



На правах рукописи

САВЕНКОВ Александр Петрович

**БЕСКОНТАКТНЫЙ СТРУЙНЫЙ ДЕФОРМАЦИОННЫЙ
МЕТОД И УСТРОЙСТВО КОНТРОЛЯ
ВЯЗКОСТИ ЖИДКОСТЕЙ**

Специальность 05.11.13 «Приборы и методы контроля природной среды,
веществ, материалов и изделий»

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

19 НОЯ 2009

Тамбов 2009

Работа выполнена на кафедре «Автоматизированные системы и приборы»
ГОУ ВПО «Тамбовский государственный технический университет».

Научный руководитель доктор технических наук, профессор
Мордасов Михаил Михайлович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Пудовкин Анатолий Петрович

кандидат технических наук, доцент
Штейнбрехер Валерий Васильевич

Ведущая организация ОАО «Корпорация «Росхимзащита»

Защита состоится 3 декабря 2009 г. в 15 часов на заседании диссертационного совета Д 212.260.01 Тамбовского государственного технического университета по адресу: г. Тамбов, ул. Советская, д. 106.

Отзывы в двух экземплярах, заверенные гербовой печатью, просим направлять по адресу: 392000, г. Тамбов, ул. Советская, д.106, ТГТУ, учёному секретарю.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке университета. Автореферат размещён на официальном сайте ТГТУ – www.tstu.ru.

Автореферат разослан 2 ноября 2009 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета,
доктор технических наук, профессор



А.А. Чуриков

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Контроль вязкости жидкостей необходим в различных отраслях промышленности, например, в химической, нефтехимической, пищевой, стекольной и других. По вязкости судят о качестве полуфабриката и готового продукта, о тех физико-химических изменениях в материале, которые происходят во время технологического процесса. Во многих процессах, связанных с нанесением покрытия на поверхность, вязкость наносимого вещества необходимо поддерживать в установленном диапазоне.

Техническая реализация подавляющего большинства известных методов контроля вязкости предполагает механический контакт элементов измерительных устройств с контролируемой жидкостью. При контроле жидкостей с высокими адгезионными свойствами и агрессивных сред это обстоятельство затрудняет использование контактных приборов и приводит к увеличению затрат времени на проведение подготовительных операций, таких как отбор проб, очистка элементов измерительных устройств и других.

Существующие бесконтактные методы измерения вязкости обладают рядом недостатков, ограничивающих их практическую применимость. Использование большинства таких методов в условиях потенциально опасных производств затруднено. Все существующие методы отличаются большим числом влияющих величин, конструкция реализующих их устройств предполагает применение сложных и дорогостоящих комплектующих. Перечисленных недостатков лишены пневматические аэрогидродинамические бесконтактные методы контроля вязкости, основанные на деформации поверхности жидкости струёй газа.

В пневматических бесконтактных методах контроля вязкости применяют струйное воздействие с постоянным расходом газа и о вязкости судят по частоте автоколебаний поверхности контролируемой жидкости. Основными недостатками этих методов являются сложности при контроле жидкостей с высокой вязкостью и низкая помехоустойчивость, что обусловлено особенностями автоколебательного режима взаимодействия струи газа с поверхностью жидкости. Указанные недостатки позволяют устранить применение переменного аэродинамического воздействия, при котором скорость газа в струе, действующей на поверхность жидкости, изменяется по заданному закону.

Актуальной является задача разработки и исследования пневматических бесконтактных методов измерения вязкости жидкостей на основе переменного аэродинамического воздействия и реализующих их устройств.

Цель работы заключается в улучшении метрологических и эксплуатационных характеристик измерительных устройств, реализующих нера-

рушающие бесконтактные методы измерения вязкости жидкостей с переменным аэродинамическим воздействием. Для достижения поставленной цели необходимо решить задачу сопоставительного анализа методов измерения вязкости на основе различных аэродинамических воздействий с последующим выбором наиболее рационального метода и конструкции реализующего его устройства. При решении этой задачи необходимо выполнить следующее:

- провести экспериментальные исследования аэрогидродинамических эффектов, возникающих при взаимодействии струи газа с поверхностью жидкости;
- осуществить математическое описание процессов, возникающих при взаимодействии струи газа постоянной и переменной скорости с поверхностью жидкости и проверить его адекватность;
- на основании полученного математического описания и результатов экспериментальных исследований сопоставить достоинства и недостатки бесконтактных методов контроля вязкости, реализованных при помощи различных пневматических воздействий;
- выбрать наиболее рациональную форму деформирующего струйного воздействия по результатам сопоставительного анализа различных методов;
- осуществить конструктивную реализацию метода с использованием переменного аэродинамического воздействия выбранной формы, провести его промышленные испытания и определить его метрологические характеристики.

