

## ЭТАЛОНЫ

Обзорная статья

УДК 53.089.68


<https://doi.org/10.20915/2077-1177-2024-20-1-17-30>



# Комплексы ГЭТ 17/1–КВИ и ГЭТ 17/2–КВН из состава Государственного первичного эталона единиц динамической и кинематической вязкости жидкости ГЭТ 17–2018

А. А. Демьянов  

ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева», г. Санкт-Петербург, Россия

 A.A.demyanov@vniim.ru

**Аннотация:** Вязкость – важнейшее свойство жидких сред, определяющее их качество, а также возможности их переработки и транспортировки. Измерения вязкости выполняют во многих отраслях промышленности для управления технологическими процессами, в которых вязкость является одним из контролируемых параметров конечного продукта. Точность измерений вязкости важна также в медицине и биологии, для организации исследований новых материалов.

Настоящая статья в жанре обзора поднимает вопросы измерения вязкости жидкости капиллярным методом, раскрывает факторы и причины, обосновывающие становление капиллярного метода как основного метода высокоточных измерений, который нашел применение во многих странах.

Автор приводит описание двух эталонных комплексов из состава Государственного первичного эталона единиц динамической и кинематической вязкости жидкости ГЭТ 17–2018. Первого – ЭК ГЭТ 17/1–КВИ, предназначенного для воспроизведения, хранения и передачи единицы кинематической вязкости в диапазоне значений температуры от 20 до 40 °С. Второго – ЭК ГЭТ 17/2–КВН, предназначенного для воспроизведения, хранения и передачи единицы кинематической вязкости в диапазонах значений температуры от –40 до +20 °С и от 40 до 150 °С. В фокусе внимания – принцип работы и основные метрологические характеристики данных эталонных комплексов, а также результаты международных ключевых сличений с их участием.

В перспективе материалы исследования могут оказать влияние при определении вектора развития средств и методов измерения вязкости жидкости.

**Ключевые слова:** воспроизведение единицы, капиллярный метод, кинематическая вязкость, метод Step Up, сличения, эталон

**Ссылка при цитировании:** Демьянов А. А. Комплексы ГЭТ 17/1–КВИ и ГЭТ 17/2–КВН из состава Государственного первичного эталона единиц динамической и кинематической вязкости жидкости ГЭТ 17–2018 // Эталоны. Стандартные образцы. 2024. Т. 20, № 1. С. 17–30. <https://doi.org/10.20915/2077-1177-2024-20-1-17-30>.

Статья поступила в редакцию 17.01.2024; одобрена после рецензирования 26.02.2024; принята к публикации 25.03.2024.


## MEASUREMENT STANDARDS

Review article

# Complexes GET 17/1–KVI and GET 17/2–KVN from GET 17–2018 State Primary Standard of Dynamic and Kinematic Liquid Viscosities

Aleksey A. Demyanov  

D. I. Mendeleyev Institute for Metrology, Saint Petersburg, Russia

 A.A.demyanov@vniim.ru

**Abstract:** Viscosity is the most important property of liquid medium, determining the quality, as well as the possibility of their processing and transportation. Viscosity measurements are performed in many industries to control technological processes in which viscosity is one of the controlled parameters of the final product. Accuracy of viscosity measurements is also necessary in medicine and biology to organize research for new materials.

This review article raises issues of measuring liquid viscosity using the capillary method, reveals the factors and reasons justifying the emergence of the capillary method as the main method of high-precision measurements used in many countries.

The author describes two standard complexes from GET 17–2018 State Primary Standard of Dynamic and Kinematic Liquid Viscosities. The first is EK GET 17/1–KVI designed for reproducing, storing, and transmitting a unit of kinematic viscosity in the temperature range from 20 to 40 °C. The second is EK GET 17/2–KVN designed for reproducing, storing, and transmitting a unit of kinematic viscosity in the temperature ranges from –40 to +20 °C and from 40 to 150 °C. The focus is on the operating principle and main metrological characteristics of these reference complexes, as well as the results of international key comparisons involving them.

In the future, the research materials may influence the development vector of means and methods for measuring liquid viscosity.

**Keywords:** reproduction of unit, capillary method, kinematic viscosity, Step Up method, comparisons, standard

**For citation:** Demyanov A. A. Complexes GET 17/1–KVI and GET 17/2–KVN from GET 17–2018 State Primary Standard of Dynamic and Kinematic Liquid Viscosities. *Measurement Standards. Reference Materials*. 2024;20(1):17–30. (In Russ.). <https://doi.org/10.20915/2077-1177-2024-20-1-17-30>

The article was submitted 17.01.2024; approved after reviewing 26.02.2024; accepted for publication 25.03.2024.

### Введение

#### Эмпирическая база

Вязкость – физическая характеристика, которая описывает сопротивление жидкости или газа потоку. Она играет важную роль в различных производственных сферах, таких как нефтяная [1–4] и газовая [5–7] промышленность, химическая индустрия, пищевая промышленность [8], медицина [9–11] и технологии покрытий. Вязкость является ключевым свойством жидких сред, определяющим их качество, возможность переработки и транспортировки [12–15]. Средства измерений вязкости используются для контроля вязкости, например, следующим образом:

- в нефтяной промышленности – для наблюдения за ухудшением состояния моторного масла [16];
- в фармацевтике – для обеспечения смешиваемости лекарств и крови [17];
- в области биомедицинской диагностики – для анализа биологических жидкостей (в частности – слюны и мочи) [18–20];
- в пищевой промышленности рисоводы применяют экспресс-анализ вязкости в качестве показателя качества риса; кривые вязкости пригодны также для прогнозирования сенсорных свойств образца риса или технологических свойств риса при использовании в качестве ингредиента [21].

### Номенклатура средств измерений

Наиболее распространенные приборы для определения динамической и кинематической вязкости – вискозиметры – как правило, подразделяют на четыре типа:

- 1) вискозиметры с капиллярной трубкой [22–24];
- 2) с падающим шариком [25–26];
- 3) ротационные [27–28];
- 4) вибрационные [29].

Чашечные [30] и аэрогидродинамические [31] вискозиметры упомянем в числе прочих.

Капиллярные вискозиметры и вискозиметры с падающим шариком оценивают вязкость путем измерения времени движения жидкости или падающего объекта. Принцип работы ротационных и вибрационных вискозиметров основан на измерении приложенного усилия при различных скоростях сдвига. Обычно вискозиметры обладают высокой точностью измерений вязкости, но для получения надежных и точных результатов им требуется большой объем образца.

По сведениям ФГИС «Аршин»<sup>1</sup>, в настоящее время в Российской Федерации зарегистрировано около 250 утвержденных типов средств измерений вязкости. Номенклатура этих средств измерений разнообразна: капиллярные вискозиметры, применяемые в лабораториях контроля качества продукции; ротационные лабораторные и поточные приборы, шариковые и колебательные, используемые для контроля вязкости в потоках транспортируемой по трубопроводам жидкости. Диапазоны измерений вязкости указанных приборов лежат в пределах от 1,0 до  $1 \cdot 10^9$  мПа·с и более – для динамической вязкости; от 0,2 до  $1 \cdot 10^5$  мм<sup>2</sup>/с – для вязкости кинематической.

### ГЭТ 17-2018: этапы формирования

Единство измерений вязкости обеспечивается в соответствии с Государственной поверочной схемой для средств измерений вязкости жидкости<sup>2</sup>, утвержденной приказом Росстандарта № 2622<sup>3</sup>.

<sup>1</sup> Утвержденные типы средств измерений // Федер. информац. фонд по обеспеч. единства измерений [сайт]. URL: <https://fgis.gost.ru/fundmetrology/registry/4> (дата обращения: 17.10.2023).

