

Научная статья

УДК 532.137:53.082.36

<https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2022-11-57-64>

Модель измерений вязкости бесконтактным аэрогидродинамическим методом

Александр Петрович Савенков¹✉, Владислав Андреевич Сычёв²

¹ Тамбовский государственный технический университет, г. Тамбов, Россия, savencow@yandex.ru✉, <https://orcid.org/0000-0001-6424-6462>

² Научно-производственное объединение «МИЭЛТА ТЕХНОЛОГИИ», г. Тамбов, Россия, flyholand@mail.ru

Аннотация. Дан краткий обзор бесконтактных методов измерений вязкости жидкостей. Показано, что для измерений высокой (более 10 Па·с) вязкости целесообразно использовать импульсный аэрогидродинамический метод. Изложена суть метода, заключающаяся в деформации поверхности контролируемой жидкости струей газа и определении вязкости по времени достижения заданной степени деформации с момента подачи струи. Теоретически получены две модели и две функции измерений вязкости импульсным аэрогидродинамическим методом и оценен нижний предел измерений вязкости. Экспериментально исследованы две модели измерений вязкости при углах аэродинамического воздействия 20° и 50° с компенсацией и без компенсации переходного процесса в момент открытия электромагнитного клапана. Установлено, что для определения вязкости по времени достижения заданной степени деформации поверхности жидкости целесообразно применять линейную функцию измерений, не компенсировать переходный процесс в пневмосистеме и использовать аэродинамическое воздействие под углом 20–30° к поверхности жидкости. Экспериментально доказано, что в диапазоне 0,5–100 Па·с относительная погрешность измерений вязкости не превышает 3 %. Результаты актуальны для повышения оперативности измерений вязкости жидкостей в машиностроении, лакокрасочной, пищевой, химической, электротехнической и нефтяной промышленности.

Ключевые слова: бесконтактный метод измерений, вязкость, газ, жидкость, поверхность, струя, модель измерений, функция измерений

Для цитирования: Савенков А. П., Сычёв В. А. Модель измерений вязкости бесконтактным аэрогидродинамическим методом // Измерительная техника. 2022. № 11. С. 57–64. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2022-11-57-64>

The model of viscosity measurement by the non-contact aerohydrodynamic method

Aleksandr P. Savencov¹✉, Vladislav A. Sychev²

¹ Tambov State Technical University, Tambov, Russia, savencow@yandex.ru✉, <https://orcid.org/0000-0001-6424-6462>

² NPO "MIELTA TECHNOLOGII", Tambov, Russia, flyholand@mail.ru

Abstract. A brief review of non-contact methods for viscosity measurement is given. It is shown that it is reasonable to use the pulse aerohydrodynamic method for the measurement of high viscosity (more than 10 Pa·s). The essence of the method is presented, it consists in deforming the tested liquid surface with a gas jet and determining the viscosity from the time takes to reach a predetermined degree of deformation from the moment when the jet was applied. The two models and two functions of the viscosity measurements are theoretically obtained for the pulsed aerohydrodynamic method. The theoretical evaluation of the lower measurement limit is performed. We conduct the experimental research of two viscosity measurement models at the aerodynamic action angles of 20° and 50° with the compensation of transient process in the moment of a solenoid valve opening and without it. It is found that to determine the viscosity by the time of the liquid surface deformation it is reasonable to apply the linear measurement function, not to use the compensation of transient process in the pneumatics, and utilize the aerodynamic action at angle of 20–30° to the liquid surface. It is experimentally proved that the viscosity measurement relative error is not more than 3 % in the interval of 0.5–100 Pa·s. The results is necessary for increase in the operability of liquid viscosity measurement in machine, paint, coating, food, chemical, electrical, and petroleum industries.

Keywords: gas, jet, liquid, measurement function, measurement model, non-contact measurement method, viscosity, surface

Введение. Измерение вязкости требуется в технологических процессах, связанных с течением жидкостей, в машиностроении, лакокрасочной, пищевой, химической, электротехнической и нефтяной промышленности [1, 2]. Использование традиционных контактных методов для контроля

вязких жидкостей сопряжено с большими затратами времени на заполнение измерительных ёмкостей, удаление газовых пузырьков и очистку измерительных преобразователей и принадлежностей [3]. Анализ эффектов взаимодействия струи газа с поверхностью жидкости позволил разработать

аэрогидродинамический бесконтактный метод измерений вязкости, обеспечивающий упрощение и повышение оперативности контроля вязких жидкостей [4–6].

Аэрогидродинамический бесконтактный метод измерений вязкости применим для находящихся в сосудах обычных жидкостей с вязкостью от 0,5 до 100 Па·с [6]. Бесконтейнерные методы левитирующей капли имеют специфическую сферу применения – исследование теплофизических свойств расплавов в переохлаждённом метастабильном состоянии [7, 8]. Для исключения контакта капли исследуемого вещества с материалами, которые могут привести к загрязнению её поверхности, используют электростатическую, электромагнитную, аэродинамическую и акустическую левитацию [8–12]. Методы измерений вязкости и поверхностного натяжения на основе капиллярных волн изначально предназначались для изучения свойств поверхностно-активных веществ [13]. Применение этих методов для контроля свойств вязких жидкостей затрудняется сильным затуханием капиллярных волн [14]. В настоящее время достигнут верхний предел измерений 10 Па·с, однако при этом необходимо измерять нанометровые амплитуды колебаний поверхности жидкости на частоте 10 Гц, что представляет собой непростую задачу и требует качественной виброзащиты экспериментальной установки [3]. Существенными недостатками метода измерений вязкости на основе капиллярных волн с электрическим возбуждением является необходимость электрического контакта с контролируемой жидкостью и значимое влияние прочих факторов на результаты измерений [3, 14].

