

Исследование структуры и свойств Structure and properties research

**Физические методы
исследования и контроля**

**Physical methods of
research and monitoring**

DOI: <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2020-86-4-29-38>

БЕСКОНТАКТНЫЕ МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОВЕРХНОСТНОГО НАТЯЖЕНИЯ ЖИДКОСТЕЙ (ОБЗОР)

© **Михаил Михайлович Мордасов, Александр Петрович Савенков*,
Кирилл Евгеньевич Чечетов**

Тамбовский государственный технический университет, Россия, 392000, г. Тамбов, ул. Советская, д. 106;

*e-mail: savencow@yandex.ru

*Статья поступила 28 августа 2019 г. Поступила после доработки 25 февраля 2020 г.
Принята к публикации 27 февраля 2020 г.*

Представлен обзор бесконтактных методов определения поверхностного натяжения жидкостей. Проведен анализ физических эффектов, положенных в их основу. Отмечены достоинства, недостатки, возможные диапазоны измерений и сферы применения бесконтактных методов. Рассмотрены пассивные методы, не требующие стимуляции объекта измерения, и активные, при реализации которых на жидкость оказывается то или иное воздействие. При анализе методов на основе капиллярных волн, применяемых для исследования свойств поверхностно-активных веществ, описаны электрические, электромагнитные, акустические, струйные и механические способы возбуждения капиллярных волн. Рассмотрены методы, базирующиеся на процессах в колеблющейся или вращающейся левитирующей капле жидкости (бесконтейнерные методы), используемые при исследовании свойств расплавов. Приведены методы на основе локальной деформации поверхности жидкости электрическим полем, акустическим импульсом и газовой струей. Показано, что для стандартных лабораторных условий наиболее перспективны аэродинамические методы, основанные на деформации поверхности контролируемой жидкости струей газа. Отмечено, что бесконтейнерные методы следует применять в условиях невесомости, методы на основе капиллярных волн и деформации поверхности жидкости сфокусированным акустическим импульсом — в случае невязких жидкостей. Методы на основе электрической деформации поверхности контролируемой жидкости имеют ограничение по толщине ее слоя, сравнительно высокую чувствительность к ее плотности и диэлектрической проницаемости, а также ряду других неконтролируемых факторов. Отмечено также, что аэродинамический бесконтактный метод определения поверхностного натяжения характеризуется низкой чувствительностью к плотности и вязкости контролируемой жидкости. Представленный обзор бесконтактных способов определения поверхностного натяжения позволит выбрать метод, наилучшим образом подходящий для решения конкретной измерительной задачи.

Ключевые слова: бесконтейнерные методы; деформация поверхности; капиллярная волна; левитирующая капля; струя газа; тепловые колебания.

NON-CONTACT METHODS FOR MEASURING THE SURFACE TENSION OF LIQUIDS (REVIEW)

© **Mikhail M. Mordasov, Aleksandr P. Savenkov*, Kirill E. Chechetov**

Tambov State Technical University, 106 Sovetskaya ul., Tambov, 392000, Russia; *e-mail: savencow@yandex.ru

Received August 28, 2019. Revised February 25, 2020. Accepted February 27, 2020.

A review of non-contact methods for determining the surface tension of liquids along with analysis of the physical effects underlying them is presented. A review of non-contact methods for determining the sur-

face tension of liquids along with analysis of the physical effects underlying them is presented. The advantages, disadvantages, possible ranges of measurements and scope of non-contact methods are discussed. Passive methods do not require any stimulation of the measurement object whereas active methods, when implemented, affect the liquid under study. Electrical, electromagnetic, acoustic, jet, and mechanical methods used for excitation of capillary waves are described in analysis of the methods based on capillary waves intended to study the properties of surface-active substances. We also considered methods based on the processes occurred in an oscillating or rotating levitating drop of liquid (containerless technology) used to study the properties of melts and methods based on local deformation of the liquid surface by the electric field, acoustic pulse, and gas jet. It is shown that aerodynamic methods based on deformation of the liquid surface under control by a gas stream are the most promising for standard laboratory conditions. It is noted that containerless methods should be used in zero gravity tests, whereas the methods based on capillary waves or deformation of the liquid surface with a focused acoustic pulse appeared useful in testing inviscid liquids. Methods based on electrical deformation of the liquid surface under control are limited with the thickness of the liquid layer; relatively high sensitivity to the density and dielectric constant of the liquid, and some other uncontrolled factors. It was also noted that aerodynamic non-contact method of the surface tension determination is characterized by low sensitivity to the density and viscosity of the controlled liquid. The presented review of non-contact methods of the surface tension determination provides optimal choice of the method most suited for solving specific measurement problems.

Keywords: containerless technology; capillary wave; contactless; deformation of the surface; levitated drop; gas jet; thermal vibrations.

Введение

Поверхностное натяжение жидкостей определяется свойствами тонкого слоя молекул на границе раздела фаз и в значительной степени зависит от загрязнений, выступающих в роли поверхностно-активных веществ (ПАВ). В особенности это характерно для расплавов металлов, контакт которых почти с любым веществом приводит к уменьшению поверхностного натяжения [1].

Специально полученные на поверхности жидкости пленки ПАВ (например, пленка Лен-

гмюра) требуют применения соответствующих подходов при определении поверхностного натяжения [2, 3]. Использование традиционных контактных методов в таких системах может привести к появлению методических погрешностей, а в случае вязких жидкостей — еще и к неприемлемым временным затратам.

Цель работы — обзор бесконтактных методов определения поверхностного натяжения жидкостей.