<sup>2</sup> ГОСТ 8.025–96 Государственная система обеспечения единства измерений. Государственная поверочная схема для средств измерений вязкости жидкостей = State system for ensuring the uniformity of measurements. State verification schedule for means measuring viscosity of liquids. М. : ИПК Издательство стандартов, 1997. 8 с.

<sup>3</sup> Об утверждении Государственной поверочной схемы для средств измерений вязкости жидкостей : Приказ от 05 ноября 2019 г. № 2622 // Федер. информац. фонд по обеспеч. единства измерений [сайт]. URL: <https://www.rst.gov.ru/portal/gost/home/activity/documents/orders#/order/126301> (дата обращения: 17.10.2023).

Во главе поверочной схемы стоит Государственный первичный эталон единиц динамической и кинематической вязкости жидкости (ГЭТ 17–2018)<sup>4</sup>, от которого размер единицы вязкости передается рабочим эталонам 1-го и 2-го разрядов и далее от них – средствам измерений.

Разработка ГЭТ 17–2018 (до 2018 г. исходное наименование «ГЭТ 17») в период с 1938 по 1946 гг. началась с исследования классических методов измерения вязкости, а именно:

- капиллярного метода;
- метода падающего (катящегося) шара – метода Стокса;
- ротационного метода;
- вибрационного, или колебательного, метода;
- условного метода.

В результате проведенных коллективом Всесоюзного научно-исследовательского института метрологии (ныне ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева») исследований была обоснована целесообразность принятия капиллярного метода для создания Государственного первичного эталона (ГПЭ). По сравнению с другими методами капиллярный метод показал более высокую точность измерений вязкости жидкостей и применимость в широком диапазоне значений температуры [32–34].

За основу ГПЭ взяты вискозиметры капиллярные стеклянные эталонные со свободным истечением, или как они еще называются – вискозиметры с «висячим уровнем». Данный тип приборов калибруют по методу Step up [35], который представляет собой последовательную ступенчатую калибровку каждой группы вискозиметров путем определения постоянной  $C$  с использованием градуировочных жидкостей. Для калибровки первой и второй групп вискозиметров в качестве градуировочной жидкости используют свежеперегнанную дважды дистиллированную воду, вязкость которой принимают за опорное значение в соответствии с ГОСТ 21727–76<sup>5</sup>. Большое преимущество вискозиметров капиллярных стеклянных эталонных в том, что они отличаются простотой конструкции, относительно дешевы и требуют малого количества исследуемой жидкости, что позволяет ее лучше термостатировать.

<sup>4</sup> ГЭТ 17–2018 Государственный первичный эталон единиц динамической и кинематической вязкости жидкости / Институт-хранитель 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: 17.10.2023).

<sup>5</sup> ГОСТ 21727–76 Вода. Вязкость при температуре 20 °С = Water. Viscosity of water at 20 °C. М. : Издательство стандартов, 1976. 3 с.

До 2019 г. метрологическое обеспечение средств измерений для исследования вязких, вязкоупругих и вязкоупругих пластичных сред располагало стандартными образцами вязкости жидкости, аттестованными в диапазоне значений температуры от 20 до 100 °С.

В результате выполнения комплекса научно-исследовательских работ, проведенных при совершенствовании ГЭТ 17–96, его функциональные возможности позволили воспроизводить единицу кинематической вязкости в диапазоне значений температуры от –40 до +150 °С, а также в области избыточных давлений до 4 МПа, со средним квадратическим отклонением (СКО) результата измерений, не превышающим  $1,5 \cdot 10^{-4}$ , и неисключенной систематической погрешностью (НСП), не превышающей  $2,2 \cdot 10^{-3}$ , в области нормальных значений давления и температуры от 20 до 100 °С и с СКО результата измерений, не превышающим  $7 \cdot 10^{-4}$ , и НСП, не превышающей  $4,4 \cdot 10^{-3}$ , в области избыточных значений давления до 4 МПа, значений температуры от –40 до +20 °С и от 40 до 150 °С [36–37].

### **Актуальность**

В мировой метрологии не ослабевает интерес к расширению функциональных возможностей средств измерений вязкости жидкости. В последние 10 лет значительно расширился спектр средств измерений (СИ), позволяющих проводить измерения динамической и кинематической вязкости жидкости в широком диапазоне значений температуры. Все эти СИ требуют соответствующих средств поверки – стандартных образцов, аттестованные значения вязкости которых прослеживаются к соответствующему ГПЭ.

В Российской Федерации период с 2015 по 2019 гг. проведены работы по очередному совершенствованию ГЭТ 17–96 во исполнение требований Распоряжения Правительства РФ № 737-р<sup>6</sup>. В частности, пункт 3 раздела III указанного распоряжения констатировал, что Российская Федерация отставала от уровня передовых государств (а) по ряду областей измерений (в том числе, измерений вязкости) и (б) по периодичности обновления национальных эталонов.

Указанные выше факты предопределили актуальность данной статьи и данных исследований, направленных на подтверждение полученных

при совершенствовании ГЭТ 17–2018 обновленного ГЭТ 17/1–КВИ и разработанного ГЭТ 17/2–КВН. Цель работы – на основе литературных данных и результатов ключевых сличений провести анализ капиллярного метода измерений вязкости и обосновать полученные в ходе совершенствования ГЭТ 17–2018 метрологические характеристики ЭК ГЭТ 17/2–КВН.

Полученные выводы предоставят возможности для изучения системы концепций, установления причины появления капиллярного метода в качестве основного метода и формулирования плана дальнейшего совершенствования системы обеспечения единства измерений вязкости жидкостей в Российской Федерации.

### **Материалы и методы**

#### ***Состав, принцип действия, метрологические характеристики ГЭТ 17–2018***

Усовершенствованный ГЭТ 17–2018, возглавляющий актуализированную ГПЭ, представляет собой сложный комплекс аппаратуры, реализующей следующие методы воспроизведения единицы вязкости:

– капиллярный: единица кинематической вязкости в диапазоне значений температуры от –40 до +150 °С;

– вибрационный: единица динамической вязкости в потоке жидкости;

– метод падающего (катящегося) шара: единицы динамической и кинематической вязкости при избыточных значениях давления.

Пересчет значений динамической и кинематической вязкости производится с применением значений плотности исследуемой жидкости при заданных значениях температуры и давления. Значения плотности определяются с применением ГЭТ 18–2014<sup>7</sup>, рабочих эталонов единицы плотности и высокоточных средств измерений.

На основе анализа существующих методов измерений вязкости и исходя из измерительных возможностей для обеспечения воспроизведения единицы вязкости в диапазоне значений температуры от –40 до +150 °С выбран капиллярный метод. Данный метод наиболее оптимальный и научно обоснованный, обладает высокой точностью и большим диапазоном воспроизведения единицы вязкости, а также широкими возможностями по установке и поддержанию температурных условий измерений [38–40].

<sup>6</sup> Об утверждении Стратегии обеспечения единства измерений в Российской Федерации до 2025 г.; Распоряжение Правительства РФ от 19 апреля 2017 года № 737-р // Информационно-правовой портал Гарант.ру [сайт]. URL: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/71563952/> (дата обращения: 17.10.2023).

<sup>7</sup> ГЭТ 18–2014 Государственный первичный эталон единицы плотности / Институт-хранитель ВНИИМ им. Д. И. Менделеева // Федеральный информационный фонд по обеспечению единства измерений : официальный сайт. URL: <https://fgis.gost.ru/fundmetrology/registry/12/items/397864> (дата обращения: 17.10.2023).

