

Аэродинамическое измерение поверхностного давления

М. М. МОРДАСОВ, А. П. САВЕНКОВ, К. Е. ЧЕЧЕТОВ

Тамбовский государственный технический университет, Тамбов, Россия, e-mail: savencow@yandex.ru

Представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований метода измерения поверхностного натяжения. Метод основан на деформации поверхности контролируемой жидкости газовой струей. Сформулированы критерии выбора параметров аэродинамического воздействия и заданного значения высоты углубления на поверхности жидкости. В связи со значительным влиянием плотности жидкости на результат измерения метод рекомендован для определения поверхностного давления поверхностно-активных веществ.

Ключевые слова: поверхностное натяжение, измерение, струя, газ, углубление, жидкость, плотность.

The results of theoretical and experimental investigations of a surface tension measurement method based on the deformation of the liquid under testing by a gas jet are presented. The choice of parameters of the aerodynamic impingement and the predetermined value of the height of cavity on the liquid surface are made on the basis of formulated criteria. Due to significant influence of liquid density occurring on the measurement result a method is recommended for the determining of surface pressure of surface active agents.

Key words: surface tension, measurement, jet, gas, cavity, liquid, density.

Результат взаимодействия струи газа с жидкостью зависит от её физических свойств: плотности, поверхностного натяжения и вязкости. Если изменять параметры струйного воздействия и одновременно контролировать степень деформации поверхности жидкости, то можно бесконтактно определять эти свойства по от-

дельности [1]. В настоящее время возможность их независимого измерения представлена в научной литературе лишь на уровне идей [1–3], несмотря на долгую историю развития струйных бесконтактных методов измерений физических свойств жидкостей.

Данная статья посвящена вопросам разработки аэродинамического метода измерения поверхностного давления поверхностно-активных веществ (ПАВ). Метод может быть также использован для измерения поверхностного натяжения жидкости с известной плотностью.

На поверхности раздела газовой и жидкой фаз в обычных условиях оседает пыль из газовой фазы и адсорбируются частички примесей из жидкой. В результате этого поверхностное натяжение уменьшается, и для водных растворов может достигать 50 % исходного значения [4]. Поверхностное давление Π представляет собой разность между поверхностным натяжением σ_0 чистой поверхности жидкости и текущим поверхностным натяжением σ загрязнённой поверхности:

$$\Pi = \sigma_0 - \sigma. \quad (1)$$

Поверхностное давление Π зависит от времени с момента формирования поверхности и её площади, но его изменение происходит при постоянных значениях плотности и вязкости. Это позволяет контролировать значения Π без компенсации влияния плотности и вязкости на результат измерений.

Измерение поверхностного давления необходимо при исследовании свойств ПАВ [5–7]. По значению этой величины можно контролировать степень чистоты поверхности жидкости или состояние плёнок Ленгмюра–Блоджетт в процессах их получения и нанесения на подложку [8]. Плёнки Ленгмюра–Блоджетт находят всё более широкое применение в качестве основы для получения моно- и мультимолекулярных слоёв в нанотехнологиях, медицине, биотехнологиях и электронике [9–12].

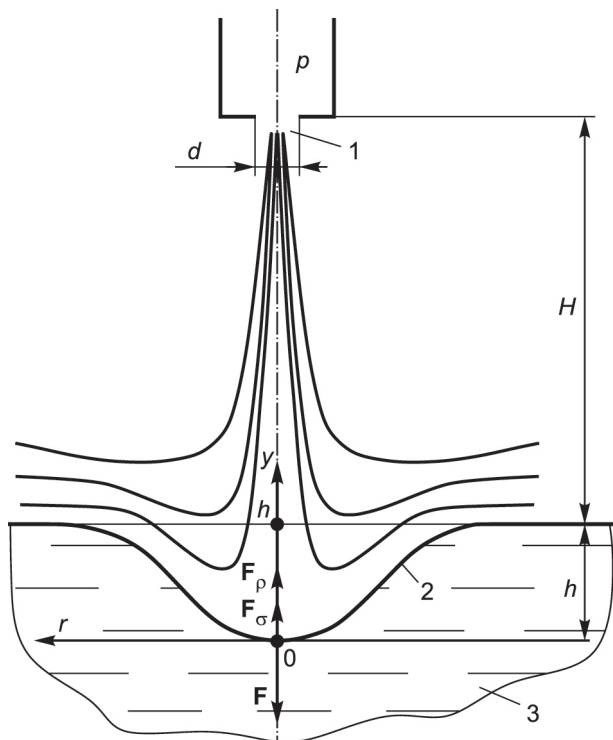


Рис. 1. Схема взаимодействия струи газа с поверхностью жидкости: 1 – отверстие истечения газовой струи; 2 – углубление; 3 – жидкость

