

Разработка системы автоматического контроля мениска жидкости в капиллярных вискозиметрах на базе видеокамеры

А. В. Миргородская

ВНИИМ им. Д.И. Менделеева

a.v.mirgorodskaya@vniim.ru

Аннотация. В статье демонстрируется возможность использования видеокамеры для автоматического определения положения мениска жидкости в капиллярных вискозиметрах. Этот подход позволяет исключить влияние человеческого фактора при измерении времени истечения жидкости, что особенно важно для повышения точности расчетов кинематической вязкости жидкости. Проведен анализ существующих методов автоматизации, однако они оказались неприменимыми в условиях лабораторной поверки из-за необходимости работы с вискозиметрами разных геометрических характеристик. Экспериментальные данные и теоретические выкладки показывают, что видеокамера позволяет фиксировать пересечение мениском контрольных меток, не оказывая влияния на исследуемый образец и не нарушая целостности конструкции вискозиметра. Предложена структура информационно-измерительной системы, состоящая из модуля обработки видеоизображений и программного обеспечения для автоматического расчета вязкости. Оценка точности показала, что использование видеокамеры значительно снижает погрешность измерений по сравнению с ручным методом. Разработка имеет важное практическое значение для различных отраслей промышленности (нефтехимической, пищевой, медицинской и других), где требуется высокоточная поверка капиллярных вискозиметров с обеспечением хорошей воспроизводимости результатов.

Ключевые слова: стеклянный капиллярный вискозиметр; кинематическая вязкость; автоматизация; видеокамера

I. АКТУАЛЬНОСТЬ

В современном мире, который всё больше погружается в цифровую среду, автоматизация и цифровизация становятся неотъемлемой частью нашей жизни. Многие эксперты в своих работах [1–3] называют этот период «зарей четвёртой промышленной революции». Это особенно заметно по тому, как рутинные операции, которые раньше выполнялись вручную, теперь заменяются автоматизированными системами [4]. Метрология также стремится адаптироваться к новым условиям реальности.

Вискозиметры капиллярные стеклянные являются распространенным средством измерений (СИ) кинематической вязкости жидкостей, которые применяются в нефтяной и нефтехимической, пищевой, авиа-машиностроительной, медицинской отраслях экономики России [5, 6].

Научно-исследовательская лаборатория государственных эталонов в области измерений плотности и вязкости жидкости ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева» (НИЛ 2302) входит в том числе поверка СИ. Как видно из данных, представленных на рис. 1, поверка капиллярных стеклянных вискозиметров составляет почти треть от общего объёма поверок, проводимых лабораторией.

Основной операцией поверки является проверка отклонения постоянной вискозиметра от номинального значения. Для этого необходимо выполнить следующие действия:

- заполнить поверяемый вискозиметр жидкостью с известной кинематической вязкостью;
- поместить вискозиметр в термостат и выдержать его там не менее 30 минут;
- после термостатирования оператор должен создать «висячий уровень» в капиллярном вискозиметре с помощью вспомогательного оборудования;
- оператор должен провести серию измерений времени истечения определенного объема жидкости через капилляр вискозиметра. Для этого необходимо наблюдать за мениском жидкости и запускать или останавливать секундомера в момент, когда мениск жидкости пересекает отметки M1 и M2, нанесенных на капилляр (рис. 2).

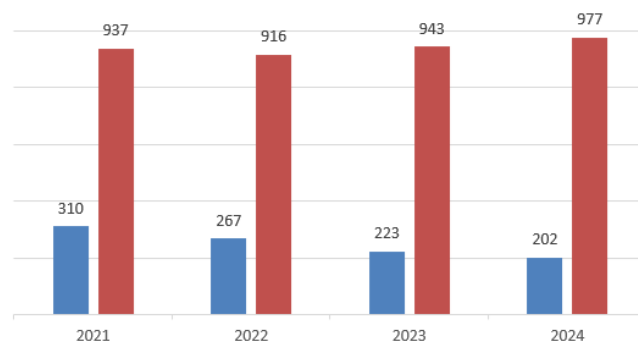


Рис. 1. Количество поверок всего СИ (красный столбец) и отдельно вискозиметров стеклянных капиллярных (синий столбец), проведенных лабораторией НИЛ 2302, в период с 2021 по 2024 гг. по данным системы 1С Метрология

