

Бесконтактное пневмоэлектрическое устройство для измерений вязкости жидкостей

А. П. Савенков, М. М. Мордасов, В. А. Сычёв

Тамбовский государственный технический университет, Тамбов, Российская Федерация,
e-mail: savencow@yandex.ru, mmm-tmb@rambler.ru, flyholand@mail.ru

Приведён обзор бесконтактных методов измерения вязкости жидкостей. Рассмотрены бесконтактные аэрогидродинамические методы, позволяющие с высокой точностью определять вязкость неоднородных и непрозрачных жидкостей в диапазоне 2–100 Па·с. Описан наиболее перспективный, но недостаточно развитый бесконтактный импульсный аэрогидродинамический метод, который заключается в деформации поверхности контролируемой жидкости струёй газа и определении вязкости по времени достижения заданной степени деформации с момента подачи газовой струи. Для измерений вязкости разработано бесконтактное аэрогидродинамическое устройство с лазерным триангуляционным детектором поверхности жидкости, применение которого позволило полностью автоматизировать прибор и значительно повысить точность измерений вязкости. Исследованы четыре возможных варианта реализации устройства. Выбран наиболее перспективный вариант с точки зрения повышения точности измерений и уменьшения чувствительности устройства к влияющим величинам. Описаны конструкция и принцип работы устройства. Исследовано влияние конструктивных параметров устройства на систематическую и случайную составляющие погрешности измерений. Получена относительная погрешность измерений вязкости жидкостей в диапазоне 2–100 Па·с не более 2 %. Разработанное бесконтактное аэрогидродинамическое устройство целесообразно использовать для контроля вязких жидкостей в различных отраслях промышленности.

Ключевые слова: аэрогидродинамический метод, бесконтактный метод, вязкость, газ, жидкость, поверхность, струя, триангуляционный детектор.

Введение. Одним из важных физических свойств жидкости является вязкость, по которой оценивают качество многих продуктов, а также технологических процессов в различных отраслях промышленности. Контроль свойств вязких жидкостей представляет собой непростую задачу, решение которой требует значительных временных затрат на заполнение измерительных ёмкостей, удаление газовых пузырьков и очистку измерительных инструментов. Последнюю операцию часто выполняют с применением токсичных и пожароопасных веществ. Существенно облегчить задачу контроля вязких жидкостей позволяют бесконтактные методы и устройства. К бесконтактным методам измерений вязкости жидкостей относятся волновые, оптические, аэрогидродинамические, а также методы на основе капиллярных волн и левитирующей капли [1].

Методы на основе капиллярных волн традиционно используют для измерения свойств жидкостей, поверхность которых покрыта плёнками поверхностно активных веществ [2]. Капиллярные волны формируются за счёт механических колебаний сосуда с контролируемой жидкостью или под воздействием электрического поля, акустической волны, струи газа [2–4].

Основными недостатками методов на основе капиллярных волн являются влияние плотности контролируемой жидкости на результаты измерений и трудности при контроле жидкостей с вязкостью более 0,1 Па·с в связи с сильным затуханием капиллярных волн. В отдельную группу выделяют методы, основанные на определении свойств жидкостей по параметрам рассеяния света на поверхностных капиллярных волнах, создаваемых тепловыми колебаниями молекул [5, 6]. В связи с малой длиной волны верхний предел измерений устройств, реализующих эти методы, не превышает 10 мПа·с.

Бесконтейнерные методы левитирующей капли имеют специфическую область применения – исследование свойств расплавов в переохлаждённом метастабильном состоянии [7]. Для отрыва капли исследуемого вещества от опоры используют электростатическую, электромагнитную, аэродинамическую и акустическую левитации [8–12]. Эти методы рекомендуется использовать в условиях невесомости. Для обычных жидкостей, находящихся в сосудах, их применение лишено смысла.

Акустические и сверхвысокочастотные (СВЧ) методы измерений вязкости основаны на изменении характеристик

волны, прошедшей через слой контролируемого вещества [1, 13]. Такие методы могут быть отнесены к бесконтактным в случае, если не производится врезка в технологический аппарат или трубопровод, а передача волн к контролируемой жидкости осуществляется через их стенки [14]. Большое количество факторов, влияющих на результаты, и сложный характер их влияния значительно повышает неопределённость измерений вязкости волновыми методами [1].

Подобный недостаток характерен также для оптических корреляционных методов и методов на основе термокапиллярной конвекции [15, 16].

Получить достоверную информацию о вязкости в диапазоне от нескольких десятых долей до сотен паскаль-секунд позволяют бесконтактные методы, при реализации которых поверхность контролируемой жидкости деформируется под воздействием лазерного излучения или струи газа [17–19]. В оптических методах измеряется вязкость нанометрового поверхностного слоя. Свойства этого слоя из-за загрязнений могут значительно отличаться от свойств контролируемой жидкости в объёме. В аэрогидродинамических методах измеряется вязкость слоя жидкости толщиной несколько миллиметров. К другим преимуществам аэродинамических методов относятся простота реализации и меньшее влияние плотности и поверхностного натяжения контролируемой жидкости на результаты измерений вязкости.