Контактные методы измерения поверхностного давления ПАВ можно использовать только для локальной области поверхности жидкости. Для исследования всей поверхности с целью сохранения целостности плёнок ПАВ применяют бесконтактные методы [5–7]. К таким методам относятся аэродинамические, основанные на деформации поверхности жидкости газовой струей.

В работе [3] предложен аэродинамический метод, согласно которому поверхностное натяжение определяется по высоте углубления, формируемого ламинарной газовой струей на поверхности контролируемой жидкости. При этом углубление имеет малый объём со сравнительно большим отношением высоты к радиусу, что позволяет уменьшить влияние плотности жидкости на результат измерения. Однако такое углубление характеризуется большой крутизной склонов, и это препятствует сохранению целостности плёнки ПАВ при контроле поверхностного давления. Для измерения геометрических параметров такого углубления необходимо, чтобы стенки сосуда с контролируемой жидкостью были прозрачными. Контроль высоты углубления со стороны газовой фазы затруднён. Актуальной задачей является проверка возможности использования аэродинамического метода измерения поверхностного давления, если под действием турбулентной струи формируется углубление с малым значением отношения высоты к радиусу.

На рис. 1 представлена схема взаимодействия струи газа с поверхностью жидкости. Турбулентная струя из отверстия 1 диаметром d направлена перпендикулярно поверхности жидкости 3 и формирует в ней углубление 2 с осевой симметрией, характеризующееся высотой h . Силе F действия струи на поверхность жидкости противодействуют силы поверхностного натяжения F_σ и выталкивающая F_p . Увеличение избыточного давления p газа перед отверстием приводит к увеличению силы F и высоты h углубления. В статическом режиме взаимодействия при постоянном давлении p выполняется уравнение баланса сил на поверхности раздела газовой и жидкой фаз

$$\mathbf{F} = \mathbf{F}_p + \mathbf{F}_\sigma. \quad (2)$$

На основании (2) в [13] получено уравнение

$$k\mu\pi d^2 p/2 = \rho g V + \sigma \max[f_\sigma(y)], \quad (3)$$

где k – коэффициент формы углубления; μ – коэффициент расхода для отверстия; ρ – плотность жидкости; g – ускорение свободного падения; V – объём углубления; $f_\sigma(y) = 2\pi r(y) \sin \beta(y)$ – функция, описывающая изменение силы F_σ по вертикали; $r(y)$ – математическое описание образующей углубления 2 в декартовых координатах $y-r$; β – угол наклона касательной к образующей углубления относительно горизонтали (оси r).

На рис. 2 приведены экспериментальные зависимости геометрических параметров V , $\max[f_\sigma(y)]$ от высоты h углубления. Исследованы смеси деионизованной воды с этиловым спиртом, свойства которых приведены в табл. 1. Плотность определена пикнометрическим методом с относительной погрешностью не более 0,3 %, поверхностное натяжение – методом втягивания пластины с погрешностью не более 2 %.