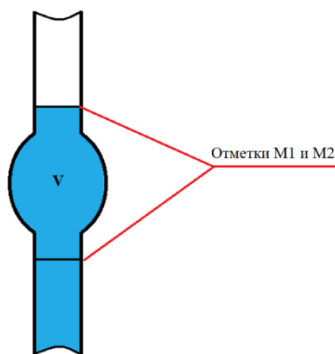


Рис. 2. Схематичное представление нанесения рисок на капилляр вискозиметра

Оператор на основании полученных данных рассчитывает значение кинематической вязкости по формуле [7]: $\nu = C \cdot \tau \cdot B / \tau$,

где C – постоянная калибровки вискозиметра, $\text{мм}^2/\text{с}^2$; τ – среднее арифметическое измеренное значение времени истечения жидкости, с; B – постоянная вискозиметра, зависящая от потери жидкостью кинетической энергии, мм^2 .

Капиллярный метод является надежным методом определения кинематической вязкости, данный факт подтверждается его использованием в национальных первичных эталонах [8]. Но он обладает рядом недостатков.

В целом погрешности измерений условно можно разделить на две группы [9].

- систематические погрешности, присущие любому прибору и указанные в паспорте на него;
- случайные погрешности, имеющие место при каждом отдельном измерении вязкости и обусловленные случайными отклонениями измеряемой величины.

На сегодняшний день задача сведение всех случайных погрешностей к минимуму кажется наиболее интересной и перспективной. Под случайными погрешностями измерений кинематической вязкости капиллярным методом следует понимать погрешность реакции наблюдателя, погрешность фиксирования момента прохождения мениском жидкости отметок на вискозиметре. Если погрешность применяемого секундомера установлена в паспорте на него, то погрешность реакции наблюдателя и погрешность фиксирования мениска жидкости зависят от оператора и применяемой жидкости соответственно.

Концепция использования автоматизированных систем для измерения вязкости с помощью капиллярного метода не нова и имеет техническое решение [10]. Однако эти решения не соответствуют задачам, которые стоят перед лабораторией. К недостаткам готовых аппаратных решений относится то, что системы используются совместно со стандартным набором капиллярных вискозиметров. Однако необходимо учитывать, что на поверку в НИЛ 2302 приходят капиллярные вискозиметры с различными геометрическими параметрами. В связи с этим целью данного исследования стало определение возможного

способа детектирования мениска жидкости в стеклянном капиллярном вискозиметре. Это необходимо для разработки информационно-измерительной системы, способной исключить участие человека на этапах запуска и остановки секундомера. Такая система позволит частично автоматизировать процесс измерения кинематической вязкости капиллярным методом. Но для достижения поставленной цели необходимо решить задачу – определить способ фиксации момента, когда мениск жидкости пересекает риски, нанесенные на капилляр вискозиметра.

А. Суть работы

Данная работа основывается на проведении литературного анализа и серии экспериментов.

Анализ литературы выявил, что на сегодняшний день существует достаточно большое число классификаций датчиков [11], но большая их часть не подходит, потому что воздействовать на жидкость в капилляре или помещать посторонние предметы в или на капилляры не представляется возможным, поскольку это приводит к усложнению процесса поверки стеклянных капиллярных вискозиметров или выходу из строя этих датчиков.

После серии экспериментов, которые описаны в работе [10], предварительно сделан выбор в пользу датчика ультрафиолетового излучения. При исследовании стекла, из которого изготавливаются вискозиметры и окна для термостатических ванн, было принято решение не применять УФ-датчик. Таким образом дальнейшие исследования будут продолжены с использованием камеры. Структурная схема разрабатываемой системы представлена на рис. 3.