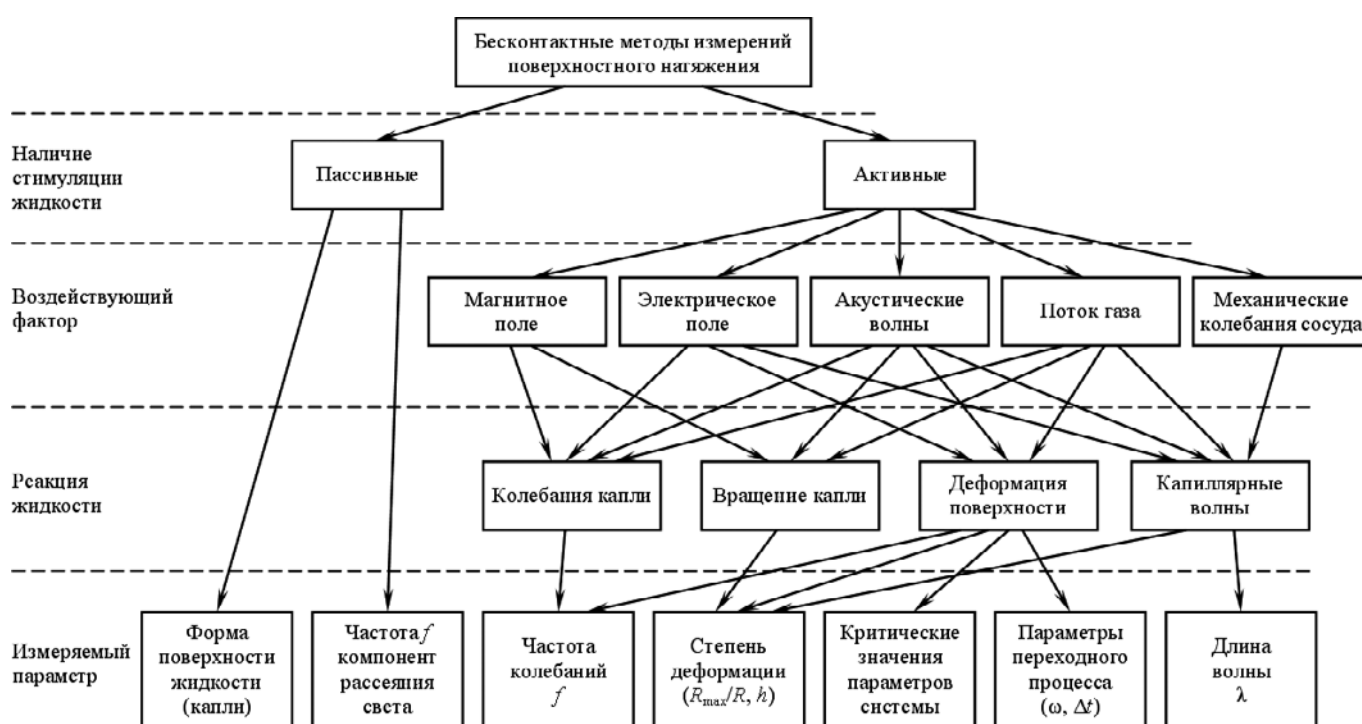


Рис. 1. Классификация бесконтактных методов определения поверхностного натяжения

Fig. 1. Classification of non-contact methods of measuring the surface tension of liquids

Классификация бесконтактных методов

Поверхностное натяжение определяют как при помощи воздействия на контролируемую жидкость (стимуляция объекта), так и без него, поэтому применяемые бесконтактные методы определения можно разделить на активные и пассивные. Отметим, что стимуляция объекта — статическое или динамическое изменение формы поверхности жидкости, при котором проявляется действие поверхностного натяжения.

Для классификации бесконтактных методов (рис. 1) использовали следующие признаки [4 – 7]:

наличие стимуляции (пассивные или активные методы);

фактор, воздействующий на жидкость;

реакция жидкости на воздействие;

параметр, используемый для определения искомой величины.

Методы на основе капиллярных волн

Капиллярными называют волны, свойства которых определяются в основном поверхностным натяжением, а не силой тяжести. Независимо от способа генерации капиллярных волн на поверхности жидкости их основные параметры связаны дисперсионным соотношением

$$\rho\omega^2 = \sigma k^3 + \rho g k, \quad (1)$$

где ρ — плотность жидкости; ω — угловая частота колебаний поверхности жидкости; σ — поверхностное натяжение; g — ускорение свободного падения; $k = 2\pi/\lambda$ — волновое число [8].

Уравнение (1) справедливо, когда толщина слоя жидкости много больше длины волны λ . Минимальная длина капиллярной волны определяется формулой

$$\lambda^* = 2\pi \sqrt{\frac{\sigma}{\rho g}}. \quad (2)$$

Для воды $\lambda^* = 17$ мм, следовательно, преобладающее влияние поверхностного натяжения будет наблюдаться при меньшей длине генерируемой волны.

При уменьшении длины волны слагаемое σk^3 уравнения (1) резко возрастает, что позволяет пренебречь вкладом силы тяжести и определять поверхностное натяжение по формуле

$$\sigma = \frac{\rho f^2 \lambda^3}{2\pi}. \quad (3)$$

При этом частота f колебаний, как правило, известна (это частота генератора, создающего капиллярные волны).

Вязкость η жидкости демпфирует колебания ее поверхности и приводит к затуханию капиллярных волн. На практике при $k^2 \approx 0,4\omega\rho/\eta$ на расстоянии трех длин волн их амплитуда уменьшается до 500 раз [9 – 12].

Уменьшить затухание капиллярных волн можно, снизив частоту колебаний и увеличив длину волны. Однако максимальная длина волны ограничена влиянием силы тяжести. Так, для жидкости с параметрами, например, $\sigma = 50$ мН/м и $\rho = 1000$ кг/м³, минимальная длина капиллярной волны $\lambda^* = 14$ мм. При этом частота f составит ~ 10 Гц. Пренебрегая действием силы тяжести, при $k^2 = 0,3\omega\rho/\eta$ получим выражение для максимальной вязкости

$$\eta^* = 0,3\sqrt[3]{\frac{\sigma^2\rho}{2\pi f}} \approx 0,1 \text{ Па} \cdot \text{с}. \quad (4)$$

Очевидно, что при большей вязкости жидкости применение бесконтактных методов на основе капиллярных волн затруднено.

Независимо от использования для стимуляции бегущих или стоячих капиллярных волн отдельные элементы жидкости в поверхностном слое совершают почти круговые движения, а поверхность попеременно растягивается и сжимается. Эти процессы обуславливают затухание волн в чистых жидкостях. В растворах ПАВ и на покрытых пленкой поверхностях, в которых переходные состояния натяжения и сжатия сопровождаются значительными локальными изменениями поверхностного натяжения и переносом вещества между слоями, затухание значительно больше. По характеру изменения параметров капиллярных волн в зависимости от частоты, кроме поверхностного натяжения, изучают поверхностные релаксационные процессы [13].

Среди бесконтактных методов только основанные на капиллярных волнах признаны динамическими, т.е. позволяющими измерять динамическое поверхностное натяжение [13]. Поэтому их обычно используют для исследования свойств тонких пленок ПАВ на поверхности жидкой субфазы [3, 8, 11, 12, 14, 15 – 17].

Из (3) следует, что для определения σ необходимо учитывать плотность жидкости ρ . При исследовании свойств ПАВ плотность жидкой субфазы, как правило, известна, однако в общем случае учет плотности — недостаток методов на основе капиллярных волн.

