

Бесконтактный метод измерения поверхностного натяжения**М. М. МОРДАСОВ, А. П. САВЕНКОВ, М. Э. САФОНОВА, В. А. СЫЧЁВ***Тамбовский государственный технический университет, Тамбов, Россия,**e-mail: savencow@yandex.ru*

Представлены результаты исследований бесконтактного метода измерения поверхностного натяжения. Метод основан на определении степени деформации поверхности контролируемой жидкости при слабом аэродинамическом воздействии газовой струей. В методе используется свойство деформированной поверхности собирать оптическое излучение. Результат измерения данным методом обладает низкой чувствительностью к изменению плотности и вязкости жидкости.

Ключевые слова: жидкость, поверхностное натяжение, газ, струя, углубление, оптическое излучение, фокусировка, лазер.

The description and results of analysis for the surface tension measurement method based on deformation of a tested liquid by a gas jet are presented. The determination of deformation degree is realised using the property of a deformed surface to converge the optical radiation. The method excels in relatively slight aerodynamic impact on the tested liquid and a low sensitivity to the change in its density and viscosity.

Key words: liquid, surface tension, gas, jet, cavity, optical radiation, focusing, laser.

Поверхностное натяжение жидкостей определяется состоянием тонкого слоя молекул на границе раздела фаз и очень чувствительно к изменению состава жидкости и внешних условий. Адсорбция частиц различных веществ из газовой и жидкой фаз на поверхности раздела, как правило, приводит к уменьшению поверхностного натяжения. Это позволяет контролировать состояние и качество многих веществ в промышленности и медицине [1, 2].

В настоящее время разрабатываются бесконтактные методы измерения поверхностного натяжения, основанные на физических эффектах разной природы [3–6]. Использование таких методов позволяет предотвратить разрушающее взаимодействие объекта и средства измерений (СИ), уменьшить влияние СИ на результат измерения и снизить затраты времени и реактивов на очистку измерительных ёмкостей и чувствительных элементов. Методы левитирующей капли имеют специфическую область применения – измерение физических свойств расплавов [4, 5]. Отсутствие контакта обеспечивается только после отбора проб и перевода образца исследуемого материала в состояние левитации. После этого образец расплавляется и производятся измерения. Рассмотренным методам, как и методам на основе рассеяния света на капиллярных тепловых волнах [3] и капиллярных волн, возбуждаемых электрическим полем [6], присущи общие недостатки: необходимость использования сложных установок; влияние плотности жидкости на результат измерения поверхностного натяжения; невозможность применения для измерения свойств вязких жидкостей. Последний недостаток обусловлен демпфирующим действием вязкого трения и является наиболее существенным, так как высокая вязкость ($\eta > 0,1 \text{ Па}\cdot\text{с}$) контролируемой жидкости является одной из предпосылок для проведения бесконтактных измерений.

С момента создания методы измерения поверхностного натяжения, основанные на определении степени деформации поверхности жидкости под действием газовой струи, предназначались для жидкостей с высокой вязкостью [7]. Несмотря на перспективность аэродинамических методов на сегодняшний день не существует СИ, которые можно без сомнения назвать бесконтактными [8]. Во многих конструкциях определение степени деформации поверхности жидкости осуществляется через стенки или дно сосуда, поэтому сосуд, по сути, становится частью СИ и к нему предъявляются жёсткие требования [7–11]. Другие устройства описаны

только на уровне идей в патентных документах и не позволяют достичь требуемой точности при реальной технической реализации [12–15].

В настоящей работе предложен бесконтактный аэродинамический метод измерения поверхностного натяжения. На результат измерения, полученный данным методом, слабо влияют плотность и вязкость контролируемой жидкости. Струя газа, направленная на поверхность жидкости, деформирует её с образованием углубления. Силе F действия струи на поверхность жидкости противодействуют выталкивающая сила F_p , зависящая от плотности ρ жидкости, и сила поверхностного натяжения F_σ . Степень деформации поверхности жидкости зависит от значений σ и ρ . Поэтому плотность оказывает влияние на результат измерения поверхностного натяжения в большинстве аэродинамических методов и устройств.