Методы исследования. Для решения задачи, поставленной в работе, использовались моделирование и анализ моделей процессов, происходящих в двухфазной системе «струя газа – жидкость». В ходе экспериментальных исследований использованы статистические методы обработки результатов измерений, методы регрессионного и дисперсионного анализов.

Научная новизна. Осуществлён сопоставительный анализ струйных деформационных методов измерения вязкости, реализованных при помощи различных переменных аэродинамических воздействий. В результате анализа установлено, что требованиям точности и простоты в реализации и эксплуатации наиболее полно отвечает струйный деформационный времяимпульсный метод, так как он наименее чувствителен к большинству влияющих величин и позволяет судить о степени деформации поверхности жидкости по направлению потоков в газовой фазе.

Теоретически и экспериментально доказано, что система «струя газа – жидкость» является апериодическим звеном второго порядка. Первая сопрягающая частота системы обратно пропорциональна кинематической вязкости жидкости.

Разработан метод измерения вязкости движущихся жидкостей, согласно которому на поверхности контролируемой жидкости посредством импульсных воздействий двумя газовыми струями, действующими по и против направления течения жидкости, формируют углубления, а о вязкости судят по сумме интервалов времени, ограниченных моментами подачи газа и моментами достижения углублениями заданного объёма.

Разработан бесконтактный метод измерения вязкости, согласно которому на поверхность контролируемой жидкости воздействуют струёй газа со скоростью, изменяющейся во времени по гармоническому закону, а о вязкости судят по частоте колебаний скорости газа, при которой амплитуда колебаний высоты углубления, формируемого на поверхности жидкости, или сдвиг фаз между колебаниями скорости газа и высоты углубления равны заданным значениям.

Практическая ценность. Разработано бесконтактное аэрогидродинамическое устройство для измерения вязкости жидкостей. Осуществлён обоснованный выбор его конструктивных размеров.

Разработаны генераторы пневматических непрерывных, импульсных и гармонических сигналов, отличающиеся высокой стабильностью, оптические, аэродинамические и электрические индикаторы высоты углубления, обеспечивающие построение простых и дешёвых бесконтактных вискозиметров.

Реализация результатов. Разработанные устройства прошли промышленные испытания и рекомендованы к внедрению на предприятиях ОАО «Тамбовский завод «Октябрь»» и ОАО «Воронежсельмаш». Также результаты диссертационной работы используются в научно-исследовательской и учебной работе Тамбовского государственного технического университета.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались на интернет-форуме магистрантов ВУЗов России «Новые идеи молодых учёных в науке XXI века» (г. Тамбов, 2006 г.); в ходе проведения Шестой международной теплофизической школы «Теплофизика в энергосбережении и управлении качеством» (г. Тамбов, 2007 г.); на XIII научной конференции ТГТУ «Фундаментальные и прикладные исследования, инновационные технологии, профессиональное образование» (г. Тамбов, 2008 г.); на Международной научно-технической конференции «Современные информационные технологии» (г. Пенза, 2008 г.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано одиннадцать научных работ, получены два патента на изобретения.

Структура и объём работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы и приложения. Основная часть диссертации изложена на 150 страницах машинописного текста, содержит 54 рисунка и 8 таблиц. Список литературы включает 148 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обоснована актуальность темы. Дана краткая характеристика содержания диссертации по главам. Сформулированы результаты исследования, выносимые на защиту.

В первой главе кратко рассмотрены технологические процессы, требующие контроля вязкости используемых жидкостей, приведён обзор существующих бесконтактных методов контроля вязкости, отмечены их достоинства и недостатки.

Для бесконтактного взаимного перемещения слоёв или отдельных молекул жидкости с целью определения её вязкости используют:

- тепловые потоки, возникающие под действием лазерного луча;
- электрическое поле;
- электромагнитные волны сверхвысокочастотного (СВЧ) диапазона;
- акустические волны;
- силовое действие струи газа.

Показано, что получение наиболее достоверных и точных результатов измерения вязкости обеспечивает применение пневматических бесконтактных методов, основанных на деформации поверхности жидкости струей газа.

Для поиска направлений дальнейшего развития пневматических бесконтактных методов контроля вязкости рассмотрены методы, разработанные и предложенные к настоящему моменту. В результате проведённого обзора установлено, что для совершенствования струйных методов необходимо применять переменное аэродинамическое воздействие, при котором скорость газа в струе, деформирующей поверхность жидкости, изменяется во времени по заданному закону.

Определена цель работы и поставлена задача исследования.

Во второй главе представлены результаты экспериментальных и теоретических исследований двухфазной системы «струя газа – жидкость» в разных режимах при различном расположении сопла относительно поверхности жидкости. Описаны основные аэрогидродинамические эффекты, наблюдаемые в системе.

