

СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ АНАЛИЗА ВЕЩЕСТВ И МАТЕРИАЛОВ

Научная статья

УДК 532.137:620.179.111:621.9.08:006.91

<https://doi.org/10.20915/2077-1177-2024-20-3-53-64>



Метод детектирования мениска жидкости в капилляре с использованием датчика ультрафиолетового излучения

А. В. Миргородская^{1,2}  , А. Ю. Дунаев³ , А. А. Неклюдова¹ 

¹ ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им. Д. И. Менделеева», г. Санкт-Петербург, Россия
 a.v.mirgorodskaya@vniim.ru

² Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, г. Санкт-Петербург, Россия

³ ФГБУ «Всероссийский научно-исследовательский институт оптико-физических измерений», г. Москва, Россия

Аннотация: Точность определения физико-химических свойств жидкости, в частности – оценка вязкости используемой жидкости – рассматривается как важная техническая задача в медицине, пищевой, нефтяной, химической промышленности, а также в других сферах, определяющих качество и безопасность жизни и деятельности человека. Например, оценка вязкости используемой жидкости – ключевой этап проектирования гидравлических систем. Сегодня совершенствование методов определения вязкости жидкости идет по пути автоматизации (цифровизации) средств и методов измерения. В этой части деятельность метрологов и инженеров согласуется с принятой в 2017 году национальной программой «Цифровая экономика Российской Федерации».

В статье рассматривается капиллярный метод определения кинематической вязкости жидкости как наиболее точный из всех возможных методов в настоящее время. Метод основан на определении времени истечения жидкости между двумя отметками, которые нанесены на стенки стеклянного капиллярного вискозиметра, образуя измерительный резервуар. Одна из основных проблем данного метода заключается в том, что все этапы измерения производит человек, даже фиксирование момента пересечения мениском жидкости метки, что является нарушением одного из ключевых принципов автоматизации процесса – независимости выполнения, которое подразумевает лишь наблюдение за работой системы.

Поскольку готовые решения не подходят под измерительные задачи лаборатории, руководство приняло решение разработать и провести исследование информационно-измерительной системы, которая будет осуществлять процесс детектирования мениска жидкости на уровне метки, а также производить пересчет измеренного временного интервала в значение кинематической вязкости. Ключевым решением в данной разработке является выбор датчика для детектирования мениска жидкости. На основании проведенного литературного обзора было решено использовать фотоэлектрический датчик. Для выбора длины волны, на которой будет работать датчик, проведено исследование спектров пропускания жидкостей, используемых при работе данным методом. Таким образом, для автоматизации метода детектирования мениска жидкости при его пересечении нанесенной на капиллярную трубку метки подобран тип фотоэлектрического датчика, предназначенного для работы в УФ-диапазоне.

Статья адресована метрологам, производящим поверку и калибровку стеклянных капиллярных вискозиметров, специалистам в области экспериментальной и теоретической вискозиметрии. Предложенный авторами метод может стать основой для дальнейшего совершенствования метода измерений кинематической вязкости жидкости.

Ключевые слова: кинематическая вязкость, капиллярный вискозиметр, мениск жидкости, датчик ультрафиолетового излучения, измерительная система, автоматизация

Принятые сокращения: ФИФ ОЕИ – Федеральный информационный фонд по обеспечению единства измерений; СО – стандартный образец; УФ – ультрафиолетовый.

Ссылка при цитировании: Миргородская А. В., Дунаев А. Ю., Неклюдова А. А. Метод детектирования мениска жидкости в капилляре с использованием датчика ультрафиолетового излучения // Эталоны. Стандартные образцы. 2024. Т. 20, № 3. С. 53–64. <https://doi.org/10.20915/2077-1177-2024-20-3-53-64>

Статья поступила в редакцию 29.05.2024; одобрена после рецензирования 27.06.2024; принята к публикации 25.09.2024.

MODERN METHODS OF ANALYSIS OF SUBSTANCES AND MATERIALS

Research Article

Method of Detecting Liquid Meniscus in Capillary Using Ultraviolet Sensor

Anastasia V. Mirgorodskaya^{1,2}  , Aleksandr Yu. Dunaev³ , Anastasiya A. Neklyudova¹ 

¹D. I. Mendeleev Institute for Metrology, St. Petersburg, Russia

 a.v.mirgorodskaya@vniim.ru

²Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia

³All-Russian Research Institute for Optical and Physical Measurements, Moscow, Russia

Abstract: The accuracy of determining the physical and chemical properties of a liquid, in particular, assessing the viscosity of the liquid used, is considered an important technical problem in medicine, food, oil, chemical industries, as well as in other areas that determine the quality and safety of human life and activity. For example, assessing the viscosity of the liquid used is a key stage in the design of hydraulic systems. Today, the improvement of methods for determining the viscosity of a liquid is on the path to automation (digitalization) of measurement instruments and methods. In this area, the activities of metrologists and engineers are consistent with the national program «Digital Economy of the Russian Federation» adopted in 2017.

The article discusses the capillary method for determining the kinematic viscosity of a liquid as the most accurate of all possible methods at present. The method is based on determining the time of liquid flow between two marks, which are applied to the walls of a glass capillary viscometer forming a measuring tank. One of the main problems of this method is that all stages of measurement are performed by a person, even recording the moment when the liquid meniscus crosses the mark, which is a violation of one of the key principles of process automation – independence of execution, which only implies monitoring the operation of the system.

Since ready-made solutions do not fit the laboratory's measurement tasks, the management decided to develop and conduct a study of an information and measuring system that will carry out the process of detecting the liquid meniscus at the mark level, as well as recalculate the measured time interval into the kinematic viscosity value. The key decision in this development is the choice of a sensor for detecting the liquid meniscus. Based on the literature review, it was decided to use a photoelectric sensor. A study of the transmission spectra of liquids used in this method was conducted to select the wavelength at which the sensor will operate. Thus, a type of photoelectric sensor designed to operate in the UV range has been selected to automate the method of detecting the liquid meniscus when it crosses a mark applied to a capillary tube.

The article is addressed to metrologists who perform verification and calibration of glass capillary viscometers, specialists in the field of experimental and theoretical viscometry. The method proposed by the authors can become the basis for further improvement of the method for measuring the kinematic viscosity of a liquid.