На рис. 1 представлена экспериментальная зависимость отношения сил F_σ/F_p от высоты углубления, формируемого струёй газа на поверхности жидкости. Исследованы жидкости с различными физическими свойствами: эпоксидная смола ($\rho=1123$ кг/м³, $\sigma=36,4$ мН/м, $\eta >20$ Па·с) и водные растворы этилового спирта различной концентрации ($\rho=960\text{--}1000$ кг/м³, $\sigma=34\text{--}73$ мН/м, $\eta <0,003$ Па·с). Методика определения значений сил F_σ , F_p подробно описана в работе [16]. По оценочным расчётам при реализации предлагаемого метода высота h углубления составляет порядка 0,1 мм. Из рис. 1 следует, что даже в наихудшем случае (при расстоянии $H_1 = 40$ мм от отверстия истечения струи газа до поверхности эпоксидной смолы) для $h < 0,6$ мм будет преобладать противодействие силы F_σ поверхностного натяжения силе F действия газовой струи. Если экстраполировать кривую для эпоксидной смолы до значения $h = 0,1$ мм, то сила F_σ более чем на порядок превысит силу F_p . Это создаст условия для измерения поверхностного натяжения, при которых влияние плотности значительно уменьшится.

Проведённые экспериментальные исследования взаимодействия струи газа с поверхностью жидкости показали, что вязкость оказывает влияние на форму углубления при передаче сравнительно большого количества движения от газовой фазы жидкой. При слабом струйном воздействии и малой степени деформации поверхности жидкости ($h < 1$ мм) форма углубления определяется только статическими силами F_σ , F_p , и результат измерения поверхностного натяжения слабо зависит не только от плотности, но и от вязкости.

На рис. 2 представлена схема устройства для реализации бесконтактного аэродинамического метода измерения поверхностного натяжения жидкостей. На основании 15 жёстко закреплены струйная трубка 8, полупрозрачный экран 10, лазерный диод 14 типа TXL04 и гидростатический указатель уровня 17. В торце трубки 8 установлена диафрагма 9 с отверстием истечения струи диаметром d . Экран 10 расположен параллельно поверхности контролируемой жидкости 12. Питание лазерного диода 14 осуществляется от генератора тока 16. Плоскость поляризации излучения лазерного диода располагается перпендикулярно плоскости основания 15.

До проведения измерений ось струйной трубки 8 выравнивается по вертикали, диафрагма 9 размещается на заданном расстоянии H_1 от недеформированной поверхности жидкости 12. Выравнивание в плоскости схемы контролируется указателем уровня 17. Установка на заданное расстояние H_1 и выравнивание по вертикали в плоскости перпендикулярной плоскости схемы производится по меткам 11 на экране 10. При правильной установке устройства на экране 10 формируется изображение 4, в котором полоса лазерного излучения центрируется между крайними метками. После установки устройства в заданное положение расстояние от поверхности жидкости 12 до экрана 10 составляет H_2 .

Подача воздуха от источника питания в трубку 8 осуществляется через переменное 1 и постоянное 3 ламинарные пневматические сопро-

тивления. Интенсивность действия газовой струи на поверхность жидкости 12 регулируется изменением переменного сопротивления 1 и контролируется жидкостным микроманометром 2. Струя газа (из отверстия в диафрагме 9) формирует на поверхности жидкости углубление 13 с осевой симметрией. Вогнутая поверхность углубления 13 фокусирует отражённое от него лазерное излучение на экране 10 с формированием изображения 5. В конструкции устройства предусмотрено прохождение лазерного луча строго по оси углубления. Выполнение этого условия с высокой точностью контролируется по пятну излучения на экране 10. При малейших отклонениях лазерного луча от оси углубления пятно становится несимметричным.

О поверхностном натяжении σ судят по избыточному давлению p перед диафрагмой 9, соответствующему заданной степени деформации поверхности контролируемой жидкости. Большему поверхностному натяжению соответствует большее давление. Физическое обоснование зависимости $p(\sigma)$ представлено в [11, 16]. В настоящей статье использованы три критерия определения заданной степени деформации поверхности жидкости.