Наиболее перспективным из аэрогидродинамических является импульсный метод с наклонным струйным воздействием, так как он позволяет существенно упростить определение степени деформации контролируемой жидкости газовой струей с использованием аэродинамических или оптических чувствительных элементов [20, 21]. С помощью оптических триангуляционных детекторов дополнительно можно контролировать расстояние до исследуемой жидкости [22]. Это обеспечивает возможность точной установки элементов измерительного устройства на заданном расстоянии над поверхностью жидкости, что необходимо для повышения точности измерений вязкости [23].

Цель настоящей работы – описать принцип работы бесконтактного импульсного аэрогидродинамического устройства для измерений вязкости с дифференциальным лазерным триангуляционным детектором расстояния до поверхности контролируемой жидкости, проанализировать различные варианты конструкции устройства и оценить его метрологические характеристики.

Аэрогидродинамический метод и устройство для измерений вязкости жидкостей. На рис. 1 представлена схема бесконтактного устройства для измерений вязкости жидкостей. Над поверхностью контролируемой жидкости, находящейся в сосуде, расположены основные элементы измерительного устройства: струйная трубка СТ с отверстием истечения ОИ газовой струи и триангуляционный детектор ТД с лазерным диодом ЛД типа TXL04 (Komoloff, Россия) и фотодиодами ФД1, ФД2 типа BPW34 (Vishay Intertechnology Inc., Германия). Принцип работы и схема триангуляционного детектора описаны в работе [23]. Схема усовершенствована, фоторезисторы заменены фотодиодами. Печатная плата ТД и трубка СТ закреплены на планке, которая механически связана с приводом П для её вертикального перемещения.

Сжатый воздух от линии пневматического питания подаётся в струйную трубку через редукционный клапан КР типа РДВ5М (завод «ТИЗПРИБОР», Россия), распределитель Р типа П1ПР.5 (завод «ТИЗПРИБОР», Россия) и ламинарный дроссель ДР. Давление p перед отверстием истечения

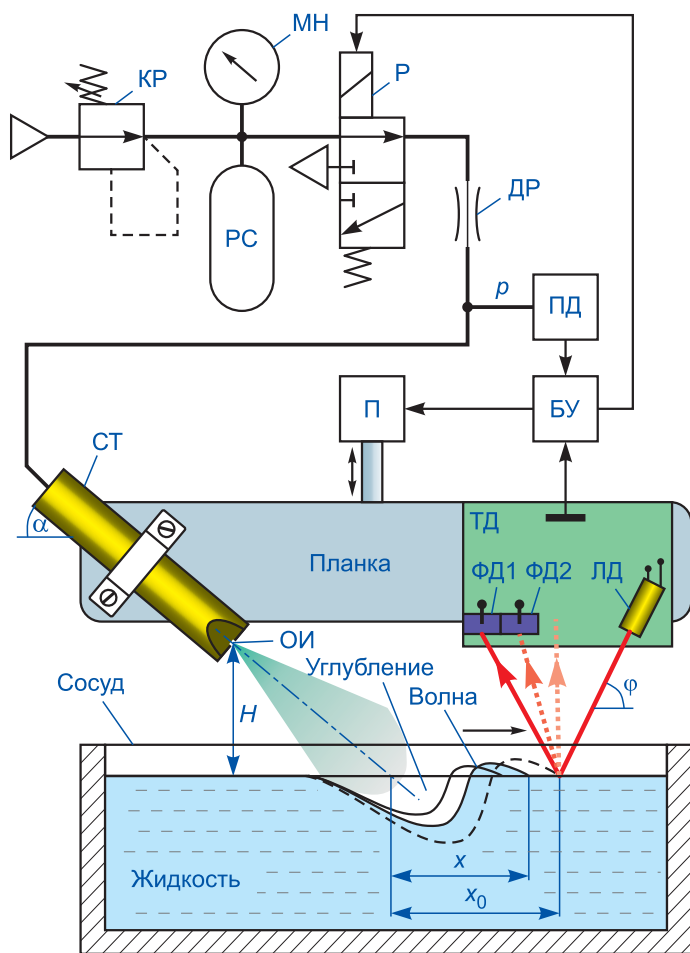


Рис. 1. Схема бесконтактного аэрогидродинамического устройства для измерений вязкости жидкостей:

СТ – струйная трубка; ФД1, ФД2 – фотодиоды; ЛД – лазерный диод; ОИ – отверстие истечения газовой струи; БУ – блок управления; ДР – ламинарный дроссель (пневматическое сопротивление); КР – клапан редукционный; МН – манометр; П – привод; ПД – преобразователь давления; Р – пневмораспределитель; РС – ресивер (50 мл); ТД – триангуляционный детектор

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

JT – jet tube; St – strip; FD1, FD2 – photodiodes; LD – laser diode; JO – jet outlet; CU – control unit; PR – laminar throttle (pneumatic resistance); PRV – pressure reducing valve; M – manometer; D – drive; SV – solenoid valve; RC – receiver (50 ml); TD – triangulation detector

регулируется с помощью клапана KP и контролируется по показаниям манометра MH типа М-1/4 и установленного непосредственно перед входом в CT калиброванного преобразователя давления $ПД$ типа MPX5010DP (Motorola Inc., США). Управление работой устройства реализуется блоком управления $БУ$ на базе микроконтроллера ATmega16A (Microchip Technology Inc., США).