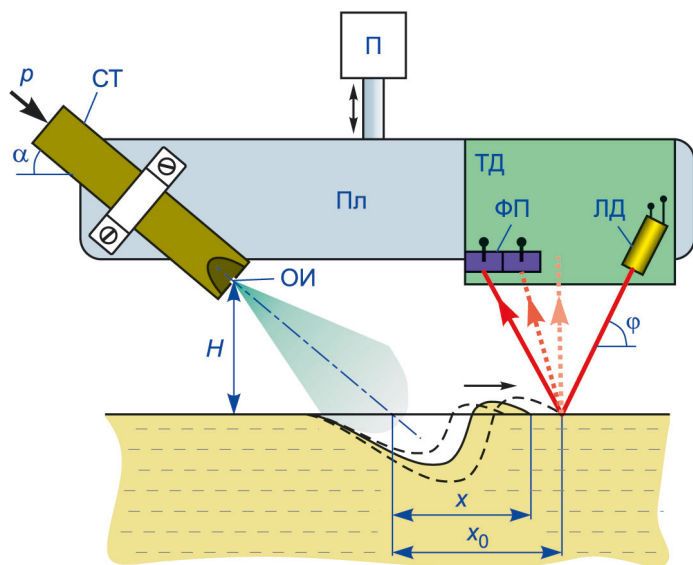


Рис. 1. Схема бесконтактного аэрогидродинамического устройства для измерений вязкости жидкостей:

СТ – струйная трубка; ОИ – отверстие истечения; П – привод; Пл – планка; ФП – фотоприёмник; ТД – триангуляционный детектор; ЛД – лазерный диод

Fig. 1. Schematic of the non-contact aerohydrodynamic device for liquid viscosity measurement:

JT – jet tube; DO – discharge orifice; D – drive; St – strip; PD – photodetector; TD – triangulation detector; LD – laser diode

Для бесконтактных измерений вязкости широко используются оптические эффекты. Метод измерений вязкости на основе рассеяния света на тепловых колебаниях молекул контролируемой жидкости позволяет создать удобное в эксплуатации портативное бесконтактное устройство, однако верхний предел измерений при этом не превышает 10 мПа·с в связи с малой длиной тепловых волн [15–17]. Аналогичный недостаток характерен и для бесконтактного метода измерений вязкости на основе рассеяния Мандельштама-Бриллюэна [18]. Для оценки вязкости биологических жидкостей предпринимаются попытки применения спекл-корреляционного анализа [19, 20].

Бесконтактные методы на основе локальной деформации поверхности контролируемой жидкости позволяют измерять вязкость в сосуде произвольных размеров и формы. Для деформации поверхности жидкости используют струю газа, лазерное излучение или электрическое поле [6, 21–25]. В ходе измерительного процесса изменение количества движения фотонов, возникающее при изменении показателя преломления на границе газовой и жидкой фаз, или воздействие электрического поля деформирует поверхность контролируемой жидкости на значение порядка всего 1 мкм. Поэтому для определения степени деформации требуются сложные оптические системы. Результаты измерений соответствуют тонкому поверхностному слою жидкости, свойства которого из-за загрязнений могут значительно отличаться от свойств жидкости в объёме. Электроды, создающие поле для деформации поверхности жидкости, располагаются на расстоянии десятых долей миллиметра. При реализации аэрогидродинамических бесконтактных методов измерений вязкости деформация поверхности жидкости и расстояния до чувствительных элементов достигают 1 см, что позволяет упростить конструкцию измерительных устройств и приблизить результаты измерений на поверхности к результатам измерений вязкости жидкости в объёме.

Цель настоящей работы – теоретическое определение и экспериментальное подтверждение модели и функции измерений вязкости жидкостей импульсным бесконтактным аэрогидродинамическим методом.

Бесконтактный аэрогидродинамический метод измерений вязкости. Сущность импульсного бесконтактного аэрогидродинамического метода измерений вязкости с наклонным аэродинамическим воздействием заключается в следующем. Основные элементы измерительного устройства – струйную трубку СТ с отверстием истечения ОИ газовой струи и лазерный триангуляционный детектор ТД [26] – располагают на заданном расстоянии H над поверхностью контролируемой жидкости (рис. 1). Трубка СТ и детектор ТД закреплены на планке Пл, вертикальное перемещение которой осуществляется с помощью привода П.

В начале измерительного процесса в момент времени t_0 на вход трубки СТ подают сжатый газ под давлением p . При истечении газа из отверстия ОИ формируется струя газа, деформирующая поверхность жидкости с образованием углубления и волны. С течением времени углубление и волна перемещаются по поверхности жидкости в направлении

действия газовой струи на расстояние x . Скорость движения зависит от вязкости η контролируемой жидкости. При достижении волной заданного перемещения x_0 в момент времени t_1 луч лазерного диода ЛД, отражённый от поверхности жидкости, изменяет направление распространения, уходит с поверхности дифференциального фотоприёмника ФП, и на выходе детектора ТД формируется соответствующий сигнал [6, 26]. Действие газовой струи прекращают, а о вязкости η судят по интервалу времени $\Delta t = t_1 - t_0$.

Подробное описание устройства для реализации рассматриваемого бесконтактного аэрогидродинамического метода измерений вязкости представлено в работе [6].

Модель и функция измерений вязкости. Зависимость перемещения x углубления от времени t действия газовой струи при угле $\alpha = 20^\circ$ (см. рис. 1) с относительной погрешностью аппроксимации не более 3 % описывается линейной функцией [5]:

$$x(t) = x^0 - \frac{b_m R \rho \mu d^2 p}{b_\eta^2 \eta^2} + \frac{\mu d^2 p}{b_\eta R \eta} t, \quad (1)$$

где x^0 – постоянная, зависящая от размеров углубления; b_m – коэффициент присоединённой массы углубления; R – максимальный радиус углубления в плоскости перпендикулярной направлению его движения; ρ – плотность контролируемой жидкости; μ , d – коэффициент расхода и диаметр отверстия истечения; b_η – коэффициент сопротивления перемещению углубления в условиях преобладания силы вязкого трения.