В качестве эталонного метода воспроизведения единицы в диапазоне значений температуры от  $-40$  до  $+150$  °C выбран, как ранее отмечалось, капиллярный метод, реализованный с помощью набора вискозиметров стеклянных капиллярных эталонных. Таким образом, в состав эталона вошли два комплекса на основе капиллярного метода измерений:

комплекс 1: эталонный комплекс ГЭТ 17/1–КВИ, предназначенный для воспроизведения, хранения и передачи единицы кинематической вязкости жидкости в диапазоне значений температуры от  $20$  до  $40$  °C. В основу комплекса легли стеклянные капиллярные вискозиметры из состава ГЭТ 17–96;

комплекс 2: эталонный комплекс ГЭТ 17/2–КВН, предназначенный для воспроизведения, хранения и передачи единицы кинематической вязкости жидкости в диапазоне значений температуры от  $-40$  до  $+20$  °C и от  $40$  до  $150$  °C. В состав комплекса вошли вискозиметры Master-Ubbelohde (производитель PSL Rheotek, Великобритания).

### Методика исследования

Методика исследования вискозиметров стеклянных капиллярных эталонных Master-Ubbelohde заключалась в проведении процедуры калибровки, при которой производилось определение постоянной каждого вискозиметра.

Перед проведением процедуры калибровки выполнялись следующие операции:

- 1) внешний осмотр;
- 2) промывка и сушка вискозиметров;
- 3) приготовление градуировочных жидкостей;
- 4) заполнение ванны вискозиметрической бани термостатирующей жидкостью;
- 5) термостатирование.

При внешнем осмотре устанавливалось соответствие следующим требованиям:

- вискозиметры должны быть изготовлены из бесцветного стекла;
- трубки вискозиметра должны быть параллельны между собой;
- кольцевые риски должны быть нанесены в плоскости перпендикулярной оси трубки;
- на вискозиметре должен быть нанесен его номер и диаметр капилляра.

Промывка и сушка вискозиметров проводилась в следующем порядке:

- 1) вискозиметры, не загрязненные материалом градуировочной жидкости, промывали горячей водой; вискозиметры, загрязненные материалом градуировочной

жидкости, сначала тщательно промывали бензином или другим подходящим растворителем, затем не менее чем десятью порциями горячей воды и заполняли хромовой смесью не менее чем на шесть часов;

2) вискозиметры заливали не менее чем на два часа хромовой смесью;

3) по истечении минимум двух часов удаляли хромовую смесь из вискозиметра;

4) вискозиметры промывали неоднократно горячей водой, затем дистиллированной водой;

5) вискозиметры сушили в сушильном шкафу при температуре не более  $100$  °C.

На первом этапе исследования метрологических характеристик эталонного комплекса заключались в определении постоянных вискозиметров.

Постоянные вискозиметров эталонных первых двух групп согласно схеме на рис. 1 определяли также по значению вязкости эталонной жидкости (воды).

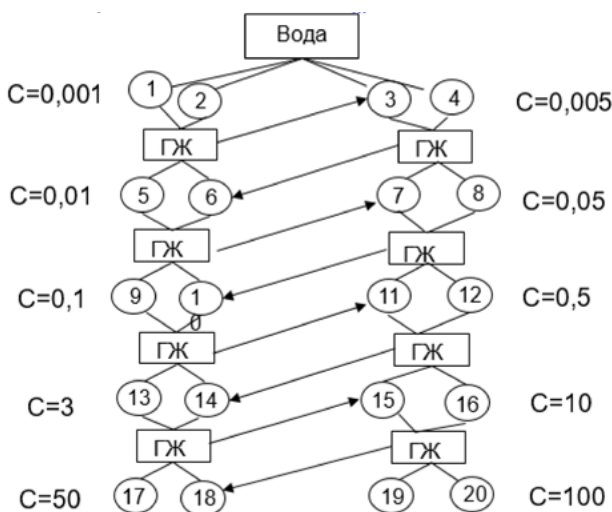


Рис. 1. Схема определения постоянных  $C$  вискозиметров  
Fig.1. Scheme for determining constant  $C$  of viscometers

Определение постоянных всех остальных групп вискозиметров эталонных производилось методом Step up («ступенчатая калибровка») при помощи градуировочных жидкостей таким образом, что два вискозиметра одной группы, постоянные которых уже определены, и два вискозиметра последующей группы заполняли одной к той же градуировочной жидкостью. Измерения времени истечения производили при одной и той же температуре с отклонением не более  $\pm 0,005$  °C по всей длине вискозиметров.

Точное значение вязкости градуировочной жидкости не играло роли, так как значения постоянных рассчитывали по соотношению времен истечения, следующих

из уравнения (1), и с учетом схемы калибровки, изображенной на рис. 1.

$$C_i = \frac{1}{3 \cdot N} \sum_{l=1}^L \sum_{i=1}^N \frac{C_{i-1} \cdot t_i}{t_{ip}}, \quad (1)$$

где  $N$  – число измерений;

$C_i$  – постоянная  $i$ -го вискозиметра;

$L$  – число вискозиметров;

$t_i$  – среднее значение времени течения жидкости в  $i$ -ом вискозиметре.

Значение постоянной  $C$  вискозиметров вычисляли как среднее арифметическое  $C_1$  и  $C_2$

$$C_1 = \frac{V_1}{\tau_1} \cdot \frac{g_H}{g_{\text{МИ}}}, \quad (2)$$

$$C_2 = \frac{V_2}{\tau_2} \cdot \frac{g_H}{g_{\text{МИ}}}, \quad (3)$$

где  $C_1$  и  $C_2$  – значения постоянных вискозиметра, определенные по двум градуировочным жидкостям, мм<sup>2</sup>/с<sup>2</sup>;

$g_H$  – нормальное ускорение свободного падения, равное 9,80665 м/с<sup>2</sup>;

$g_{\text{МИ}}$  – ускорение свободного падения в месте проведения калибровки вискозиметра, равное 9,81867 м/с<sup>2</sup> для ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева»;

$v_i$  – значение кинематической вязкости  $i$ -ой градуировочной жидкости, мм<sup>2</sup>/с;

$\tau_i$  – среднее арифметическое измеренное значение времени истечения  $i$ -ой градуировочной жидкости, предложенное в [41].

Значение постоянной  $C$  вискозиметра округляли до пяти значащих цифр.

Основные метрологические характеристики эталонных комплексов ГЭТ 17/1–КВИ и ГЭТ 17/2–КВН из состава ГЭТ 17–2018, полученные по результатам совершенствования Государственного первичного эталона единицы кинематической вязкости жидкости ГЭТ 17–96, приведены в табл. 1.

#### Ключевые сличения национальных эталонов вязкости жидкости

В 2018 г. ВНИИМ им. Д. И. Менделеева принял участие в Международных сличениях национальных эталонов вязкости жидкости CIPM Key Comparison of Viscosity CCM.V-K4:2018<sup>8</sup>. Сличения проходили с 8 января по 30 апреля 2018 г. с участием 12 лабораторий, описанных в табл. 2.

<sup>8</sup>CIPM Key Comparison of Viscosity CCM.V-K4:2018 // Интернет-платформа CIPM MRA [сайт]. URL: <https://www.bipm.org/kcdb/comparison?id=1866> (дата обращения: 17.10.2023).

CIPM Key Comparison of Viscosity CCM.V-K4:2018 // Интернет-платформа CIPM MRA [сайт]. URL: <https://www.bipm.org/kcdb/comparison?id=1867> (дата обращения: 17.10.2023).

