

**АНАЛИЗ ПОКАЗАТЕЛЕЙ МЕТРОЛОГИЧЕСКОЙ НАДЕЖНОСТИ
ВИСКОЗИМЕТРОВ СТЕКЛЯННЫХ КАПИЛЛЯРНЫХ ЭТАЛОННЫХ****А.А. Неклюдова**

a.a.tsurko@vniim.ru

В.Ш. Сулаберидзе

v.sh.sulaberidze@vniim.ru

**ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева», Санкт-Петербург,
Российская Федерация****Аннотация**

Приведены результаты исследований показателей метрологической надежности вискозиметров стеклянных капиллярных эталонных, которые входят в комплексы эталонные ЭК КВх, предназначенные для измерения, хранения и передачи единицы кинематической вязкости жидкостей, соответствующие уровню рабочих эталонов 1 разряда по государственной поверочной схеме для средств измерений вязкости жидкостей, утвержденной приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 05.11.2019 № 2622. Показано, что метрологическая надежность средств измерений вязкости характеризуется такими показателями, как вероятность безотказной работы, наработка на отказ и обеспечивается высокой стабильностью коэффициента преобразования вискозиметров с капиллярами различного диаметра. Предложено уточнение термина «метрологическая надежность», обеспечивающее необходимую степень однозначности его определения и трактовки. Высокие стабильность во времени и точность определения коэффициента преобразования, как основной характеристики вискозиметра, позволяют поддерживать требуемый уровень точности передачи размера кинематической вязкости, обосновать соответствие уровня компетентности лаборатории — эксплуатанта комплексов эталонных, требованиям ГОСТ ISO/IEC 17025–2019, что создает условия, обеспечивающие успешное участие лаборатории в международных и ключевых сличениях в области измерений вязкости жидких сред

Ключевые слова

Вязкость кинематическая, вискозиметр стеклянный капиллярный, коэффициент преобразования, метрологическая надежность, вероятность безотказной работы, наработка на отказ, срок службы

Поступила 14.04.2023

Принята 22.06.2023

© Автор(ы), 2024

Введение. На протяжении длительного времени (2000–2023 гг.) эксплуатации комплексов эталонных накоплены результаты поверок вискозиметров (более 960 поверок вискозиметров 10 типоразмеров). Всесторонний анализ стабильности коэффициентов преобразования (КП) для каждого диаметра капилляра в течение эксплуатации позволяет достигнуть и поддерживать требуемый уровень точности передачи размера кинематической вязкости, обосновать и обеспечить уровень компетентности эталонной лаборатории.

В состав комплексов эталонных ЭК КВх, предназначенных для измерения, хранения и передачи единицы кинематической вязкости жидкостей в диапазоне значений температуры $-40 \dots 150$ °С, входят вискозиметры стеклянные капиллярные эталонные.

Цель работы — привести результаты анализа показателей метрологической надежности вискозиметров стеклянных капиллярных эталонных.

Вискозиметры (рис. 1) предназначены для измерений кинематической вязкости исследуемых жидкостей в лабораторных условиях в диапазонах значений вязкости $0,4 \dots 10^5$ мм²/с в зависимости от диаметра капилляра. Принцип их действия основан на измерении времени истечения определенного объема исследуемой жидкости через капилляр вискозиметра под действием собственного веса и постоянном контроле установленного значения температуры [1–12]. Вискозиметры состоят из трех соединенных между собой стеклянных трубок, в одной из которых расположен капилляр и измерительный резервуар, ограниченный двумя кольцевыми рисками. Стеклянная трубка изготовлена из химически стойкого лабораторного стекла. Вискозиметры маркируют нанесением на сферическую поверхность измерительного резервуара номинального значения его объема, а также меток, определяющих его измерительный резервуар. Габаритные размеры вискозиметра 55 × 610 мм. Условия эксплуатации: температура окружающего воздуха 20 ± 2 °С; относительная влажность воздуха 30...80 %; атмосферное давление 84,0...106,7 кПа.



Рис. 1. Общий вид вискозиметра стеклянного капиллярного эталонного

Значение КП — постоянной вискозиметра — зависит от диаметра, а его точность и стабильность являются характеристиками метрологической надежности средства измерения (СИ). Вискозиметры надежны и дол-

говечны: срок службы до 25 лет, наработка на отказ до 48 000 ч (согласно описанию типа СИ), нормированный интервал между поверками 4 года.