В работе [5] получены экспериментальные значения коэффициентов b_m , b_η . Экспериментальное и теоретическое значения коэффициента b_η совпадают и равняются 6. Экспериментальное значение коэффициента b_m равно 3,3, теоретическое – 0,67.

При высокой вязкости контролируемой жидкости (число Рейнольдса $Re < 1$) второе слагаемое функции (1) пренебрежимо мало [5]. Это позволяет представить (1) в упрощённом виде

$$x(t) = x^0 + \frac{\mu d^2 p}{b_\eta R \eta} t. \quad (2)$$

Для получения модели измерений вязкости аэрогидродинамическим методом необходимо приравнять функцию $x(t)$ заданному значению x_0 перемещения углубления. Из (1), (2) получим модели измерений

$$\Delta t(\eta) = \frac{b_\eta R \eta (x_0 - x^0)}{\mu d^2 p} + \frac{b_m R^2 \rho}{b_\eta \eta}; \quad (3)$$

$$\Delta t(\eta) = \frac{b_\eta R \eta (x_0 - x^0)}{\mu d^2 p}. \quad (4)$$

В уравнение (3) входит плотность ρ контролируемой жидкости, следовательно, этот параметр влияет на результаты измерений вязкости η . Это влияние проявляется при низкой вязкости жидкости, когда сила вязкого трения соизмерима с силой инерции [5, 24]. Для определения степени влияния

плотности на результаты измерений вязкости целесообразно использовать функцию измерений [27].

Из уравнения (3) функция измерений получается путём решения квадратного уравнения. Одно из двух решений, которое соответствует диапазону 0,5–100 Па·с изменения вязкости, имеет вид

$$\eta(\Delta t) = \frac{b_\eta \mu d^2 p \Delta t + \sqrt{b_\eta^2 \mu^2 d^4 p^2 \Delta t^2 - 4 b_m b_\eta^2 R^3 (x_0 - x^0) \mu d^2 p \rho}}{2 b_\eta^2 R (x_0 - x^0)}. \quad (5)$$

Из уравнения (4) получим линейную функцию измерений вязкости

$$\eta(\Delta t) = \frac{\mu d^2}{b_\eta R (x_0 - x^0)} p \Delta t. \quad (6)$$

Анализ влияния плотности контролируемой жидкости на результаты измерений вязкости. Влияние плотности ρ контролируемой жидкости на результаты измерений вязкости η оценим по методике, описанной в работе [27]. В бесконтактном аэрогидродинамическом вискозиметре вязкость вычисляется по интервалу времени Δt , полученному в процессе измерений [6]. В памяти устройства хранятся коэффициенты функции измерений (5), соответствующие средней плотности $\rho_0 = 1000 \text{ кг/м}^3$. Время Δt зависит от действительного значения плотности ρ контролируемой жидкости в соответствии с моделью измерений (3). Подставив в функцию

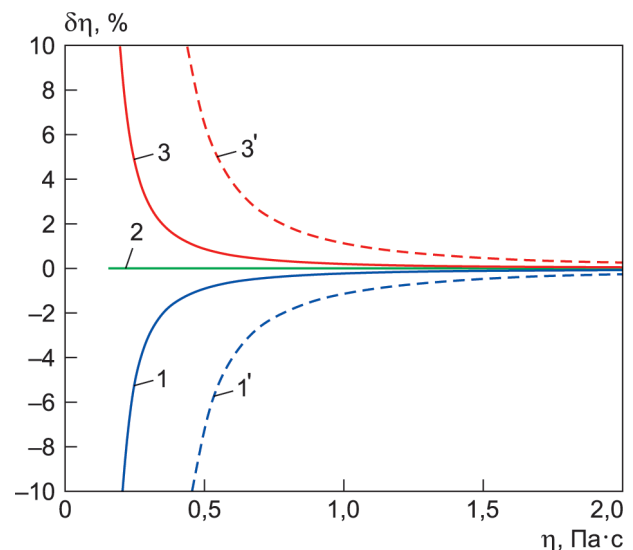


Рис. 2. Относительная погрешность измерений вязкости, обусловленная изменением плотности ρ контролируемой жидкости: 1, 1' и 3, 3' – при $\rho = 900$ и 1100 кг/м^3 соответственно, 2 – при $\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$; 1, 3 и 1', 3' – при $b_m = 0,67$ и $3,3$ соответственно

Fig. 2. Viscosity measurement relative error caused by change in tested liquid density ρ : 1, 1' and 3, 3' – at $\rho = 900$ and 1100 kg/m^3 respectively, 2 – at $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$; 1, 3 and 1', 3' – at $b_m = 0.67$ and 3.3 respectively

измерений (5) плотность ρ_0 и время Δt , полученное по модели измерений (3) с использованием значения плотности ρ , найдём выражение для оценки влияния плотности ρ на результаты измерений вязкости:

$$\eta[\Delta t(\eta, \rho), \rho_0] = \frac{\eta}{2} + \frac{b_m R \mu d^2 \rho \rho}{2 b_\eta^2 (x_0 - x^0) \eta} + \sqrt{\frac{\eta^2}{4} + \frac{b_m R \mu d^2 \rho (\rho - 2\rho_0)}{2 b_\eta^2 (x_0 - x^0)} + \left[\frac{b_m R \mu d^2 \rho \rho}{2 b_\eta^2 (x_0 - x^0) \eta} \right]^2}. \quad (7)$$

При подстановке $\rho = \rho_0$ в выражение (7) имеем

$$\eta[\Delta t(\eta, \rho_0), \rho_0] = \eta. \quad (8)$$

Определим относительную погрешность измерений вязкости, обусловленную влиянием плотности ρ контролируемой жидкости:

$$\delta\eta(\rho, \eta) = \frac{\eta[\Delta t(\eta, \rho_0), \rho] - \eta[\Delta t(\eta, \rho_0), \rho_0]}{\eta[\Delta t(\eta, \rho_0), \rho_0]}. \quad (9)$$