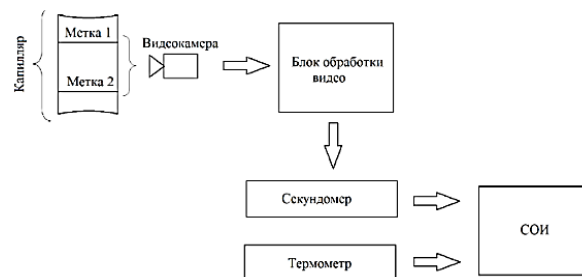


Рис. 3. Структурная схема информационно-измерительной системы определения кинематической вязкости жидкости Метрология

Видеокамера снимает движение мениска жидкости по измерительной трубке капиллярного стеклянного вискозиметра, блок обработки видео анализирует видеопоток и определяет положение меток, мениска жидкости, а также положение мениска относительно отметок на капилляре при помощи алгоритмов компьютерного зрения. В систему обработки информации (СОИ) передаются полученные данные (время, температура) для дальнейшего анализа и расчета кинематической вязкости.

Система предполагает следующий алгоритм работы:

- видеокамера настраивается для четкого захвата изображения капилляра вискозиметра;
- проверяется видимость отметок (метка 1 и метка 2) и начального положения мениска жидкости;

- видеокамера начинает запись капилляра в реальном времени;
- блок обработки видео начинает анализ видеопотока;
- система определяет начальное положение мениска жидкости и его форму;
- фиксируются координаты метки 1 и метки 2 на капилляре;
- определяется нижняя граница мениска жидкости;
- система вычисляет текущее положение мениска относительно метки 1;
- когда мениск жидкости достигает метки 1, система фиксирует этот момент и автоматически запускается секундомер для измерения интервала времени истечения жидкости между двумя метками, кроме того, записывается температура жидкости;
- система продолжает анализировать изменение положения мениска в реальном времени: видеокамера продолжает запись, а блок обработки видео отслеживает перемещение мениска;
- когда мениск жидкости достигает второй метки, система также фиксирует этот момент и автоматически останавливает секундомер, записывая конечное время истечения жидкости и температура жидкости;
- система вычисляет время, за которое мениск переместился от первой до второй метки. Кроме того, необходимо учитывать данные о температуре. Это нужно для корректировки расчетов, так как вязкость жидкости зависит от температуры;
- время движения мениска, температура жидкости, координаты мениска и отметок передаются в СОИ, анализируются и производится расчет кинематической вязкости жидкости по заданной формуле;
- система выдает сигнал о завершении измерения, после которого видеокамера и блок обработки видео возвращаются в исходное состояние, а секундомер сбрасывается, таким образом система готова к новому циклу измерений.

II. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изучив литературу, посвященную исследованиям времени реакции человека, было принято, что среднестатистический человек в среднем запаздывает на 250 мс [12, 13]. Следовательно, суммарная неопределенность человека также равна 250 мс.

Основными составляющими для расчета неопределенности работы камеры будут неопределенность частоты кадров, задержка обработки изображения, неопределенность алгоритма [14, 15]. Подставив теоретические значения перечисленных параметров в формулу для расчета суммарной неопределенности, получено значение равное 30 мс.

Таким образом, камера более предпочтительна для задач, где требуется быстрое действие, поскольку работает с высокой частотой кадров и известными задержками

обработки данных. И напротив, время реакции человека порой может определяться его психофизиологическим состоянием.

Для дальнейшей реализации информационно-измерительной системы необходимо выбрать или разработать алгоритм обработки видеопотока в реальном времени для поиска и классификации отметок на капилляре, мониторинга движения мениска между отметками.

В заключение стоит упомянуть, что практическая значимость разработки заключается в ее возможности широкого применения в различных отраслях:

- в метрологических службах система позволила бы повысить производительность поверочных работ за счет автоматизации процесса измерений при обеспечении стабильной точности измерений независимо от оператора (экономический эффект достигается за счет сокращения времени поверки одного прибора примерно на 30%);
- в промышленных лабораториях технология может быть использована для организации непрерывного мониторинга вязкости, что особенно актуально в нефтехимической отрасли для контроля качества моторных масел и других нефтепродуктов;
- в научно-исследовательских институтах система обеспечивала бы высокую точность измерений и возможность архивирования видеоданных для последующего анализа, что может быть важно при исследовании биологических жидкостей в медицинской сфере.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Автор выражает благодарность научному сотруднику лаборатории госэталонов и научных исследований в области газоаналитических измерений ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева» Румянцеву Дмитрию Владимировичу за предоставление технической базы для проведения экспериментов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Дравица В., Курбацкий А. Промышленная революция Industry 4 // Наука и инновации. 2016. № 3 (157). 13-17 с.
- [2] Götz M. The Industry 4.0 Induced Agility and New Skills in Clusters // Foresight and STI Governance. 2019, Vol. 13, No. 2, P. 72–83. DOI: 10.17323/2500- 2597.2019.2.72.83
- [3] Тихонов К. Новая промышленная революция // Бизнес-журнал. 2013. №5 (206).
- [4] Роботизация бизнеса: что такое RPA и кому она нужна: [Электронный ресурс] // РБК. URL: <https://trends.rbc.ru/trends/innovation/62a8fd169a7947f5847e4d4f> (дата обращения: 13.01.2025).
- [5] Чекирда К.В., Демьянов А.А., Неклюдова А.А., Домостроев А.В., Сулаберидзе В.Ш. История создания и модернизация государственных первичных эталонов единиц динамической, кинематической вязкости жидкости и плотности // Измерительная техника. 2022. № 7. С. 24–29. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2022-7-24-29>
- [6] Миргородская А.В. История развития капиллярного метода измерений кинематической вязкости: от вискозиметра Ломоносова до информационно-измерительной системы // Измерительная техника. 2023. № 8. С. 53–59. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2023-8-53-59>
- [7] СК 03-2302в-ГЭТ17/2-2024 «Вискозиметры капиллярные стеклянные эталонные типа Уббелодде, входящие в состав

- эталонного комплекса ЭК ГЭТ 17/2-КВН Государственного первичного эталона единиц динамической и кинематической вязкости жидкости ГЭТ 17-2018. Методика калибровки».
- [8] Calibration and Measurement Capabilities: [Электронный ресурс] // KCDB. URL: <https://www.bipm.org/kcdb/cmc/quick-search?keywords=capillary+viscometer> (дата обращения: 20.01.2025).
- [9] Измерения массы, плотности и вязкости / В.Я. Кузьмин, С.И. Торопин, Ю.В. Тарбеев и др.; Под ред. Ю.В. Тарбеева. Москва: Изд-во стандартов, 1988. 175,[1] с.: ил.: 22 см.
- [10] Миргородская А.В., Дунаев А.Ю., Неклюдова А.А. Метод детектирования мениска жидкости в капилляре с использованием датчика ультрафиолетового излучения // Эталоны. Стандартные образцы. 2024. № 20(3). С. 53-63. <https://doi.org/10.20915/2077-1177-2024-20-3-53-64>
- [11] Шуберт Ю.Ф. Измерительные преобразователи // Вестник ВУиТ. 2009. №14. С. 90-92
- [12] Зайцев А.В., Лупандин В.И., Сурнина О.Е. Время реакции в теоретических и прикладных исследованиях. Екатеринбург: Банк культурной информации, 2002, том 3, с. 3-20.
- [13] Lore Goetschalckx and others. Computing a human-like reaction time metric from stable recurrent vision models: [Электронный ресурс] // Neural Information Processing Systems. URL: <https://neurips.cc/virtual/2023/poster/72982> (дата обращения: 20.01.2025).
- [14] Козинев Е.А., Кустикова В.Д., Мееров И.Б., Половинкин А.Н., Сиднев А.А. Подходы к оптимизации и распараллеливанию вычислений в задаче детектирования объектов разных классов на изображении // Вестник ЮУрГУ. Серия: Вычислительная математика и информатика. 2012. №47 (306).
- [15] Тормозов В.С., Золкин А.Л., Богданов М.Р., Выговский С.В. Способ повышения быстродействия алгоритма детектирования объектов изображения с помощью фильтрации гипотез // Вестник ТОГУ. 2023. №2 (69).