

## Методы экспериментального определения поверхностного натяжения

*Е.А. Шимко<sup>1</sup>, К.В. Соломатин<sup>1</sup>, Е.Р. Курколуп<sup>2</sup>, С.С. Лескова<sup>3</sup>*

<sup>1</sup> Алтайский государственный университет (Барнаул, Россия)

<sup>2</sup> Алтайский государственный педагогический университет (Барнаул, Россия)

<sup>3</sup> Алтайский государственный медицинский университет (Барнаул, Россия)

## Methods of Surface-Tension Experimental Evaluation

*E.A. Shimko<sup>1</sup>, K.V. Solomatin<sup>1</sup>, E.R. Kirkolup<sup>2</sup>, S.S. Leskova<sup>3</sup>*

<sup>1</sup> Altai State University (Barnaul, Russia)

<sup>2</sup> Altai State Pedagogical University (Barnaul, Russia)

<sup>3</sup> Altai State Medical University (Barnaul, Russia)

Приведены два метода определения поверхностного натяжения жидкостей: метод отрыва пластины и метод равновесной капли. Для реализации данных методов использовалась экспериментальная установка, позволяющая перемещать одну стеклянную пластину относительно другой с точностью до 0,01 мм. Между стеклянными пластинами наливали 0,05–0,2 мл жидкости так, чтобы капля жидкости касалась обеих пластин, а затем полученную каплю растягивали до ее разрыва либо до тех пор, пока верхняя и нижняя поверхности капли, соприкасающиеся с пластинами, не выравнивались и не принимали форму круга. При исследовании профиля капли использовали USB-микроскоп, с помощью которого фотографировали каплю исследуемой жидкости и измеряли краевые углы смачивания. В качестве экспериментальных жидкостей использовали дистиллированную воду, глицерин, этиловый спирт и трансформаторное масло ГК. В результате проведенных экспериментов получены значения поверхностного натяжения исследуемых жидкостей, хорошо согласующиеся со справочными данными. Достоинствами данных методов является простота их реализации, быстрота проведения эксперимента и то, что при проведении экспериментов не требуется много жидкости.

**Ключевые слова:** поверхностное натяжение, капля жидкости, метод отрыва пластины, метод равновесной капли.

DOI 10.14258/izvasu(2016)1-15

**Введение.** Исследования в области смачивания и капиллярных явлений имеют широкий спектр практических приложений, так как многие технологические процессы связаны с растеканием жидкости по твердой поверхности [1, с. 94]. Именно поэтому

There are two methods of liquids surface-tension evaluation: the plate detachment method and the balanced-drop method. These methods are performed with an experimental installation that allows to slide plates with an accuracy up to 0,01 mm. An amount of 0,05–0,2 ml of liquid is poured between the plates so that the drop contacts both plates. Then the drop was stretched up to its rupture or till upper and lower surfaces of the drop become equally round. The drop profile is studied with the USB-microscope, and pictures of the analyzed liquid drop area taken to evaluate the wetting angle. Distil water, glycerin, ethanol, and GK transformer oil are used as experimental liquids. The values of liquids surface-tension obtained in experiments correspond well with the reference data. These methods demonstrate the following advantages: simplicity of preparation, quickness, and little amount of liquids.

**Key words:** surface-tension, a liquid drop, the plate detachment method, the balanced-drop method.

понимание этих процессов во многом определяет создание новых технологий и материалов. Традиционно на легкоподвижных границах «жидкость — газ» или «жидкость — жидкость» поверхностное натяжение измеряют по массе капли, отрывающейся от кон-

ца вертикальной трубки (сталагмометра); по величине максимального давления, необходимого для продавливания в жидкость пузырька газа; по форме капли, лежащей на твердой или жидкой поверхности; по максимальной высоте поднятия жидкости в тонких капиллярах; резонансными методами; методами стоячих или бегущих волн и другими методами. На сегодняшний день существующие методы усовершенствуются в основном за счет использования компьютерной обработки экспериментальных данных [2, с. 83; 3, с. 1048; 4, с. 570; 5, с. 406] и моделирования экспериментов [6, с. 88]. Тем не менее в настоящее время существует сравнительно мало разработок, которые бы позволили просто, а главное — оперативно определять поверхностное натяжение жидкости. Многие из существующих методов обладают невысокой точностью, в некоторых методах не учитывается гистерезис краевых углов смачивания [7, с. 99; 8, с. 48; 9, с. 111].