После подстановки выражений (7), (8) в формулу (9) получим

$$\delta\eta(\rho, \eta) = -\frac{1}{2} + f_\rho(\rho, \eta) + \sqrt{\left[\frac{1}{2} + f_\rho(\rho, \eta) \right]^2 - 2f_\rho(\rho, \eta)}, \quad (10)$$

$$\text{где } f_\rho(\rho, \eta) = \frac{b_m R \mu d^2 \rho}{2 b_\eta^2 (x_0 - x^0) \eta^2} \rho.$$

Зависимость (10) представлена на рис. 2 для значений плотности 900, 1000 и 1100 кг/м³ при теоретическом 0,67 и экспериментальном 3,3 значениях коэффициента b_m [5]. Для построения кривых использованы значения, известные

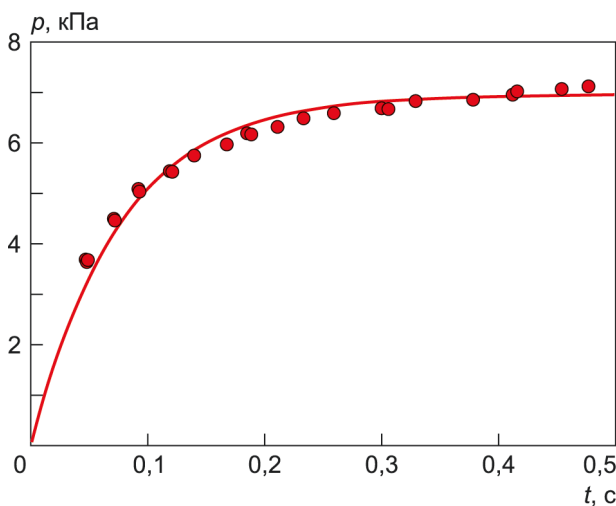


Рис. 3. График изменения давления p перед отверстием истечения струи газа после открытия электромагнитного клапана (установившееся значение 7,2 кПа)

Fig. 3. The graph of change in pressure p upstream of DO after solenoid valve opening (steady state value 7.2 kPa)

из эксперимента: $b_\eta = 6$; $R = 5$ мм; $x_0 = 20,5$ мм; $x^0 = 7,2$ мм; $\mu = 0,68$; $d = 0,89$ мм; $p = 5,5$ кПа. Можно наблюдать, что плотность ρ влияет на результаты измерений сильнее вязкости, если $\eta < 0,2$ и $0,5$ Па·с соответственно при $b_m = 0,67$ и $3,30$. Применение рассматриваемого импульсного аэрогидродинамического метода для измерений меньшей вязкости нецелесообразно. Диапазон $0,2$ – $0,5$ Па·с представляет собой теоретическую оценку нижнего предела измерений.

Экспериментальная часть. Подробное описание установки для экспериментальных исследований модели измерений вязкости бесконтактным аэрогидродинамическим методом представлено в работах [5, 6]. Конструктивные параметры установки (см. рис. 1) совпадают с указанными выше расчётными данными: диаметр $d = 0,89$ мм; коэффициент расхода $\mu = 0,68$; давление $p = 5,45$ кПа; угол падения луча лазерного диода на поверхность жидкости $\phi = 60^\circ$. Эксперименты проведены для двух значениях угла струйного воздействия: при $\alpha = 20^\circ$ выбраны значения $H = 10,3$ мм; $x^0 = 7,2$ мм; $x_0 = 20,5$ мм; при $\alpha = 50^\circ$ – значения $H = 16,7$ мм; $x^0 = 4,4$ мм; $x_0 = 17,3$ мм. Радиус углубления составил $R = 5,0$ и $4,5$ мм при $\alpha = 20^\circ$ и 50° соответственно.

В экспериментах использованы стандартные образцы вязкости Brookfield и жидкости, действительные значения η_0 вязкости которых получены при помощи калиброванного вискозиметра Брукфильда [28]. Все исследования проводили при температуре жидкостей $(25,0 \pm 0,1)^\circ\text{C}$. Интервалы Δt времени действия струи на поверхность жидкости определены по результатам многократных измерений.

В ходе измерений вязкости сжатый воздух поступает в струйную трубку после открытия электромагнитного клапана, напряжение на обмотку которого подаёт блок управления [6, 25]. График изменения давления перед отверстием истечения после открытия клапана представлен на рис. 3. Зависимость $p(t)$ описана уравнением переходной характеристики апериодического звена первого порядка

$$p(t) = p_0(1 - \exp[-t/\tau_0]), \quad (11)$$

где $p_0 = 6,95$ кПа – давление перед отверстием истечения в установившемся режиме; $\tau_0 = 76$ мс – постоянная времени.

Максимальное абсолютное отклонение экспериментальных данных от аппроксимирующей функции (11) составляет $0,47$ кПа, среднее квадратическое отклонение – $0,2$ кПа, относительная погрешность аппроксимации – $3,6\%$. Аperiодический переходной процесс нарастания давления перед отверстием истечения обусловлен инерционностью срабатывания электромагнитного клапана, заполнением объёма соединительных и струйной трубок.

Время действия струи на поверхность контролируемой жидкости пропорционально её вязкости [6]. Поэтому из рис. 3 следует, что средняя интенсивность струйного воздействия уменьшается с уменьшением вязкости. С целью линеаризации действительной функции измерений бесконтактного аэрогидродинамического вискозиметра в ходе экспериментов сделана попытка компенсировать изменение давления. В процессе измерения вязкости давление

определяется с периодом 3 мс преобразователем давления типа MPX5010DP (Motorola Inc., США). При отсутствии компенсации изменения давления заданное значение 5,45 кПа регулируется редукционным клапаном в установившемся режиме при открытом электромагнитном клапане [6]. При компенсации изменения давления его среднее значение за время Δt действия газовой струи равно заданному 5,45 кПа. Регулировка выполняется для каждой жидкости индивидуально в зависимости от её вязкости.