В исходном положении планка с трубкой CT и детектором $ТД$ находится на сравнительно большом расстоянии до поверхности жидкости. Сигналы на выходе $ТД$ отсутствуют. По управляющему сигналу $БУ$ привод $П$ опускает планку и отверстие $ОИ$ устанавливается на заданном расстоянии H до поверхности контролируемой жидкости (алгоритм описан в работе [23]). Для уменьшения случайной погрешности установки отверстия истечения планка колеблется по вертикали в окрестности положения, при котором отражённый от поверхности жидкости лазерный луч попадает на границу поверхностей фотодиодов $ФД1$, $ФД2$. После установки измерительных элементов устройства в заданное положение луч $ЛД$, отражённый от поверхности жидкости, попадает в центр поверхности фотодиода $ФД1$.

Для измерения вязкости по сигналу блока $БУ$ открывается распределитель P и сжатый воздух через дроссель $ДР$ поступает в трубку CT . Отсчёт времени t действия газовой струи начинается в момент превышения давлением на входе преобразователя $ПД$ порогового значения 550 Па. Газовая струя, вытекающая из отверстия $ОИ$, формирует на поверхности жидкости углубление и волну. С течением времени объём углубления растёт, а волна перемещается по поверхности жидкости в направлении действия газовой струи со скоростью, зависящей от вязкости η контролируемой жидкости. В момент достижения волной точки падения луча лазерного диода $ЛД$ на поверхность жидкости отражённый луч изменяет направление распространения. Детектор $ТД$ последовательно формирует три состояния двух дискретных

выходных сигналов U_1 , U_2 : $U_1=1$, $U_2=0$ – отражённый луч попадает преимущественно на поверхность $ФД1$; $U_1=0$, $U_2=0$ – на поверхности $ФД1$, $ФД2$ поступают приблизительно одинаковые световые потоки; $U_1=0$, $U_2=1$ – больший световой поток попадает на поверхность $ФД2$. В блоке $БУ$ регистрируются моменты времени t_1 , t_2 среза сигнала U_1 и фронта сигнала U_2 соответственно. В момент времени t_2 $БУ$ формирует сигнал о прекращении подачи воздуха в трубку CT . Для определения вязкости жидкости используется среднее арифметическое t_{12} величин t_1 , t_2 . Давление p измеряется преобразователем $ПД$ в течение всего времени t_2 действия газовой струи на поверхность жидкости. Среднее значение p требуется для компенсации влияния изменений давления на результат измерения вязкости.

После выдержки времени, пропорциональной времени действия газовой струи и необходимой для восстановления поверхности жидкости до исходной плоской формы, измерение вязкости повторяется заданное количество раз для уменьшения влияния случайной составляющей погрешности на результаты измерений. На дисплей $БУ$ выводится значение вязкости, соответствующее среднему арифметическому результатов многократных измерений.

Выбор варианта реализации аэрогидродинамического устройства для измерений вязкости. Дифференциальный триангуляционный детектор ($ТД$) позволяет с погрешностью не более 0,1 мм определить заданное расстояние H_s^0 до поверхности жидкости (рис. 2, нулевое положение) [22, 23]. Однако в нулевом положении нецелесообразно измерять вязкость, поскольку к срабатыванию $ТД$ приводят малейшие изменения формы поверхности жидкости. Время деформации поверхности жидкости стремится к нулю, влияние плотности жидкости на результаты измерений становится соизмеримым с влиянием вязкости, увеличивается случайная составляющая погрешности (рис. 3). Для повышения помехозащищённости устройства перед подачей газовой струи

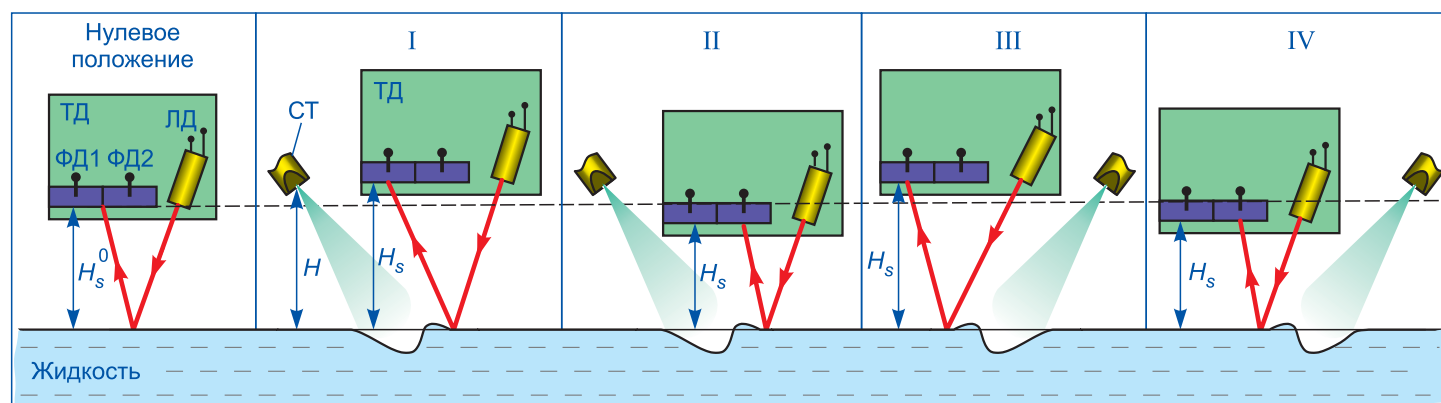


Рис. 2. Варианты I–IV реализации аэрогидродинамического устройства для измерений вязкости при противоположном (I, II) и совпадающем (III, IV) направлениях действия газовой струи и лазерного излучения; обозначения те же, что на рис. 1