В данной работе приведены еще два сравнительно простых метода определения поверхностного натяжения жидкостей. Для реализации этих методов использовалась экспериментальная установка (рис. 1), позволяющая перемещать одну стеклянную пластину относительно другой с точностью до 0,01 мм. Для исследования профиля капли использовали USB-микроскоп Levenhuk DTX90, с помощью которого фотографировали каплю исследуемой жидкости и измеряли краевые углы смачивания. Основными преимуществами данных методов является то, что для проведения эксперимента достаточно небольшого объема исследуемой жидкости, менее 0,5 мл, и то, что при должной настройке экспериментальной установки время, которое необходимо для получения серии из 10 опытов, составляет порядка 2 минут. За такое время у исследуемой жидкости несущественно изменяются ее физико-химические свойства, и поэтому при определении поверхностного натяжения этими изменениями можно пренебречь.

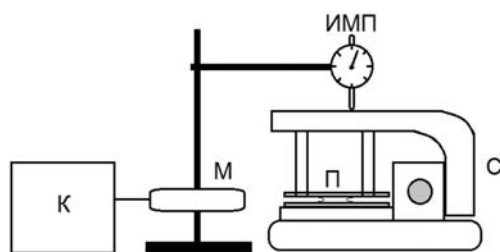


Рис. 1. Схема экспериментальной установки:  
С — стойка, ИМП — индикатор малых перемещений,  
П — стеклянная пластина, М — USB-микроскоп,  
К — компьютер

**Метод отрыва пластины.** При определении поверхностного натяжения различных жидкостей методом отрыва пластины сначала наливали 0,05–0,2 мл

жидкости на пластину, расположенную горизонтально на предметном столике. Следует отметить, что данный объем жидкости подбирался экспериментально так, чтобы капля не была слишком маленькой и при этом не растекалась до краев пластины. Вторую пластину опускали с помощью стойки до соприкосновения с каплей. Затем медленно поднимали верхнюю пластину до тех пор, пока капля жидкости не разорвется, и измеряли в этот момент расстояние между пластинами  $H$ . После чего с помощью инструментария USB-микроскопа измеряли краевой угол смачивания  $\varphi$  в предельный момент перед разрывом капли.

Рассмотрим каплю жидкости между двумя пластинами в предельный момент, когда она еще не разорвалась (см. рис. 2). Давление внутри жидкости на уровне точки  $A$  с координатами  $(x, y)$ :

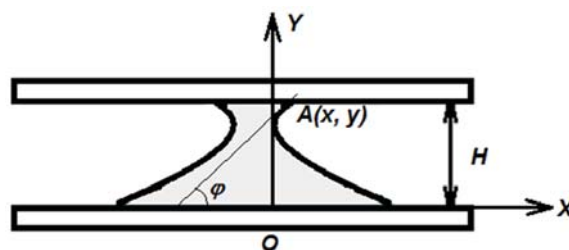


Рис. 2. Капля жидкости между пластинами в момент разрыва

$$P = P_0 - \rho gy, \quad (1)$$

где  $P_0$  — атмосферное давление,  $\rho$  — плотность жидкости,  $g$  — ускорение свободного падения. То же давление можно выразить по формуле Лапласа:

$$P = P_0 - K\sigma, \quad (2)$$

где  $K$  — абсолютное значение кривизны поверхности жидкости в точке  $A$ . Тогда, объединяя (1) и (2), получим:

$$\rho gy = K\sigma. \quad (3)$$

Кривизна поверхности в данном случае будет определяться как отношение угла  $d\varphi$  между касательной в точке  $A$  к элементу длины дуги  $dl$  в окрестностях этой точки:

$$K = -\frac{d\varphi}{dl}.$$

При этом элемент длины дуги  $dl$  считается положительным, когда он проходит в направлении снизу вверх. Он связан с  $dx$  и  $dy$  соотношениями:

$$dx = dl \cdot \cos \varphi,$$

$$dy = dl \cdot \sin \varphi.$$

Таким образом,

$$K = -\frac{d\varphi}{dx} \cos\varphi = -\frac{d\varphi}{dy} \sin\varphi.$$

Подставляя эти выражения в (3), получим два дифференциальных уравнения:

$$\rho g y \cdot dx + \sigma \cdot \cos\varphi \cdot d\varphi = 0, \quad (4)$$

$$\rho g y \cdot dy + \sigma \cdot \sin\varphi \cdot d\varphi = 0. \quad (5)$$

Интегрируя уравнение (5) при начальном условии  $\varphi = \pi$  при  $y=0$ , получим

$$y = 2\sqrt{\frac{\sigma}{\rho g}} \cos\frac{\varphi}{2}. \quad (6)$$

Подставляя выражение (6) в (4) и интегрируя полученное уравнение при начальном условии  $x=0$  при  $\varphi = \pi/2$ , получим

$$x = \sqrt{\frac{\sigma}{\rho g}} \left( \sqrt{2} - 2\sin\frac{\varphi}{2} + \frac{1}{2} \ln \frac{(1 + \sin(\varphi/2))(\sqrt{2} - 1)}{(1 - \sin(\varphi/2))(\sqrt{2} + 1)} \right). \quad (7)$$

Формулы (6) и (7) выражают уравнение поверхности капли жидкости между пластинами в параметрической форме. То есть, измеряя геометрические размеры капли в момент ее разрыва, можно, например, определить поверхностное натяжение жидкости, используя эти формулы. Тогда, выражая из (6) поверхностное натяжение и считая, что в момент разрыва капли расстояние между пластинами  $y = H$ , получим формулу расчета поверхностного натяжения для данного метода:

$$\sigma = \frac{\rho g H^2}{2(1 + \cos\varphi)}. \quad (8)$$

**Метод равновесной капли.** При определении поверхностного натяжения методом равновесной капли наливали 0,2 мл жидкости между пластинами. Затем медленно поднимали верхнюю пластину, растягивая каплю до тех пор, пока верхняя и нижняя поверхно-

сти капли, соприкасающиеся с пластинами, не выровнялись и не принимали форму круга. После чего в этом состоянии измеряли расстояние между пластинами  $h$  и равновесный краевой угол смачивания  $\varphi$ .

В случае равновесия капли между пластинами выражение (3) примет вид:

$$\rho g h = K\sigma.$$

Проводя рассуждения, аналогичные тем, что приведены в предыдущем пункте, получим следующие уравнения поверхности равновесной капли жидкости, находящейся между пластинами:

$$x = \frac{\sigma(1 - \sin\varphi)}{\rho g h},$$

$$y = \frac{\sigma \cos\varphi}{\rho g h}. \quad (9)$$

Выражая из (9) поверхностное натяжение и заменяя  $y$  на  $h$ , получим формулу расчета поверхностного натяжения для метода равновесной капли:

$$\sigma = \frac{\rho g h^2}{\cos\varphi}. \quad (10)$$

**Результаты эксперимента.** Экспериментальные данные и рассчитанные по формулам (8) и (10) значения поверхностного натяжения для различных жидкостей приведены в таблице. Строки таблицы соответствуют экспериментальным данным, полученным в разные дни и при различных условиях. В процессе проведения экспериментов фиксировались значения температуры и влажности воздуха. При этом пределы изменения температуры составили 16–27 °С, а пределы изменения влажности — 40–56%. Из таблицы следует, что оба метода позволяют с хорошей точностью измерять поверхностное натяжение жидкостей. Если сравнивать экспериментально полученные значения поверхностного натяжения для дистиллированной воды, глицерина, спирта и трансформаторного масла ГК со значениями, приведенными в [10, с. 20–22, 11, с. 5], то видим, что они практически не отли-

Экспериментальные данные определения поверхностного натяжения различных жидкостей методом отрыва пластины и методом равновесной капли

Жидкость	$V$ , см <sup>3</sup>	$h$ , мм	$\varphi$ , град	$\sigma$ , мН/м
Метод отрыва пластины				
Дистиллированная вода	0,20±0,01	4,98±0,05	46±4	72±7
	0,20±0,01	5,25±0,10	21±1	70±5
	0,20±0,01	5,04±0,05	39±3	70±6
Глицерин	0,20±0,01	4,09±0,05	48±6	62±9
	0,20±0,01	4,42±0,05	25±3	63±8
Спирт	0,05±0,01	2,27±0,15	90	20±4
Трансформаторное масло ГК	0,20±0,01	3,41±0,15	44±3	30±3