Результаты и их обсуждение. В табл. 1 представлены результаты аппроксимации уравнениями (3), (4) действительных моделей измерений бесконтактного аэрогидродинамического устройства для измерений вязкости. В экспериментах использовано 17 жидкостей с разной вязкостью в диапазоне 0,1–101,8 Па·с. Диапазон аппроксимации составляет 0,5–101,8 Па·с, так как при меньшей вязкости наблюдается большее отклонение экспериментальных данных от моделей измерений. Для повышения точности аппроксимации в уравнения (3), (4) введена постоянная τ :

$$\Delta t(\eta) = \tau + \frac{b_{\eta} R \eta (x_0 - x^0)}{\mu d^2 p} + \frac{b_m R^2 p}{b_{\eta} \eta}; \quad (12)$$

$$\Delta t(\eta) = \tau + \frac{b_{\eta} R \eta (x_0 - x^0)}{\mu d^2 p}. \quad (13)$$

Задержка времени τ обусловлена совокупностью факторов: переходным процессом нарастания давления перед отверстием истечения (см. рис. 3), формированием углубления до начала его движения по поверхности жидкости, ускорением присоединённой массы углубления [5]. Использование высокого экспериментального значения коэффициента присоединённой массы углубления $b_m = 3,3$ в уравнении (12) позволяет значительно снизить постоянную τ , но не довести её до нуля (см. табл. 1). Несмотря на это, теоретическое значение $b_m = 0,67$ обеспечивает меньшую погрешность определения вязкости.

На рис. 4 представлены экспериментальные данные и модели измерений вязкости (12), (13) бесконтактным аэрогидродинамическим методом в диапазоне

0,1–1,0 Па·с. В уравнениях (12), (13) использованы коэффициенты из табл. 1, соответствующие диапазону исследования 0,5–101,8 Па·с. При аппроксимации экспериментальных данных уравнением (12) использованы действительные значения плотности жидкостей. По этой причине линии 3, 4 (см. рис. 4) ломаные. Погрешности измерений вязкости в табл. 1 определены как отклонение функции измерений (5) от действительных значений вязкости. В функции (5) использованы коэффициенты b_m , b_{η} из табл. 1, среднее значение плотности $\rho_0 = 1000 \text{ кг/м}^3$ и учтена постоянная τ .

Таблица 1

Результаты аппроксимации действительной модели измерений уравнениями (3), (4)

Модель измерений	Компенсация давления	τ , мс	b_m	b_{η}	$\delta\eta$, %	
					$\eta < 1 \text{ Па} \cdot \text{с}$	$\eta \geq 1 \text{ Па} \cdot \text{с}$
$\alpha = 20^\circ$						
(4), (13)	Нет	65,5	0	6,17	2,7	1,1
	Да	40,8	0	6,13	3,3	2,3
(3), (12)	Да	35,8	0,67	6,17	2,8	1,9
		20,0	3,30	6,21	5,5	5,0
$\alpha = 50^\circ$						
(4), (13)	Нет	58,8	0	5,79	2,3	7,0
	Да	31,0	0	5,76	3,8	7,2

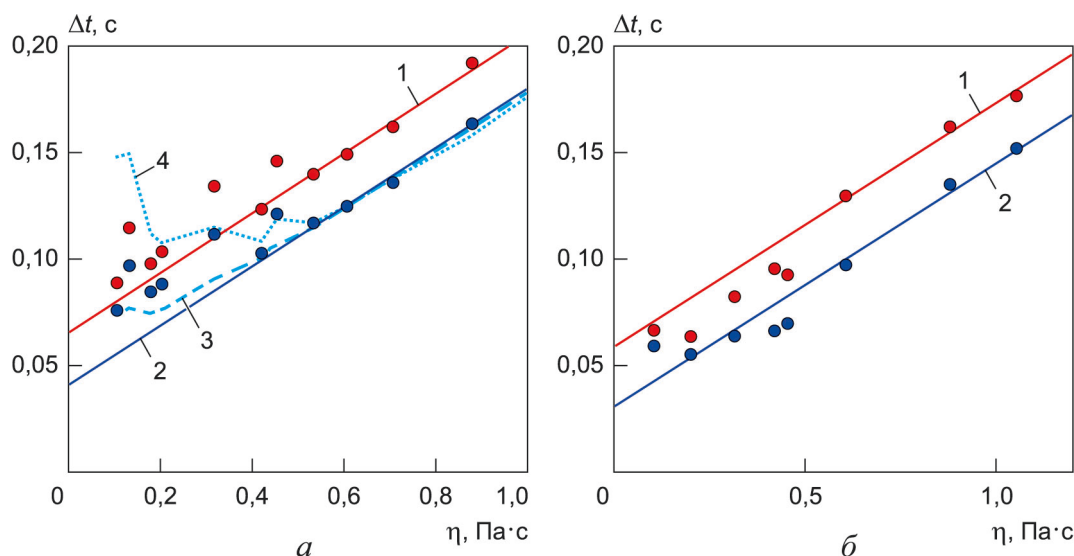


Рис. 4. Модели измерений вязкости бесконтактным аэрогидродинамическим методом при углах аэродинамического воздействия 20° (а) и 50° (б):

•, • – экспериментальные данные без компенсации изменения давления и с компенсацией, соответственно; 1, 2 – расчёт по уравнению (13) с использованием данных без компенсации давления и с компенсацией соответственно; 3, 4 – расчёт по уравнению (12) при компенсации давления и $b_m = 0,67$ и $3,3$ соответственно