Keywords: kinematic viscosity, capillary viscometer, liquid meniscus, ultraviolet radiation sensor, measuring system, automation

Abbreviations used: FIF EUM – Federal Information Fund for Ensuring the Uniformity of Measurements; RM – reference material; UV – ultraviolet.

For citation: Mirgorodskaya A. V., Dunaev A. Yu., Neklyudova A. A. Method of detecting liquid meniscus in capillary using ultraviolet sensor. *Measurement Standards. Reference Materials*. 2024;20(3):53–64 (In Russ.). <https://doi.org/10.20915/2077-1177-2024-20-3-53-64>

The article was submitted 29.05.2024; approved after reviewing 27.06.2024; accepted for publication 25.09.2024.

Введение

Актуальное состояние

Цифровизация и автоматизация определяют технологическую картину мира в XXI веке. Ряд специалистов в своих трудах характеризует данный исторический период как «зарю IV промышленной революции» [2–4], к основным приметам которой относятся развитие «интернета вещей» (англ. *internet of things, IoT*), технологии «больших данных» (англ. *big data*), концепции «киберфизических систем» (англ. *cyber-physical system*).

В Большой российской энциклопедии понятие «автоматизация» обозначает «получение, передачу, хранение, распределение и преобразование информации о состоянии объекта, которым может являться любой предмет познания или деятельность человека, с помощью применения технических и программных средств» [1]. ГОСТ Р 59853–2021¹ определяет «автоматизированный процесс» как «процесс, совершаемый человеком при помощи средств автоматизации». В первую очередь роботизированным, автоматизированным системам делегированы выполняемые вручную рутинные операции [5]. К новым условиям метрологи стремятся адаптировать и методы измерений.

Нормативная база

В Российской Федерации для осуществления цифровизации и автоматизации создана крепкая законодательная база. Так, в 2017 году Правительством Российской Федерации утверждена программа «Цифровая экономика Российской Федерации», определяющая, кроме прочих, следующие цели:

– создание экосистемы цифровой экономики Российской Федерации, в которой данные в цифровой форме являются ключевым фактором производства во всех сферах социально-экономической деятельности, в которой обеспечено эффективное взаимодействие, включая трансграничное, бизнеса,

¹ ГОСТ Р 59853–2021 Информационные технологии. Комплекс стандартов на автоматизированные системы. Автоматизированные системы. Термины и определения.

научно-образовательного сообщества, государства и граждан;

– создание необходимых и достаточных условий институционального и инфраструктурного характера, устранение имеющихся препятствий и ограничений для создания и (или) развития высоко технологических бизнесов и недопущение появления новых препятствий и ограничений как в традиционных отраслях экономики, так и в новых отраслях и высокотехнологичных рынках;

– повышение конкурентоспособности на глобальном рынке как отдельных отраслей экономики Российской Федерации, так и экономики в целом.

Указанные документы служат ориентиром и в деятельности метрологов. Во ВНИИМ им. Д. И. Менделеева ведутся соответствующие разработки [6–10].

Актуальные разработки

В рамках данного исследования важной представляется работа [10] по совершенствованию ГЭТ 17–2018², который состоит из нескольких комплексов. Некоторые из этих комплексов включают вискозиметры стеклянные капиллярные с «висячим уровнем» типа Ubbelohde. Они в совокупности с секундомерами, термометрами и другим вспомогательным оборудованием позволяют реализовать наиболее точный метод определения кинематической вязкости жидкости – капиллярный метод [11].

Определение номинального значения кинематической вязкости градуировочной жидкости данным методом осуществляется следующим образом:

1) вискозиметр из состава эталона заполняют градуировочной жидкостью;

2) вискозиметр с градуировочной жидкостью помещают в термостат и выдерживают не менее 30 минут. При помощи термометра контролируют температуру теплоносителя;

² ГЭТ 17–2018 Государственный первичный эталон единиц динамической и кинематической вязкости жидкости.

3) по завершении термостатирования градуировочной жидкости оператор при помощи вспомогательного оборудования образует в капиллярном вискозиметре так называемый «висячий уровень»;

4) оператор проводит серию измерений времени истечения определенного объема градуировочной жидкости через капилляр вискозиметра путем наблюдения и запуска/остановки секундомера в момент времени пересечения мениском жидкости отметок М1 и М2, нанесенных на капилляр (рис. 1).

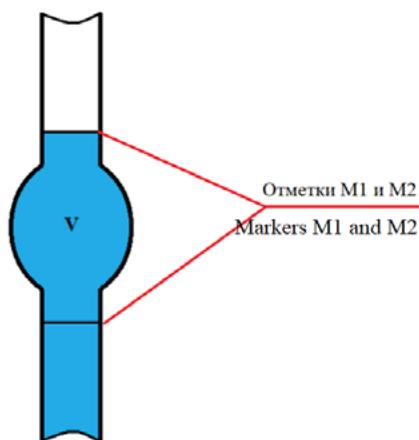


Рис. 1. Схематичное представление нанесения рисок на капилляр вискозиметра

Fig. 1. Schematic representation of the application of drawings on the capillary of the viscometer

Оператор на основании полученных данных рассчитывает значение кинематической вязкости по формуле [1] (уравнение измерений на ЭК ГЭТ 17/1-КВИ)

$$\nu = C \cdot \tau \cdot \left(1 - \frac{e}{\rho}\right) - \frac{B}{\tau},$$

где ν – кинематическая вязкость исследуемой жидкости, мм²/с; C – постоянная вискозиметра, мм²/с²; τ – время истечения жидкости через капилляр вискозиметра, с; e – плотность воздуха, г/см³; ρ – плотность исследуемой жидкости, г/см³; B – постоянная вискозиметра, зависящая от потери жидкостью кинетической энергии, мм².

Проблематика работы

Капиллярный метод является наиболее точным методом определения кинематической вязкости жидкости – на его основе осуществляется процесс воспроизведения и передачи единицы кинематической вязкости от ГЭТ 17–2018 к рабочим эталонам 1-го разряда высокоточным средствам измерений вязкости при помощи градуировочной жидкости методом

сличения (основание – приказ Росстандарта № 2622³). Но на величину итоговой погрешности результатов, полученных капиллярным методом, существенно влияет человеческий фактор, заключающийся в ручном определении моментов запуска и остановки таймера (оператор наблюдает за ходом жидкости при помощи лупы). Задача детектирования момента пересечения мениском отметки требует от оператора уверенных навыков и опыта во избежание ошибок, как это продемонстрировано в работе [13].