На рис. 1, а представлена схема двухфазной системы «струя газа – жидкость» для случая перпендикулярного расположения сопла. Её входным воздействием является расход Q газа на входе в сопло 1, расположенное на расстоянии H относительно недеформированной поверхности жидкости 2, а выходным сигналом – высота h углубления 3, формируемого струей газа.

На первом этапе исследована статическая характеристика системы «струя газа – жидкость» – зависимость $h(Q)$ при постоянном расходе Q газа. В ходе теоретических и экспериментальных исследований установлено, что статическая характеристика $h(Q)$ системы является линейной

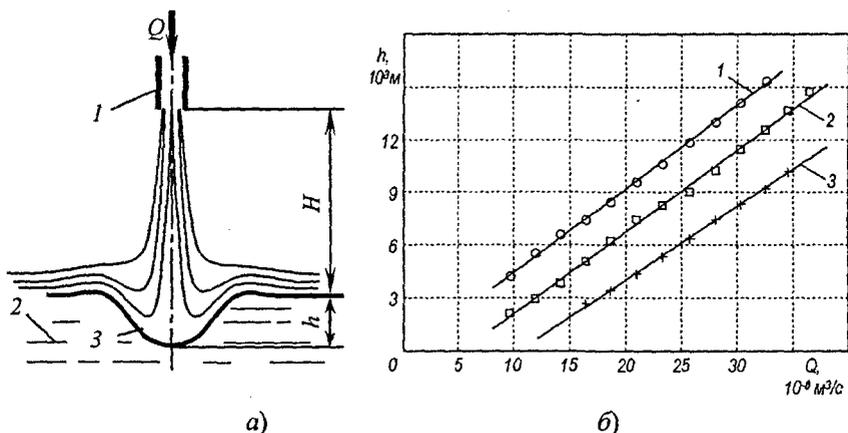


Рис. 1. Схема системы «струя газа – жидкость» (а) и её экспериментальные статические характеристики $h(Q)$ (б) при различных значениях расстояния H :
 1 – $H = 20$ мм; 2 – $H = 30$ мм; 3 – $H = 40$ мм

(см. рис. 1, б). Линейность сохраняется при изменении расстояния H и величин физико-химических свойств жидкости: вязкости η , плотности ρ и поверхностного натяжения σ .

Схема экспериментальной установки для исследования свойств системы «струя газа – жидкость» представлена на рис. 2. В экспериментах использованы касторовое масло, глицерин, эпоксидная смола с добавками ацетона. Вязкость жидкостей определена при помощи ротационного прибора типа «Реотест-2», плотность – пикнометрическим методом, поверхностное натяжение – сталагмометрическим методом. Эксперименты проводились при температуре окружающего воздуха $(20 \pm 1)^\circ\text{C}$, кювета с исследуемой жидкостью погружалась в термостатирующий сосуд с температурой $(20,0 \pm 0,3)^\circ\text{C}$.

При переменном расходе Q высота h углубления изменяется. В ходе экспериментальных исследований установлено, что изменения радиуса R_0 кривизны нижней части углубления при изменении расхода Q незначительны. Поэтому, для математического описания динамических свойств системы изменение высоты h углубления представлено как перемещение виртуального газового пузырька по вертикали. При этом контакт с жидкостью имеет только нижняя половина пузырька. Выбор такой модели обусловлен тем, что действие всех сил, определяющих поведение системы, сосредоточено в нижней точке углубления. Для описания процесса динамического взаимодействия струи газа с поверхностью жидкости определены силы, действующие на газовый пузырёк, перемещающийся в вязкой жидкости.

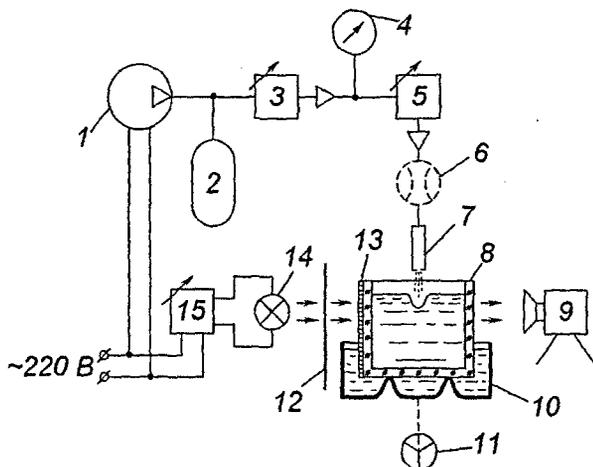


Рис. 2. Схема установки для исследования свойств системы «струя газа – жидкость»:

1 – компрессор; 2 – ресивер; 3 – задатчик; 4 – манометр; 5 – генератор пневматических сигналов; 6 – ротаметр; 7 – сопло; 8 – кювета с исследуемой жидкостью; 9 – цифровая видеокамера; 10 – термостат; 11 – механизм для перемещения кюветы 8; 12 – рассеивающий экран; 13 – миллиметровая бумага; 14 – осветитель; 15 – регулятор мощности

На поверхность жидкости в нижней точке углубления действует совокупность сил. Сила F , создаваемая струёй газа, уравновешивается выталкивающей силой F_p , силой F_σ , создаваемой поверхностным натяжением σ жидкости, силой F_η вязкого трения и силой инерции F_m , т.е.

$$F = F_m + F_\eta + F_p + F_\sigma. \quad (1)$$

Определив каждое из слагаемых этого уравнения, получим дифференциальное уравнение системы «струя газа – жидкость» в виде:

$$\frac{1}{3} \pi \rho R_0^3 \frac{d^2 h}{dt^2} + \frac{1}{2} k \pi \eta R_0 \frac{dh}{dt} + \pi \rho g R_0^2 h - \frac{1}{3} \pi \rho g R_0^3 + 2 \pi \sigma R_0 = F, \quad (2)$$

где t – время, с; k – коэффициент, зависящий от размеров углубления и режима течения жидкости; g – ускорение свободного падения, m/s^2 .

Из уравнения (2) следует, что при вязкости η меньшей некоторого минимального значения η_{\min} система «струя газа – жидкость» является колебательным звеном, при увеличении вязкости – аperiodическим звеном второго порядка, а при дальнейшем увеличении – аperiodическим звеном первого порядка. Минимальное значение η_{\min} вязкости определяется исходя из условия получения положительных значений дискриминанта характеристического уравнения системы по формуле:

$$\eta_{\min} = \frac{4}{\sqrt{3}} \frac{\rho R_0}{k} \sqrt{g R_0}. \quad (3)$$

При значениях величин $\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$; $g = 9,8 \text{ м/с}^2$; $R_0 = 3,0 \cdot 10^{-3} \text{ м}$; $k = 4$ минимальное значение вязкости составляет $\eta_{\min} = 0,3 \text{ Па}\cdot\text{с}$.

Поскольку сила F связана линейной зависимостью с высотой h (см. уравнение (2)), которая, в свою очередь, линейно зависит от расхода Q , была высказана гипотеза о линейности зависимости $F(Q)$. На основании этой гипотезы определены динамические характеристики системы «струя газа – жидкость»:

– передаточная функция

$$W(s) = \frac{1}{\frac{1}{3} \frac{R_0}{g} s^2 + \frac{1}{2} \frac{k\eta}{\rho g R_0} s + 1}, \quad (4)$$

где s – параметр преобразования Лапласа, с^{-1} ;

– амплитудная частотная характеристика (АЧХ)

$$A(\omega) = \frac{1}{\sqrt{\left(1 - \frac{1}{3} \frac{R_0}{g} \omega^2\right)^2 + \left(\frac{1}{2} \frac{k\eta}{\rho g R_0} \omega\right)^2}}, \quad (5)$$

где ω – круговая частота, рад/с ;

– логарифмическая амплитудная частотная характеристика (ЛАЧХ)

$$L(\omega) = -10 \cdot \lg \left[\left(1 - \frac{1}{3} \frac{R_0}{g} \omega^2\right)^2 + \left(\frac{1}{2} \frac{k\eta}{\rho g R_0} \omega\right)^2 \right]; \quad (6)$$

– фазовая частотная характеристика (ФЧХ)

$$\varphi(\omega) = \begin{cases} -\operatorname{arctg} \frac{\frac{1}{2} \frac{k\eta}{\rho g R_0} \omega}{1 - \frac{1}{3} \frac{R_0}{g} \omega^2} \text{ при } \omega \leq \sqrt{\frac{3g}{R_0}}, \\ -\pi - \operatorname{arctg} \frac{\frac{1}{2} \frac{k\eta}{\rho g R_0} \omega}{1 - \frac{1}{3} \frac{R_0}{g} \omega^2} \text{ при } \omega > \sqrt{\frac{3g}{R_0}}. \end{cases} \quad (7)$$