Fig. 4. The viscosity measurement models for the non-contact aerohydrodynamic method in cases of the aerodynamic action angle α values are equal to 20° (a) and 50° (b):

points •, • are the experimental data without and with the compensation of change in pressure, respectively; lines 1 and 2 are the equations (13) described the data without and with the pressure compensation, respectively; lines 3 and 4 are the equations (12) described the data with the pressure compensation for the values of b_m coefficient are equal 0.67 and 3.3, respectively

Таблица 2

Результаты экспериментального определения погрешности измерений вязкости бесконтактным аэрогидродинамическим устройством

Жидкость	η_0 , Па·с	ρ_0 , кг/м ³	$\alpha = 20^\circ$				$\alpha = 50^\circ$			
			Δt , с	η , Па·с	$\Delta \eta$, Па·с	$\delta \eta$, %	Δt , с	η , Па·с	$\Delta \eta$, Па·с	$\delta \eta$, %
Масло моторное М-8В	0,106±0,001	900	0,089	0,17	0,06	58,8	0,066	0,07	-0,04	37,3
Раствор коричневого сахара водный (65 %)	0,132±0,002	1340	0,115	0,35	0,22	165,7	—	—	—	—
Масло моторное SAE 5W-40	0,179±0,001	850	0,098	0,23	0,05	29,7	—	—	—	—
Масло моторное SAE 10W-40	0,202±0,002	860	0,103	0,27	0,07	33,7	0,064	0,05	-0,16	77,1
Глицериновая смесь (95 %)	0,316±0,003	1250	0,134	0,49	0,17	54,8	0,082	0,21	-0,11	35,1
Масло трансмиссионное ТСп-15К	0,421±0,003	910	0,124	0,42	-0,01	1,3	0,096	0,32	-0,10	23,3
Глицериновая смесь (96 %)	0,454±0,003	1250	0,146	0,58	0,12	26,7	0,093	0,30	-0,16	34,3
Масло трансмиссионное SAE 80W-90	0,532±0,004	890	0,140	0,53	0,00	0,0	—	—	—	—
Масло компрессорное KC-19	0,607±0,005	900	0,150	0,60	-0,01	1,2	0,130	0,62	0,01	1,6
Масло касторовое DAB-10	0,708±0,003	957	0,162	0,69	-0,02	2,6	—	—	—	—
Масло трансмиссионное ТАп-15В	0,880±0,005	930	0,192	0,90	0,02	2,7	0,162	0,90	0,02	2,3
Глицерин	1,055±0,015	1260	0,214	1,06	0,01	0,5	0,177	1,03	-0,02	2,2
Масло трансмиссионное ТЭп-15	2,72±0,02	950	0,448	2,73	0,01	0,4	0,371	2,72	0,00	0,2
Масло трансмиссионное автотракторное по ГОСТ 542-50 (Nigrol)	3,84±0,06	950	0,607	3,87	0,03	0,7	0,496	3,82	-0,02	0,7
СО Brookfield 12500	12,20±0,12	970	1,76	12,08	-0,13	1,0	1,36	11,36	-0,84	6,9
Эпоксидная смола ЭД-20	26,1±0,3	1160	3,75	26,3	0,2	0,8	3,26	27,9	1,8	7,0
СО Brookfield 100000	101,8±1,0	970	14,47	102,9	1,1	1,1	10,95	95,0	-6,7	6,6

Из анализа уравнений (12), (13) и рис. 4, а, следует, что при любом $b_m \neq 0$ функция (12) отклоняется от функции (13) в сторону больших значений времени Δt при малых значениях вязкости η . С учётом этого аппроксимация экспериментальных данных для аэродинамического воздействия под углом $\alpha = 50^\circ$ уравнением (12) не выполнялась, так как большинство точек на графиках рис. 4, б лежат ниже линии, соответствующей уравнению (13). Из анализа экспериментальных данных для аэродинамического воздействия под углом $\alpha = 20^\circ$ при отсутствии компенсации изменения давления также следует, что нецелесообразно аппроксимировать эти данные уравнением (12).

В табл. 2 (где СО – стандартный образец) представлены действительные значения η_0 вязкости и значения η , вычисленные по функции измерений (6) с использованием интервала времени $\Delta t - \tau$ (Δt получен путём усреднения результатов многократных измерений; τ , b_η взяты из табл. 1 для случая отсутствия компенсации изменения давления); значения плотности ρ_0 (табличные, указанные в сопроводительной документации производителей жидкостей и полученные в результате измерений плотности пикнометрическим методом); результаты экспериментального определения погрешности измерений вязкости бесконтактным аэрогидродинамическим устройством при $\alpha = 20^\circ$ и 50° . О степени влияния плотности на результаты измерений вязкости можно судить по значениям ρ_0 в совокупности со знаком абсолютной погрешности $\Delta \eta$ и модулем относительной $\delta \eta$.

Из рис. 4 и табл. 2 следует, что существенное уменьшение точности измерений вязкости наблюдается при $\eta < 0,5$ Па·с. Это значение целесообразно принять в качестве нижнего предела измерений. Оно соответствует теоретической оценке нижнего предела для экспериментального значения коэффициента $b_m = 3,3$ (см. рис. 2).

Уменьшение точности измерений вязкости на нижнем пределе обусловлено влиянием плотности контролируемой жидкости посредством изменения присоединённой массы углубления (см. уравнение (1)). Согласно рис. 4, а использование экспериментального значения $b_m = 3,3$ в диапазоне $\eta = 0,3 \dots 0,5$ Па·с позволяет с относительной погрешностью не более 6 % описать зависимость $\Delta t(\eta)$ с применением действительных значений плотности контролируемой жидкости. Однако при использовании функции измерений вида (5) с теми же параметрами аппроксимации τ , b_m , b_η и средним значением плотности $\rho_0 = 1000$ кг/м³ в том же диапазоне η погрешность измерения вязкости возрастёт до 37 %. При этом одно из значений вязкости не представляется возможности вычислить по причине отрицательного значения подкоренного выражения в функции (5).