Жидкость	$V$ , см <sup>3</sup>	$h$ , мм	$\varphi$ , град	$\sigma$ , мН/м
Метод равновесной капли				
Дистиллированная вода	0,20±0,01	2,60±0,01	20±3	71±12
	0,20±0,01	2,50±0,01	30±6	71±15
	0,20±0,01	2,50±0,01	28±8	70±20
Глицерин	0,20±0,01	2,20±0,01	20±6	64±20
	0,20±0,01	2,10±0,01	25±3	60±7
Спирт	0,20±0,01	1,50±0,01	43±6	24±4
Трансформаторное масло ГК	0,20±0,01	1,70±0,01	29±3	29±3

чаются. Тем не менее, несмотря на хорошее совпадение результатов, следует отметить, что в некоторых экспериментах относительная погрешность достигала порядка 30%. В первую очередь, это связано с точностью определения угла  $\varphi$ , так как даже при тщательной настройке USB-микроскопа разброс значений угла  $\varphi$  превышал 5%.

Кроме того, в ходе проведения экспериментов было замечено, что для капель, объем которых не превышал 0,1 мм, значение угла  $\varphi$  в момент разрыва кап-

ли было близко к  $\pi/2$ . Данное наблюдение связано с конструктивными особенностями экспериментальной установки и характеристиками самой жидкости.

**Выводы.** Предложенные методы позволяют достаточно точно и быстро определять поверхностное натяжение различных жидкостей при должной настройке экспериментальной установки. Главной особенностью данных методов является их простота реализации и то, что при проведении экспериментов не требуется большое количество жидкости.

### Библиографический список

1. Кононенко В.И., Семенищев А.М., Добряк В.А., Торокин В.В., Сон Л.Д., Конюкова А.В., Попель П.С., Мозговой А.Г. Автоматизированный метод измерения плотности и поверхностного натяжения металлических расплавов // Перспективные материалы. — 2007. — №2.
2. Речкалов В.Г., Ушаков В.Л., Пызин Г.П., Бескачко В.П. Компьютерная обработка изображения в методе определения коэффициента поверхностного натяжения жидкости по форме поверхности капли // Вестник Южно-Уральского гос. ун-та. Серия : Математика. Механика. Физика. — 2010. — №30 (206).
3. Пономарева М.А., Якутенок В.А. Способ определения коэффициента поверхностного натяжения и угла смачивания по изображению капли // Вестник ННГУ. — 2011. — №4 (3).
4. Pierre-Marie Gassin Measure de la tension superficielle par la technique de la goutte pendante // Le Bulletin de l'union des physiciens. — 2014. — V. 108. — №963.
5. Nikolay Tankovsky, Nikolay Zografov Oscillations of a Hanging Liquid Drop, Driven by Interfacial Dielectric Force // Zeitschrift für Physikalische Chemie. — 2011. — №225 (4). DOI: 10.1524/zpch.2011.0074.
6. Речкалов В.Г., Бескачко В.П. Моделирование экспериментов по измерению поверхностного натяжения по форме поверхности капли при наличии несовершенств в ее подвесе или опоре // Вестник Южно-Уральского гос. ун-та. Серия : Математика. Механика. Физика. — 2013. — №1.
7. Сумм Б.Д. Гистерезис смачивания // Соросовский образовательный журнал. — 1999. — №7.
8. Волков В.И., Лескова С.С., Кирколуп Е.Р. Экспериментальное исследование гистерезиса смачивания с помощью плоского капилляра // Вестник уральской медицинской академической науки. — 2006. — №2 (12).
9. Волков В.И., Лескова С.С., Кирколуп Е.Р. Экспериментальное исследование гистерезиса смачивания // Известия Алтайского гос. ун-та. — 2006. — №1 (49).
10. Краткий справочник физико-химических величин / под ред. А.А. Равделя и А.М. Пономаревой. — СПб., 2003.
11. Ионова И.В. Физико-химический анализ многокомпонентных углеводородных систем : автореф. дисс. ... канд. хим. наук. — Казань, 2006.