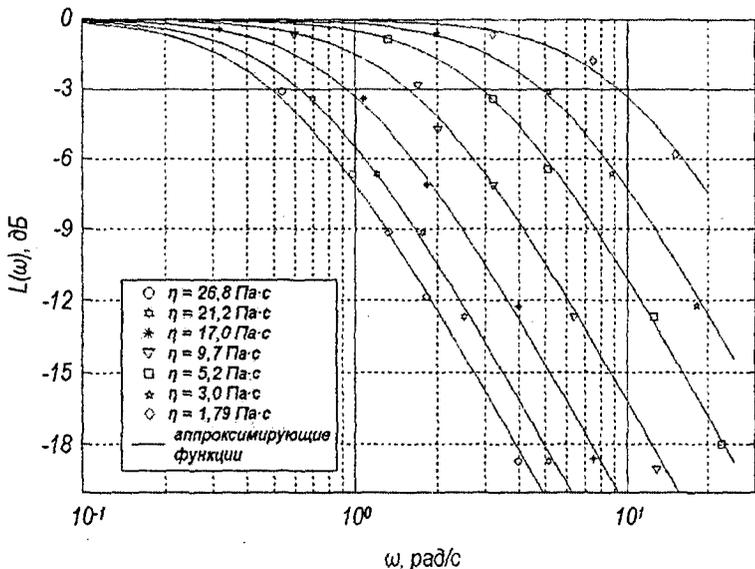


Рис. 3. Экспериментальные ЛАЧХ системы «струя газа – жидкость»

Анализ уравнений (4) – (7) показывает, что при высокой вязкости жидкости рассматриваемая система «струя газа – жидкость» является аperiodическим звеном первого порядка.

Для экспериментального подтверждения выполненного математического описания проведены экспериментальные исследования АЧХ системы. В экспериментах использована установка, схема которой представлена на рис. 2. Из схемы исключён расходомер 6, в качестве генератора 5 использован генератор гармонических колебаний расхода газа переменной частоты и постоянной амплитуды. Расход газа на выходе сопла 7 изменялся по закону:

$$Q(t) = Q_0 + \Delta Q \sin \omega t, \quad (8)$$

где Q_0 – среднее значение расхода газа, $\text{м}^3/\text{с}$; ΔQ – амплитуда колебаний расхода газа ($Q_0 > \Delta Q$), $\text{м}^3/\text{с}$.

На рис. 3 представлены экспериментальные логарифмические амплитудные частотные характеристики (ЛАЧХ) $L(\omega)$ двухфазной системы для жидкостей различной вязкости. Выбор логарифмического масштаба обусловлен значительным диапазоном изменения частот и возможностью определения порядка аperiodического звена по наклону отрезков кривых. Поскольку при $L(\omega) < -3$ дБ представленные кривые имеют одинаковый наклон равный минус 6 дБ/окт, система «струя газа – жидкость» в исследуемом диапазоне вязкости η является аperiodическим звеном первого порядка, что соответствует теории. Адекватность математического описа-

ния доказана на основании сопоставления экспериментальных данных с теоретической зависимостью $\omega_1(\eta)$ сопрягающей частоты ω_1 , при которой $L(\omega_1) = -3$ дБ, от вязкости η .

На рис. 4 представлена зависимость первой сопрягающей частоты ω_1 системы «струя газа – жидкость» от вязкости η , которая обуславливает возможность создания метода контроля вязкости жидкости на основе вынужденных колебаний её поверхности, вызванных действием газовой струи. Вместо частоты ω_1 в качестве информативного параметра возможно использование значения частоты ω , соответствующего заданному значению амплитуды колебаний высоты h углубления.

В третьей главе представлены результаты экспериментальных и теоретических исследований бесконтактных струйных деформационных методов измерения вязкости при непрерывном, импульсном и гармоническом деформирующих воздействиях. Классификация методов представлена на рис. 5.

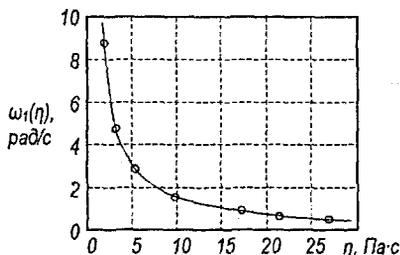


Рис. 4. Зависимость первой сопрягающей частоты ω_1 системы «струя газа – жидкость» от вязкости η жидкости



Рис. 5. Классификация бесконтактных струйных деформационных методов измерения вязкости

В системе «струя газа – жидкость» при постоянном расходе Q газа возникают автоколебания, если его значение превышает критическое $Q_{кр}$. Сущность автоколебательного процесса заключается в том, что на поверхности жидкости периодически самопроизвольно формируются волны. Проведены исследования метода на основе автоколебаний с переменным аэродинамическим воздействием, согласно которому на поверхность контролируемой жидкости воздействуют струей газа с давлением, варьируемым на двух уровнях, а о вязкости судят по изменению частоты автоколебаний. Исследования показали, что метод с переменным аэродинамическим воздействием позволяет снизить влияние расстояния H от среза сопла до поверхности жидкости на результат измерения вязкости.