Критерий 1 заключается в совпадении фокусного расстояния поверхности углубления 13 с расстоянием (на схеме не указано) до экрана 10 (излучение сфокусировано на экране). Достижение этого критерия определяется по минимальной площади пятна излучения на экране 10 (изображение 5). В связи с тем, что ширина лазерного луча в плоскости недеформированной поверхности жидкости больше диаметра углубления, то на экране, кроме пятна сфокусированной части излучения, с меньшей интенсивностью сохраняется также исходная полоса луча. При увеличении давления p увеличиваются интенсивность аэродинамического воздействия и кривизна углубления 13. Фокусное расстояние до поверхности углубления становится меньше расстояния до экрана 10, и площадь пятна излучения увеличивается.

Критерий 2 достижения заданной степени деформации определяется равенством размеров пятна сфокусированного излучения и расстояния между внутренними метками 11 экрана 10 (изображение 6). В экспериментальных исследованиях использовался экран, расстояние между внутренними метками которого равнялось половине расстояния между внешними. При дальнейшем повышении степени деформации длина исходной полосы лазерного излучения уменьшается, а размеры пятна сфокусированного луча увеличиваются. Равенство этих размеров выбрано в качестве *критерия 3* достижения заданной степени деформации поверхности жидкости (изображение 7).

Элементы устройства имеют следующие параметры: ламинарное сопротивление 3 – капилляр длиной 15 мм и диаметром 0,35 мм; проводимость пневматического сопротивления 1 $\alpha = 1,53 \cdot 10^{-9}$ м·с; диафрагма 9 толщиной 0,18 мм с отверстием диаметром $d = 0,89$ мм (коэффициент расхода $\mu = 0,68$); расстояние между крайними и внутренними метками 11 экрана 10 – 9,0 и 4,5 мм, соответственно; расстояния $H_1 = 34$ мм, $H_2 = 6,5$ мм; угол между лазерным лучом и поверхностью жидкости $\varphi = 16,5^\circ$; ток питания лазерного диода 10,5 мА.

В ходе измерений истечение газа происходит при столь низких (до 70 Па) перепадах давления, что измерить их с достаточной точностью не удаётся даже с помощью жидкостных микроманометров с наклонной трубкой. Поэтому давление p перед диафрагмой определяется косвенно по давлению p' перед ламинарным сопротивлением 3. Исходя из предположения о линейности этого сопротивления массовый расход G протекающего через него газа определяется по формуле $G = \alpha(p' - p)$. Давление p' в среднем на два порядка превышает давление p , поэтому последним можно пренебречь, и формула для расхода будет иметь вид

$$G = \alpha p'. \quad (1)$$

Расход газа при истечении струи через отверстие в диафрагме 9, представляющее собой турбулентное пневматическое сопротивление, выражается как

$$G = \mu S \sqrt{2 p \rho_r}, \quad (2)$$

где $S = \pi d^2/4$ – площадь отверстия истечения; ρ_r – плотность газа.

Из (1), (2) получим выражение для определения давления p перед отверстием истечения

$$p = 2\alpha^2 p'^2 / (\mu^2 \pi^2 d^4 \rho_r). \quad (3)$$

Расстояние H_1 выбрано сравнительно большим для обеспечения турбулентного режима течения газа у поверхности жидкости. Струя, вытекающая из отверстия под действием малого перепада давления, не всегда достигает развитого турбулентного режима, однако в результате взаимодействия с атмосферой на больших расстояниях от отверстия она турбулезуется. Турбулентные струи имеют больший диаметр, что способствует увеличению радиуса кривизны углубления и давления p , соответствующего заданной степени деформации поверхности жидкости. Увеличение расстояния $H_1 > 40$ мм нецелесообразно, так как при этом на поверхности жидкости наблюдаются небольшие колебания даже при малой интенсивности аэродинамического воздействия, в результате чего затрудняется определение степени деформации.

На рис. 3 представлены экспериментальные зависимости давления p , соответствующего заданной степени деформации поверхности жидкости, от её поверхностного натяжения σ (точки соответствуют усреднению результатов многократных измерений давления). Степени деформации определены по одному из трёх рассмотренных выше критериев. Полученные зависимости аппроксимированы линейной функцией

$$\sigma(p) = b_0 + b_1 p, \quad (4)$$

где b_0, b_1 – некоторые коэффициенты.