Наиболее простой способ возбуждения капиллярных волн — механические колебания сосуда с контролируемой жидкостью. Колебания могут быть как вертикальными, так и горизонтальными [14, 15]. Поскольку при таком способе возбуждения необходимо получить стоячие волны, частоту колебаний приходится менять [18]. Не-

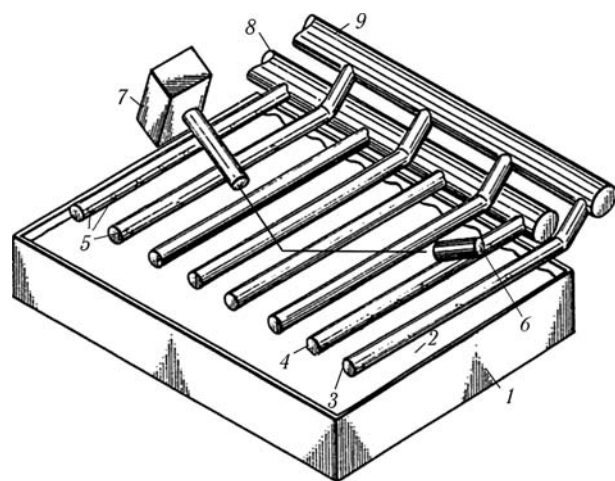


Рис. 2. Схема бесконтактного струйного устройства для измерения поверхностного натяжения и вязкости жидкостей по параметрам капиллярных волн: 1 — емкость; 2 — жидкость; 3, 4 — струйные трубки с различным расстоянием между соплами; 5 — сопла; 6 — фотоприемник; 7 — источник света; 8, 9 — трубки питания

Fig. 2. Schematic representation of the non-contact device for measurements of the surface tension and viscosity using parameters of capillary waves: 1 — container; 2 — liquid; 3, 4 — jet tubes with different spacing between nozzles; 5 — nozzles; 6 — photodetector; 7 — light source; 8, 9 — air manifolds

достаток механического способа — существенные трудности (большие, чем для других способов) при возбуждении колебаний жидкости со сравнительно высокой вязкостью (более $0,05 \text{ Па} \cdot \text{с}$).

Электрический способ возбуждения капиллярных волн заключается в подаче напряжения, меняющегося по гармоническому закону, на электрод, расположенный на некотором (несколько десятых миллиметра) расстоянии от поверхности жидкости, имеющей электрический контакт с заземляющим электродом [3, 8, 11, 12, 19]. Под действием колебаний напряжения в сотни вольт возбуждаются колебания поверхности амплитудой в несколько микрон [3, 8]. Достоинство способа — возможность его использования в случае сравнительно высокой вязкости жидкости [11].

Бесконтактно капиллярные волны можно возбудить также с помощью акустических колебаний и газовых струй [10, 16, 20].

В случае газовых струй возбуждение волн осуществляют одновременной импульсной их подачи (рис. 2) [10]. Воздействие струй на поверхность жидкости позволяет уменьшить эффект затухания. При таком импульсном способе длина волны определяется расстоянием между соплами. Поверхностное натяжение оценивают по частоте затухающих колебаний поверхности, а вязкость — по декременту затухания. Для повышения точности проводят поочередное определение σ и η для двух значений длин волн. Для этого ис-

пользуют два набора сопел с различными расстояниями друг от друга на струйных трубках.

В случае более высокой вязкости жидкости (силы инерции значительно меньше вязкого трения) капиллярные волны формируют постоянным воздействием электрического поля [9]. Жидкость проходит через электрическое поле, создаваемое расположенными над ней линейными электродами, параллельными направлению движения. В области действия электрического поля формируется устойчивая картина капиллярных волн с гребнями под электродами и впадинами между ними. В направлении движения амплитуда Δh волн плавно возрастает от нуля до максимума Δh_m и дальше остается неизменной до окончания электродов. Длина волны λ равна расстоянию между электродами. Значения поверхностного натяжения и вязкости рассчитывают по формулам

$$\sigma = \left(\frac{\lambda}{2\pi} \right)^2 \left(\frac{\varepsilon_0 \Delta E^2}{2\Delta h_m} - \rho g \right),$$

$$\eta = \frac{H_l^3 \varepsilon_0 x}{6w\Delta h} \left(\frac{2\pi}{\lambda} \right)^2 \Delta E^2,$$

где $\varepsilon_0 = 8,8542 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}$ — электрическая постоянная; ΔE^2 — амплитуда изменения квадрата напряженности электрического поля на поверхности жидкости; H_l — толщина слоя жидкости; x — расстояние от начала электродов до линии определения амплитуды Δh ; w — скорость движения жидкости.

Амплитуду Δh находят путем обработки изображения, полученного цифровой камерой при помощи светового потока, проходящего через жидкость в вертикальном направлении.

Недостаток данного метода — низкая точность, обусловленная значительным влиянием неконтролируемых величин H_l и ΔE^2 на результаты измерений, и применимость только для движущихся жидкостей.

В методах на основе капиллярных волн параметры их распространения определяют, как правило, оптическими способами. При малой амплитуде волн используют интерференцию лазерного луча, отраженного от поверхности жидкости и конца оптоволоконна, расположенного над ней [3, 8]. Параметры колебаний можно также определить по положению отраженного от поверхности луча [10, 14, 20].

Кроме оптических методов, применяют поляризованный электрод [11, 19], эффект Доплера при отражении ультразвуковых волн и измерение импеданса ультразвукового преобразователя [16].

Среди бесконтактных методов определения поверхностного натяжения жидкостей на основе

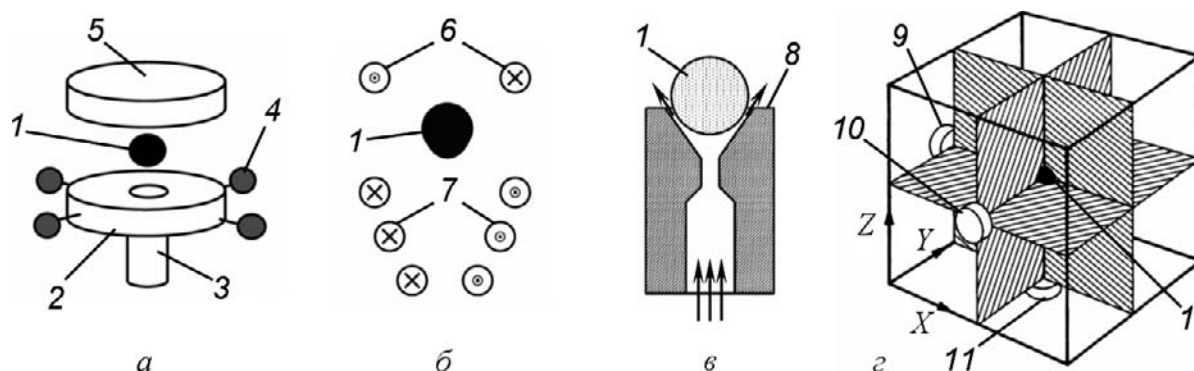


Рис. 3. Схемы перевода капли расплава в состояние левитации электростатическим (а), электромагнитным (б), аэродинамическим (в) и акустическим (г) способами: 1 — капля расплава; 2, 5 — основные электроды; 3 — трубка для загрузки и выгрузки образца; 4 — боковые электроды для перемещения образца в горизонтальной плоскости; 6, 7 — электрические обмотки; 8 — сопло; 9–11 — акустические излучатели в направлениях X, Y, Z соответственно

Fig. 3. Schematic representation of melt drop levitation using electrostatic (a), electromagnetic (b), aerodynamic (c), acoustic (d) methods: 1 — melt drop; 2, 5 — main electrodes; 3 — tube for sample loading and discharging; 4 — side electrodes used to move a sample in horizontal plane; 6, 7 — electrical coils; 8 — nozzle; 9–11 — acoustic emitters in X, Y, Z directions, respectively

капиллярных волн отметим методы с тепловым возбуждением [5–7], которые не требуют стимуляции объекта измерения. Они отличаются возможностью контроля проб малого объема (не более 3 мл) и высокой оперативностью. Основу для измерения поверхностного натяжения составляет дисперсионное соотношение (1) и упрощенная формула (3). Искомую величину определяют по центральной частоте линии спектра, соответствующей выбранной в устройстве длине волны [7].