Целеполагание

Целью данного исследования являлась разработка информационно-измерительной системы, способной исключить участие человека на этапе запуска и остановки таймера.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить первоочередную задачу – выбрать для дальнейшего взаимодействия с таймером датчик, фиксирующий момент времени пересечения мениском жидкости риск, нанесенных на капилляр.

Материалы и методы

Оборудование

Автоматические системы для вычисления кинематической вязкости жидкостей широко применяются для измерительных задач. Но есть причины, по которым они не могут быть использованы как готовое решение. В частности, подобные системы укомплектованы стандартным набором капиллярных вискозиметров, так что при смене капилляров требуется сложная калибровка [14].

Существует широкий перечень классификаций датчиков [15, 16]. Так, в работе [16] выделено 24 классификационных признака. Выбор подходящего устройства в рамках настоящего исследования начался с того, что были сформулированы некоторые ограничения. В частности, (а) искомый датчик не должен воздействовать на жидкость в капилляре; (б) исключалась возможность помещать посторонние предметы внутрь или поверх капилляров.

К изучению был взят зарубежный опыт [17–19]. Был учтен способ реализации детектирования мениска жидкости в некоторых аналогичных системах, а именно⁴:

³ Об утверждении Государственной поверочной схемы для средств измерений вязкости жидкостей.

⁴ Приведенные ниже регистрационные номера смотреть в ФИФ ОЕИ (Федеральный информационный фонд по обеспечению единства измерений) по ссылке: <https://fgis.gost.ru/fundmetrology/registry>

1) автоматических системах измерения вязкости (автоматическая система измерения вязкости PVS LAUDA (регистрационный номер 33885–07);

2) вискозиметрах автоматических для измерений кинематической вязкости АКВ (регистрационный номер 37803–08);

3) анализаторе вязкости HVM 472 (регистрационный номер 30086–05).

В итоге было решено использовать оптический датчик. Данное решение обладает рядом преимуществ [20, 21]: малые габаритные размеры и масса, высокая чувствительность, электромагнитная совместимость, возможность объединения в сети. Кроме того, применение данного типа датчика обусловлено отсутствием какого-либо влияния на капилляр и жидкость в нем и относительной простотой его конструкции и реализации.

Методология измерений

Идея применения фотоэлектрического датчика заключается в том, что все материалы поглощают излучение в той или иной степени [22, 23]. Излучатель устанавливается напротив отметки, приемник устанавливается также на уровне отметки, но напротив излучателя. При правильном выборе длины волны излучения оно не попадет на приемник в момент, когда мениск жидкости пересечет отметку и цепь разомкнется (или замкнется – что зависит от схемы, применяемой непосредственно в датчике), это приведет к запуску/остановке таймера. Главной отличительной чертой разрабатываемой системы от существующих систем является нахождение детектора за пределами термостата. Следовательно, необходимо учитывать, что капилляр с исследуемым образцом помещен в некоторый теплоноситель и при выборе частоты важно, чтобы для излучения материал теплоносителя был прозрачным (для рабочей длины волны излучения).

Процедура измерений

Номенклатура материалов и оборудования. Для проведения исследований были подготовлены СО вязкости, применяемые при проведении калибровки и поверки вискозиметров стеклянных капиллярных, и образцы материалов теплоносителей из термостатов. Здесь стоит отметить, что ГЭТ 17–2018 аттестован в диапазоне значений температуры от $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+150\text{ }^{\circ}\text{C}$, что является причиной применения разных теплоносителей:

– от $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$ в качестве теплоносителя применяется спирт этиловый ректифицированный «Экстра» из пищевого сырья по ГОСТ 5962–2013⁵;

⁵ ГОСТ 5962–2013 Спирт этиловый ректифицированный из пищевого сырья. Технические условия.

– от $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ – дистиллированная вода по ГОСТ Р 58144–2018⁶;

– от $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ – полиметилсилоксановая жидкость ПМС-20 или силиконовое масло Thermal Silicon OIL 200–10.

Научно-исследовательская лаборатория государственных эталонов в области измерений плотности и вязкости жидкости производит свыше 100 типов СО. Более 20 из них относятся к стандартным образцам вязкости⁷. СО вязкости отличаются интервалами значений кинематической и динамической вязкости. Для проведения исследования было решено использовать СО с регистрационными номерами⁸ ГСО 8586–2004 (РЭВ-2), ГСО 8598–2004 (РЭВ-600), ГСО 8599–2004 (РЭВ-1000), ГСО 8603–2004 (РЭВ-10000).

Параметры исследования. В качестве параметра исследования применялся спектральный коэффициент пропускания, который определяется как отношение величины спектрального потока излучения, прошедшего через исследуемый образец, к величине спектрального потока излучения, падающего на образец. Спектральный коэффициент пропускания является функцией пропускания T от длины волны λ [24]. Пропускание может принимать значения от 0% (вещество полностью поглощает излучение) до 100% (среда полностью прозрачна для излучения).

Для экспериментального исследования использовался спектрофотометр Agilent Cary 5000 из состава вторичного эталона единиц спектрального коэффициента направленного пропускания и оптической плотности в диапазоне длин волн от 0,2 до 2,5 мкм (регистрационные № 2.1.ZZB.0226.2016), позволяющий производить измерения с суммарной стандартной неопределенностью до 0,3% (далее – спектрофотометр).

Алгоритм измерений. Измерения проходили следующим образом. Образцом исследуемой жидкости заполнялась чистая сухая стеклянная кювета с длиной пути 10 мм. Затем кювета помещалась в спектрофотометр. Исследование образца проходило в диапазоне длин волн от 250 до 2500 нм, что позволило наблюдать за характером изменения спектра пропускания образца

⁶ ГОСТ Р 58144–2018 Вода дистиллированная. Технические условия.