Предел допускаемой относительной погрешности определения КП вискозиметров из состава комплексов эталонных, согласно описанию типа, не должен превышать $\pm 0,2\%$.

Материалы и методы решения задач, принятые допущения. Вероятность безотказной работы $R(t)$, по аналогии с рекомендациями RP-1 [1], определена как отношение числа СИ, оказавшихся в допуске, к общему числу поверенных СИ. Следует отметить, что характеризующими метрологическую надежность СИ показателями могут быть:

– вероятность безотказной работы (по зависимости вероятности безотказной работы от времени можно определить время работы, при котором значение указанной вероятности достигает минимально допустимого уровня, соответствующего неприемлемому риску эксплуатации СИ в неисправном состоянии, что подробно описано и проанализировано в рекомендациях RP-1;

– наработка на отказ, характеризующая неприемлемый уровень внезапного отказа, на основании значений которой проводится определение и назначение межповерочного интервала СИ, обеспечивающего требуемый уровень вероятности применения СИ, находящегося в исправном состоянии.

Данные по результатам 627 поверок вискозиметров в течение семи лет приведены в табл. 1.

Таблица 1

Данные по результатам 627 поверок вискозиметров в течение семи лет

Время эксплуатации, г	Число калибровок СИ	Число СИ в допуске	$R(t)$
0–1	15	12	0,800
2	147	140	0,952
3	121	118	0,975
4	94	92	0,979
5	89	88	0,989
6	83	83	1,000
7	78	76	0,974

В соответствии с рекомендациями RP-1 подобраны аналитические формулы для описания дрейфа показателя безотказной работы в течение эксплуатации СИ (рис. 2). Довольно высокая надежность вискозиметров при длительной эксплуатации может быть описана двумя моделями: 1) мо-

делью Вейбулла (ГОСТ Р 5579.27–2017¹) $R(t, \theta) = \exp(-\theta_1 t)^{\theta_2}$, $\theta_1 = 0,08$, $\theta_2 = 5$; 2) моделью гарантированной надежности $R(t, \theta) = 1 / X [1 + \exp(\theta_1(t - \theta_2))]$, $\theta_1 = 1$, $\theta_2 = 11$. Согласно зависимости на рис. 2, значение вероятности безотказной работы вискозиметров снижается до 0,8 в течение девяти лет эксплуатации. Это более чем в 2 раза превосходит нормированное значение интервала между их промежуточными поверками.

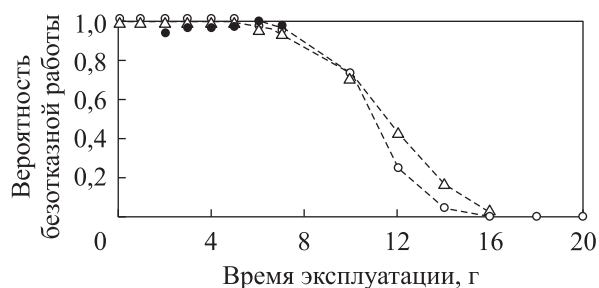


Рис. 2. Данные по значениям вероятности безотказной работы вискозиметров (•) и описание их расчетными моделями Вейбулла (---) и моделью гарантированной надежности (-△-)

Результаты анализа стабильности КП по представительным выборкам однотипных вискозиметров показывают, что их метрологические характеристики гораздо более стабильны. Это подтверждается анализом стабильности и повторяемости значений КП. Тем не менее не требуется значительно увеличивать интервалы между поверками вискозиметров в связи с тем, что объективно одним из важных фактов, влияющих на метрологическую надежность СИ, является квалификация и компетентность персонала. Как правило, это обеспечивается постоянной планомерной практической деятельностью в области технического обеспечения нормального функционирования СИ.

Зависимость КП вискозиметров от диаметра капилляра и времени эксплуатации вискозиметра приведена на рис. 3. Такая метрологическая характеристика стабильна на протяжении длительного времени, значительно превышающего нормированный интервал между поверками. Корректировка КП вискозиметра осуществляется по результатам измерений вязкости градуировочных жидкостей (компараторов) в процессе периодических поверок.