Поверхность жидкости, кажущаяся абсолютно плоской, при увеличении оказывается подверженной хаотическим колебаниям, возбуждаемым тепловыми движениями молекул. Обычно амплитуда тепловых капиллярных волн составляет единицы нанометров, а длина — единицы микрон. Для измерения параметров тепловых капиллярных волн используют эффект рассеяния света. Волны на поверхности жидкости действуют подобно колеблющейся отражающей дифракционной решетке, отклоняя небольшую часть излучения от основного отраженного светового потока.

Главные проблемы реализации методов измерений поверхностного натяжения на основе теплового рассеяния света — малая интенсивность рассеянного излучения и сложность выделения единственной длины волны из множества накладывающихся друг на друга волн. Эти проблемы решают с помощью применения в устройствах принципа супергетеродинного оптического приемника [5–7].

Усовершенствованные устройства для реализации методов на основе рассеяния света на тепловых капиллярных волнах обеспечивают измерение поверхностного натяжения с относитель-

ной погрешностью не более 1, вязкости — 3 %. Однако эти методы имеют чрезвычайно низкий предел применения (по вязкости) в связи со сравнительно большим значением частоты f (см. (4)). Так, для минимально возможной частоты 1 кГц значение λ^* составляет 0,01 Па · с.

Бесконтейнерные методы левитирующей капли

При исследовании физических свойств расплавов широко используют бесконтейнерные методы левитирующей капли. В состоянии левитации контакт капли расплава с другими предметами отсутствует, а сама капля окружена инертным газом или вакуумом. Это предотвращает окисление поверхности контролируемого расплава и ее загрязнение и обеспечивает повышение точности измерений. Для отрыва капли от опоры используют электрическое поле, электромагнитное взаимодействие, поток газа или стоячие акустические волны высокой интенсивности [21–24] (рис. 3).

При электростатической левитации позиционирование капли осуществляют посредством регулирования напряжения на электродах 2, 4 и 5 в системе с обратной связью по сигналу от оптических систем на основе He–Ne-лазеров [21, 25–27]. Для передачи капле электрического заряда используют контактный, термоэлектронный и фотоэлектронный способы [21]. Нагревают и плавят образец при помощи ксеноновых ламп, Nd:YAG- или CO₂-лазеров [25]. Температуру образца контролируют пирометрами. Частоту колебаний капли и ее формы определяют с помощью цифровых видеокамер [25–28]. Диаметр капли при электростатической левитации составляет 1–3 мм.

Для электромагнитной левитации могут быть использованы электропроводные материалы или полупроводники, предварительно разогретые до состояния достаточной проводимости [29]. Перевод в состояние левитации, нагрев и плавление образца осуществляют путем создания в нем индукционных токов при пропускании через обмотки 6 и 7 переменного тока силой около 100 А и частотой 200 – 400 кГц [30 – 32]. Капля 1 занимает единственную устойчивую позицию в центре магнитной системы, при этом для ее позиционирования дополнительных устройств не требуется [23, 29]. Температуру расплава регулируют, охлаждая его смесью газов специального состава [23]. Частоту колебаний измеряют оптическими методами. Световой поток пропускают в зазоре между верхней и нижней обмотками [23, 29, 31]. Диаметр капли — 3 – 8 мм.

Аэродинамическая левитация основана на создании устойчивого пространственного положения образца при обтекании его потоком инертного газа в сопле 8 специальной формы [22, 24] или на поверхности пористой мембраны [33]. Нагрев и плавление образца проводят лазерным лучом [24, 34] или индукционным способом. Диаметр капли в этом случае 1 – 5 мм.

Известно, что в полях стоячих звуковых волн возможна левитация образцов вещества с плотностью большей, чем у окружающего их газа. Исследуемое вещество занимает положение в узлах звукового давления, соответствующих потенциальным ямам. Для левитации, например, капля воды радиусом 5 мм в воздухе необходима амплитуда звукового давления 4 кПа, что соответствует 166 дБ. Для левитации тел большей плотности, например, металлов, требуется большее звуковое давление. В обычных условиях один акустический излучатель кроме подъемной силы создает также и силы, достаточные для стабилизации положения капли в горизонтальной плоскости [22].

В условиях невесомости (рекомендуется для всех методов на основе левитации) целесообразно использовать три излучателя (9, 10, 11), акустические колебания которых распространяются в трех взаимно перпендикулярных плоскостях вдоль осей X , Y , Z соответственно (см. рис. 3, 2) [35].

О поверхностном натяжении капли расплава судят по частоте f ее колебаний в соответствии с выражением

$$\sigma = \frac{1}{8} \rho R^3 (2\pi f)^2, \quad (5)$$

где R — радиус капли. Частота f лежит в диапазоне 20 – 200 Гц.

При электростатической или акустической левитациях колебания капли возбуждают низко-

частотной модуляцией подъемной силы. В электростатических методах частоту f определяют после снятия возмущения в режиме свободных затухающих колебаний, постоянная времени τ затухания которых используется также для оценки вязкости расплава по формуле [25 – 27]

$$\eta = \frac{\rho R^2}{5\tau}.$$

Отметим, что при аэродинамической и электромагнитной левитациях колебания капли на частотах резонанса непрерывно возбуждают потоком газа [24].

Вязкость расплава анализируемого вещества препятствует возбуждению колебаний капли. Максимальное значение вязкости можно найти по формуле

$$\eta^* = \sqrt{R\sigma\rho}.$$

Если вязкость выше η^* , то после снятия деформирующего воздействия возврат капли в исходное состояние происходит в аperiодическом режиме [33]. Возбуждение свободных затухающих колебаний невозможно.

Для исследования свойств расплава с вязкостью, близкой к η^* , следует использовать метод определения частоты собственных колебаний капли по резонансу с внешним возбуждающим периодическим воздействием [35]. Однако при дальнейшем увеличении вязкости он также становится неэффективным.

В случае электростатической левитации при высокой вязкости жидкости для измерения поверхностного натяжения используют метод вращающейся капли [35, 36]. Вращающий момент можно создать посредством применения вращающегося магнитного поля. Находящаяся под действием такого поля капля расплава раскручивается подобно ротору асинхронного двигателя и деформируется. Создание вращающего момента возможно также при акустическом и аэродинамическом способах левитации [35, 37, 38]. Частоту вращения определяют оптическими методами [27, 28, 36], поверхностное натяжение — путем приведения частоты f_r вращения к частоте f колебаний и использования формулы (6). Приведение f_r к f осуществляют с помощью известной зависимости f_r/f от $R_{\max}/R$, где $R_{\max}$ — максимальный радиус деформированной капли, R — радиус шара того же объема [36].