⁷ НИЛ 2302. Стандартные образцы : официальный сайт. URL: <https://www.vniim.ru/nil-2302-standard.html#rev> (дата обращения: 29.11.2023).

⁸ Приведенные далее регистрационные номера СО и СИ смотреть в ФИФ ОЕИ (Федеральный информационный фонд по обеспечению единства измерений) по ссылке <https://fgis.gost.ru/fundmetrology/registry>

в зависимости от того, в каком диапазоне ведется наблюдение. Для учета влияния пропускания кюветы при измерении спектрального потока излучения, падающего на образец, в измерительный отсек устанавливалась кювета без вещества.

Все измерения проводились согласно руководству по эксплуатации «Спектрофотометры моделей Cary 100, Cary 300, Cary 4000, Cary 5000, Cary 6000i, Cary 7000. Руководство по эксплуатации» и Правилам содержания и применения эталона⁹.

Результаты и обсуждение

Выводы экспериментальной части

На рис. 2 приведены графики полученных результатов исследования СО на спектрофотометре.

На рис. 3 показаны спектры пропускания образцов теплоносителя из термостатов.

Для простоты отображения на рисунках ниже приводится спектр пропускания только одного из представленных выше СО вязкости. На рис. 4–6 приведены графики спектра пропускания СО вязкости в сравнении с графиками спектра пропускания образцов спирта, масла, дистиллированной воды соответственно.

Полученные зависимости (рис. 2) имеют схожий характер, что объясняется использованием при их

приготовлении материалов одной группы. Также после рассмотрения графиков (рис. 3) можно сделать вывод, что спектры пропускания образцов жидкостей теплоносителя частично похожи на рассмотренные выше спектры пропускания СО. Это объясняется тем, что в состав СО вязкости входят вода, спирты и компоненты, схожие с компонентами, которые применяют при изготовлении масла.

Конструкция фотоприемного устройства

Однако при сравнении каждого образца жидкости теплоносителя со стандартным образцом вязкости (рис. 4–6) можно заметить, что при длине волны излучения от 280 до 360 нм образцы жидкостей теплоносителей будут прозрачны, но при этом СО поглотит все излучение. Данному интервалу длин волн соответствует УФ-диапазон [25]. В состав разрабатываемого устройства для детектирования мениска жидкости должны входить источник узкополосного излучения и фотоприемное устройство УФ-диапазона.

Фотоприемное устройство должно включать приемник оптического излучения, усилитель выходного сигнала и цифро-аналоговый преобразователь, который может быть выполнен в виде мультиметра с цифровым интерфейсом. Предпочтительным приемником оптического излучения является кремниевый фотодиод, оптимизированный для применения в УФ-диапазоне. Фотодиод не требует обязательной модуляции излучения, поэтому оптическая схема устройства может быть сильно упрощена. Однако применение амплитудной модуляции источника предпочтительно для снижения шумов.

Источником узкополосного излучения могут выступать светодиод или лампа накаливания из увиолевого или кварцевого стекла с установленным полосовым фильтром. Применительно к решаемой задаче полосовой

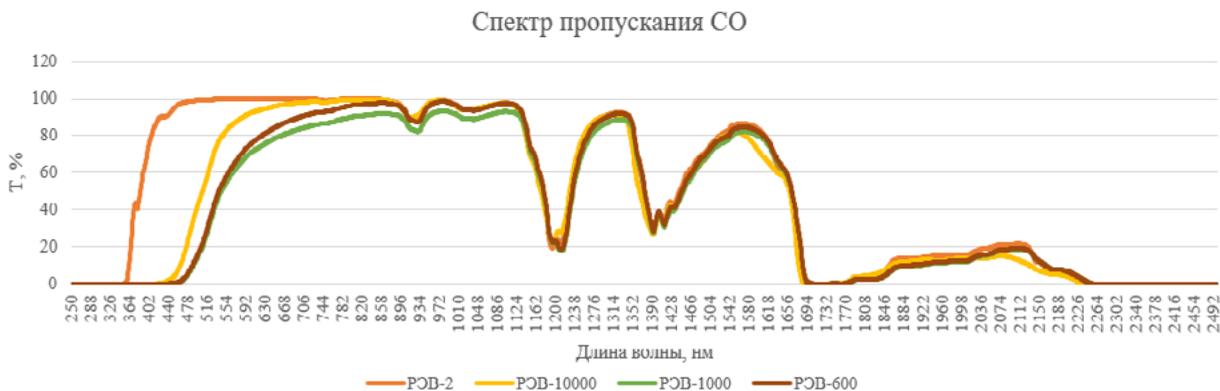


Рис. 2. Спектры пропускания СО
Fig. 2. Transmission spectra of RMs

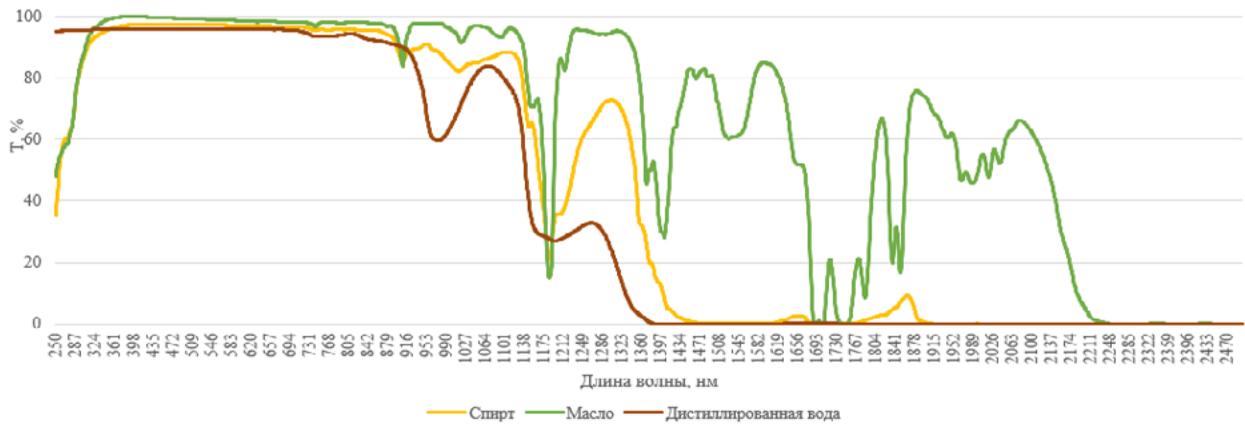


Рис. 3. Спектры пропускания теплоносителей (вода, спирт, масло)
 Fig. 3. Transmission spectra of heat carriers (water, alcohol, oil)