Fig. 2. Variants I–IV of implementations of the aerohydrodynamic device for measuring viscosity in the opposite (I, II) and coincident (III, IV) directions of the gas jet and laser radiation actions; designations are the same as in fig. 1

необходимо переместить *ТД* выше или ниже относительно нулевого положения. В связи с этим возникают четыре варианта реализации устройства в зависимости от направлений действия газовой струи и лазерного излучения (см. рис. 2).

Вариант I. Направления действия лазерного излучения и газовой струи противоположны. Положение *ТД* определяется неравенством $H_s > H_s^0$. Достоинства: возможно использование двух интервалов времени t_1, t_2 ; слабое влияние расстояния H на результаты измерений; большое линейное перемещение углубления. Недостатков нет.

Вариант II. Направления действия лазерного излучения и газовой струи противоположны. Положение *ТД* определяется неравенством $H_s < H_s^0$. Достоинства: нет. Недостатки: возможно использование только одного интервала времени t_1 ; сильное влияние расстояния H на результаты измерений; малое линейное перемещение углубления.

Вариант III. Направления действия лазерного излучения и газовой струи совпадают. Положение *ТД* определяется неравенством $H_s > H_s^0$. Достоинства: слабое влияние расстояния H на результаты измерений; большое линейное

перемещение углубления. Недостатки: возможно использование только одного интервала времени t_1 .

Вариант IV. Направления действия лазерного излучения и газовой струи совпадают. Положение *ТД* определяется неравенством $H_s < H_s^0$. Достоинства: возможно использование двух интервалов времени t_1, t_2 . Недостатки: сильное влияние расстояния H на результаты измерений; малое линейное перемещение углубления.

Для экспериментальных исследований выбраны варианты I, III и IV, вариант реализации устройства II не исследован ввиду его бесперспективности. Конструктивные параметры устройства (см. рис. 1): угол струйного воздействия на поверхность жидкости $\alpha = 20^\circ$; расстояние от отверстия истечения до поверхности жидкости $H = 10,3$ мм; диаметр отверстия истечения $d = 0,89$ мм; коэффициент расхода отверстия $\mu = 0,68$; давление перед отверстием истечения $p = 5,45$ кПа.

Параметры *ТД*: угол $\varphi = 60^\circ$; расстояние $H_s^0 = 8$ мм. Конструктивно предусмотрено горизонтальное перемещение *ТД* для изменения расстояния x_0 , которое волна проходит по поверхности жидкости до достижения точки падения на неё лазерного луча. Для вариантов I, III, IV соответственно выбраны значения $x_0 = 20,5; 20,5; 15,5$ мм, которые обеспечивают максимальное перемещение x волны по поверхности жидкости при стабильной работе устройства. Увеличивать перемещение волны необходимо для уменьшения влияния плотности и поверхностного натяжения контролируемой жидкости на результаты измерений вязкости, так как влияние вязкости на происходящие процессы наиболее сильно проявляется при перемещении волны.

На рис. 3, а представлены зависимости времени t_1 деформации поверхности жидкости от положения *ТД* для случая совпадения направлений действия газовой струи и лазерного излучения (варианты III, IV). В ходе экспериментов одновременно изменяли расстояния H_s, H (см. рис. 1). Расстояние H соответствовало заданному значению 10,3 мм только в двух точках при $H_s - H_s^0 = \pm 2,5$ мм. Одновременно с изменением расстояний H_s, H горизонтально перемещали *ТД*, что обеспечивало сохранение постоянных заданных значений $x_0 = 20,5; 15,5$ мм для вариантов III, IV соответственно. В качестве экспериментальной жидкости использована эпоксидная смола марки ЭД-20 вязкостью (30 ± 2) Па·с при температуре $(24,2 \pm 0,3)^\circ\text{C}$.

Из рис. 3, а следует, что *ТД* срабатывает значительно быстрее при падении отражённого луча лазерного диода на границы поверхностей фотодиодов (см. рис. 2), что соответствует следующим условиям:

$H_s - H_s^0 < -4$ мм, луч падает на правую границу поверхности фотодиода *ФД2* (вариант IV);

$H_s - H_s^0 \approx 0$, луч падает на границу поверхностей фотодиодов *ФД1, ФД2* (нулевое положение);

$H_s - H_s^0 > 4,5$ мм, луч падает на левую границу поверхности фотодиода *ФД1* (вариант III).