Относительная неопределенность измерений методами левитирующей капли составляет не более 3 % [27, 30, 35]. Существенный недостаток методов, кроме аэродинамической левитации, — предпочтительное их использование в условиях невесомости [29, 35, 39]. В обычных условиях электромагнитная левитация значительно деформирует каплю образца, акустическая — тре-

бует применения больших звуковых давлений, электростатическая — приводит к падению образца из платины, железа и некоторых других материалов по причине существенной потери заряда [39].

Бесконтейнерные методы левитирующей капли имеют ограниченную сферу применения — изучение теплофизических свойств жидкостей в переохлажденном метастабильном состоянии. Вместе с тем знание теплофизических свойств при температурах ниже номинальной температуры плавления материала необходимо, в частности, при моделировании процессов кристаллизации [40].

Методы на основе локальной деформации поверхности жидкости

На практике часто требуются измерения свойств жидкости, находящейся в сосуде. В этом случае для деформации поверхности используют электрические поля, сфокусированные акустические волны и газовые струи [9, 20, 41 – 48].

Электрический способ деформации поверхности жидкости применяют при измерении свойств тонких (от единиц микрон до единиц миллиметров) пленок жидкостей, нанесенных на заземленную проводящую подложку [9, 42]. Под действием электрического поля, создаваемого электродом, расположенным над поверхностью пленки, происходит деформация последней с образованием возвышения. О величине поверхностного натяжения судят, например, по потенциалу U_0 свободной поверхности и характерному размеру a деформации в соответствии с уравнением [42]

$$\frac{\varepsilon\varepsilon_0 U_0^2}{H_l^2} \operatorname{cth}\left(2\frac{\pi}{a} H_l\right) = \rho g + \sigma \left(\frac{2\pi}{a}\right)^2,$$

где ε — диэлектрическая проницаемость жидкости.

При достижении напряжением между электродом и деформированной поверхностью порогового значения U_1 от жидкости начинают отрываться мельчайшие частицы, переносящие заряд, в результате чего в цепи возникает электрический ток. По значению U_1 также можно определять поверхностное натяжение [41].

К недостаткам электрических методов следует отнести ограничение на толщину слоя жидкости и их низкую точность, обусловленную влиянием неконтролируемых величин U_0 , ε , a и ρ .

На рис. 4 представлена схема устройства для реализации метода измерений вязкости и поверхностного натяжения жидкостей с использованием воздействия сфокусированных акустических импульсов.

Контролируемой жидкостью 8 заполняют одну или несколько кювет из набора 7 [43, 44].

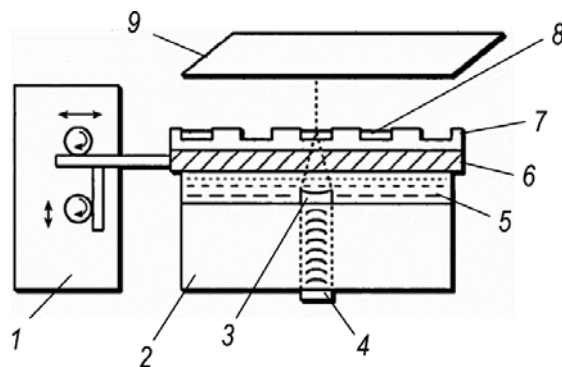


Рис. 4. Схема устройства для измерения поверхностного натяжения и вязкости жидкости на основе деформации ее поверхности сфокусированной акустической волной

Fig. 4. Schematic representation of the device for measurements of the surface tension and viscosity using deformation of the liquid surface induced by focused acoustic wave

Оставшиеся кюветы оставляют свободными или заполняют эталонными жидкостями для проведения относительных измерений. Посредством механизма 1 платформу 6 с закрепленным на ней набором кювет перемещают в горизонтальном и вертикальном направлениях до достижения положения, при котором центр поверхности контролируемой (или эталонной) жидкости находится в фокусе акустической линзы 3. На вход пьезоэлектрического преобразователя 4 подают электрический импульс длительностью 1–30 мкс. Преобразователь формирует звуковую волну, которая проходит через пластину 2, фокусируется линзой и через контактный состав 5, элементы 6 и 7 достигает поверхности жидкости. Энергия волны сообщает объему жидкости определенное количество движения. При достаточной энергии может наблюдаться отрыв капли от поверхности жидкости. Меньшая энергия способна привести только к образованию возвышения. Основные силы, противодействующие этому процессу, — силы поверхностного натяжения и вязкого трения [44].

После образования возвышения в зависимости от вязкости жидкости и условий эксперимента следует колебательный или апериодический процесс восстановления исходной плоской поверхности [2]. Данные о переходном процессе на поверхности жидкости получают с помощью отраженных от нее ультразвуковых сигналов или устройства 9 для оптического определения состояния деформированной поверхности. Вязкость η и поверхностное натяжение σ определяют по параметрам переходного процесса [44]:

$$\sigma \propto \rho \omega^2 r^2,$$

$$\eta \propto \rho r^2 / \tau,$$

где r — радиус кюветы с жидкостью; τ — постоянная времени затухания колебаний.

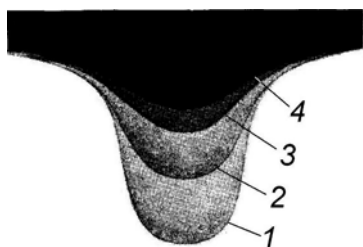


Рис. 5. Углубления в жидкостях с поверхностным натяжением 30 (1), 38 (2), 47 (3) и 55 мН/м (4), сформированные ламинарной газовой струей

Fig. 5. Dimples in liquids with the surface tension 30 (1), 38 (2), 47 (3), 55 mN/m (4) formed by a laminar gas jet

Возможно измерение поверхностного натяжения вязкой жидкости по времени Δt , в течение которого возвышение достигает максимальной высоты с момента подачи акустического импульса в апериодическом переходном процессе [45]. Однако точность такого способа низка.

Бесконтактно деформировать поверхность жидкости в сосуде произвольного размера можно с помощью газовой струи [46]. Такой подход используют в случае вязких жидкостей, измерение свойств которых традиционными контактными методами затруднено (рис. 5). Поверхностное натяжение определяют по высоте h углубления, формируемого ламинарной газовой струей, воздействующей на поверхность жидкости с заданной интенсивностью. Для жидкостей с σ в диапазоне 25 – 70 мН/м высота h меняется в диапазоне 0,5 – 4 мм.

Достоинство метода — сравнительно слабое влияние плотности жидкости на результат измерения, что обусловлено малым объемом углубления. В этом случае действие силы поверхностного натяжения превосходит действие выталкивающей силы.