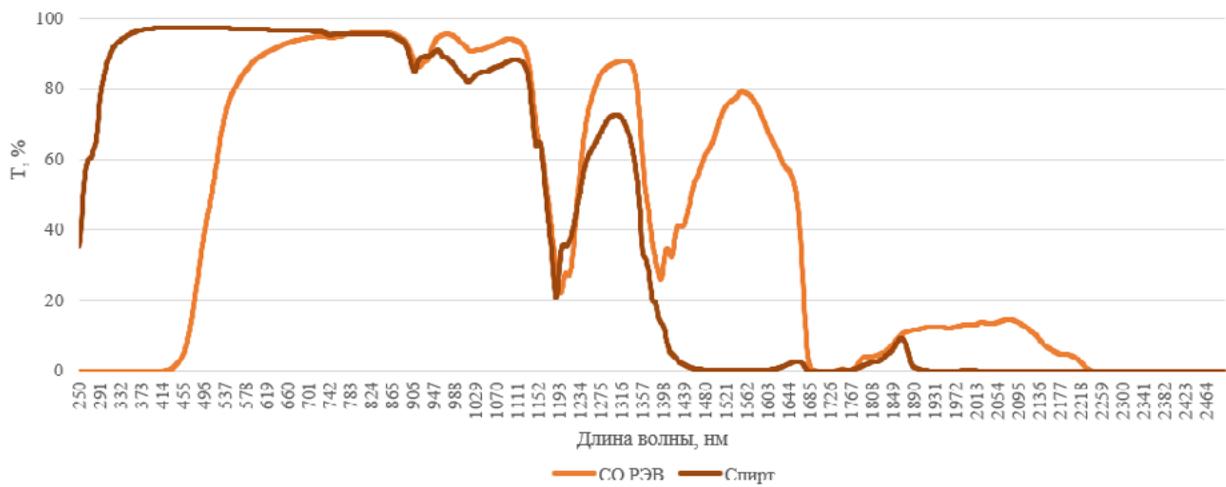


Рис. 4. Сравнение спектров пропускания СО вязкости и спирта
 Fig. 4. Comparison of transmission spectra of viscosity and alcohol RMs

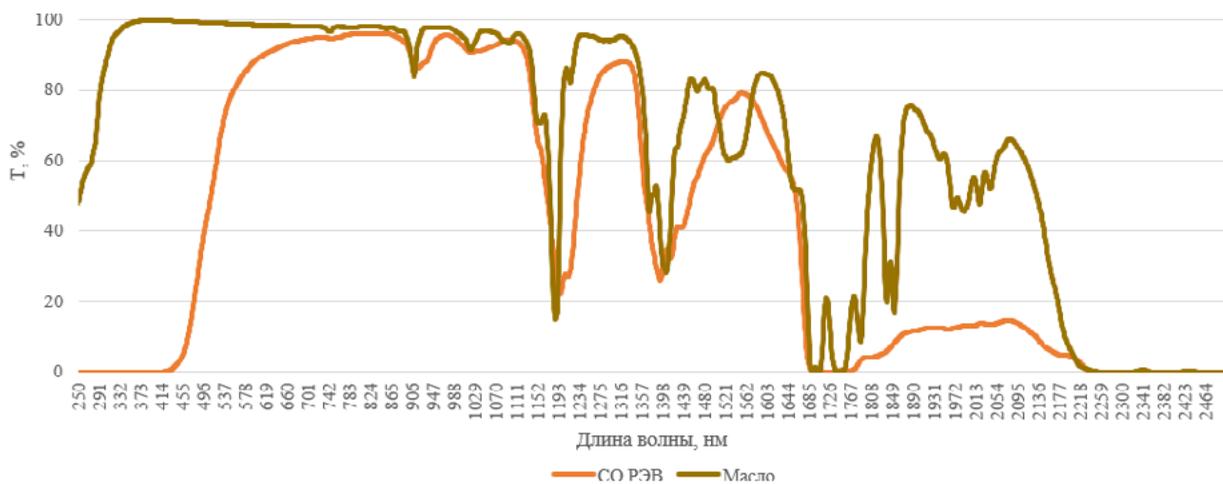


Рис. 5. Сравнение спектров пропускания СО вязкости и масла
 Fig. 5. Comparison of transmission spectra of viscosity and oil RMs

фильтр может быть изготовлен из цветного стекла УФС2 по ГОСТ 9411–91¹⁰.

Заключение

Безусловно, человеческий фактор влияет на качество измерений и достоверность результатов, получаемых капиллярным методом. Учитывая острую конкуренцию в мире современного приборостроения за право развивать передовые технологии, автоматизация является не только закономерным, но и неизбежным этапом для достижения наивысшей точности и объективности результатов. Значимость представленной в статье работы заключается в возможности практического применения автоматизированного мониторинга и слежения за уровнем жидкости, истекающей через прозрачный капилляр, с помощью интегрированных в общую измерительную систему фотометрических УФ-детекторов. Такой подход требует детальной проработки обязательных требований, которым должны соответствовать источник излучения и фотоприемное устройство. Кроме того, для дальнейшей работы необходимо провести исследование оптических свойств материала капиллярного вискозиметра для исключения влияния его поглощающих или рассеивающих свойств на общий спектр поглощения (пропускания), так как капиллярные вискозиметры производятся во многих странах.

В заключение стоит отметить, что применение автоматизированных маркеров для определения уровня жидкости в стеклянном капиллярном вискозиметре – актуальная задача на сегодняшний день. В этой связи изложенный в статье материал своевременный и актуальный.

Благодарности: Автор выражает благодарность ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева» за предоставление технической базы для проведения экспериментов.

