/см, 645 дин/см и 558 дин/см, соответственно. Теоретические модели, использованные в работе для описания динамики жидкой капли и процессов смачивания в электростатических и электромагнитных полях, во всех случаях дают хорошо согласие с экспериментом.