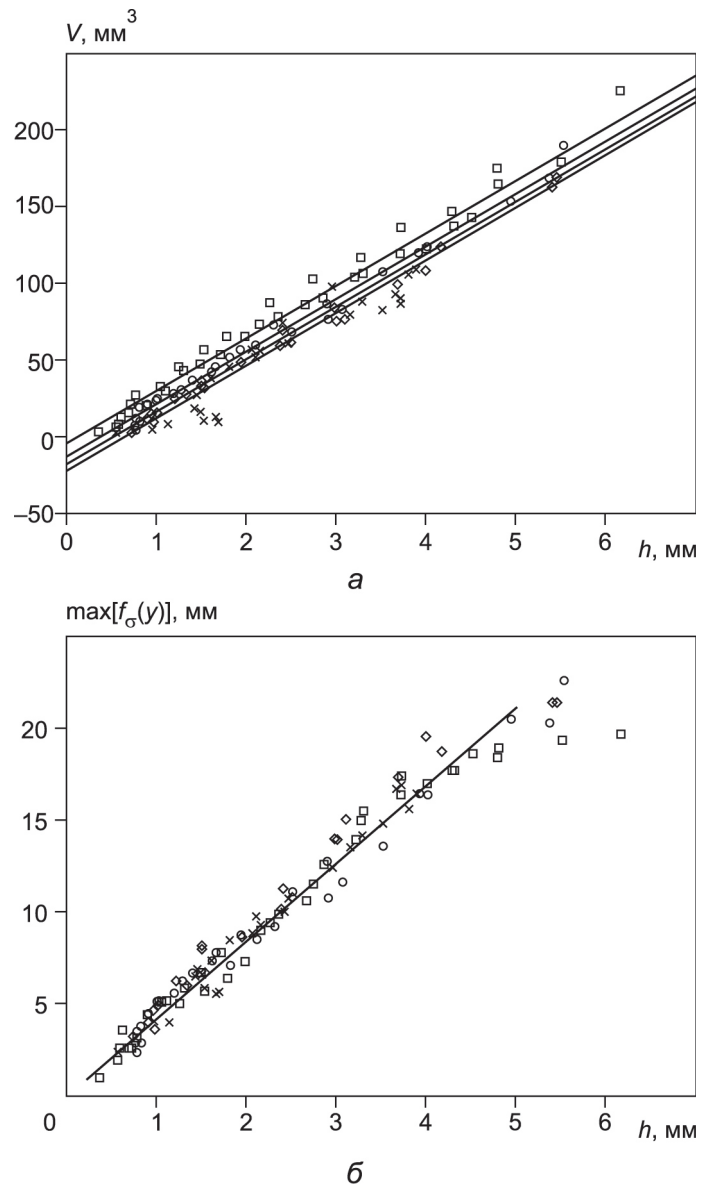


Рис. 2. Зависимости геометрических параметров V (а) и $\max[f_\sigma(y)]$ (б) от высоты h углубления для различных значений поверхностного натяжения σ : $\times$ – 22,9 мН/м; $\diamond$ – 34,1 мН/м; $\circ$ – 48,0 мН/м; $\square$ – 73,3 мН/м; точки – экспериментальные данные; линии – результаты аппроксимации данных функциями (4), (5)

Эксперименты выполнены на установке, в её состав входит струйная трубка с отверстием истечения струи диаметром $d = 0,89$ мм и коэффициентом расхода $\mu = 0,67$. Расстояние от отверстия истечения до недеформированной поверхности жидкости $H = (20,0 \pm 0,2)$ мм (см. рис. 1). Такие параметры выбраны с учётом следующих условий:

максимальное значение давления, при котором на поверхности жидкости не наблюдаются колебания ($p < 1050$ Па);

минимальная крутизна склонов углубления (угол β не превышает 30°);

максимальное влияние поверхностного натяжения жидкости

Т а б л и ц а 1
Физические свойства водных растворов этилового спирта

Объёмная концентрация этилового спирта, %	ρ , кг/м ³	σ , мН/м
0	998	73,3
11,6	985	48,0
34,4	959	34,1
96,0	808	22,9

на форму углубления ($F_\sigma/F_p \geq 0,5$).

При выполнении двух первых условий сохраняется целостность плёнки ПАВ на поверхности жидкости и упрощается измерение геометрических параметров углубления со стороны газовой фазы. Третье условие обеспечивает

зависимость высоты h углубления от поверхностного натяжения σ , положенную в основу метода измерения.

Давление p перед отверстием истечения в ходе экспериментов изменялось в диапазоне 0,1–2,5 кПа и контролировалось жидкостным микроманометром. При определении форм образующих углублений и расчёте параметров V и $\max[f_\sigma(y)]$ использованы методики [13, 14]. Образующие углублений описаны функцией

$$r(y) = ay^m + by^n,$$

где $a = 1,2 \dots 4,0$; $b = 10^{-7} \dots 10$; $m = 0,5$; $n = 2 \dots 16$ – параметры функции; значения a, b соответствуют координатам r, y , выраженным в миллиметрах.