Установлено, что импульсное воздействие малой длительности (δ -функция) целесообразно применять в струйных деформационных методах только при малой вязкости контролируемых жидкостей. В случае высокой вязкости следует использовать импульсный метод. Сущность метода заключается в том, что в исходный момент времени t_1 на поверхность жидкости под углом α направляют струю газа с постоянной скоростью. Под действием струи на поверхности жидкости формируется волна, которая перемещается с постоянной скоростью по направлению газового потока. При достижении волной заданного положения в момент времени t_2 прекращают действие струи газа на поверхность жидкости. О вязкости судят по времени $t_{12} = t_2 - t_1$ деформирующего действия струи. К достоинствам такого метода следует отнести оперативность и возможность его применения для контроля жидкостей, на поверхности которых под действием струи газа не возникают устойчивые автоколебания.

Исследованы две модификации метода с гармоническим входным воздействием. Метод позволяет существенно снизить влияние на результат измерения различных влияющих величин. Одна из модификаций метода позволяет устранить влияние величин Q , H и σ , а другая – величин ρ и σ .

В первом случае информативным параметром является частота ω , на которой АЧХ $A(\omega)$ или ФЧХ $\phi(\omega)$ принимают заданные значения. При выборе в качестве заданных величин $A_1 = 0,707$ или $\phi_1 = 45^\circ$ о вязкости судят по сопрягающей частоте ω_1 системы «струя газа – жидкость». Результатом измерения является кинематическая вязкость $\nu = \eta/\rho$ контролируемой жидкости. Такой результат обусловлен тем, что в АЧХ и ФЧХ системы «струя газа – жидкость» заложена информация о вязкости η (при $\omega > \omega_1$) и о плотности ρ (при $\omega < \omega_1$) (см. формулы (5) – (7)). Отдельно определить каждое из свойств жидкости по этим характеристикам невозможно.

Вторая модификация метода заключается в определении частоты $\omega > \omega_1$, на которой амплитуда Δh_m колебаний высоты h углубления равна заданному значению Δh_0 . В отличие от первой модификации, где задаётся

относительное изменение амплитуды колебаний, здесь заданная амплитуда Δh_0 выражается в единицах длины. Это позволяет исключить влияние плотности ρ на результат измерения вязкости η . При такой организации измерений непосредственно определяется реакция силы вязкого трения на действие струи газа, однако, при этом на результат измерения оказывают влияние величины Q, H .

Четвёртая глава посвящена разработке и исследованию устройств для реализации струйных деформационных методов. Рассмотрена обобщённая схема измерительного устройства, её функциональные блоки, приведены их принципиальные и функциональные схемы.

Разработаны генераторы пневматических непрерывных, импульсных и гармонических сигналов. Предложено использовать в качестве автономного источника питания сжатым воздухом ёмкости переменного объёма, например, сильфонного или поршневого типов.

Изучены перспективы использования оптических, аэродинамических и электрических индикаторов высоты углубления. В случае применения аэродинамических индикаторов о достижении углублением заданной формы судят по наличию струи, выходящей из углубления, в заданной точке пространства.

Предложены способы установки первичного измерительного преобразователя на заданное расстояние H_1 относительно поверхности жидкости, для реализации которых необходимо использовать оптические или аэродинамические индикаторы высоты углубления.

Представлена функциональная схема пневмодинамического устройства контроля вязкости, реализующего метод на основе гармонического входного воздействия с фиксацией заданного сдвига фаз и компенсацией плотности. В таком устройстве единственной существенной влияющей величиной является расстояние H , нестабильность установки которого уменьшается посредством применения оптической системы.

В пятой главе на основании результатов исследований, представленных в третьей и четвёртой главах проведён сопоставительный анализ струйных деформационных методов измерения вязкости (см. табл. 1).

В результате анализа было установлено, что наиболее перспективным с позиций обеспечения точности измерений и автономности реализующего устройства является времяимпульсный метод измерения вязкости.

На рис. 6 представлена структурная схема устройства для бесконтактного контроля вязкости, реализующего времяимпульсный метод. В исходный момент времени на выходе триггера 7 формируется сигнал нулевого уровня $U_7 = 0$, под действием которого исполнительный механизм 4 осуществляет растяжение сильфона 3 с постоянной скоростью w_4 . В момент времени t_1 шток исполнительного механизма 4 достигает крайнего верхне-