¹⁰ ГОСТ 9411–91 Стекло оптическое цветное. Технические условия.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Большая российская энциклопедия 2004–2017 // Министерство культуры Российской Федерации. URL: https://old.bigenc.ru/technology_and_technique/text/1799468 (дата обращения: 28.10.2023).
2. Дравица В., Курбацкий А. Промышленная революция Industry 4 // Наука и инновации. 2016. № 3(157). 13–17 с.
3. Götz M. The industry 4.0 induced agility and new skills in clusters // Foresight and STI Governance. 2019. Vol. 13, № 2. P. 72–83. <https://10.17323/2500–2597.2019.2.72.83>
4. Тихонов К. Новая промышленная революция // Бизнес-журнал. 2013. № 5(206). С. 16–19.
5. Исаков И. Роботизация бизнеса: что такое RPA и кому она нужна // РБК-Тренды. Обновлено 16.06.2022. URL: <https://trends.rbc.ru/trends/innovation/62a8fd169a7947f5847e4d4f> (дата обращения: 28.10.2023).

Acknowledgments: The author expresses gratitude to the D. I. Mendeleev Institute for Metrology for providing the technical base for conducting the experiments.

Вклад соавторов: Миргородская А. В. – постановка цели и задач исследования, выбор и подготовка материалов исследования, участие в проведении исследовательской работы, подготовка проекта статьи, проверка и редакция текста статьи; Дунаев А. Ю. – разработка методологии исследования, проведение исследовательских работ, подготовка и создание визуальных материалов, проверка и редакция текста статьи; Неклюдова А. А. – постановка цели и задач исследования, выбор и подготовка материалов исследования, проверка и редакция текста статьи.

Author Contribution: Mirgorodskaya A. V. – development of the research concept, provision of research materials, writing a draft version of the article, checking and editing the text of the article; Dunaev A. Yu. – development of research methodology, conducting research, preparation and creation of visual materials, checking and editing the text of the article; Neklyudova A. A. – statement of the purpose and objectives of the study, selection and preparation of research materials, verification and editing of the text of the article.

Конфликт интересов: Автор заявляет, что у них нет потенциального конфликта интересов в связи с исследованием, представленным в данной статье.

Conflict of interests: The authors declare no conflict of interest.

Финансирование: Работа выполнена в рамках диссертационного исследования «Информационно-измерительная система определения кинематической вязкости жидкости». Научный руководитель: Малихина Галина Федоровна, профессор, д-р техн. наук.

Funding: The work was carried out within the dissertation research «Information and measuring system for determining the kinematic viscosity of a liquid». Supervisor: Galina F. Malykhina, professor, Dr. Sci. (Eng.).

6. Совершенствование государственного первичного специального эталона единицы давления для разности давлений ГЭТ 95–75 / О. С. Витковский [и др.] // Эталоны. Стандартные образцы. 2020. Т. 16, № 2. С. 17–20. <https://doi.org/10.20915/2687-0886-2020-16-2-17-20>
7. Колокация абсолютного баллистического и относительного криогенного гравиметров во ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева» / Л. Ф. Витушкин [и др.] // Альманах современной метрологии. 2020. № 4(24). С. 255–259.
8. Корнеев Р. А. Совершенствование государственной поверочной схемы для средств измерений расхода и количества жидкости // Эталоны. Стандартные образцы. 2023. Т. 19, № 3. С. 7–20. <https://doi.org/10.20915/2077-1177-2023-19-3-7-20>
9. Колобова А. В., Конопелько Л. А., Попов О. Г. Государственный первичный эталон единиц молярной доли, массовой доли и массовой концентрации компонентов в газовых и газоконденсатных средах ГЭТ 154–2019 // Эталоны. Стандартные образцы. 2020. Т. 16, № 3. С. 23–35. <https://doi.org/10.20915/2687-0886-2020-16-3-23-35>
10. Демьянов А. А., Цурко А. А. Государственный первичный эталон единицы кинематической вязкости жидкости в диапазоне от $4 \cdot 10^{-7} \div 1 \cdot 10^{-1} \text{ м}^2/\text{с}$ (ГЭТ 17–96) : Российская метрологическая энциклопедия. Т. 1. СПб. : Гуманистика, 2015. 904 с.
11. История создания и модернизация государственных первичных эталонов единиц динамической, кинематической вязкости жидкости и плотности / К. В. Чекирда [и др.] // Измерительная техника. 2022. № 7. С. 24–29. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2022-7-24-29>
12. Демьянов А. А., Неклюдова А. А. Государственный первичный эталон единицы кинематической вязкости жидкости ГЭТ 17–96 // Материалы 28 симпозиума по реологии, Москва, 28 сентября – 02 октября 2016 г. М. : Институт нефтехимического синтеза им. А. В. Топчиева РАН, 2016. С. 74–75.
13. Результаты сравнительных измерений кинематической вязкости образцов жидкостей / А. А. Неклюдова [и др.] // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Серия Приборостроение. 2022. № 3(140). С. 103–114. <https://doi.org/10.18698/0236-3933-2022-3-103-114>
14. 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>
15. Шуберт Ю. Ф. Измерительные преобразователи // Вестник Волжского университета им. В. Н. Татищева. 2009. № 14. С. 90–92.
16. Храмов А. В. Первичные измерительные преобразователи измерительных приборов и автоматических систем. Киев: Вища школа, 1988. 527 с. (На укр. яз.).
17. An automated system for performing continuous viscosity versus temperature measurements of fluids using an Ostwald viscometer / L. Y. Beaulieu [et al.] // Review of Scientific Instruments. 2017. Vol. 88, Is. 9. <https://doi.org/10.1063/1.4990134>
18. Will J. C., Hernández I., Trujillo S. Automated measurement of viscosity with ubbelohde viscometers, camera unit and image processing software : Simposio de Metrología, Santiago de Querétaro, México, 22–24 de Octubre 2008 // Semantic scholar. URL: <https://www.semanticscholar.org/paper/Automated-Measurement-of-Viscosity-with-Ubbelohde-%2C/93dc021d428ed5c0e473306fe46684ff8f7d6617> (accessed 28 October 2023).
19. Technological characteristics of assembly procedure for fiberoptic sensors of fluid media parameters / T. I. Murashkina [et al.] // Journal of physics: Conference series. 2020. Vol. 1515, № 5. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1515/5/052060>
20. Качура С. М., Постнов В. И. Перспективные оптоволоконные датчики и их применение (обзор) // Труды ВИАМ. 2019. № 5(77). С. 52–61. <https://doi.org/10.18577/2307-6046-2019-0-5-52-61>
21. Иванов П. А. Оптоэлектронные датчики // Лесной вестник. 2010. № 1. С. 137–139.
22. Латыпова А. Ф., Калинин Ю. Е. Анализ перспективных радиопоглощающих материалов // Вестник ВГТУ. 2012. № 6. С. 70–76.
23. Козлов М. В. Разработка оптоэлектронного датчика для медицинской диагностики // Биомедицинская инженерия и электроника. 2014. № 2(6). С. 91–94.
24. Пацаева С. В., Южаков В. И. Электронные спектры сложных молекул: Спецпрактикум кафедры общей физики. Физический факультет. Кафедра общей физики. М. : Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, 2010. 34 с.
25. Рябцев А. Н. Ультрафиолетовое излучение. Под ред. А. М. Прохорова. М. : Большая Российская энциклопедия, 1998. Т. 5. С. 760.