Влияние плотности контролируемой жидкости возрастает при больших значениях вязкости и угле аэродинамического воздействия $\alpha = 50^\circ$ (см. табл. 2, три нижних строки). Такая особенность метода измерений обусловлена тем, что с увеличением угла аэродинамического воздействия увеличивается отношение высоты углубления на поверхности жидкости к расстоянию x_0 , на которое перемещается углубление. Высота углубления связана

с действующей на него выталкивающей силой и, таким образом, с плотностью жидкости. Перемещение углубления в горизонтальном направлении на расстояние x_0 сопровождается действием силы вязкого трения. Поэтому увеличение угла аэродинамического воздействия приводит к усилению влияния плотности на результаты измерений вязкости.

Действие выталкивающей силы не учитывается в моделях измерений (3), (4). Для угла $\alpha=20^\circ$ учитывать это действие не имеет смысла, так как изменение плотности контролируемой жидкости не оказывает ярко выраженного влияния на результаты измерений вязкости при высоких значениях этой величины. Несмотря на это, в дальнейших исследованиях целесообразно увеличить угол аэродинамического воздействия до величины 30° . Это позволит увеличить расстояние H от отверстия истечения до поверхности жидкости и, возможно, линеаризовать действительную модель измерений на нижнем пределе. Согласно рис. 4 при $\alpha=20^\circ$ экспериментальные данные отклоняются от модели измерений (13) в сторону больших значений времени Δt , а при $\alpha=50^\circ$ – в сторону меньших. При угле $\alpha=30^\circ$ описание действительной модели измерений функцией (13) будет более точным.

Точность измерений малых значений вязкости повышена по сравнению с результатами работы [6] за счёт уменьшения погрешности измерений среднего значения давления p путём уменьшения с 23 до 3 мс периода опроса преобразователя давления. При этом для всего диапазона используется одна функция измерений (13), а не две, как в работе [6].

Заключение. Бесконтактный импульсный аэрогидродинамический метод измерений вязкости жидкостей с наклонным аэродинамическим воздействием позволяет контролировать вязкость в диапазоне 0,5–100 Па·с с относительной погрешностью не более 3 % при изменении плотности в диапазоне 900–1300 кг/м³. По результатам экспериментальных исследований метода относительная погрешность измерений вязкости в диапазоне 1–100 Па·с составила не более 1,1 %. Указанный верхний предел 100 Па·с связан с набором используемых в экспериментальных исследованиях жидкостей и теоретических ограничений не имеет. Нижний предел 0,5 Па·с обусловлен усилением влияния плотности контролируемой жидкости на результаты измерений вязкости и может быть уменьшен при увеличении с 20° до 30° угла аэродинамического воздействия.

В диапазоне 0,5–100 Па·с для вычисления вязкости по времени деформации поверхности контролируемой жидкости газовой струей используется единственная линейная функция измерений. Более сложную функцию измерений, учитывающую ускорение присоединённой массы углубления при импульсном воздействии газовой струи на поверхность контролируемой жидкости, применять нецелесообразно, так как это не приводит к повышению точности измерений. Также не имеет смысла компенсировать изменения давления перед отверстием истечения газовой струи в момент открытия клапана. Результаты измерений вязкости без компенсации изменения давления отличаются меньшей погрешностью.

Список источников / References

1. Домостроев А. В., Демьянов А. А., Клим О. В., Юдченко Д. А. Сравнительные исследования поточных вибрационных вискозиметров нефти // Измерительная техника. 2013. № 3. С. 62–66 [Domostroeov A. V., Dem'yanov A. A., Klim O. V., Yudchenko D. A., *Measurement. Techniques*, 2013, vol. 56, no. 3, pp. 337–343. <https://doi.org/10.1007/s11018-013-0206-1>]
2. Соломин Б. А., Черторийский А. А., Конторович М. Л., Низаметдинов А. М. Аппаратно-программный комплекс для оперативного исследования теплофизических свойств жидкости // Измерительная техника. 2014. № 3. С. 49–52. [Solomin B. A., Chertoriiskii A. A., Kontorovich M. L., Nizametdinov A. M., *Measurement. Techniques*, 2017, vol. 57, no. 3, pp. 312–317. <https://doi.org/10.1007/s11018-014-0451-y>]
3. Chaudhary K., Munjal P., Singh K. P., *Sci. Rep.*, 2021, vol. 11, no. 14365. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-93729-0>
4. Banks R. B., Chandrasekhara D. V., *J. Fluid Mech.*, 1963, vol. 15, part 1, pp. 13–34. <https://doi.org/10.1017/S0022112063000021>
5. Савенков А. П., Сычёв В. А. Исследование реакции поверхности жидкости на импульсное воздействие наклонной газовой струи при малых числах Рейнольдса // Журнал технической физики. 2022. Т. 92. Вып. 2. С. 216–224. <https://doi.org/10.21883/JTF.2022.02.52010.251-21> [Savenkov A. P., Sychev V. A., *Tech. Phys.*, 2022, vol. 92, no. 2, pp. 183–190. <https://doi.org/10.21883/TP.2022.02.52944.251-21>]
6. Савенков А. П., Мордасов М. М., Сычёв В. А. Бесконтактное пневмоэлектрическое устройство для измерений вязкости жидкостей // Измерительная техника. 2020. № 9. С. 43–49. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2020-9-43-49> [Savenkov A. P., Mordasov M. M., Sychev V. A., *Measurement Techniques*, 2020, vol. 63, no. 9, pp. 722–728. <https://doi.org/10.1007/s11018-021-01845-0>]
7. Herlach D. M., Cochrane R. F., Egry I., Fecht H. J., Greer A. L., *Int. Mater. Rev.*, 1993, vol. 38, no. 6, pp. 273–347. <https://doi.org/10.1179/095066093790326267>
8. Li L. H., Hu L., Yang S. J., Wang W. L., Wei B., *J. Appl. Phys.*, 2016, vol. 119, no. 035902. <https://doi.org/10.1063/1.4940243>
9. Xue S., Dong W., Chen D., Guo Q., He H., Yu J., *Rev. Sci. Instrum.*, 2021, vol. 92, no. 065111. <https://doi.org/10.1063/5.0026974>
10. Beckers M., Engelhardt M., Schneider S., *High Temp. – High Press.*, 2021, vol. 50, no. 3, pp. 167–184. <https://doi.org/10.32908/hthp.v50.1031>
11. Langstaff D., Gunn M., Greaves G. N., Marsing A., Kargl F., *Rev. Sci. Instrum.*, 2013, vol. 84, no. 124901. <https://doi.org/10.1063/1.4832115>
12. Kremer J., Kilzer A., Petermann M., *Rev. Sci. Instrum.*, 2018, vol. 89, no. 015109. <https://doi.org/10.1063/1.4998796>
13. Sohl C. H., Miyano K., Ketterson J. B., *Rev. Sci. Instrum.*, 1978, vol. 49, no. 10, pp. 1464–1469. <https://doi.org/10.1063/1.1135288>
14. Behroozi F., Smith J., Even W., *Am. J. Phys.*, 2010, vol. 78, no. 11, pp. 1165–1169. <https://doi.org/10.1119/1.3467887>
15. Koller T. M., Kerscher M., Fröba A. P., *J. Colloid Interface Sci.*, 2022, vol. 626, pp. 899–915. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2022.06.129>