На рис. 3, б представлены зависимости коэффициента вариации v_t (относительного стандартного отклонения) интервалов времени t_1, t_2 и их среднего арифметического t_{12}

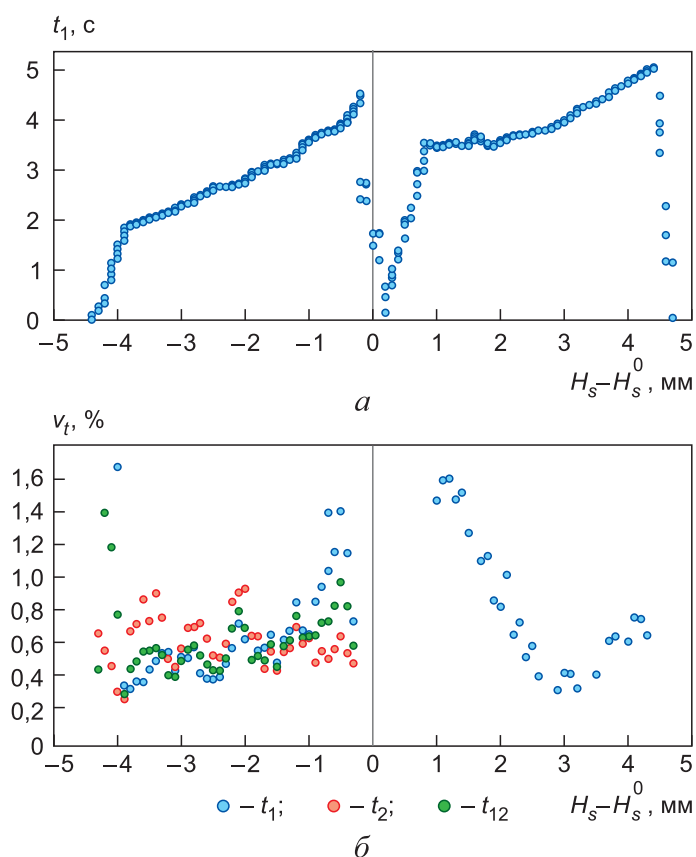


Рис. 3. Зависимости времени t_1 деформации поверхности жидкости (а) и коэффициентов вариации v_t временных интервалов (б) от положения триангуляционного детектора

Fig. 3. The dependence of the liquid surface deformation time t_1 (а) and the dependence of time intervals variation coefficients (б) on the position of the triangulation detector

от положения $TД$. Зависимости построены по тем же экспериментальным данным, что и рис. 3, а. Применено сглаживание данных скользящим средним. Коэффициент вариации представляет собой отношение среднего квадратического отклонения к среднему арифметическому, выраженное в процентах, и в рассматриваемом случае характеризует величину случайной составляющей погрешности измерений вязкости. Коэффициент вариации увеличивается при падении отражённого лазерного луча на границы поверхностей фотодиодов $TД$. Зависимости, аналогичные представленным на рис. 3, характерны и для других вариантов реализации устройства, в частности, для варианта I. Характер изменения величин t_1 , t_2 , t_{12} и v_t сохраняется при изменении угла α и расстояния H (см. рис. 1), так как в основном он определяется параметрами $TД$. По результатам исследований разных вариантов реализации устройства определено, что значение H_s целесообразно выбирать из диапазона $2,3 \text{ мм} < |H_s - H_s^0| < 2,5 \text{ мм}$. В этом интервале минимально влияние на результаты измерений как случайной составляющей погрешности, так и расстояния H от отверстия истечения газовой струи до поверхности жидкости.

Варианты I, IV реализации устройства позволяют фиксировать два интервала времени t_1 , t_2 деформации поверхности жидкости струёй газа, а вязкость определять по их среднему арифметическому t_{12} . Из рис. 3, б следует, что использование параметра t_2 вполне допустимо, так как коэффициент вариации для этого интервала времени ненамного больше коэффициента вариации интервала t_1 . Использование среднего арифметического t_{12} важно для уменьшения влияния показателя преломления контролируемой жидкости и внешнего освещения на результаты измерений. Указанные факторы оказывают влияние на ширину зоны нечувствительности $TД$ при равенстве световых потоков лазерного излучения, падающего на фотодиоды. При уменьшении показателя преломления и усилении внешнего светового потока ширина зоны нечувствительности увеличивается с уменьшением времени t_1 и увеличением времени t_2 . Среднее арифметическое t_{12} изменяется значительно слабее. Использование двух значений времени t_1 , t_2 также

позволяет уменьшить влияние расстояния H на результаты измерений, так как зависимости $t_1(H)$, $t_2(H)$ в окрестности заданного значения H частично компенсируют друг друга.

При выборе между вариантами I и IV реализации устройства предпочтение следует отдать варианту I (см. рис. 1, 2), так как при этом снижается влияние расстояния H , а также плотности и поверхностного натяжения контролируемой жидкости на результаты измерений вязкости. При одновременном изменении расстояний H , H_s на 0,1 мм выходной сигнал устройства изменяется на 0,5; 0,9; 2,7 % для вариантов реализации I, III, IV соответственно. Сильное влияние расстояний H , H_s при реализации варианта IV обусловлено тем, что при одинаковом абсолютном изменении расстояний (0,1 мм) во всех вариантах относительное изменение расстояния H_s для варианта IV оказывается значительно большим, чем для других вариантов реализации устройства.