Таблица 1. Метрологические характеристики эталонных комплексов ГЭТ 17/1–КВИ и ГЭТ 17/2–КВН из состава ГЭТ 17–2018

Table 1. Metrological characteristics of the reference complexes GET 17/1–KVI and GET 17/2–KVN from GET 17–2018

Наименование метрологической характеристики	Значение
<i>ЭК ГЭТ 17/1–КВИ</i>	
Диапазон значений единицы кинематической вязкости жидкости, мм <sup>2</sup> /с	от $4,0 \cdot 10^{-1}$ до $1,0 \cdot 10^5$
Относительное среднее квадратическое отклонение результата измерений ( $S_o$ ) при 10 независимых измерениях, не превышает	$1,5 \cdot 10^{-4}$
Неисключенная систематическая погрешность ( $\Theta_o$ ), не превышает	$2,0 \cdot 10^{-3}$
Относительная стандартная неопределенность, оцененная по типу $A$ , $u_A$ , не превышает	$1,5 \cdot 10^{-4}$
Относительная стандартная неопределенность, оцененная по типу $B$ , $u_B$ , не превышает	$8,4 \cdot 10^{-4}$
Относительная суммарная стандартная неопределенность, $u_R$ , не превышает	$8,5 \cdot 10^{-4}$
Относительная расширенная неопределенность при коэффициенте охвата, $k = 2$ ( $P = 0,95$ ), $U_R$ , не превышает	$1,7 \cdot 10^{-3}$

Окончание табл. 1  
End of Table 1

Наименование метрологической характеристики	Значение
<i>ЭК ГЭТ 17/2–КВН</i>	
Диапазон значений единицы кинематической вязкости жидкости, мм <sup>2</sup> /с	от $4,0 \cdot 10^{-1}$ до $1,0 \cdot 10^5$
Относительное среднее квадратическое отклонение результата измерений ( $S_o$ ) при 10 независимых измерениях, не превышает	$1,5 \cdot 10^{-4}$
Неисключенная систематическая погрешность ( $\Theta_o$ ), не превышает	$2,2 \cdot 10^{-3}$
Относительная стандартная неопределенность, оценённая по типу $A$ , $u_A$ , не превышает	$1,5 \cdot 10^{-4}$
Относительная стандартная неопределенность, оцененная по типу $B$ , $u_B$ , не превышает	$9,7 \cdot 10^{-4}$
Относительная суммарная стандартная неопределенность, $u_R$ , не превышает	$9,8 \cdot 10^{-4}$
Относительная расширенная неопределенность при коэффициенте охвата, $k=2$ ( $P=0,95$ ), $U_R$ , не превышает	$2,0 \cdot 10^{-3}$

Таблица 2. Участники Международных сличений национальных эталонов вязкости жидкости CIPM  
Key Comparison of Viscosity CCM.V-K4:2018

Table 2. Participants in the International Comparison of National Liquid Viscosity Standards CIPM Key Comparison of Viscosity CCM.V-K4:2018

№	Участник сличения	Оборудование
1	ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева»	ГЭТ 17/2–КВН из состава ГЭТ 17–2018 (новый комплекс)
2	Centro Nacional de Metrología (CENAM)	вискозиметры капиллярные стеклянные Ubbelohde с длиной капилляра 90 мм
3	Central Office of Measures (GUM)	вискозиметры капиллярные стеклянные Ubbelohde с длиной капилляра 5 мм
4	Instituto Nacional de Metrología (INMETRO)	вискозиметры капиллярные стеклянные Ubbelohde с длиной капилляра 90 мм
5	National Institute of Metrology (NIM)	вискозиметры капиллярные стеклянные Ubbelohde с длиной капилляра 300 мм
6	National Metrology Institute of Japan / National Institute of advanced Industrial Science and Technology (NMIJ/AIST)	вискозиметры капиллярные стеклянные U-tube с длиной капилляра 400 мм
7	Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB)	вискозиметры капиллярные стеклянные Ubbelohde с длиной капилляра 90 мм
8	Slovenský metrologický ústav (SMU)	вискозиметры капиллярные стеклянные Ubbelohde с длиной капилляра 500 мм
9	VSL Dutch Metrology Institute (VSL)	вискозиметры капиллярные стеклянные Ostwald с длиной капилляра 200 мм

Окончание табл. 2  
End of Table 2

№	Участник сличения	Оборудование
10	Instituto Português da Qualidade Instituto Português da Qualidade (IPQ)	вискозиметры капиллярные стеклянные Ubbelohde с длиной капилляра 90 мм
11	National Institute for Standard (NIS)	вискозиметры капиллярные стеклянные Ubbelohde с длиной капилляра 250 мм
12	Saudi Standards, Metrology and Quality Org. (SASO, NMMC)	вискозиметры капиллярные стеклянные Ubbelohde с длиной капилляра 90 мм

Примечание. Участники сличений 1–9 – национальные метрологические институты, поддерживающие независимую шкалу вискозиметрии. Участники 10 и 12 – не поддерживающие независимую шкалу вискозиметрии.

Цель ключевых сличений заключалась в установлении опорного значения вязкости образцов жидкости по значениям, материализованным в эталонах участников этих сличений. Сличения проводились с использованием стандартных ньютоновских жидкостей (жидкость А и жидкость В) в диапазоне значений температуры от 10 до 100 °С и диапазоне значений вязкости от 10 мм<sup>2</sup>/с до 10 000 мм<sup>2</sup>/с. Ниже квалифицированы материалы, использованные для сличений.

Жидкость А

Кинематическая вязкость, мм <sup>2</sup> /с	Температура, °С
170	20
65	40
10	100

Жидкость В

Кинематическая вязкость, мм <sup>2</sup> /с	Температура, °С
10 000	10
4 600	20
120	100

Результаты и обсуждение

Содержание отчета

По итогам Международных ключевых сличений CIPM Key Comparison of Viscosity CCM.V-K4:2018 в 2023 г. получен отчет В, составленный по результатам, представленным каждым из 12 участников, для стандартной жидкости А (рис. 2) и стандартной жидкости В (рис. 3).

Рис. 2. Отклонения результатов для стандартной жидкости А (графическое увеличение):

ось Х – участник сличений; ось Y – размах отклонения; расширенная неопределенность эталонного значения выражена в виде расстояния между красными линиями

Fig. 2. Deviations of standard liquid A (graphic enlargement): X axis – comparison participant; Y axis – deviation range; the expanded uncertainty of the reference value is expressed as the distance between the red lines

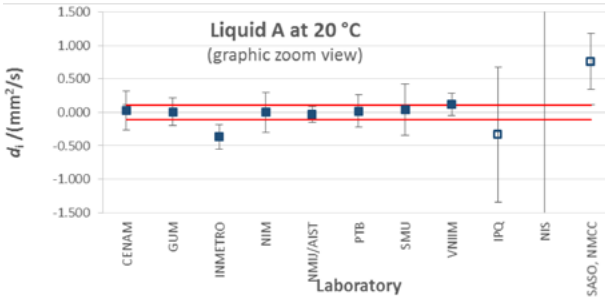


Рис. 2.1. Отклонения результатов от значения вязкости стандартной жидкости А при 20 °С

Fig. 2.1. Deviations of results from the viscosity value of standard liquid A at 20 °С

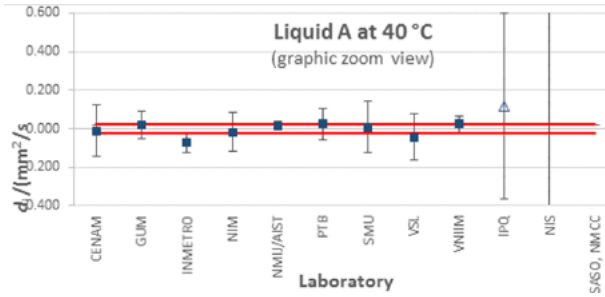


Рис. 2.2. Отклонения результатов от значения вязкости стандартной жидкости А при 40 °С

Fig. 2.2. Deviations of results from the viscosity value of standard liquid A at 40 °С

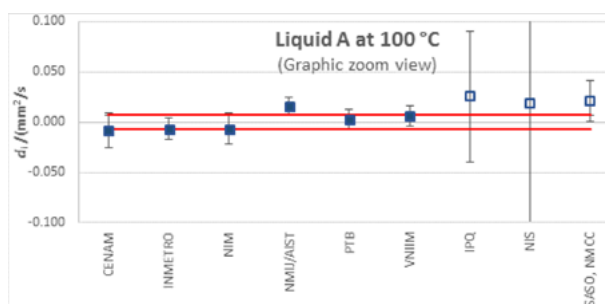


Рис. 2.3. Отклонения результатов от значения вязкости стандартной жидкости А при 100 °С