Неоднозначность зависимости $V(h)$ для $\sigma = 22,9$ мН/м в диапазоне $h = 1,4 \dots 1,8$ мм обусловлена изменением режима течения газа в струе в соответствующем диапазоне давлений (см. рис. 2, а). Для больших значений σ такая неоднозначность выражена менее ярко и наблюдается при меньших значениях высоты h . Сравнительно большой разброс значений объёмов V углубления для $\sigma = 22,9$ мН/м при значениях $h > 3$ мм связан с возникновением хаотических колебаний на поверхности жидкости. Этим же обусловлено увеличение отклонения значений $\max[f_\sigma(y)]$ от аппроксимирующей функции при $h > 4$ мм (см. рис. 2, б).

Зависимости параметров $V, \max[f_\sigma(y)]$ от высоты h углубления (см. рис. 2) описываются линейными функциями

$$V = b_0 + b_1\sigma + b_2h; \quad (4)$$

$$\max[f_\sigma(y)] = b_4h, \quad (5)$$

где $b_0 = -30,0$ мм³; $b_1 = 0,350$ мм³·с²/г; $b_2 = 34,3$ мм²; $b_4 = 4,23$ – коэффициенты; высота h выражена в миллиметрах, поверхностное натяжение σ – в миллиньютонах, делённых на метры.

Максимальное абсолютное отклонение экспериментальных данных от вычисленных по (4) не превышает 20 мм³, среднее квадратическое отклонение (СКО) – 6,5 мм³, относительная погрешность аппроксимации – 9,1 %. При оценке погрешностей аппроксимации для жидкости с $\sigma = 22,9$ мН/м исключены данные при $h < 1,8$ мм, соответствующие диапазону изменения режима течения газа в струе. Максимальное абсолютное отклонение экспериментальных данных от рассчитанных по (5) составляет не более 2,4 мм, СКО – не более 0,87 мм, относительная погрешность аппроксимации –

не более 8,6 %. При оценке погрешностей аппроксимации исключены данные при $\max[f_\sigma(y)] > 19$ мм, соответствующие колебательному режиму взаимодействия газа и жидкости.

После подстановки (4), (5) в уравнение (3) получим функцию измерения поверхностного натяжения

$$\sigma = \frac{k\mu\pi d^2 p / 2 - \rho g(b_0 + b_2 h)}{\rho g b_1 + b_4 h}. \quad (6)$$

Существуют две модификации бесконтактного аэродинамического метода измерения поверхностного натяжения. Первая заключается в определении поверхностного натяжения σ по высоте h углубления при заданном давлении p_0 [3], а вторая – по давлению p , которое необходимо для формирования углубления заданной высоты h_0 . Вторая модификация метода обладает следующими преимуществами:

линейностью функции измерения $\sigma(p)$ при $h = \text{const}$;

постоянством формы и размеров углубления, обеспечивающим постоянство величин $k, V, \max[f_\sigma(y)]$ при различных значениях измеряемой величины σ ;

простотой конструкции устройства, реализующего метод, требуется лишь детектор высоты углубления, сигнализирующий о достижении заданного значения h_0 ;

рациональностью зависимости погрешности определения поверхностного натяжения от измеряемой величины.

Последнее преимущество заключается в следующем. Наибольший вклад в погрешность определения поверхностного натяжения вносит погрешность измерения высоты углубления. Абсолютная погрешность измерения высоты h не зависит от её значения. При заданном постоянном давлении p_0 меньшему поверхностному натяжению соответствует большая высота углубления. Максимальная высота углубления ограничивается колебательным режимом взаимодействия, который для малых значений поверхностного натяжения возникает при меньшей высоте (около 2,1 мм). При большом поверхностном натяжении высота углубления, соответствующая тому же давлению p_0 , будет сравнительно малой, вследствие чего будут высокими относительные погрешности измерений высоты углубления и поверхностного натяжения. Таким образом, большему значению измеряемой величины соответствует большая относительная погрешность.