Результаты аппроксимации представлены в табл. 1. Здесь Δ_a , σ_a , δ_a – максимальное абсолютное отклонение экспериментальных данных от аппроксимирующей функции (4), среднее квадратическое отклонение и относительная погрешность аппроксимации, соответственно.

Таблица 1

Результаты аппроксимации функции измерения $\sigma(p)$

Критерий	b_0 , мН/м	b_1 , мм	Δ_a , мН/м	σ_a , мН/м	δ_a , %
1	–21,6	5,83	2,8	1,3	2,9
2	–5,0	1,49	1,5	0,8	1,7
3	–2,8	1,09	5,1	3,3	7,3

Теоретически зависимость $\sigma(p)$ должна быть пропорциональной. Из рис. 3 следует, что эта зависимость больше соответствует пропорциональной функции при большей степени деформации. Исходя из этого можно предположить, что отклонение зависимости $\sigma(p)$ от пропорциональной может быть связано с нелинейностью реального ламинарного пневматического сопротивления, используемого для определения давления p .

Из анализа данных рис. 3 и табл. 1 можно сделать вывод, что наименее точным для определения заданной степени деформации поверхности жидкости является критерий 3, так как для него характерны наибольшие отклонения экспериментальных данных от аппроксимирующей функции. Также критерий 3 является наиболее сложным в реализации. Наиболее точным следует признать критерий 2, так как его применение обеспечивает сравнительно близкое соответствие функции измерения (4) пропорциональной зависимости и минимальную погрешность измерений поверхностного натяжения. Небольшой разброс экспериментальных данных критерия 2 обусловлен высокой чувствительностью размеров пятна излучения на экране к изменению фокусного расстояния при его несовпадении с расстоянием до экрана. При совпадении этих расстояний абсолютное изменение размеров пятна будет минимальным.

В табл. 2 представлены результаты экспериментального определения погрешностей измерения поверхностного натяжения различных жидкостей (где ПАВ – поверхностно-активные вещества) рассматриваемым бесконтактным методом при использовании критерия 2 для задания степени деформации. Действительные значения поверхностного натяжения определены методом втягивания пластины с относительной погрешностью не более 1 %. Действительные значения плотности и вязкости жидкостей взяты из различных источников с целью оценки влияния соответствующих величин на результат измерения поверхностного натяжения. Вычисленные значения поверхностного натяжения σ получены с использованием функции измерения (4) по экспериментально измеренным (при многократных измерениях) значениям давления p . Абсолютная погрешность $\Delta\sigma$ измерения, равная разности вычисленного и действительного значений поверхностного натяжения, составила не более 1,5 мН/м, относительная погрешность $\delta\sigma = 3,1\%$, для диапазона 0–80 мН/м приведённая погрешность $\gamma\sigma = 1,9\%$.

Таблица 2

Результаты измерения поверхностного натяжения различных жидкостей бесконтактным аэродинамическим методом

Исследуемая жидкость	Действительные значения			Измеренное значение	Вычисленные значения			
	σ , мН/м	ρ , кг/м ³	η , Па·с		σ , мН/м	$\Delta\sigma$, мН/м	$\delta\sigma$, %	$\gamma\sigma$, %
Спирт этиловый	23,0	820	0,0012	19,3	23,7	0,7	3,0	0,9
Масло касторовое	34,9	960	0,8500	26,9	35,0	0,1	0,4	0,2
Эпоксидная смола	36,4	1123	20,5000	28,6	37,5	1,1	3,1	1,4
Пропиленгликоль	36,8	1035	0,0500	28,1	36,8	0,0	0,0	0,0
Глицерин	58,9	1260	1,2700	43,0	58,9	0,0	0,1	0,1
Вода	72,3	998	0,0010	53,1	73,8	1,5	2,1	1,9
Водные растворы:								
спирта этилового (70 % об.)	26,0	880	0,0023	20,5	25,5	–0,5	2,0	0,6
кислоты уксусной (60 % об.)	34,2	1056	0,0023	26,9	35,0	0,8	2,4	1,0
спирта этилового (30 % об.)	35,7	968	0,0018	26,9	35,9	–0,7	1,9	0,8
кислоты уксусной (25 % об.)	43,8	1020	0,0014	32,4	43,1	–0,7	1,6	0,9
глицерина (20 % об.)	44,8	1152	0,0025	32,9	43,9	–0,9	2,0	1,1
Вода, поверхность которой покрыта ПАВ из смеси стеариновой и олеиновой кислот	52,1 58,0 61,5 67,7	998 998 998 998	0,0010 0,0010 0,0010 0,0010	38,6 42,4 44,2 48,4	52,4 58,0 60,6 66,9	0,3 0,0 –0,9 –0,8	0,5 0,0 1,4 1,3	0,3 0,0 1,1 1,1