Fig. 2.3. Deviations of results from the viscosity value of standard liquid A at 100 °C

Рис. 3. Отклонения результатов для стандартной жидкости В (графическое увеличение):

ось X – наименование участника сличений; ось Y – размах отклонения; расширенная неопределенность эталонного значения выражена в виде расстояния между красными линиями

Fig. 3. Deviations of standard liquid B (graphic enlargement): X axis – participant in comparisons; Y axis – deviation range; the expanded uncertainty of the reference value is expressed as the distance between the red lines

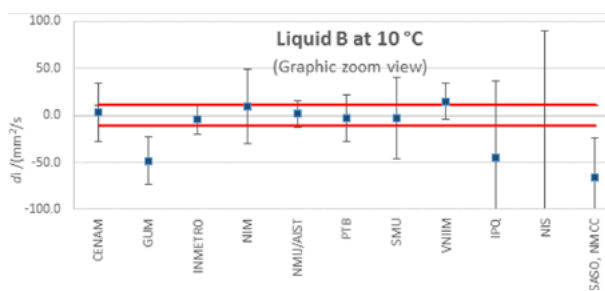


Рис. 3.1 Отклонения результатов от значения вязкости стандартной жидкости В при 10 °С

Fig. 3.1. Deviations of results from the viscosity value of standard liquid B at 10 °C

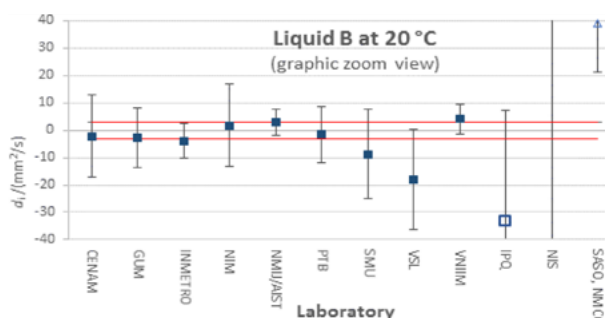


Рис. 3.2. Отклонения результатов от значения вязкости стандартной жидкости В при 20 °С

Fig. 3.2. Deviations of results from the viscosity value of standard liquid B at 20 °C

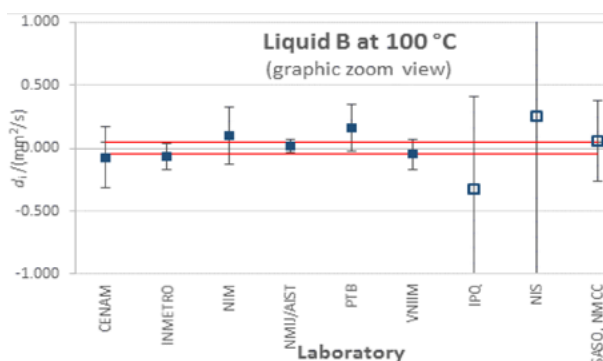


Рис. 3.3. Отклонения результатов от значения вязкости стандартной жидкости В при 100 °С

Fig. 3.3. Deviations of results from the viscosity value of standard liquid B at 100 °C

### Выводы отчета

Основной целью проведения Международных ключевых сличений CIPM Key Comparison of Viscosity CCM.V-K4:2018 являлось сравнение измерительных возможностей национальных эталонов государств с применением критерия  $En$  при 10 °С, 20 °С, 40 °С и 100 °С с использованием двух различных образцов вязкости жидкости.

Как видно из представленных в настоящей статье материалов, большинство национальных метрологических институтов – участников сличений – показало хорошую эквивалентность возможностей при измерении вязкости в широком диапазоне значений (от 10 мм²/с до 10 000 мм²/с) при значениях температуры 10 °С, 20 °С, 40 °С и 100 °С.

Результаты ключевых сличений подтвердили метрологические характеристики разработанного и введенного в состав ГЭТ 17–2018 эталонного комплекса ГЭТ 17/2–КВН. Однако при пересчете значений постоянных вискозиметров с применением принятого в стандарте ISO 3666<sup>9</sup> значения кинематической вязкости воды, равного 1,0034 мм²/с, результаты, полученные ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева», могут быть улучшены. Таким образом, необходима актуализация морально устаревшего ГОСТ 21727–76.

### Заключение

В рамках практической значимости полученных результатов можно утверждать, что комплексы ЭК ГЭТ 17/1–КВИ и ЭК ГЭТ 17/2–КВН из состава ГЭТ 17–2018 признаны соответствующими требованиям, обеспечивающим воспроизведение, хранение и передачу единицы

<sup>9</sup> ISO/TR3666:1998 Viscosity of water // ISO [website]. URL: <https://www.iso.org/standard/28607.html> (Accessed: 17.10.2023).

кинематической вязкости в диапазоне значений температуры от  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $+150\text{ }^{\circ}\text{C}$ , а их метрологические характеристики подтверждены результатами ключевых сличений.

Теоретическая значимость полученных результатов заключается в актуализации теоретико-методологического подхода к процедуре определения постоянных С вискозиметров капиллярных стеклянных эталонных из состава ГЭТ 17–2018 с целью повысить точность воспроизведения и передачи единицы кинематической вязкости жидкости. Приведенный в статье анализ и представленное обоснование создают основу для формулирования плана дальнейшего совершенствования системы обеспечения единства измерений вязкости жидкостей в Российской Федерации.

**Благодарности:** Статья подготовлена во исполнение следующих документов: 1) Соглашения о предоставлении субсидий на возмещение затрат, связанных с осуществлением мероприятий в области обеспечения единства измерений № 172-11-008 от 07.06.2017; 2) Дополнительного соглашения № 172-11-008/2 от 03.04.2018; 3) Дополнительного соглашения 172-11-008/3 от 21.06.2018; 4) Дополнительного соглашения № 172-11-008/4 от 03.10.2018 по Приложению № 4 «Разработка, совершенствование и содержание Государственных первичных эталонов единиц величин, а также разработка и совершенствование

Государственных референтных методик (методов) измерений».

Автор выражает глубокую признательность д-ру техн. наук, старшему научному сотруднику Владимиру Шалвовичу Сулаберидзе за советы и ценные замечания при подготовке статьи.

Автор благодарит рецензентов за экспертное мнение и конструктивный подход.

**Acknowledgments:** The article was prepared in pursuance of the following documents: 1) Agreement on the provision of subsidies for reimbursement of costs associated with the implementation of measures in the field of ensuring the uniformity of measurements No. 172-11-008 dated 07.06.2017; 2) Additional agreement No. 172-11-008/2 dated 03.04.2018; 3) Additional agreement 172-11-008/3 dated 21.06.2018. 5) Additional agreement No. 172-11-008/4 dated 03.10.2018 on Appendix No. 4 «Development, improvement and maintenance of State primary standards of units of quantities, as well as development and improvement of State reference measurement procedures (methods)».

The author expresses their gratitude to Vladimir Sh. Sulaberidze, Dr. Sci. (Eng.), Senior Researcher, for advice and valuable comments during the preparation of the article.