1. Сопоставительный анализ струйных деформационных методов

Характеристика	Струйные деформационные методы измерения вязкости на основе						
	непрерывного входного воздействия		импульсного входного воздействия		гармонического входного воздействия с поиском заданных		
	постоянного	переменного	с использованием фронта импульса	временной импульсный метод	абсолютной амплитуды колебаний	относительной амплитуды колебаний	сдвига фаз
1. Диапазон измерения ¹ , Па·с							
– верхний предел;	0,1	0,1	0,5	1	0,3	0,3	0,1
– нижний предел	100	100	–	–	–	–	–
2. Нормированная относительная чувствительность к изменению вязкости ² , %	150	150	100	100	100	100	100
3. Нормированная относительная чувствительность к изменению величин ² , %							
– плотности;	100	100	30	30	14	105	100
– поверхностного натяжения;	100	100	30	30	–	–	–
– расстояния H ;	100	33	180	55	160	120	130
– расхода газа	120	120	140	180	100	5	5
4. Устойчивость к действию помех	низкая		средняя	низкая	высокая		
5. Время измерения ³	2 η	3 η	5 η	2 η	наивысшее		
6. Сложность алгоритма	простой		простой		сложный		
7. Затраты энергии сжатого газа	низкие		низкие		высокие		
8. Возможности							
– автономного питания;	нет	нет	да	да	нет	нет	нет
– использования потоков, выходящих из углубления	да	да	нет	да	нет	нет	нет

Примечания: ¹рассчитано для устройств, используемых в экспериментах; ²значение относительной чувствительности нормировано по величине выходного сигнала; ³время измерения зависит от вязкости η [Па·с] согласно представленным выражениям; прочерки соответствуют благоприятным значениям параметров, определение которых лишено смысла.

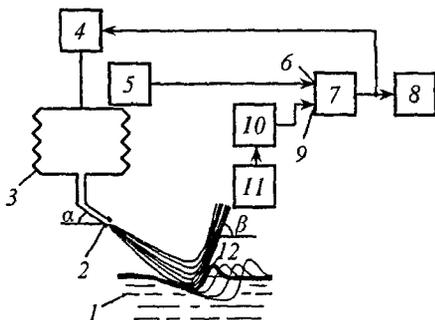


Рис. 6. Структурная схема устройства для бесконтактного контроля вязкости

го положения и на выходе датчика 5 формируется сигнал единичного уровня $U_5 = 1$, поступающий на вход 6 триггера 7 и устанавливающий на его выходе сигнал $U_7 = 1$, под действием которого исполнительный механизм 4 сжимает сильфон 3 с постоянной скоростью, равной по модулю w_4 . На выходе сопла 2, расположенного над поверхностью жидкости 1 под углом α к ней, формируется струя воздуха, деформирующая поверхность жидкости и приводящая к образованию волны 12, которая перемещается в направлении действия струи со скоростью w_{12} , зависящей от вязкости η жидкости. При движении волны струя воздуха отрывается от поверхности жидкости и выходит из образованного углубления под углом $\beta \approx \pi/2$.

В момент времени t_2 волна 12 достигает положения, при котором струя воздуха воздействует на мембрану микрофона 11, в результате чего на его выходе возникает интенсивный шум, под действием которого детектор 10 формирует на выходе сигнал единичного уровня $U_{10} = 1$, поступающий на вход 9 триггера 7 и устанавливающий на его выходе сигнал $U_7 = 0$. Исполнительный механизм 4 осуществляет растяжение сильфона 3. Таймер 8 измеряет длительность $t_{12} = t_2 - t_1$ импульса на выходе триггера 7, пропорциональную вязкости η , и выводит показания на цифровой индикатор.

В работе осуществлён выбор геометрических размеров сильфона 3. Выполнен анализ источников погрешностей. Проведённые метрологические исследования устройства позволили определить конструктивные размеры первичного измерительного преобразователя и определить основные метрологические характеристики устройства. Основная относительная погрешность измерения вязкости в диапазоне 3...50 Па·с не превышает 4%.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

1. На основании проведённого обзора струйных деформационных методов измерения вязкости установлено, что для их совершенствования целесообразно использовать переменное деформирующее аэродинамическое воздействие.

2. Выявлены эффекты, наблюдающиеся в двухфазной системе «струя газа – жидкость» при постоянной и переменной скорости газа в струе.

3. Проведено математическое описание процессов, происходящих в системе «струя газа – жидкость» при перпендикулярном расположении сопла относительно поверхности жидкости. Проверена адекватность математического описания. Для анализа динамических свойств системы «струя газа – жидкость» использованы подходы теории автоматического регулирования.

4. В результате теоретических и экспериментальных исследований системы «струя газа – жидкость» установлено, что:

- статическая характеристика системы является линейной;
- динамические свойства системы соответствуют звену второго порядка;
- первая сопрягающая частота системы обратно пропорциональна кинематической вязкости жидкости.

5. Проведена научная классификация струйных деформационных методов измерения вязкости жидкостей, основанных на применении пневматических сигналов различной формы.

6. В результате теоретических и экспериментальных исследований струйных деформационных методов определены диапазоны измерения, чувствительности к измеряемой величине и влияющим величинам, сопоставлены энергетические и временные затраты, необходимые для реализации методов.

7. На основании сопоставительного анализа результатов теоретических и экспериментальных исследований методов и устройств установлено, что наиболее перспективным с позиций обеспечения точности измерений и автономности реализующего устройства является времяимпульсный метод измерения вязкости.