16. Nishimura Y., Hasegawa A., Nagasaka Y., *Rev. Sci. Instrum.*, 2014, vol. 85, no. 044904, 11 p.
<https://doi.org/10.1063/1.4871992>
17. Eguchi M., Taguchi Y., Nagasaka Y., *Opt. Express*, 2018, vol. 26, no. 26, pp. 34070–34080.
<https://doi.org/10.1364/OE.26.034070>
18. Taylor M. A., Kijas A. W., Wang Z., Lauko J., Rowan A. E., *Biomed. Opt. Express*, 2021, vol. 12, no. 10, pp. 6259–6268.
<https://doi.org/10.1364/BOE.435869>
19. Postnov D. D., Moller F., Sosnovtseva O., *PLoS ONE*, 2018, vol. 13(9), e0203141. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0203141>
20. Chan J., Raghunath A., Michaelsen K. E., Gollakota S., *Proc. ACM Interact. Mob. Wearable Ubiquitous Technol.*, 2022, vol. 6, no. 1, pp. 3:1–3:27. <https://doi.org/10.1145/3517256>
21. Verma G., Yadav G., Saraj C. S., Li L., Miljkovic N., Delville J. P., Li W., *Light: Sci. Appl.*, 2022, vol. 11, no. 115.
<https://doi.org/10.1038/s41377-022-00796-7>
22. Yoshitake Y., Mitani, S., Sakai, K., Takagi, K., *J. Appl. Phys.*, 2005, vol. 97, no. 024901. <https://doi.org/10.1063/1.1839640>
23. Shimokawa Y., Sakai K., *Phys. Rev. E*, 2013, vol. 87, no. 063009. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.87.063009>
24. Гализдра В. И., Мордасов М. М. Двухфазная система «струя газа – жидкость» в измерении вязкости жидких сред // Вестник ТГТУ. 1999. Т. 5. № 2. С. 218–227. [Galizdra V. I., Mordasov M. M., Dvuhfaznaya sistema “struya gaza – zhidkost” v izmerenii vyazkosti zhidkih sred, *Transactions TSTU*, 1999, vol. 5, no. 2, pp. 218–227. (In Russ.)]
25. Гребенникова Н. М., Мордасов М. М. Пневматический метод контроля вязкости жидкостей // Вестник ТГТУ. 2005. Т. 11. № 1А. С. 81–87 [Grebennikova N. M., Mordasov M. M., Pnevmaticheskiy metod kontrolya vyazkosti zhidkostej, *Transactions TSTU*, 2005, vol. 11, no. 1A, pp. 81–87. (In Russ.)]
26. Мордасов М. М., Савенков А. П., Сафонова М. Э., Сычев В. А. Бесконтактное триангуляционное измерение расстояния до зеркальных поверхностей // Автометрия. 2018. Т. 54. № 1. С. 80–88. <https://doi.org/10.15372/AUT20180111> [Mordasov M. M., Savenkov A. P., Safonova M. E., Sychev V. A., *Optoelectron. Instrum. Data Process.*, 2018, vol. 54, no. 1, pp. 69–75. <https://doi.org/10.3103/S8756699018010119>]
27. Mishchenko S. V., Mordasov M. M., Savenkov A. P., Safonova M. E., Sychev V. A., *Advanced Materials & Technologies*, 2019, no. 3(15), pp. 50–55.
<https://doi.org/10.17277/amt.2019.03.pp.050-055>
28. Мищенко С. В., Мордасов М. М., Савенков А. П., Сычев В. А. Исследования влияния размеров сосуда с жидкостью на показания вискозиметра Брукфильда // Измерительная техника. 2020. № 4. С. 33–38. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2020-4-33-38> [Mischenko S. V., Mordasov M. M., Savenkov A. P., Sychev V. A., *Measurement Techniques*, 2020, vol. 63, no. 4, pp. 288–294. <https://doi.org/10.1007/s11018-020-01784-2>]

Статья поступила в редакцию 03.08.2022; одобрена после рецензирования 01.09.2022; принята к публикации 03.09.2022.
The article was submitted 03.08.2022; approved after reviewing 01.09.2022; accepted for publication 03.09.2022.