Влияние плотности и поверхностного натяжения жидкости на результаты измерений, как указывалось ранее, связано с линейным перемещением углубления, наименьшим при варианте IV (15,5 мм против 20,5 мм для вариантов I, III). Уменьшение линейного перемещения в варианте IV связано с тем, что для срабатывания $TД$ необходима большая деформация поверхности контролируемой жидкости при меньшем расстоянии H_s . По мере перемещения волны по поверхности жидкости высота волны уменьшается, поэтому при больших значениях x лазерный луч отклоняется недостаточно для срабатывания $TД$ при $H_s < H_s^0$ (см. рис. 1, 2).

Таким образом наилучшим вариантом реализации устройства является вариант I.

Экспериментальное определение погрешности измерений вязкости бесконтактным аэрогидродинамическим устройством. Для варианта I реализации устройства экспериментально определены функции измерений вязкости и погрешности измерений. В экспериментах использованы стандартные образцы (СО) вязкости Brookfield и жидкости, действительные значения η_0 вязкости которых получены с помощью вискозиметра Брукфильда, калиброванного с использованием СО (таблица) [24]. Все исследования проводили при температуре жидкостей $(25,0 \pm 0,1)^\circ\text{C}$. Значения

Результаты экспериментального определения погрешности измерений вязкости бесконтактным аэрогидродинамическим устройством

Жидкость	η_0 , Па·с	t_{12} , с	$\eta = -0,294 + 6,950t_{12}$			$\eta = -0,14 + 6,76t_{12}$		
			η , Па·с	$\Delta\eta$, Па·с	δ_η , %	η , Па·с	$\Delta\eta$, Па·с	δ_η , %
Масло трансмиссионное ТСп-15К	0,421±0,003	0,106	0,443	0,022	5,2	0,577	0,156	37,0
Масло компрессорное КС-19	0,607±0,005	0,125	0,575	-0,032	5,3	0,705	0,098	16,1
Масло трансмиссионное ТАп-15В	0,880±0,005	0,166	0,860	-0,020	2,3	0,982	0,102	11,6
Глицерин	1,055±0,015	0,200	1,096	0,041	3,9	1,212	0,157	14,9
Масло трансмиссионное ТЭп-15	2,72±0,02	0,422	2,64	-0,08	3,0	2,71	-0,01	0,3
Масло трансмиссионное автотракторное* (Нигрол)	3,84±0,06	0,578	3,72	-0,12	3,0	3,77	-0,07	1,9
СО Brookfield 12500	12,20±0,12	1,860	12,6	0,4	3,5	12,4	0,2	1,9
Эпоксидная смола ЭД-20	26,1±0,3	3,850	26,5	0,4	1,4	25,9	-0,2	0,8
СО Brookfield 100000	101,8±1,0	15,000	104,0	2,2	2,2	101,3	-0,5	0,5

*Согласно ГОСТ 542-50 «Масло трансмиссионное автотракторное. Технические условия».

времени t_{12} действия струи на поверхность жидкости определены по результатам многократных измерений. Плотность жидкостей находится в диапазоне от 900 до 1300 кг/м³. Зависимость вязкости η от времени t_{12} аппроксимирована двумя линейными функциями $\eta = b_0 + b_1 t_{12}$, где $b_0 = -0,294$ Па·с, $b_1 = 6,95$ Па для невязких жидкостей ($\eta \leq 2$ Па·с) и $b_0 = -0,14$ Па·с, $b_1 = 6,76$ Па для вязких жидкостей ($\eta > 2$ Па·с). Результаты экспериментального определения погрешности измерений вязкости бесконтактным аэрогидродинамическим устройством приведены в таблице, полужирным шрифтом выделены значения, соответствующие применению различных функций измерений в указанных диапазонах, курсивным – значения, полученные при аппроксимации функцией для вязких жидкостей зависимости $\eta(t_{12})$ в диапазоне до 2 Па·с и отличающиеся высокой погрешностью. Из таблицы следует, что при использовании функции измерений для невязких жидкостей относительная погрешность δ_η составила не более 6 и 4 % в диапазонах 0,4–1,0 и 1–100 Па·с соответственно. Применение функции измерений для вязких жидкостей позволяет определять значения вязкости в диапазоне 2–100 Па·с с относительной погрешностью $\delta_\eta \leq 2$ %.

Заключение. Результаты экспериментальных исследований, представленные в настоящей работе, позволили сделать обоснованный выбор одного из вариантов реализации бесконтактного аэрогидродинамического устройства для измерений вязкости и оценить погрешность измерений. Рассмотренное устройство позволяет измерять вязкость жидкостей в диапазоне 2–100 Па·с с относительной погрешностью не более 2 % при изменении плотности от 900 до 1300 кг/м³. Преобладающей является мультипликативная погрешность измерений. Статическая характеристика линейна, близка к пропорциональной. Устройство целесообразно использовать для контроля вязких жидкостей, например при исследовании процесса отверждения смол.