Подтверждением низкой чувствительности бесконтактного метода к плотности и вязкости жидкости является успешное использование од-

ной функции измерения (4) для жидкостей с различными свойствами: плотность жидкостей изменялась в 1,5 раза, вязкость – в 20000 раз (см. табл. 2).

Существенно влияет на результат измерений бесконтактными аэрогидродинамическими методами изменение расстояния H_1 от отверстия истечения до поверхности жидкости. На рис. 4 представлены результаты экспериментального исследования относительной погрешности δ_σ измерения поверхностного натяжения, обусловленной отклонением расстояния H_1 от заданного значения $H_0 = 34$ мм. Зависимость $\delta_\sigma(H_1)$ получена для крайних значений поверхностного натяжения из исследованного диапазона: 23,0 мН/м (этиловый спирт) и 72,3 мН/м (вода). Погрешность δ_σ представлена в форме относительной погрешности с учётом знака абсолютной погрешности. Зависимость $\delta_\sigma(H_1)$ аппроксимирована линейной функцией

$$\delta_\sigma(H_1) = 15(H_0 - H_1). \quad (5)$$

Абсолютная погрешность установки расстояния H_1 в рассматриваемом устройстве не превышает 0,06 мм. Из уравнения (5) следует, что при таком отклонении расстояния H_1 от заданного значения относительная погрешность измерения поверхностного натяжения составляет не более 1 %.

Увеличение расстояния H_1 приводит к уменьшению кривизны и увеличению фокусного расстояния поверхности углубления, а также расстояния от этой поверхности до экрана. Такие изменения геометрических параметров оптической системы компенсируют их влияние на результат измерения поверхностного натяжения. Теоретически можно выбрать такие параметры измерительного устройства, при которых влияние изменения расстояния H_1 на результат измерения будет минимальным.

Рассмотренный аэродинамический метод измерения поверхностного давления или поверхностного натяжения в полной мере может быть назван бесконтактным по критериям [8]. При использовании метода не

существует жёстких ограничений на параметры сосуда, в котором находится контролируемая жидкость, и результат измерения обладает низкой чувствительностью к влияющим величинам. Для реализации метода требуется минимальная деформация поверхности контролируемой жидкости, не разрушающая плёнок ПАВ, т. е. метод является статическим. Экспериментально полученная приведённая погрешность измерения поверхностного натяжения в диапазоне 20–80 мН/м не превышает 2 %. При измерении поверхностного натяжения невязких жидкостей требуется виброзащита устройства для реализации метода.

Для применения рассматриваемого бесконтактного метода требуется усовершенствовать способ контроля интенсивности действия газовой струи (давления p). При использовании ламинарного сопротивления для контроля давления p в соответствии с выражением (3) на результат измерения оказывают влияние плотность ρ и проводимость α , которая, в свою очередь, зависит от вязкости газа. В качестве возможных путей повышения точности измерений следует отметить уменьшение диаметра отверстия истечения газовой струи, позволяющее повысить давление p и контролировать его по микроманометру, или применение турбулентного пневматического сопротивления вместо ламинарного. Открытым также остаётся вопрос поиска наиболее рационального критерия достижения заданной степени деформации поверхности жидкости.

Прикладные научные исследования выполнены при поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках соглашения № 14.577.21.0214 (уникальный идентификатор проекта RFMEFI57716X0214).

Литература

1. Муратова Е. И., Смолихина П. М. Реология кондитерских масс: монография. Тамбов: Изд-во ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2013.
2. Mills C. O., Ellas E., Martin G. H. B., Woo M. T. C., Winder A. F. Surface tension properties of human urine: relationship with bile salt con-

centration // *Clinical Chemistry and Laboratory Medicine*. 2009. V. 26. No. 4. P. 187–194. DOI: 10.1515/cclm.1988.26.4.187.