**Конфликт интересов:** Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

**Conflict of interests:** The author declares no conflict of interest.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Elucidating the impact of ultrasonic treatment on bituminous oil properties: A comprehensive study of viscosity modification / A. R. Galimzyanova [et al.] // *Geoenergy Science and Engineering*. 2024. Vol. 233. P. 212487. <https://doi.org/10.1016/j.geoen.2023.212487>
2. Development of compositional-based models for prediction of heavy crude oil viscosity: Application in reservoir simulations / Z. Liu [et al.] // *Journal of Molecular Liquids*. 2023. Vol. 389. P. 122918. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2023.122918>
3. Multiple machine learning models in estimating viscosity of crude oil: Comparisons and optimization for reservoir simulation / P. Sun [et al.] // *Journal of Molecular Liquids*. 2023. Vol. 384. P. 122251. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2023.122251>
4. Barateiro C. E. R. B., Emerik R. C. S. Liquid hydrocarbon flow meters calibration with high flow and viscosity: Conceptual design of a new facility // *Flow Measurement and Instrumentation*. 2020. Vol. 73. P. 101749. <https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2020.101749>
5. A study of kinematic viscosity approach with air as a gas medium for turbine flowmeter calibration / B. Rochmanto [et al.] // *Flow Measurement and Instrumentation*. 2024. Vol. 95. P. 102490. <https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2023.102490>
6. Correlations for prediction of hydrogen gas viscosity and density for production, transportation, storage, and utilization applications / C. Wei [et al.] // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2023. Vol. 48, Iss. 89. P. 34930–34944. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.05.202>
7. Moiseyeva Y., Saitova A., Strokina S. Calculating densities and viscosities of natural gas with a high content of  $\text{C}_{2+}$  to predict two-phase liquid-gas flow pattern // *Petroleum*. 2023. Vol. 9, Iss. 4. P. 579–591. <https://doi.org/10.1016/j.petlm.2023.01.001>
8. Functionality-driven food product formulation – An illustration on selecting sustainable ingredients building viscosity / A. Lie-Piang [et al.] // *Food Research International*. 2022. Vol. 152. P. 110889. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2021.110889>
9. Blood viscosity and risk of cardiovascular events: the Edinburgh Artery Study / G. D. O. Lowe [et al.] // *British Journal of Hematology*. 1997. Vol. 96. P. 168–173. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2141.1997.8532481.x>
10. Çinar Y., Şenyoğlu A. M., Duman K. Blood viscosity and blood pressure: role of temperature and hyperglycemia // *American Journal of Hypertension*. 2001. Vol. 14, Iss. 5. P. 433–438. [https://doi.org/10.1016/S0895-7061\(00\)01260-7](https://doi.org/10.1016/S0895-7061(00)01260-7)

11. A highly accurate and consistent microfluidic viscometer for continuous blood viscosity measurement / Y. J. Kang [et al.] // *Artificial Organs*. 2010. Vol. 34, Iss. 11. P. 944–949. <https://doi.org/10.1111/j.1525-1594.2010.01078.x>
12. Муратова Е. И., Смолихина П. М. Реология кондитерских масс : монография. Тамбов : Изд-во ФГБОУ ВПО ТГТУ, 2013. 188 с.
13. Реология : Теория и приложения : пер. с англ. Под ред. Ф. Эйриха ; Под общ. ред. Ю. Н. Работнова и П. А. Ребиндера. М. : Изд-во иностр. лит., 1962. 824 с.
14. Павловский Н. Н. Гидравлический справочник. Л. ; М. : ОНТИ НКТП СССР, главная редакция энергетической литературы, 1937. 890 с.
15. Рыбак Б. М. Анализ нефти и нефтепродуктов. М. : ГосТехИздат, 1962. 888 с.
16. Hameed D. K. Deterioration in physical engine oil properties after different trip length // *Kurdistan Journal of Applied Research*. 2021. Vol. 6, Iss. 1. P. 13–20. <https://doi.org/10.24017/science.2021.1.2>
17. Akyazi T., Basabe-Desmonts L., Benito-Lopez F. Review on microfluidic paper-based analytical devices towards commercialization // *Analytica Chimica Acta*. 2017. № 1001. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2017.11.010>
18. From Newtonian to non-Newtonian fluid: insight into the impact of rheological characteristics on mineral deposition in urine collection and transportation / Z. Yan [et al.] // *Sci Total Environment*. 2022. Vol. 823. P. 153532. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153532>
19. Rheological study of cowpea puree 'adowè' and the influence of saliva on the puree viscosity / E. Teko [et al.] // *International Journal of Food Science & Technology*. 2022. Vol. 57, Iss. 5. P. 3098–3105. <https://doi.org/10.1111/ijfs.15640>
20. A rapid label-free disposable electrochemical salivary point-of-care sensor for SARS-CoV-2 detection and quantification / N. Farsaeivahid [et al.] // *Sensors*. 2023. Vol. 23, Iss. 1. P. 433. <https://doi.org/10.3390/s23010433>
21. Viscosity of rice flour: a rheological and biological study / M. A. Fitzgerald [et al.] // *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 2003. Vol. 51, Iss. 8. P. 2295–2299. <https://doi.org/10.1021/jf020574i>
22. 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>
23. McKennell R. Cone-Plate Viscometer // *Analytical Chemistry*. 1956. Vol. 28, Iss. 11. P. 1710–1714. <https://doi.org/10.1021/ac60119a021>
24. Lee E., Kim B., Choi S. Hand-held, automatic capillary viscometer for analysis of Newtonian and non-Newtonian fluids // *Sensors and Actuators A: Physical*. Vol. 313. P. 112176. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2020.112176>
25. Development of an improved falling ball viscometer for high-pressure measurements with supercritical CO<sub>2</sub> / B. Calvignac [et al.] // *The Journal of Supercritical Fluids*. 2010. Vol. 55, Iss. 1. P. 96–106. <https://doi.org/10.1016/j.supflu.2010.07.012>
26. New design of the falling-body rheoviscometer for high and extra-high viscous liquid measurements. viscosity of vacuum oils / D. Sagdeev [et al.] // *Journal of Chemical & Engineering Data*. 2020. Vol. 65, Iss. 4. P. 1773–1786. <https://doi.org/10.1021/acs.jced.9b01071>
27. Evaluation of the metrological performance of two kinds of rotational viscometers by means of viscosity reference materials / C. S. C. de Castro [et al.] // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2016. Vol. 138. P. 292–297. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2015.12.003>
28. Investigation of rheological properties of blended cement pastes using rotational viscometer and dynamic shear rheometer / Y. J. Kim [et al.] // *Advances in Materials Science and Engineering*. 2018. Vol. 17. P. 1–6. <https://doi.org/10.1155/2018/6303681>
29. Yabuno H. Review of applications of self-excited oscillations to highly sensitive vibrational sensors ZAMM // *Journal of Applied Mathematics and Mechanics*. 2021. Vol. 101, Iss. 7. Special Issue: 4th International Conference on Vibro-Impact Systems (ICoVIS2018). <https://doi.org/10.1002/zamm.201900009>
30. The Rheology Handbook // *Pigment & Resin Technology*. 2009. Vol. 38, № 5. <https://doi.org/10.1108/prt.2009.12938eac.006>
31. Гребенникова Н. М. Аэрогидродинамический метод и устройство контроля вязкости жидких веществ : спец. 05.11.13 «Приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий» : дисс. канд. техн. наук / Н. М. Гребенникова ; Тамб. гос. техн. ун-т. Тамбов, 2008. 16 с. Место защиты: Тамб. гос. техн. ун-т. URL: <https://viewer.rsl.ru/ru/rsl01003459748?page=1&rotate=0&theme=white> (дата обращения: 17.10.2023).
32. 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). В кн.: Российская метрологическая энциклопедия. Т. 1. СПб. : Гуманистика, 2015. С. 380–382.
33. Степанов Л. П. Измерение вязкости жидкостей. М. : [б. и.], 1966. 43 с.
34. 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.
35. Marvin R. S. The Accuracy Measurements Viscosity Liquids // *Journal of research of the National Bureau of Standards – A. Physics and Chemistry*. 1975. Vol. 75A, № 6. P. 535–540. <https://doi.org/10.6028/jres.075A.041>
36. Цурко А. А., Демьянов А. А. Состояние метрологического обеспечения измерений вязкости нефтепродуктов // *Измерительная техника*. 2014. № 4. С. 65–66. <https://doi.org/10.1007/s11018-014-0479-z>

37. 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>
38. Klingenberg G., Bauer H. CCM.V-K1 intercomparison in capillary viscometry / Published under licence by IOP Publishing Ltd // Metrologia. 2004. Vol. 41, № 1A. P. 07001. <https://doi.org/10.1088/0026–1394/41/1A/07001>
39. Maggi C. P., Trowbridge D., Zubler M. T. Final report on CCM.V-K2 comparison / Published under licence by IOP Publishing Ltd // Metrologia. 2009. Vol. 46. № 1A. P. 07003. <https://doi.org/10.1088/0026–1394/46/1A/07003>
40. CCM.V-K3: CCM Key Comparison of Viscosity / Y. Fujita [et al.] // Metrologia. 2018. Vol. 55. № 1A. P. 07010. <https://doi.org/10.1088/0026–1394/55/1A/07010>
41. Неклюдова А. А., Сулаберидзе В. Ш. Научно-методические основы метрологического обеспечения современных методов измерений вязкости жидких сред: монография. СПб. : Издательско-полиграфическая компания КОСТА, 2023. 232 с.