В модификации метода с постоянным значением h_0 высоты углубления при уменьшении поверхностного натяжения уменьшается давление p и, соответственно, силовое действие струи, что способствует сохранению стабильной формы углубления. Относительная погрешность измерения поверхностного натяжения не зависит от измеряемого значения этой величины.

Для всех исследованных растворов определены диапазоны выбора заданного значения h_0 высоты углубления по следующим критериям:

наилучшее совпадение форм углублений для различных значений поверхностного натяжения ($h_0 = 2,0 \dots 2,5$ мм);

стабильность формы углубления ($h_0 < 2,1$ мм);

однозначность зависимости $h(p)$, обусловленная постоянством режима течения газа в струе ($h_0 > 1,7$ мм);

наилучшее совпадение коэффициента k формы для различных значений поверхностного натяжения ($h_0 = 1,6 \dots 2,3$ мм);

Т а б л и ц а 2

Результаты измерения поверхностного натяжения аэродинамическим методом при $h_0 = 2$ мм

Исследуемая жидкость	Действительные значения		Измеренное значение	Вычисленные значения			
	ρ , кг/м ³	σ , мН/м		σ , мН/м	Δ_σ , мН/м	δ_σ , %	γ_σ , %
Спирт этиловый	820	23,0	398	20,8	-2,2	9,6	2,8
Кислота уксусная	1050	27,8	540	28,9	1,1	4,1	1,4
Пропиленгликоль	1035	36,8	589	34,5	-2,3	6,1	2,8
Водные растворы: кислоты уксусной спирта этилового глицерина	1026	36,8	595	35,5	-1,3	3,6	1,6
	960	36,6	590	36,9	0,3	0,9	0,4
	1104	44,8	680	42,2	-2,6	5,9	3,3
Вода с масляной плёнкой на поверхности	998	49,6	750	52,8	3,2	6,4	4,0
Вода с ПАВ из смеси стеариновой и олеиновой кислот на поверхности	998	57,9	782	56,2	-1,7	3,0	2,2
	998	50,5	740	51,7	1,2	2,4	1,5
	998	55,2	782	56,2	1,0	1,7	1,2
	998	55,9	785	56,5	0,6	1,0	0,7
Вода	998	73,6	952	74,2	0,6	0,8	0,7

линейность зависимости $\sigma(\rho)$, определённая по результатам анализа зависимостей $h(\rho)$ для различных значений поверхностного натяжения ($h_0 = 1,8 \dots 2,5$ мм).

Выбрана заданная высота углубления $h_0 = 2,0$ мм и определён соответствующий ей коэффициент формы $k = 1,51$.

Функция измерения (6) экспериментально проверена на различных жидкостях для выбранного значения h_0 . В результате проверки была обнаружена аддитивная погрешность функции (6). Для компенсации этой погрешности введена положительная поправка 5 мН/м в результат измерения. Экспериментальные данные, полученные аэродинамическим методом измерения поверхностного натяжения, с учётом указанной поправки представлены в табл. 2. Действительные значения плотности и поверхностного натяжения (табл. 2) определены пикнометрическим методом с относительной погрешностью не более 0,3 % и методом втягивания пластины с погрешностью не более 2 %, соответственно. Вычисленное значение σ найдено по данным многократных измерений давления p с учётом действительного значения плотности ρ . Абсолютная погрешность измерения Δ_σ поверхностного натяжения, равная разности вычисленного и действительного значений поверхностного натяжения, составила по модулю не более 3,2 мН/м, относительная погрешность δ_σ – не более 9,6 %, приведённая погрешность γ_σ для диапазона 20–80 мН/м – не более 4,0 %.