В дальнейшем планируется выполнить математическое моделирование процесса взаимодействия струи газа с поверхностью жидкости и оптимизацию конструктивных и режимных параметров устройства для контроля невязких жидкостей. Такие исследования позволят определить нижний предел измерений и повысить их точность.

Список литературы

1. Мордасов М. М., Савенков А. П. Бесконтактные методы измерения вязкости жидкостей (обзор) // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2013. Т. 79. № 1. С. 27–35.
2. Sohl C. H., Miyano K., Ketterson J. B., *Review of Scientific Instruments*, 1978, vol. 49, no. 10, pp. 1464–1469. <https://doi.org/10.1063/1.1135288>
3. Behrooz F., Smith J., Even W., *American Journal of Physics*, 2010, vol. 78, no. 11, pp. 1165–1169. <https://doi.org/10.1119/1.3467887>
4. B. M. Pierce, D. B. Chang, US Patent no. 5005401 (9 April 1991).
5. Nishimura Y., Hasegawa A., Nagasaka Y., *Review of Scientific Instruments*, 2014, vol. 85, no. 044904, 11 p. <https://doi.org/10.1063/1.4871992>
6. Koller T. M., Klein T., Giraudet C., Chen J., Kalantar A., van der Laan G. P., Rausch M. H., Froba A. P., *Journal of Chemical & Engineering Data*, 2017, vol. 62, no. 10, pp. 3319–3333. <https://doi.org/10.1021/acs.jced.7b00363>
7. Herlach D. M., Cochrane R. F., Egry I., Fecht H. J., Greer A. L., *International Materials Reviews*, 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., *Journal of Applied Physics*, 2016, vol. 119, no. 035902, 8 p. <https://doi.org/10.1063/1.4940243>
9. Brillo J., Lohöfer G., Schmidt-Hohagen F., Schneider S., Egry I., *International Journal of Materials and Product Technology*, 2006, vol. 26, no. 3/4, pp. 247–273. <https://doi.org/10.1504/IJMPT.2006.009469>
10. Langstaff D., Gunn M., Greaves G. N., Marsing A., Kargl F., *Review of Scientific Instruments*, 2013, vol. 84, no. 124901, 10 p. <https://doi.org/10.1063/1.4832115>
11. Kremer J., Kilzer A., Petermann M., *Review of Scientific Instruments*, 2018, vol. 89, no. 015109, 8 p. <https://doi.org/10.1063/1.4998796>
12. Ansari Hosseinzadeh V., Holt R. G., *Journal of Applied Physics*, 2017, vol. 121, no. 174502, 6 p. <https://doi.org/10.1063/1.4982908>
13. Kuo F.-J., Sheng C.-T., Ting C.-H., *Journal of Food Engineering*, 2008, vol. 86, no. 1, pp. 84–90. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2007.09.016>
14. Мордасов М. М., Савенков А. П., Чечетов К. Е. Особенности применения термина «бесконтактный метод измерения» // Датчики и системы. 2017. № 4. С. 47–52.
15. Postnov D. D., Moller F., Sosnovtseva O., *PLoS ONE*, 2018, vol. 13(9), no. e0203141, 10 p. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0203141>
16. Пат. № 2305271 РФ / Б. А. Безуглый, О. А. Тарасов, С. И. Чемоданов // Изобретения. Полезные модели. 2007. № 24.
17. Yoshitake Y., Mitani, S., Sakai, K., Takagi, K., *Journal of Applied Physics*, 2005, vol. 97, no. 024901, 6 p. <https://doi.org/10.1063/1.1839640>
18. S. Nowinski, GB Patent no. 2192987 (27 January 1988).
19. P. G. Backes, US Patent no. 5024080 (18 June 1991).
20. Мордасов М. М., Савенков А. П. Пневматическое бесконтактное измерение вязкости жидкостей // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2009. Т. 75. № 2. С. 33–37.
21. Мордасов Д. М., Мордасов М. М., Савенков А. П. Аэрогидродинамические эффекты в бесконтактных струйных методах неразрушающего контроля вязкости жидких веществ. М.: Физматлит, 2012. 352 с.
22. 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>
23. Мордасов М. М., Савенков А. П., Сычев В. А., Мозгова Г. В. Лазерный триангуляционный детектор расстояния до зеркальной поверхности // Датчики и системы. 2018. № 3. С. 49–53.
24. 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>