## REFERENCE

1. Galimzyanova A. R., Gataullin R. N., Stepanova Yu. S., Marfin E. A., Khelkhal M. A., Vakhin A. V. Elucidating the impact of ultrasonic treatment on bituminous oil properties: A comprehensive study of viscosity modification. *Geoenergy Science and Engineering*. 2024;233:212487. <https://doi.org/10.1016/j.geoen.2023.212487>
2. Liu Z., Zhaob X., Tianc Y., Tanb J. Development of compositional-based models for prediction of heavy crude oil viscosity: Application in reservoir simulations. *Journal of Molecular Liquids*. 2023;389:122918. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2023.122918>
3. Sun P., Huo S., He T. Multiple machine learning models in estimating viscosity of crude oil: Comparisons and optimization for reservoir simulation. *Journal of Molecular Liquids*. 2023;384:122251. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2023.122251>
4. Barateiro C. E. R. B., Emerik R. C. S. Liquid hydrocarbon flow meters calibration with high flow and viscosity: Conceptual design of a new facility. *Flow Measurement and Instrumentation*. 2020;73:101749. <https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2020.101749>
5. Rochmanto B., Setiaprada H., Haryono I., Yubaidah S. A study of kinematic viscosity approach with air as a gas medium for turbine flowmeter calibration. *Flow Measurement and Instrumentation*. 2024;95:102490. <https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2023.102490>
6. Wei C., Raad S. M. J., Leonenko Y., Hassanzadeh H. Correlations for prediction of hydrogen gas viscosity and density for production, transportation, storage, and utilization applications. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2023;48(89):34930–34944. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.05.202>
7. Moiseyeva Y., Saitova A., Strokin S. Calculating densities and viscosities of natural gas with a high content of C<sub>2+</sub> to predict two-phase liquid-gas flow pattern. *Petroleum*. 2023;9(4):579–591. <https://doi.org/10.1016/j.petlm.2023.01.001>
8. Lie-Piang A., Căcilie Möllera A., Köllmann N., Garreb A., Booma R., van der Padta A. Functionality-driven food product formulation – An illustration on selecting sustainable ingredients building viscosity. *Food Research International*. 2022;152:110889. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2021.110889>
9. Lowe G. D. O., Lee A. J., Rumley A., Price J. F., Fowkes F. G. R. Blood viscosity and risk of cardiovascular events: the Edinburgh Artery Study. *British Journal of Hematology*. 1997;96:168–173. <https://doi.org/10.1046/j.1365–2141.1997.8532481.x>
10. Çinar Y., Şenyoğlu A. M., Duman K. Blood viscosity and blood pressure: role of temperature and hyperglycemia. *American Journal of Hypertension*. 2001;14(5):433–438. [https://doi.org/10.1016/S0895–7061\(00\)01260-7](https://doi.org/10.1016/S0895–7061(00)01260-7)
11. Kang Y. J., Yoon S. Y., Lee K.-H., Yang S. A Highly Accurate and Consistent Microfluidic Viscometer for Continuous Blood Viscosity Measurement. *Artificial Organs*. 2010;34(11):944–949. <https://doi.org/10.1111/j.1525–1594.2010.01078.x>
12. Muratova E. I., Smolikhina P. M. Rheology of confectionery masses: monograph. Tambov: FGBOU VPO TGTU; 2013. 188 p. (In Russ.).
13. Eirich F. R. Rheology. Theory and applications. Vol. 1. New York: Acad. Press; 1956. [Russ. ed.: Rheology: Theory and applications: Eirich F., Worknov Yu. N., Rebinder P. A. (eds.). Moscow: Izdatel'stvo inostrannoi literatury; 1962. 824 p. (In Russ.).]
14. Pavlovsky N. N. Hydraulic handbook. Leningrad, Moscow: ONTI NKTP SSSR, glavnaia redaktsiia energeticheskoi literatury; 1937. 890 p. (In Russ.).
15. Rybak B. M. Analysis of oil and petroleum products. Moscow: Gostekhizdat; 1962. 888 p. (In Russ.).
16. Hameed D. K. Deterioration in physical engine oil properties after different trip length. *Kurdistan Journal of Applied Research*. 2021;6(1):13–20. <https://doi.org/10.24017/science.2021.1.2>
17. Akyazi T., Basabe-Desmonts L., Benito-Lopez F. Review on microfluidic paper-based analytical devices towards commercialization. *Analytica Chimica Acta*. 2017;1001. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2017.11.010>
18. Yan Z., Li Z., Cheng S., Wang X., Zhang L., Zheng L. et al. From Newtonian to non-Newtonian fluid: insight into the impact of rheological characteristics on mineral deposition in urine collection and transportation. *Sci Total Environment*. 2022;823:153532. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153532>
19. Teko E., Ako K., Yousefi A., Munialo C. D., Osseyi E. Rheological study of cowpea puree 'adowè' and the influence of saliva on the puree viscosity. *International Journal of Food Science & Technology*. 2022;57(5):3098–3105. <https://doi.org/10.1111/ijfs.15640>
20. Farsaeivahid N., Grenier C., Nazarian S., Wang M. L. A rapid label-free disposable electrochemical salivary point-of-care sensor for SARS-CoV-2 detection and quantification. *Sensors*. 2023;23(1):433. <https://doi.org/10.3390/s23010433>