Существенный недостаток применения ламинарной струи — формирование углубления с высоким значением отношения высоты к радиусу. Измерение h со стороны газовой фазы не представляется возможным. Ее определяют оптическим способом через прозрачные стенки сосуда с жидкостью [46]. Требование прозрачных стенок делает сосуд частью средств измерения, в результате чего метод, по сути, становится контактными, так как появляется необходимость очистки измерительной емкости от остатков контролируемой жидкости после завершения измерительных операций [18].

Для измерения поверхностного натяжения целесообразно использовать турбулентные струи, под действием которых на поверхности контролируемой жидкости формируются углубления со сравнительно низким значением отношения высоты к радиусу [49 – 52]. Геометри-

ческие параметры таких углублений могут быть определены со стороны газовой фазы [47, 53].

При сравнительно высокой интенсивности действия газовой струи поверхность жидкости теряет стабильность и на ней появляются колебания. Параметры струйного воздействия, при которых происходит переход от стабильного режима к колебательному, в значительной мере зависят от поверхностного натяжения жидкости [54]. Величину σ определяют по углу наклона оси струи к жидкости [55] или расходу газа в струе [56, 57], при которых двухфазная система «струя газа – жидкость» переходит в колебательное состояние (критические значения параметров системы).

Добиться точных измерений поверхностного натяжения по точкам перехода системы в колебательный режим не просто. Основная причина — плавность перехода. На поверхности жидкости малой вязкости небольшие хаотические колебания присутствуют почти всегда. По мере роста интенсивности действия струи эти колебания постепенно увеличивают амплитуду и приобретают периодический характер. Периодические колебания на поверхности вязкой жидкости (вязкость более 10 Па · с) при малой скорости газа в струе могут иметь настолько низкую частоту, что для их обнаружения потребуется значительное время. Поэтому на практике точка перехода определяется чувствительностью детектора, формирующего сигнал о наличии колебаний, или индивидуальными особенностями исследователя.

Зная интенсивность газовой струи, которая необходима для достижения заданной высоты углубления, можно оценить σ [49, 50]. В этом случае получают линейную возрастающую статическую характеристику измерительных устройств. Недостаток таких методов и устройств — высокая чувствительность к изменению плотности жидкости. Это обусловлено тем, что для углубления сравнительно большого объема, формируемого турбулентной струей, выталкивающая сила преобладает над действием силы поверхностного натяжения. Для снижения влияния плотности и вязкости контролируемой жидкости на результат измерения σ бесконтактными струйными методами целесообразно уменьшать степень деформации (высоту углубления). Добиться высоты углубления менее 0,1 мм [53] можно, если струя газа будет действовать на поверхность жидкости под прямым углом.

Степень деформации определяют, используя свойство деформированной поверхности фокусировать оптическое излучение. Лазерный луч направляют на поверхность жидкости в зону ее деформации под углом менее 30° (для повышения точности измерений). Степень деформации оце-

нивают по размерам пятна лазерного излучения, отраженного от деформированной поверхности.

Поверхностное натяжение определяют по избыточному давлению P перед отверстием истечения газовой струи, которое соответствует заданной степени деформации поверхности контролируемой жидкости. Степень деформации задают размерами пятна лазерного излучения. Зависимость $P(\sigma)$ — линейная возрастающая функция. В диапазоне 0 – 80 мН/м погрешность при изменении плотности и вязкости в интервалах 800 – 1300 кг/м³ и 0,001 – 20 Па · с соответственно не превышает 2 %.

Заключение

Таким образом, при бесконтактных способах определения поверхностного натяжения для жидкостей (расплавов) при высоких температурах, а также в условиях невесомости, можно использовать бесконтейнерные методы левитирующей капли. Методы на основе капиллярных волн эффективны в случае жидкостей, поверхность которых покрыта пленками ПАВ. Однако на результат измерения существенное влияние оказывает плотность жидкости. Поэтому в связи с сильным затуханием волн измерение поверхностного натяжения жидкостей с вязкостью более 0,1 Па · с невозможно. Для электрических и акустических методов на основе локальной деформации поверхности жидкости характерны сложности с исключением контакта средства и объекта измерений. Аэродинамические методы, основанные на деформации поверхности контролируемой жидкости газовой струей, позволяют получать достоверные результаты определения поверхностного натяжения при вязкости жидкости более 0,1 Па · с.

Финансирование

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках выполнения проекта по соглашению № 05.604.21.0240 (уникальный идентификатор RFMEFI60419X0240).

ЛИТЕРАТУРА (REFERENCES)

1. Thiessen D. B., Man K. F. A quasi-containerless pendant drop method for surface tension measurements on molten metals and alloys / *Int. J. Thermophys.* 1995. Vol. 16. N 1. P. 245 – 255. DOI: 10.1007/BF01438975.
2. Issenmann B., Wunenburger R., Chraïbi H., et al. Unsteady deformations of a free liquid surface caused by radiation pressure / *J. Fluid Mech.* 2011. Vol. 682. P. 460 – 490. DOI: 10.1017/jfm.2011.236.
3. US Pat. 5303030, G01B 9/02. Method and apparatus for monitoring and measuring the surface tension of a fluid using fiber optics / B. M. Abraham, J. B. Ketterson, T. M. Bohanon, J. M. Mikrut. — Appl. N 801153. Filed 02.12.1991. Pat. 12.04.1994. — 9 p.