3. **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 // *Review of Scientific Instruments*. 2014. V. 85. No. 044904. DOI: 10.1063/1.4871992.

4. **Zhou K., Wang H. P., Wei B.** Determining thermophysical properties of undercooled liquid Ti–Al alloy by electromagnetic levitation // *Chemical Physics Letters*. 2012. V. 521. P. 52–54. DOI: 10.1016/j.cplett.2011.09.061.

5. **Okada J. T., Ishikawa T., Watanabe Y., Paradis P.-F.** Surface tension and viscosity of molten vanadium measured with an electrostatic levitation furnace // *J. Chemical Thermodynamics*. 2010. V. 42. No. 7. P. 856–859. DOI: 10.1016/j.jct.2010.02.008.

6. **Behroozi F., Perkins A.** Direct measurement of the dispersion relation of capillary waves by laser interferometry // *American Journal of Physics*. 2006. V. 74. No. 11. P. 957–961. DOI: 10.1119/1.2215617.

7. **Pfund A. H., Greenfield E. W.** Surface-tension measurements of viscous liquids // *Industrial and Engineering Chemistry*. 1936. V. 8. No. 2. P. 81–82. DOI: 10.1021/ac50100a001.

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

9. **Пат. 71576 UA.** Оптико-електронний вимірювач поверхневого натягу рідин / Й. Й. Білінський, О. С. Білошкурська, С. О. Сіренко. // *Бюллетень изобретений*. 2004. № 12.

10. **А. с. 1753369 СССР.** Способ определения поверхностного натяжения жидкостей / В. П. Астахов, М. М. Мордасов, В. П. Журавлев // *Изобретения*. 1992. № 29.

11. Мордасов М. М., Савенков А. П., Чечетов К. Е. Аэродинамическое измерение поверхностного давления // Измерительная техника. 2018. № 5. С.

12. Пат. 71259 UA. Оптико-електронний вимірювач поверхневого натягу рідин / Й. Й. Білінський, О. С. Городецька // Бюллетень изобретений. 2004. № 11.

13. Пат. 2192987 GB. A device for measuring physical properties of liquids / S. Nowinski.

14. Пат. 2156968 РФ. Устройство для измерения поверхностного натяжения / И. С. Филатов, Ю. А. Брусенцов, М. М. Мордасов // Изобретения. Полезные модели. 2000. № 27.

15. Пат. 2208777 РФ. Способ измерения поверхностного натяжения жидких сред и устройство для его реализации / М. М. Мордасов, В. И. Гализдра, Е. И. Корнеева // Изобретения. Полезные модели. 2003. № 20.

16. 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.

Дата принятия: 11.12.2017.

Подписуночные подписи

Рис. 1. Зависимости отношения F_{σ}/F_p силы поверхностного натяжения и выталкивающей силы от высоты h углубления при различных расстояниях $H_1 = 10, 15, 25, 40$ мм (соответственно +; ×; ○; □) от отверстия истечения струи газа до поверхностей эпоксидной смолы и при $H_1 = 20$ мм (◇) до поверхностей растворов этилового спирта в воде различной концентрации

Рис. 2. Схема бесконтактного аэродинамического устройства для измерения поверхностного натяжения жидкостей:

1, 3 – переменное и постоянное ламинарные пневматические сопротивления; 2 – жидкостный микроманометр; 4–7 – формируемые изображения; 8 – трубка; 9 – диафрагма; 10 – экран; 11 – метки на экране; 12 – исследуемая жидкость; 13 – углубление; 14 – лазерный диод; 15 – основание устройства; 16 – генератор тока; 17 – указатель уровня

Рис. 3. Зависимость давления P от поверхностного натяжения σ при задании степени деформации поверхности жидкости по различным критериям: $\times$ – первому, $\circ$ – второму, $\square$ – третьему, *точки* – экспериментальные данные, *линии* – результаты аппроксимации функцией (4)

Рис. 4. Зависимость погрешности δ_σ измерения поверхностного натяжения σ от расстояния H_1 : $\circ$, $\square$ – экспериментальные данные для спирта этилового и воды, соответственно; *линии* – результат линейной аппроксимации