Вклад выталкивающей силы F_p в общую силу сопротивления поверхности жидкости проникновению газовой струи больше вклада силы F_σ поверхностного натяжения. Следовательно, изменение плотности жидкости оказывает значительное влияние на результат измерения поверхностного натяжения в соответствии с выражением (6). В связи с этим рассматриваемый метод целесообразно использовать для измерения поверхностного давления плёнок ПАВ на поверхности жидкости с известной плотностью. Для воды плотностью $\rho = 998$ кг/м³ и при $g = 9,81$ м/с² из (6) получим

$$\sigma = b_p \rho - \sigma_1, \quad (7)$$

где

$$b_p = k \mu \pi d^2 / [2(p g b_1 + b_4 h)] = 0,106 \cdot 10^{-3} \text{ м};$$

$$\sigma_1 = \rho g (b_0 + b_2 h) / (p g b_1 + b_4 h) = 0,0318 \text{ Н/м}.$$

С учётом поправки 5 мН/м принято значение постоянной $\sigma_1 = 26,8$ мН/м. Из выражений (1), (7) получим уравнение для определения поверхностного давления

$$P = \sigma_0 + \sigma_1 - b_p \rho. \quad (8)$$

Уравнение (7) может быть также использовано для упрощения функции (6). Для компенсации влияния плотности в него необходимо ввести дополнительное слагаемое:

$$\sigma = b_p \rho - \sigma_1 - b_p (\rho - \rho_0), \quad (9)$$

где коэффициент $b_p = 0,03$ мН·м²/кг получен путём аппроксимации экспериментальных данных; $\rho_0 = 1000$ кг/м³.

На рис. 3 представлены результаты экспериментального исследования влияния расстояния H от отверстия истечения струи до поверхности жидкости на погрешность δ_σ измерения поверхностного натяжения (с учётом знака абсолютной погрешности этой величины). Влияние расстояния H увеличивается с уменьшением поверхностного натяжения, что обусловлено изменением уменьшаемого в числителе функции (6). В связи с этим требуется точная установка диафрагмы с отверстием истечения на заданном расстоянии относительно поверхности жидкости. Лазерные триангуляционные детекторы расстояния обеспечивают сигнализацию достижения заданного значения с абсолютной погрешностью не более 0,05 мм [15]. При таком отклонении от заданного значения H , равного 20 мм, можно получить $\delta_\sigma = 1; 0,04$ % для спирта и воды, соответственно.

При экспериментальных измерениях высоты углубления использовалась установка, рассмотренная в работе [14], в состав которой входит сосуд с прозрачными стенками, заполняемый контролируемой жидкостью. Применение специально подготовленного сосуда для контролируемой жидкости не соответствует

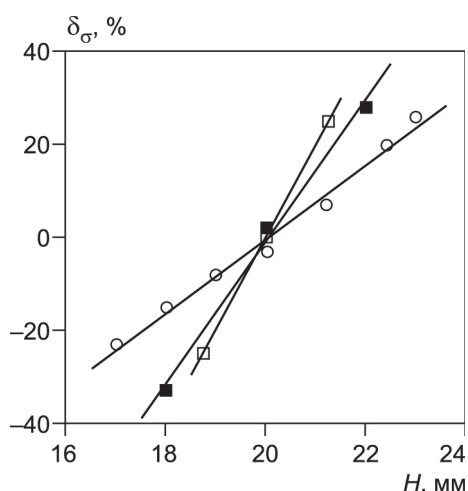


Рис. 3. Зависимость погрешности δ_σ измерения поверхностного натяжения σ жидкости от расстояния H :

○, ■, □ – экспериментальные точки для воды, кислоты уксусной и спирта этилового, соответственно; линии – результаты линейной аппроксимации

требованиям, предъявляемым к бесконтактным методам измерения [16]. Для устранения этого недостатка в настоящее время разрабатываются триангуляционные оптические средства измерений (СИ) высоты углубления на поверхности жидкости, позволяющие определять необходимые параметры со стороны газовой фазы [15].

В ходе экспериментальных исследований рассматриваемого в работе метода была выявлена его характерная особенность. Газовые потоки, вытекающие из углубления, распространяются вдоль поверхности жидкости и создают касательные напряжения (см. рис. 1). В результате этого поверхность жидкости в месте контакта со струей очищается. Такой эффект наблюдается при слабых загрязнениях, которые не формируют сплошную плёнку ПАВ. В этих условиях результаты измерения поверхностного натяжения аэродинамическим методом соответствуют чистой поверхности жидкости, а применение метода втягивания пластинки даёт меньшие значения поверхностного натяжения. Эффектом очистки поверхности, в частности, обусловлена сравнительно высокая погрешность измерения для поверхности жидкости с масляной плёнкой (см. табл. 2), которая не образует сплошного слоя. Для поверхности жидкости, покрытой сплошной устойчивой плёнкой, результаты измерения аэродинамическим методом соответствуют результатам метода втягивания пластинки (см. табл. 2, плёнки из смесей олеиновой и стеариновой кислот).