4. USSR Inventor's Certificate 1436017, G01N 13/02. Method of determining the coefficient of surface tension of liquid / V. V. Sterlyadkin, E. A. Sterlyadkina; applicant and patentee Vsesoyuznyi zaochnyi mashinostroitel'nyi institut. — Appl. N 4076665/31 – 25; appl. 07.04.1986; publ. 07.11.1988. Byull. Otkryt. Izobret. N 41. [In Russian].
5. Hård S., Hamnerius Y., Nilsson O. Laser heterodyne apparatus for measurements of liquid surface properties — Theory and experiments / *J. Appl. Phys.* 1976. Vol. 47. N 6. P. 2433 – 2442. DOI: 10.1063/1.322953.
6. Sano M., Kawaguchi M., Chen Y.-L., et al. Technique of surface-wave scattering and calibration with simple liquids / *Rev. Sci. Instrum.* 1986. Vol. 57. N 6. P. 1158 – 1162. DOI: 10.1063/1.1138620.
7. Nishimura Y., Hasegawa A., Nagasaka Y. High-precision instrument for measuring the surface tension, viscosity and surface viscoelasticity of liquids using ripplon surface laser-light scattering with tunable wavelength selection / *Rev. Sci. Instrum.* 2014. Vol. 85. N 044904. DOI: 10.1063/1.4871992.
8. Behroozi F., Perkins A. Direct measurement of the dispersion relation of capillary waves by laser interferometry / *Am. J. Phys.* 2006. Vol. 74. N 11. P. 957 – 961. DOI: 10.1119/1.2215617.
9. US Pat. 5590560, G01M 3/08. Apparatus for measuring viscosity or thickness, surface tension and surface dilational elasticity / F. M. Joos, A. K. Anders. — Appl. N 561904; filed 22.11.1995; pat. 07.01.1997. — 22 p.
10. US Pat. 5005401, G01N 11/00, G01N 13/02. Noncontact on-line measurement of the viscosity of liquid paint / B. M. Pierce, D. B. Chang. — Appl. N 478893; filed 12.02.1990; pat. 09.04.1991. — 9 p.
11. Sohl C. H., Miyano K., Ketterson J. B. Novel technique for dynamic surface tension and viscosity measurements at liquid — gas interfaces / *Rev. Sci. Instrum.* 1978. Vol. 49. N 10. P. 1464 – 1469. DOI: 10.1063/1.1135288.
12. Miyano K. Local mechanical properties of monomolecular films on water measured with a capillary wave probe / *Langmuir* 1990. Vol. 6. N 7. P. 1254 – 1259. DOI: 10.1021/la00097a011.
13. Adamson A. W. *Physical Chemistry of Surfaces*. — New York: Interscience (Wiley), 1967. — 747 p.
14. US Pat. 4512183, G01N 13/02. Method of measuring and/or monitoring the surface tension of fluids / M. Alexander. — Appl. N 522180; filed 18.01.1983; pat. 23.04.1985. — 6 p.
15. Saylor J. R., Szeri A. J., Foulks G. P. Measurement of surfactant properties using a circular capillary wave field / *Exp. Fluids*. 2000. Vol. 29. N 6. P. 509 – 518. DOI: 10.1007/s003480000119.
16. Pat. 2836972 DE, G01N 13/02. Verfahren zur berührungslosen Messung der Oberflächenspannung und der Viskosität / E.-G. Li-erke, W. M. Heide, M. Achatz. — Aktenzeichen P2836972.4; anmeldetag 24.08.1978; offenlegungstag 06.03.1980. — 20 p.
17. US Pat. 6563588, G01B 11/00. Apparatus and method for measurement of fluid viscosity / F. Behroozi. — Appl. N 09/747528; filed 22.12.2000; pat. 13.05.2003. — 16 p.
18. Mordasov M. M., Savenkov A. P., Chechetov K. E. Special aspects of applying the term “non-contact method of measurement” / *Sensors and Systems*. 2017. N 4. P. 47 – 52 [In Russian].
19. USSR Inventor's Certificate 409116, G01N 13/02. Method of determining liquid surface tension coefficient / E. Z. Gak, M. Z. Gak, G. P. Komarov; applicant and patentee Agrophysical Research Institute. — Appl. N 1816623/26 – 25; appl. 04.08.1972; publ. 30.11.1973. Byull. Otkryt. Izobret. N 48 [In Russian].
20. Cinbis C., Khuri-Yakub B. A noncontacting technique for measuring surface tension of liquids / *Rev. Sci. Instrum.* 1992. Vol. 63. N 3. P. 2048 – 2050. DOI: 10.1063/1.1143164.
21. Rhim W.-K., Chung S., Barber D., et al. An electrostatic levitator for hightemperature containerless materials processing in 1g / *Rev. Sci. Instrum.* 1993. Vol. 64. N 10. P. 2961 – 2970. DOI: 10.1063/1.1144475.
22. Herlach D., Cochrane R., Egry I., et al. Containerless processing in the study of metallic melts and their solidification /