8. Разработано устройство для реализации времяимпульсного метода, не требующее подключения к централизованной линии снабжения сжатым воздухом и использующее для получения информации о степени деформации поверхности жидкости выходящие из углубления газовые потоки. Проведены метрологические исследования разработанного устройства. Устройство прошло промышленные испытания и рекомендовано к внедрению на ОАО «Тамбовский завод "Октябрь"» и ОАО «Воронежсельмаш».

Основные материалы, отражающие результаты диссертационной работы, изложены в следующих публикациях

1. Мордасов, М.М. Автоматический контроль вязкости с гидродинамическим формированием объединённой пробы / М.М. Мордасов, А.П. Савенков, М.М. Козадаева // Контроль. Диагностика, 2008. – № 1. – С. 25 – 27.
2. Мордасов, М.М. Бесконтактный неразрушающий аэрогидродинамический контроль вязкости жидкостей / М.М. Мордасов, А.П. Савенков // Заводская лаборатория. Диагностика материалов, 2008. – Т. 74. – № 2. – С. 22 – 25.
3. Мордасов, М.М. Пневматическое бесконтактное измерение вязкости жидкостей / М.М. Мордасов, А.П. Савенков // Заводская лаборатория. Диагностика материалов, 2009. – Т. 75. – № 4. – С. 33 – 37.
4. Мордасов, М.М. Бесконтактный метод измерения вязкости с переменным аэродинамическим воздействием на жидкость / М.М. Мордасов, А.П. Савенков // Контроль. Диагностика, 2009. – № 6. – С. 52 – 54.
5. Мордасов, М.М. Пневмоэлектрическое устройство для бесконтактного неразрушающего контроля вязкости / М.М. Мордасов, А.П. Савенков // Теплофизика в энергосбережении и управлении качеством : материалы 6-й междунар. теплофизической школы. – Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2007. – Ч. 2. – С. 228 – 230.
6. Мордасов, М.М. Бесконтактные пневматические деформационные методы измерения вязкости жидкостей / М.М. Мордасов, А.П. Савенков // Фундаментальные и прикладные исследования, инновационные технологии, профессиональное образование : материалы XIII науч. конф. ТГТУ. – Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2008. – С. 78 – 81.
7. Мордасов, М.М. Деформационные бесконтактные методы измерения вязкости жидкостей / М.М. Мордасов, А.П. Савенков // Современные информационные технологии : сб. ст. междунар. науч.-техн. конф. – Пенза : Пензенская государственная технологическая академия, 2008. – Вып. 8. – С. 48–49.
8. Савенков, А.П. О возможности пневматического бесконтактного совокупного контроля плотности и поверхностного натяжения жидкостей / А.П. Савенков // Новые идеи молодых учёных в науке XXI века. Интернет-форум магистрантов ВУЗов России : сб. ст. магистрантов. – Тамбов : ТОГУП «Тамбовполиграфиздат», 2006. – Вып. 4. – С. 189 – 193.
9. Козадаева, М.М. Бесконтактный неразрушающий контроль физико-механических свойств жидкостей / М.М. Козадаева, М.М. Мордасов, А.П. Савенков // Труды ТГТУ : сб. науч. ст. молодых учёных и студентов. – Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2006. – Вып. 19. – С. 86 – 90.

10. Мордасов, М.М. Выбор конструктивных параметров бесконтактного времяимпульсного вискозиметра / М.М. Мордасов, А.П. Савенков // Труды ТГТУ : сб. науч. статей молодых учёных и студентов. – Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2008. – Вып. 21. – С. 128 – 131.

11. Маликов, О.Г. О динамических свойствах системы струя газа – жидкость / О.Г. Маликов, М.М. Мордасов, А.П. Савенков ; Тамб. гос. техн. ун-т. – Тамбов, 2007. – 12 с. Деп. в ВИНТИ 30.01.2008, № 61-В2008.

12. Пат. 2323430 РФ, G01N 11/10, G01N 27/22. Способ контроля физико-химических свойств жидкости и устройство для его реализации / М.М. Козадаева, Д.М. Мордасов, М.М. Мордасов, А.П. Савенков. – № 2006121846/28. Заявл. 19.06.2006.

13. Пат. 2334211 РФ, G01N 11/00. Способ контроля вязкости движущихся жидкостей и устройство для его реализации / М.М. Козадаева, М.М. Мордасов, А.П. Савенков. – № 2006136781/28. Заявл. 16.10.2006.

Подписано в печать 20.10.2009.
Формат 60 × 84/16. 0,93 усл. печ. л. Тираж 100 экз. Заказ № 423.

Издательско-полиграфический центр
Тамбовского государственного технического университета
392000, Тамбов, Советская, 106, к. 14