Предложенный метод может быть использован для измерения поверхностного давления плёнок ПАВ на поверхности жидкости или поверхностного натяжения невязких жидкостей при известном значении плотности. Измеряемые величины вычисляются по давлению p перед отверстием истечения газовой струи в соответствии с выражениями (8) или (9). Диапазон измерения поверхностного натяжения составляет 20–80 мН/м.

Существующие в настоящее время СИ поверхностного натяжения характеризуются абсолютной погрешностью, не пре-

вышающей 1 мН/м. В реальных технологических процессах, как правило, необходимо поддерживать поверхностное натяжение ниже заданного значения, например, 50 или 30 мН/м. Для этого достаточно установить поверхностное натяжение меньше заданного порога на погрешность измерения. При измерениях предложенным методом с учётом абсолютных погрешностей (см. табл. 2) целесообразно выбрать в качестве заданных значения поверхностного натяжения на 3 мН/м менее указанных ранее (47 или 27 мН/м, соответственно). Преимуществом рассматриваемого метода является возможность бесконтактной реализации.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, соглашение № 15-19-10028.

Литература

1. **Pat. 2192987 GB.** A device for measuring physical properties of liquids / S. Nowinski.
2. **Мордасов Д. М.** Пневмодинамический бесконтактный контроль плотности жидких веществ // Вестник ТГТУ. 2004. Т. 10. № 3. С. 666–674.
3. **Pfund A. H., Greenfield E. W.** Surface-tension measurements of viscous liquids // Ind. Eng. Chem. 1936. V. 8. No. 2. P. 81–82. DOI: 10.1021/ac50100a001.
4. **Eastoe J., Dalton J. S.** Dynamic surface tension and adsorption mechanisms of surfactants at the air–water interface // Advances in Colloid and Interface Science. 2000. V. 85. No. 2–3. P. 103–144. DOI: 10.1016/S0001-8686(99)00017-2.
5. **Miyano K.** Local mechanical properties of monomolecular films on water measured with a capillary wave probe // Langmuir. 1990. V. 6. No. 7. P. 1254–1259. DOI: 10.1021/la00097a011.
6. **Pat. 5303030 US.** 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.
7. **Saylor J. R., Szeri A. J., Foulks G. P.** Measurement of surfactant properties using a circular capillary wave field // Experiments in Fluids. 2000. V. 29. No. 6. P. 509–518. DOI: 10.1007/s003480000119.
8. **Блинов Л. М.** Лэнгмюровские пленки // Успехи физических наук. 1988. Т. 155. Вып. 3. С. 443–480. DOI: 10.3367/UFNr.0155.198807c.0443.
9. **Штыков С. Н., Русанова Т. Ю.** Наноматериалы и нанотехнологии в химических и биохимических сенсорах: возможности и области применения // Российский химический журнал. 2008. Т. 52. № 2. С. 92–100.
10. **Mangadlao J. D., Santos C. M., Felipe M. J. L., de Leon A. C. C., Rodrigues D. F., Advincula R. C.** On the antibacterial mechanism of graphene oxide (GO) Langmuir–Blodgett films // Chemical Communications. 2015. V. 51. No. 14. P. 2886–2889. DOI: 10.1039/c4cc07836e.
11. **Azad I., Ram M. K., Goswami D. Y., Stefanakos E.** Fabrication and characterization of ZnO Langmuir–Blodgett film and its use in metal–insulator–metal tunnel diode // Langmuir. 2016. V. 32. No. 33. P. 8307–8314. DOI: 10.1021/acs.langmuir.6b02182.
12. **Sizov A. S., Agina E. V., Gholamrezaie F., Bruevich V. V., Oleg V. B., Parashuk D. Yu., de Leeuw D. M., Ponomarenko S. A.** Oligothiophene-based monolayer field-effect transistors

prepared by Langmuir-Blodgett technique // Appl. Phys. Lett. 2013. V. 103. No. 043310. P. 1–4. DOI:10.1063/1.4816839.