- Int. Mater. Rev. 1993. Vol. 38. N 6. P 273 – 347. DOI: 10.1179/095066093790326267.
23. **Brillo J., Lohöfer G., Schmidt-Hohagen F., et al.** Thermophysical property measurements of liquid metals by electromagnetic levitation / *Int. J. Mater. Prod. Technol.* 2006. Vol. 26. N 3/4. P 247 – 273. DOI: 10.1504/IJMPT.2006.009469.
 24. **Sarou-Kanian V., Millot F., Rifflet J.** Surface tension and density of oxygen-free liquid aluminum at high temperature / *Int. J. Thermophys.* 2003. Vol. 24. N 1. P 277 – 286. DOI: 10.1023/A:1022466319501.
 25. **Paradis P.-F., Ishikawa T., Koike N.** Non-contact measurements of the surface tension and viscosity of molybdenum using an electrostatic levitation furnace / *Int. J. Refract. Met. Hard Mater.* 2007. Vol. 25. N 1. P 95 – 100. DOI: 10.1016/j.jrmhm.2006.02.001.
 26. **Zhou Z., Mukherjee S., Rhim W.-K.** Measurement of thermophysical properties of molten silicon using an upgraded electrostatic levitator / *J. Cryst. Growth.* 2003. Vol. 257. N 3 – 4. P 350 – 358. DOI: 10.1016/S0022-0248(03)01430-1.
 27. **Okada J., Ishikawa T., Watanabe Y., Paradis P.-F.** Surface tension and viscosity of molten vanadium measured with an electrostatic levitation furnace / *J. Chem. Thermodyn.* 2010. Vol. 42. N 7. P 856 – 859. DOI: 10.1016/j.jct.2010.02.008.
 28. **Paradis P.-F., Ishikawa T., Koike N., Watanabe Y.** Physical properties of liquid titanium measured by levitation techniques / *J. Rare Earths.* 2007. Vol. 25. N 6. P 665 – 669. DOI: 10.1016/S1002-0721(08)60003-4.
 29. **Fujii H., Matsumoto T., Nogi K.** Analysis of surface oscillation of droplet under microgravity for the determination of its surface tension / *Acta Mater.* 2000. Vol. 48. N 11. P 2933 – 2939. DOI: 10.1016/S1359-6454(00)00086-0.
 30. **Wang H., Chang J., Wei B.** Measurement and calculation of surface tension for undercooled liquid nickel and its alloy / *J. Appl. Phys.* 2009. Vol. 106. N 033506. P 033506-1 – 033506-4. DOI: 10.1063/1.3187793.
 31. **Brillo J., Egry I.** Density determination of liquid copper, nickel, and their alloys / *Int. J. Thermophys.* 2003. Vol. 24. N 4. P 1155 – 1170. DOI: 10.1023/A:1025021521945.
 32. **Brillo J., Egry I., Matsushita T.** Density and surface tension of liquid ternary Ni – Cu – Fe alloys / *Zeitschr. Metallkunde.* 2006. Vol. 97. N 1. P 28 – 34.
 33. **Haumesser P.-H., Bancillon J., Daniel M., et al.** High-temperature contactless viscosity measurements by the gas-film levitation technique: Application to oxide and metallic glasses / *Rev. Sci. Instrum.* 2002. Vol. 73. N 9. P 3275 – 3285. DOI: 10.1063/1.1499756.
 34. **Millot F., Rifflet J., Sarou-Kanian V., Wille G.** High-temperature properties of liquid boron from contactless techniques / *Int. J. Thermophys.* 2002. Vol. 23. N 5. P 1185 – 1195. DOI: 10.1023/A:1019836102776.
 35. **Elleman D., Wang T., Barmatz M.** Acoustic containerless experiment system: a non-contact surface tension measurement: NASA Technical Memorandum 89N20308 / *Microgravity Science and Applications Flight Programs.* Vol. 2. — Washington: NASA, 1988. P 557 – 567.
 36. **Rhim W.-K., Ishikawa T.** Noncontact surface tension measurement by drop rotation / *Rev. Sci. Instrum.* 2001. Vol. 72. N 9. P 3572 – 3575. DOI: 10.1063/1.1388215.
 37. **Millot F., Rifflet J., Wille G., et al.** Analysis of surface tension from aerodynamic levitation of liquids / *J. Am. Ceram. Soc.* 2002. Vol. 85. N 1. P 187 – 192. DOI: 10.1111/j.1151-2916.2002.tb00064.x.
 38. **Weber J. K. R., Hampton D. S., Merkley D. R., et al.** Aeroacoustic levitation: A method for containerless liquid-phase processing at high temperatures / *Rev. Sci. Instrum.* 1994. Vol. 65. N 2. P 456 – 465. DOI: 10.1063/1.1145157.
 39. **Ishikawa T., Paradis P.-F., Itami T., Yoda S.** Non-contact thermophysical property measurements of refractory metals using an electrostatic levitator / *Meas. Sci. Technol.* 2005. Vol. 16. N 2. P 443 – 451. DOI: 10.1088/0957-0233/16/2/016.
 40. **Trinh E., Ohsaka K.** Measurement of density, sound velocity, surface tension, and viscosity of freely suspended supercooled liquids / *Int. J. Thermophys.* 1995. Vol. 16. N 2. P 545 – 555. DOI: 10.1007/BF01441920.
 41. **USSR Inventor's Certificate 320755, G01N 13/02.** Method of determining liquid surface tension coefficient / V. N. Sokol'skii; applicant and patentee V. N. Sokol'skii. — Appl. N 1409310/26 – 25; appl. 02.03.1970; publ. 04.11.1971. Byull. Otkryt. Izobret. N 34 [in Russian].
 42. **USSR Inventor's Certificate 1257464, G01N 11/00.** Method of determining rheological parameters of medium / M. M. Rusanov, L. M. Panasyuk; applicant and patentee M. M. Rusanov, L. M. Panasyuk. — Appl. N 3633999/24 – 25; appl. 12.08.1983; publ. 15.09.1986. Byull. Otkryt. Izobret. N 34 [in Russian].
 43. **US Pat. 6925856, G01N 11/00, G01N 13/00, G01N 29/10.** Non-contact techniques for measuring viscosity and surface tension information of a liquid / R. O. Williams. — Appl. N 10/290626; filed 07.11.2002; pat. 09.08.2005. — 13 p.
 44. **US Pat. 7281413, G01N 11/00.** Acoustic method for determining the viscosity and/or surface tension of a liquid / R. O. Williams, J. Chiao, H. W. Chow, et al. — Appl. N 11/088436; filed 24.03.2005; pat. 16.10.2007. — 21 p.
 45. **Cinbis C., Mansour N., Khuri-Yakub B.** Effect of surface tension on the acoustic radiation pressure-induced motion of the water-air interface / *J. Acoust. Soc. Am.* 1993. Vol. 94. N 4. P 2365 – 2372. DOI: 10.1121/1.407456.
 46. **Pfund A. H., Greenfield E. W.** Surface-tension measurements of viscous liquids / *Ind. Eng. Chem.* 1936. Vol. 8. N 2. P 81 – 82. DOI: 10.1021/ac50100a001.
 47. **US Pat. 5024080, G01N 11/00.** Paint viscosity monitoring system and method / P. G. Backes. — Appl. N 503586; filed 03.04.1990; pat. 18.06.1991. — 6 p.
 48. **GB Pat. 2192987, G01N 11/00, G01N 9/00, G01N 13/02.** A device for measuring physical properties of liquids / S. Nowinski. — Appl. N 8717205; filed 21.07.1987; publ. 27.01.1988. — 5 p.
 49. **RF Pat. 2205380, G01N 13/02.** Method of measuring the surface tension / M. M. Mordasov, V. I. Galizdra, E. I. Korneeva; applicant and patentee Tambov Military Aviation Engineering Institute. — Appl. N 2000106486/28; appl. 16.03.2000; publ. 27.05.2003. Byull. Otkryt. Izobret. N 15 [in Russian].
 50. **RF Pat. 2208777, G01N 13/02.** Method of measuring the surface tension of fluids and device for its implementation / M. M. Mordasov, V. I. Galizdra, E. I. Korneeva; applicant and patentee Tambov Military Aviation Engineering Institute. — Appl. N 2001103826/28; appl. 12.02. 2001; publ. 20.07.2003. Byull. Otkryt. Izobret. N 20 [in Russian].
 51. **UA Pat. 71259, G01N 13/02.** Optoelectronic meter of surface tension of liquids / I. I. Bilins'kii, O. S. Gorodets'ka; applicant and patentee Vinnytsia National Technical University. — Appl. N 20031211547; appl. 15.12.2003; publ. 15.11.2004; Bull. N 11. [in Ukrainian].
 52. **UA Pat. 71576, G01N 13/02.** Optoelectronic meter of surface tension of liquids / I. I. Bilins'kii, O. S. Biloshkurs'ka, S. O. Sirenko; applicant and patentee Vinnytsia National Technical University. — Appl. N 2001042381; appl. 10.04. 2001; publ. 15.12.2004. Bull. N 12. [in Ukrainian].
 53. **Mordasov M. M., Savenkov A. P., Safonova M. E., Sychev V. A.** Contactless method of measurement of surface tension / *Meas. Tech.* 2018. Vol. 61. N 6. P 613 – 620. DOI: 10.1007/s11018-018-1473-7.
 54. **Rosler R. S., Stewart G. H.** Impingement of gas jets on liquid surfaces / *J. Fluid Mech.* 1968. Vol. 31. P 163 – 174. DOI: 10.1017/S002211206800008X.
 55. **Mordasov M. M., Galizdra V. I., Astakhov V. P.** A Non-contact pneumatic method of surface tension measurement / *Zavod. lab. Diagnos. mat.* 1994. Vol. 60. N 9. P 33 – 36 [in Russian].
 56. **Galizdra V. I., Mishchenko S. V., Mordasov D. M., Mordasov M. M.** A method for monitoring the surface tension of fluid media under industrial conditions / *Ind. Lab.* 1997. Vol. 63. N 5. P 282 – 284.
 57. **Galizdra V. I., Mishchenko S. V., Mordasov D. M., Mordasov M. M.** Pneumatic methods for monitoring the surface tension of fluid media (review) / *Zavod. Lab. Diagn. Mater.* 1997. Vol. 63. N 8. P 26 – 31 [in Russian].