REFERENCES

1. The great russian encyclopedia. Available at: https://old.bigenc.ru/technology_and_technique/text/1799468 (Accessed 28 October 2023). (In Russ.).
2. Dravitsa V., Kurbatskiy A. N. The industrial revolution Industry 4. *Nauka i innovatsii*. 2016;3(157):13–17. (In Russ.).
3. Götz M. The industry 4.0 induced agility and new skills in clusters. *Foresight and STI governance*. 2019;13(2):72–83. <https://doi.org/10.17323/2500-2597.2019.2.72.83>
4. Tikhonov K. The new industrial revolution. *Biznes-zhurnal*. 2013;5(206):16–19. (In Russ.).
5. Isakov I. Robotization of business: what is RPA and who needs it. *RBC-Trends*. Updated 06.16.2022. (In Russ.). Available at: <https://trends.rbc.ru/trends/innovation/62a8fd169a7947f5847e4d4f> (Accessed 28 October 2023).
6. Vitkovskiy O. S., Teteruk R. A., Gorobey V. N., Pimenova A. A., Firsanov N. A. Improvement of the state primary special standard of the pressure unit for the pressure difference GET 95–75. *Measurement Standards. Reference Materials*. 2020;16(2):17–20. (In Russ.). <https://doi.org/10.20915/2687-0886-2020-16-2-17-20>
7. Vitushkin L. F., Krivtsov E. P., Nalivaev V. V., Orlov O. A. Collocation of absolute ballistic and relative cryogenic gravimeters in the D. I. Mendeleev all-russian institute for metrology (VNIIM). *Almanac of Modern Metrology*. 2020;4(24):255–259. (In Russ.).

8. Korneev R. A. Improvement of the state verification schedule for flow and quantity measuring instruments. *Measurement Standards. Reference Materials*. 2023;19(3):7–20. (In Russ.). <https://doi.org/10.20915/2077-1177-2023-19-3-7-20>
9. Kolobova A. V., Konopelko L. A., Popov O. G. State primary standard of units of molar part, mass part and mass concentration of components in gas and gas condensate environs GET 154-2019. *Measurement standards. Reference materials*. 2019;16(3):23–35. (In Russ.). <https://doi.org/10.20915/2687-0886-2020-16-3-23-35>
10. Demyanov A. A., Tsurko A. A. The state primary standard of a unit of liquid kinematic viscosity at a range from $4 \cdot 10^{-7} \div 1 \cdot 10^{-1} \text{ m}^2/\text{s}$ (GET 17–96). In: Russian metrological encyclopedia. Vol. 1. St. Petersburg: Gumanistika Publ.; 2015. 904 p. (In Russ.).
11. Chekirda K. V., Demyanov A. A., Neklyudova A. A., Domostroevo A. V., Sulaberidze V. Sh. The history of creation and modernization of the state primary standards of units of dynamic, kinematic viscosity of liquid and density. *Measurement Techniques*. 2022;7:24–29. (In Russ.). <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2022-7-24-29>
12. Demyanov A. A., Neklyudova A. A. National primary standard of the unit kinematic viscosity of the liquid. In: *Materials 28th Symposium on Rheology*. Moscow: 2016. P. 74–75. (In Russ.).
13. Neklyudova A. A., Demyanov A. A., Sulaberidze V. Sh., Chekirda K. V. Results of comparative kinematic viscosity measurements for fluid samples. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Instrument Engineering*. 2022;3(140):103–114. (In Russ.). <https://doi.org/10.18698/0236-3933-2022-3-103-114>
14. Mirgorodskaya A. V. The history of the development of the capillary method of measuring kinematic viscosity: from the Lomonosov viscometer to the information measuring system. *Measurement Techniques*. 2023;8:53–59. (In Russ.). <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2023-8-53-59>
15. Shubert Yu. F. Measuring transducers. *Vestnik V. N. Tatishchev Volga State University (Institute)*. 2009;14:90–92. (In Russ.). <https://elibrary.ru/owlzqv?ysclid=ly5gfo7gyx904849599>
16. Khranov A. V. Primary measuring transducers of measuring instruments and automatic systems. Kiev: Vischa shkola; 1988. 527 p. (In Ukr.).
17. Beaulieu L. Y., Logan E. R., Gering K. L., Dahn J. R. An automated system for performing continuous viscosity versus temperature measurements of fluids using an Ostwald viscometer. *Review of Scientific Instruments*. 2017;88(9). <https://doi.org/10.1063/1.4990134>
18. Will J. C., Hernández I., Trujillo S. Automated measurement of viscosity with ubbelohde viscometers, camera unit and image processing software. Simposio de metrología, Santiago de Querétaro, México, 22–24 de Octubre 2008. Available at: *Semantic scholar*. URL: <https://www.semanticscholar.org/paper/Automated-Measurement-of-Viscosity-with-Ubbelohde-%2C/93dc021d428ed5c0e473306fe46684ff8f7d6617> (Accessed 28 October 2023).
19. Murashkina T. I., Badeeva E. A., Khasanshina N. A., Shachneva E. A., Polyakova E. A. Technological characteristics of assembly procedure for fiberoptic sensors of fluid media parameters. *Journal of physics: Conference series*. 2020;1515(5). <https://10.1088/1742-6596/1515/5/052060>
20. Kachura S. M., Postnov V. I. Promising fiber-optic sensors and their application (overview). *Trudy All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials*. 2019;5 (77):52–61. (In Russ.). <https://10.18577/2307-6046-2019-0-5-52-61>
21. Ivanov P. A. Optoelectronic sensors. *Lesnoy vestnik*. 2010;1:137–139.
22. Latypova A. F., Kalinin Yu. E. Analysis of promising radio-absorbing materials. *Vestnik Voronezh State Technical University*. 2012;6:70–76.
23. Kozlov M. V. Development of an optoelectronic sensor for medical diagnostics. *Biomeditsinskaya Inzheneriya i Elektronika*. 2014;2(6):91–94.
24. Patsaeva S. V., Yuzhakov V. I. Electronic spectra of complex molecules. Special practice of the Department of General Physics. Faculty of Physics. Department of General Physics. Moscow: 2010. 34 p.
25. Ryabtsev A. N. Ultraviolet radiation. Study guide A. M. Prokhorov. Moscow: The Great Russian Encyclopedia; 1998. 760 p.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- ГОСТ Р 58144–2018 Вода дистиллированная. Технические условия = Distilled water. Specifications. М. : ФГБУ «РСТ», 2022. С. 10.
- ГОСТ 5962–2013 Спирт этиловый ректификованный из пищевого сырья. Технические условия = Rectified ethyl alcohol from edible raw material. Specifications. М. : Стандартинформ, 2014. С. 5.
- ГОСТ 9411–91 Стекло оптическое цветное. Технические условия = Coloured optical glass. Specifications. М. : Издательство стандартов, 1992. 47 с.
- ГОСТ Р 59853–2021 Информационные технологии. Комплекс стандартов на автоматизированные системы. Автоматизированные системы. Термины и определения = Information technology. Set of standards for automated systems. Automated systems. Terms and definitions. М. : Российский институт стандартизации, 2021. 16 с.
- ГЭТ 17–2018 Государственный первичный эталон единиц динамической и кинематической вязкости жидкости / Институт-хранитель ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева» // Федеральный информационный фонд по обеспечению единства измерений : официальный сайт. URL: <https://fgis.gost.ru/fundmetrology/registry/12/items/947620> (дата обращения: 28.10.2023).