21. Fitzgerald M. A., Martin M., Ward R. M., Park W. D., Shead H. J. Viscosity of rice flour: A rheological and biological study. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 2003;51(8):2295–2299. <https://doi.org/10.1021/jf020574i>
22. 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. *Measuring equipment*. 2023;8:53–59. (In Russ.). <https://doi.org/10.32446/0368–1025it.2023-8-53-59>
23. McKennell R. Cone-Plate Viscometer. *Analytical Chemistry*. 1956;28(11):1710–1714. <https://doi.org/10.1021/ac60119a021>
24. Lee E., Kim B., Choi S. Hand-held, automatic capillary viscometer for analysis of Newtonian and non-Newtonian fluids. *Sensors and Actuators A: Physical*. 2020;313:112176. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2020.112176>
25. Calvignac B., Rodier E., Letourneau J.-J., Vitoux P., Aymonier C., Fages J. Development of an improved falling ball viscometer for high-pressure measurements with supercritical CO<sub>2</sub>. *The Journal of Supercritical Fluids*. 2010;55(1):96–106. <https://doi.org/10.1016/j.supflu.2010.07.012>
26. Sagdeev D. I., Gabitov I. R., Khairutdinov V. F., Fomina M. G., Alyaev V. A., Sal'manov R. S. et al. New design of the falling-body rheoviscometer for high and extra-high viscous liquid measurements. viscosity of vacuum oils. *Journal of Chemical & Engineering Data*. 2020;65(4):1773–1786. <https://doi.org/10.1021/acs.jced.9b01071>
27. de Castro C. S. C., do Espírito Santo Filho D. M., Siqueira J. R. R., Barbosa A. P. F., da Costa Rodrigues C. R., Cabral Jr. M. L. et al. Evaluation of the metrological performance of two kinds of rotational viscometers by means of viscosity reference materials. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2016;138:292–297. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2015.12.003>
28. Kim Y. J., Cho B.-Y., Lee S.-J., Hu J., Wilde J. W. Investigation of rheological properties of blended cement pastes using rotational viscometer and dynamic shear rheometer. *Advances in Materials Science and Engineering*. 2018;17:1–6. <https://doi.org/10.1155/2018/6303681>
29. Yabuno H. Review of applications of self-excited oscillations to highly sensitive vibrational sensors ZAMM. *Journal of Applied Mathematics and Mechanics*. 2021;101(7). Special Issue: 4th International Conference on Vibro-Impact Systems (ICoVIS2018). <https://doi.org/10.1002/zamm.201900009>
30. The Rheology Handbook. *Pigment & Resin Technology*. 2009;38(5). <https://doi.org/10.1108/prt.2009.12938eac.006>
31. Grebennikova N. M. Aerohydrodynamic method and device for controlling the viscosity of liquid substances. PhD (Eng.).sci.diss., Tambov State Technical University. Tambov: TGTU; 2008. 16 p. Available at: <https://viewer.rsl.ru/ru/rsl01003459748?page=1&rotate=0&theme=white> [Accessed: 17 October 2023]. (In Russ.).
32. Demyanov A. A., Tsurko A. A. The state primary standard for the unit of kinematic viscosity of a liquid in the range from  $4 \cdot 10^{-7} \div 1 \cdot 10^{-1} \text{ m}^2/\text{s}$  (GET 17–96). In: Russian Metrological Encyclopedia. Saint Petersburg: Humanistics; 2015:1:380–382. (In Russ.).
33. Stepanov L. P. Measurement of viscosity of liquids. Moscow: 1966. 43 p. (In Russ.).
34. Demyanov A. A., Neklyudova A. A. The state primary standard of the unit of kinematic viscosity of a liquid GET 17–96. In: *Proceedings of the 28th Symposium on Rheology*, September 28 – October 02 2016, Moscow. Moscow: Topchiev Institute of Petrochemical Synthesis of the Russian Academy of Sciences; 2016. P. 74–75. (In Russ.).
35. Marvin R. S. The accuracy measurements viscosity liquids. *Journal of research of the national bureau of standards – A. Physics and chemistry*. 1975;75A(6):535–540. <https://doi.org/10.6028/jres.075A.041>
36. Tsurko A. A., Demyanov A. A. The state of metrological support for measuring the viscosity of petroleum products. *Measuring equipment*. 2014;4:65–66. (In Russ.). <https://doi.org/10.1007/s11018–014–0479-z>
37. Chekirda K. V., Demyanov A. A., Neklyudova A. A., Domostroeve A. V., Sulaberidze V. S. The history of creation and modernization of the state primary standards of units of dynamic, kinematic viscosity of liquid and density. *Izmeritel'naya Tekhnika*. 2022;(7):24–29. (In Russ.). <https://doi.org/10.32446/0368–1025it.2022-7-24-29>
38. Klingenberg G., Bauer H. CCM.V-K1 intercomparison in capillary viscometry. Published under licence by IOP Publishing Ltd. *Metrologia*. 2004;41(1A):07001. <https://doi.org/10.1088/0026–1394/41/1A/07001>
39. Maggi C. P., Trowbridge D., Zubler M. T. Final report on CCM.V-K2 comparison/ Published under licence by IOP Publishing Ltd. *Metrologia*. 2009;46(1) A:07003. <https://doi.org/10.1088/0026–1394/46/1A/07003>
40. Fujita Y., Zubler T., Mastropierro J., Trujillo S., Cekiel I., Malta D. et al. CCM.V-K3: CCM Key Comparison of Viscosity. *Metrologia*. 2018;55(1A):07010. <https://doi.org/10.1088/0026–1394/55/1A/07010>
41. Neklyudova A. A., Sulaberidze V. Sh. Scientific and methodological foundations of metrological support for modern methods of measuring viscosity of liquid media: monograph. Saint Petersburg: Izdatel'sko-poligraficheskaya kompaniya COSTA; 2023. 232 p. (In Russ.).

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

CIPM Key Comparison of Viscosity CCM.V-K4. A:2018 // CIPM MRA [website].  
URL: <https://www.bipm.org/kcdb/comparison?id=1866> (Accessed: 17.10.2023).

CIPM Key Comparison of Viscosity CCM.V-K4.B:2018 // CIPM MRA [website].  
URL: <https://www.bipm.org/kcdb/comparison?id=1867> (Accessed: 17.10.2023).

ISO/TR3666:1998 Viscosity of water // ISO [website]. URL: <https://www.iso.org/standard/28607.html> (Accessed: 17.10.2023).

ГОСТ 8.025–96 Государственная система обеспечения единства измерений. Государственная поверочная схема для средств измерений вязкости жидкостей = State system for ensuring the uniformity of measurements. State verification schedule for means measuring viscosity of liquids. М. : ИПК Издательство стандартов, 1997. 8 с.

ГОСТ 21727–76 Вода. Вязкость при температуре 20 °С = Water. Viscosity of water at 20 °C. М. : Издательство стандартов, 1976. 3 с.

ГЭТ 18–2014 Государственный первичный эталон единицы плотности / институт-хранитель ВНИИМ им. Д. И. Менделеева // Федеральный информационный фонд по обеспечению единства измерений : официальный сайт. URL: <https://fgis.gost.ru/fundmetrology/registry/12/items/397864> (дата обращения: 17.10.2023).

ГЭТ 17–2018 Государственный первичный эталон единиц динамической и кинематической вязкости жидкости / институт-хранитель 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: 17.10.2023).

Об утверждении Государственной поверочной схемы для средств измерений вязкости жидкостей : Приказ от 05 ноября 2019 г. № 2622 // Федеральный информационный фонд по обеспечению единства измерений : официальный сайт. URL: <https://www.rst.gov.ru/portal/gost/home/activity/documents/orders#/order/126301> (дата обращения: 17.10.2023).

Об утверждении Стратегии обеспечения единства измерений в Российской Федерации до 2025 г. ; Распоряжение Правительства РФ от 19 апреля 2017 года № 737-р // Информационно-правовой портал Гарант.ру: официальный сайт. URL: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/71563952/>

Сведения о результатах поверки средств измерений // Федеральный информационный фонд по обеспечению единства измерений : официальный сайт. URL: <https://fgis.gost.ru/fundmetrology/cm/results> (дата обращения: 17.10.2023).

Утвержденные типы средств измерений // Федеральный информационный фонд по обеспечению единства измерений : официальный сайт. URL: <https://fgis.gost.ru/fundmetrology/registry/4> (дата обращения: 17.10.2023).

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

**Демьянов Алексей Алексеевич** – руководитель научно-исследовательской лаборатории госэталонов в области измерений плотности и вязкости жидкости ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева»  
г. Санкт-Петербург, Московский пр., 19  
e-mail: [A.A.demyanov@vniim.ru](mailto:A.A.demyanov@vniim.ru)  
<https://orcid.org/0000-0001-7160-7078>  
ResearcherID: O-3983–2018

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Aleksey A. Demyanov** – Head of Density and Viscosity Laboratory, D. I. Mendeleyev Institute for Metrology (VNIIM)  
19 Moskovsky ave., Saint Petersburg, 190005, Russia  
e-mail: [A.A.demyanov@vniim.ru](mailto:A.A.demyanov@vniim.ru)  
<https://orcid.org/0000-0001-7160-7078>  
ResearcherID: O-3983–2018