13. Мордасов М. М., Савенков А. П., Чечетов К. Е. Методика исследования взаимодействия струи газа с поверхностью жидкости // Журнал технической физики. 2016. Т. 86. Вып. 5. С. 20–29. DOI: 10.1134/S1063784216050170.

14. Мордасов М. М., Савенков А. П. Измерение геометрических параметров поверхностей раздела газожидкостных систем // Измерительная техника. 2015. № 7. С. 47–49. DOI: 10.1007/s11018-015-0796-x.

15. Savenkov A. P., Safonova M. E. A non-contact sensor of distance to a liquid surface // The World of Science without Borders: Proc. 3rd International scientific and practical conference of young scientists. Tambov: TSTU Publishing House, 2016. P. 128–132.

16. Мордасов М. М., Савенков А. П., Чечетов К. Е. Особенности применения термина «бесконтактный метод измерения» // Датчики и системы. 2017. № 4. С. 47–52.

Дата принятия: 11.12. 2017

ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

536.5

Исследование воспроизводимости кривых плавления и затвердевания олова в малогабаритной ампуле

Е. В. ВАСИЛЬЕВ, А. А. ИГНАТОВ, М. И. КАЛИНИН, Л. Д. МАРКИН

Всероссийский научно-исследовательский институт метрологической службы, Москва, Россия, e-mail: kalinin@vniims.ru

Исследована возможность реализации реперной точки олова Международной температурной шкалы 1990 г. в малогабаритной ампуле в комплекте с портативным калибратором температуры с целью повышения точности методов калибровки малогабаритных прецизионных платиновых термопреобразователей сопротивления до уровня точности эталонных термометров сопротивления второго разряда. Показана невозможность использования для этого кривых плавления олова чистотой 99,999 % в малогабаритной ампуле. Определено обусловленное примесями уменьшение температуры ликвидуса отечественного коммерческого олова. Найдены оптимальные для разрабатываемых методов калибровки режимы воспроизводимости кривых затвердевания, исследованы свойства этих кривых.

Ключевые слова: реперная точка олова, малогабаритная ампула, платиновый термометр сопротивления, калибровка, кривая плавления, кривая затвердевания.

The possibility of the realization of tin fixed point of the International Temperature Scale 1990 in a miniature cell using together with handheld temperature calibrator has been investigated with the purpose of rise of operative calibration accuracy of smallsize precision platinum resistance thermometer up to echelon of accuracy of second class reference resistance thermometers. It is shown that it is impossible to use the melting curves of tin with a purity of 99,999 % in a miniature cell for this purpose. The decrease of the liquidus temperature of domestic commercial tin due to the impurities influence is determined. The optimal regimes of the reproducibility of tin freezing diagrams acceptable for developed calibration methods are detected and that diagram characteristics are studied.

Key words: tin fixed point, miniature cell, platinum resistance thermometer, calibration, melting diagram, freezing diagram.

Повышение точности градуировки платиновых термопреобразователей сопротивления (ПТС) позволяет уменьшить погрешность измерений температуры. Для градуировки эталонных ПТС (длина корпуса не менее 550 мм) используются классические ампулы реперных точек Международной температурной шкалы 1990 г. (МТШ-90) в составе громоздких стационарных установок. Широко распространённые малогабаритные ПТС конструктивно несовместимы с классическими ампулами и градуируются методом сличения с эталонными ПТС в жидкостных термостатах и калибраторах температуры.

Применение малогабаритных ампул реперных точек МТШ-90 совместно с портативными калибраторами температуры даёт возможность значительно сократить производственные затраты на градуировку ПТС, существенно повышая её точность по сравнению с точностью метода сличения. В России производство таких ампул в промышленном масштабе пока не налажено. Имеются лишь отдельные разработки: малогабаритные ампулы галлия и индия (внешний диаметр 34,8 и 43,8 мм, соответственно), предназначенные для применения в составе калибраторов температуры собственного производства (НПП «Эталон»); малогабаритная ампула олова (диаметр корпуса 36 мм) (НПП «Элемер») [1].