НИЛ 2302. Стандартные образцы : официальный сайт. <https://www.vniim.ru/nil-2302-standard.html> (дата обращения: 29.11.2023).

ФИФ ОЕИ – Федеральный информационный фонд по обеспечению единства измерений : официальный сайт.
URL: <https://fgis.gost.ru/#/>

Об утверждении Государственной поверочной схемы для средств измерений вязкости жидкостей : Приказ Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 5 ноября 2019 г. № 2622 // Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии : официальный сайт.

URL: <https://www.rst.gov.ru/portal/gost/home/activity/documents/orders?portal:componentId=e493102f-5217-43e9-8821> (дата обращения: 29.11.2023).

Об утверждении требований к содержанию и построению государственных поверочных схем и локальных поверочных схем, в том числе к их разработке, утверждению и изменению, требований к оформлению материалов первичной аттестации и периодической аттестации эталонов единиц величин, используемых в сфере государственного регулирования обеспечения единства измерений, формы свидетельства об аттестации эталона единицы величины, требований к оформлению правил содержания и применения эталона единицы величины, формы извещения о непригодности эталона единицы величины к его применению : Приказ Минпромторга России от 11.02.2020 г. № 456 // Информационно-правовой портал «Гарант.ру» [сайт].
URL: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/74448299/?ysclid=ly49fysi6t260904926> (дата обращения: 28.10.2023).

Программа «Цифровая экономика Российской Федерации» : Распоряжение Правительства Российской Федерации от 28.07.2017 г. № 1632-р // Информационно-правовой портал «Гарант.ру» [сайт].

URL: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/71634878/?ysclid=ly5nqtlmd4486702140> (дата обращения: 28.10.2023).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Миргородская Анастасия Викторовна – аспирант, младший научный сотрудник, ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева», Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

190005, Россия, Санкт-Петербург, Московский пр-т, д. 19, литера Д

e-mail: a.v.mirgorodskaya@vniim.ru

<https://orcid.org/0000-0003-1468-934X>

Дунаев Александр Юрьевич – канд. техн. наук, заместитель начальника лаборатории, ФГБУ «Всероссийский научно-исследовательский институт оптико-физических измерений» (ВНИИОФИ)

119361, Россия, г. Москва, ул. Озерная, д. 46

e-mail: dunaev@vniiofi.ru

<https://orcid.org/0000-0002-6319-1014>

Неклюдова Анастасия Александровна – канд. техн. наук, заместитель руководителя научно-исследовательской лаборатории госэталонов в области измерений плотности и вязкости жидкости, доцент кафедры «Теоретическая и прикладная метрология» ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева»

190005, Россия, Санкт-Петербург, пр-т Московский, д. 19, литера Д

e-mail: A.A.Tsurko@vniim.ru

<https://orcid.org/0009-0005-0472-6962>

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Anastasia V. Mirgorodskaya – postgraduate student, Junior Researcher, D. I. Mendeleev Institute for Metrology, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University

19 Moskovsky ave., St. Petersburg, 190005, Russia

e-mail: a.v.mirgorodskaya@vniim.ru

<https://orcid.org/0000-0003-1468-934X>

Aleksandr Yu. Dunaev – Cand. Sci. (Eng.), Deputy Head of the Laboratory, All-Russian Research Institute for Optical and Physical Measurements (VNIIOFI)

46 Ozernaya st., Moscow, 119361, Russia

e-mail: dunaev@vniiofi.ru

<https://orcid.org/0000-0002-6319-1014>

Neklyudova Anastasiya A. – Cand. Sci. (Eng.), Deputy Head of the Density and Viscosity Laboratory, Associate Professor of the Department of Theoretical and Applied Metrology, D. I. Mendeleev Institute for Metrology

19 Moskovsky ave., St. Petersburg, 190005, Russia

e-mail: A.A.Tsurko@vniim.ru

<https://orcid.org/0009-0005-0472-6962>