References

1. Mordasov M. M., Savenkov A. P., *Inorganic Materials*, 2014, vol. 50, no. 15, pp. 1435–1443.
<https://doi.org/10.1134/S0020168514150126>
2. Sohl C. H., Miyano K., Ketterson J. B., *Review of Scientific Instruments*, 1978, vol. 49, no. 10, pp. 1464–1469.
<https://doi.org/10.1063/1.1135288>
3. Behroozi F., Smith J., Even W., *American Journal of Physics*, 2010, vol. 78, no. 11, pp. 1165–1169.
<https://doi.org/10.1119/1.3467887>
4. B. M. Pierce, D. B. Chang, US Patent no. 5005401 (9 April 1991).
5. Nishimura Y., Hasegawa A., Nagasaka Y., *Review of Scientific Instruments*, 2014, vol. 85, no. 044904, 11 p.
<https://doi.org/10.1063/1.4871992>
6. Koller T. M., Klein T., Giraudet C., Chen J., Kalantar A., van der Laan G. P., Rausch M. H., Froba A. P., *Journal of Chemical & Engineering Data*, 2017, vol. 62, no. 10, pp. 3319–3333.
<https://doi.org/10.1021/acs.jced.7b00363>
7. Herlach D. M., Cochrane R. F., Egry I., Fecht H. J., Greer A. L., *International Materials Reviews*, 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., *Journal of Applied Physics*, 2016, vol. 119, no. 035902, 8 p.
<https://doi.org/10.1063/1.4940243>
9. Brillo J., Lohöfer G., Schmidt-Hohagen F., Schneider S., Egry I., *International Journal of Materials and Product Technology*, 2006, vol. 26, no. 3/4, pp. 247–273.
<https://doi.org/10.1504/IJMPT.2006.009469>
10. Langstaff D., Gunn M., Greaves G. N., Marsing A., Kargl F., *Review of Scientific Instruments*, 2013, vol. 84, no. 124901, 10 p.
<https://doi.org/10.1063/1.4832115>
11. Kremer J., Kilzer A., Petermann M., *Review of Scientific Instruments*, 2018, vol. 89, no. 015109, 8 p.
<https://doi.org/10.1063/1.4998796>
12. Ansari Hosseinzadeh V., Holt R. G., *Journal of Applied Physics*, 2017, vol. 121, no. 174502, 6 p.
<https://doi.org/10.1063/1.4982908>
13. Kuo F.-J., Sheng C.-T., Ting C.-H., *Journal of Food Engineering*, 2008, vol. 86, no. 1, pp. 84–90.
<https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2007.09.016>
14. Mordasov M. M., Savenkov A. P., Chechetov K. E., *Sensors and Systems*, 2017, no. 4, pp. 47–52 (in Russian).
15. Postnov D. D., Moller F., Sosnovtseva O., *PLoS ONE*, 2018, vol. 13(9), no. e0203141, 10 p.
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0203141>
16. Bezuglyj B. A., Tarasov O. A., Chemodanov S. I., RF Patent no. 2305271, *Byull. Izobret.*, no. 24 (2007).
17. Yoshitake Y., Mitani, S., Sakai, K., Takagi, K., *Journal of Applied Physics*, 2005, vol. 97, no. 024901, 6 p.
<https://doi.org/10.1063/1.1839640>
18. S. Nowinski, GB Patent no. 2192987 (27 January 1988).
19. P. G. Backes, US Patent no. 5024080 (18 June 1991).
20. Mordasov M. M., Savenkov A. P., *Industrial Laboratory. Diagnostics of Materials*, 2009, vol. 75, no. 2, pp. 33–37 (In Russian).
21. Mordasov D. M., Mordasov M. M., Savenkov A. P., *Aerogidrodinamicheskie efekty v beskontaktnykh struinykh metodah nerazrushayushchego kontrolya vyazkosti zhidkih veshchestv*, Moscow, Fizmatlit Publ., 2012, 352 p. (in Russian).
22. Mordasov M. M., Savenkov A. P., Safonova M. E., Sychev V. A., *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*, 2018, vol. 54, no. 1, pp. 69–75.
<https://doi.org/10.3103/S8756699018010119>
23. Mordasov M. M., Savenkov A. P., Sychev V. A., Mozgova G. V., *Sensors and Systems*, 2018, no. 3, pp. 49–53 (in Russian).
24. 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>

Дата поступления: 14.05.2020.

Дата принятия: 10.06.2020.

A non-contact pneumoelectric device for liquid viscosity measurement

Aleksandr P. Savenkov, Mikhail M. Mordasov, Vladislav A. Sychev

Tambov State Technical University, Tambov, Russia, e-mail: savencow@yandex.ru, mmm-tmb@rambler.ru, flyholand@mail.ru

Non-contact aerohydrodynamic methods, unlike other non-contact methods, allow highly accurate determination of the viscosity of inhomogeneous and opaque liquids in any industry in the interval of 2–100 Pa·s. The pulsed aerohydrodynamic method was proposed about thirty years ago, and is the most promising of the non-contact methods, but it has not received proper development. The method consists in deforming the surface of a tested liquid with a gas jet and determining the viscosity from the time takes to reach a predetermined degree of deformation from the moment when the gas jet was applied. The paper presents the results of studies of a non-contact aerohydrodynamic device for measuring viscosity with a laser triangulation detector of the liquid surface, the use of which made it possible to fully automate the device and significantly increase the accuracy of viscosity measurements. The aim of the research is to choose the most promising of four possible variants for implementing the device. The choice was made according to criteria, the fulfillment of which ensures a decrease in the sensitivity of the device to influencing quantities, and an increase in the measurement accuracy. A description of the design and principle of operation of the device is given. The results of studies of design parameters influence on the systematic and random components of the measurement error are presented. The relative error in measuring the viscosity of liquids in the interval from 2 to 100 Pa·s does not exceed 2 %. The developed non-contact aerohydrodynamic device is advisable to use in testing of viscous liquids in various industries.

Key words: aerohydrodynamic method, gas, jet, liquid, non-contact method, viscosity, surface, triangulation detector.