¹ ГОСТ Р 5579.27–2017. Статистические методы. Распределение Вейбулла. Анализ данных. М., Стандартинформ, 2020.

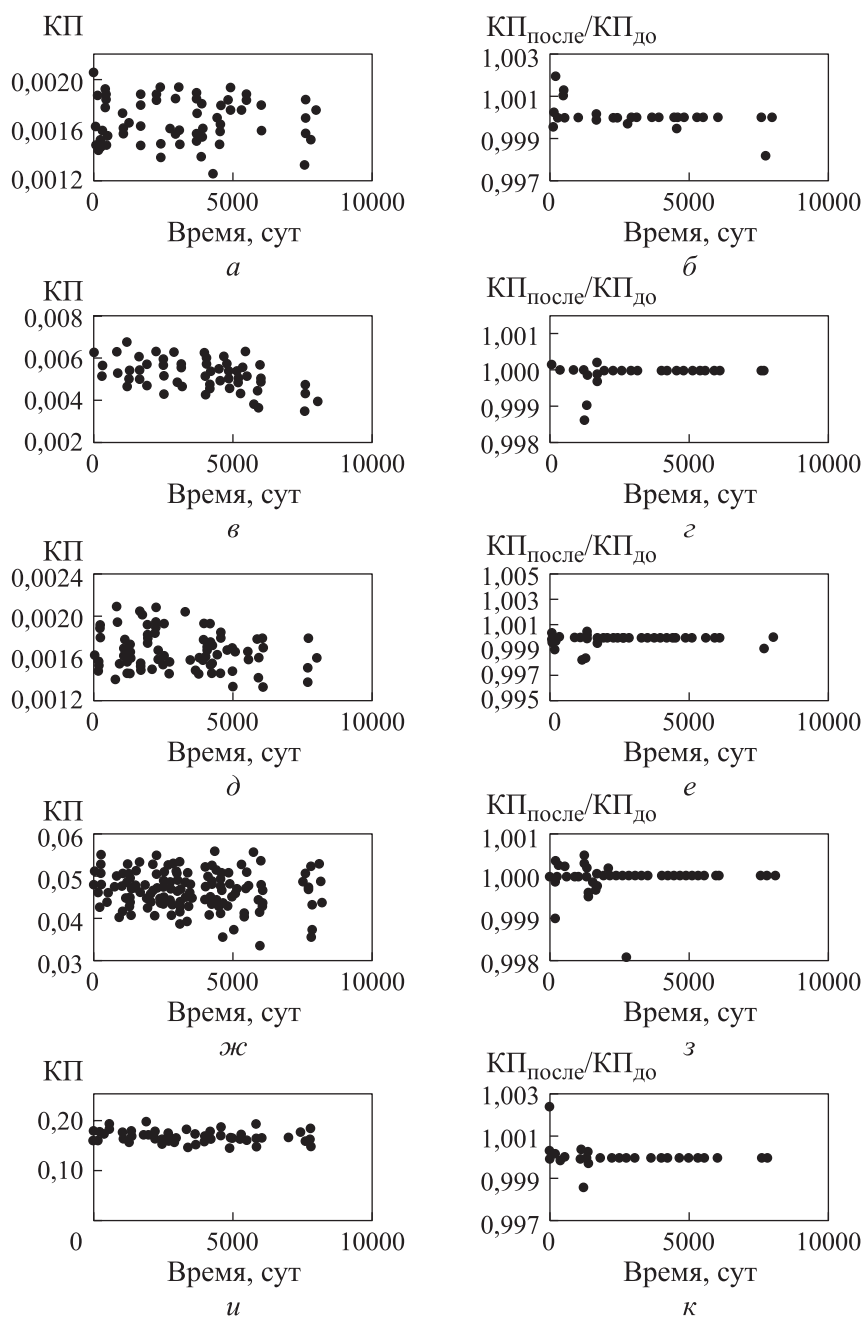


Рис. 3 (начало). Зависимости КП и отношения $\text{КП}_{\text{после}}/\text{КП}_{\text{до}}$ вискозиметров от времени при диаметре капилляра $d = 0,33$ (*а, б*), $0,48$ (*в, г*), $0,65$ (*д, е*), $0,97$ (*ж, з*), $1,33$ (*и, к*)

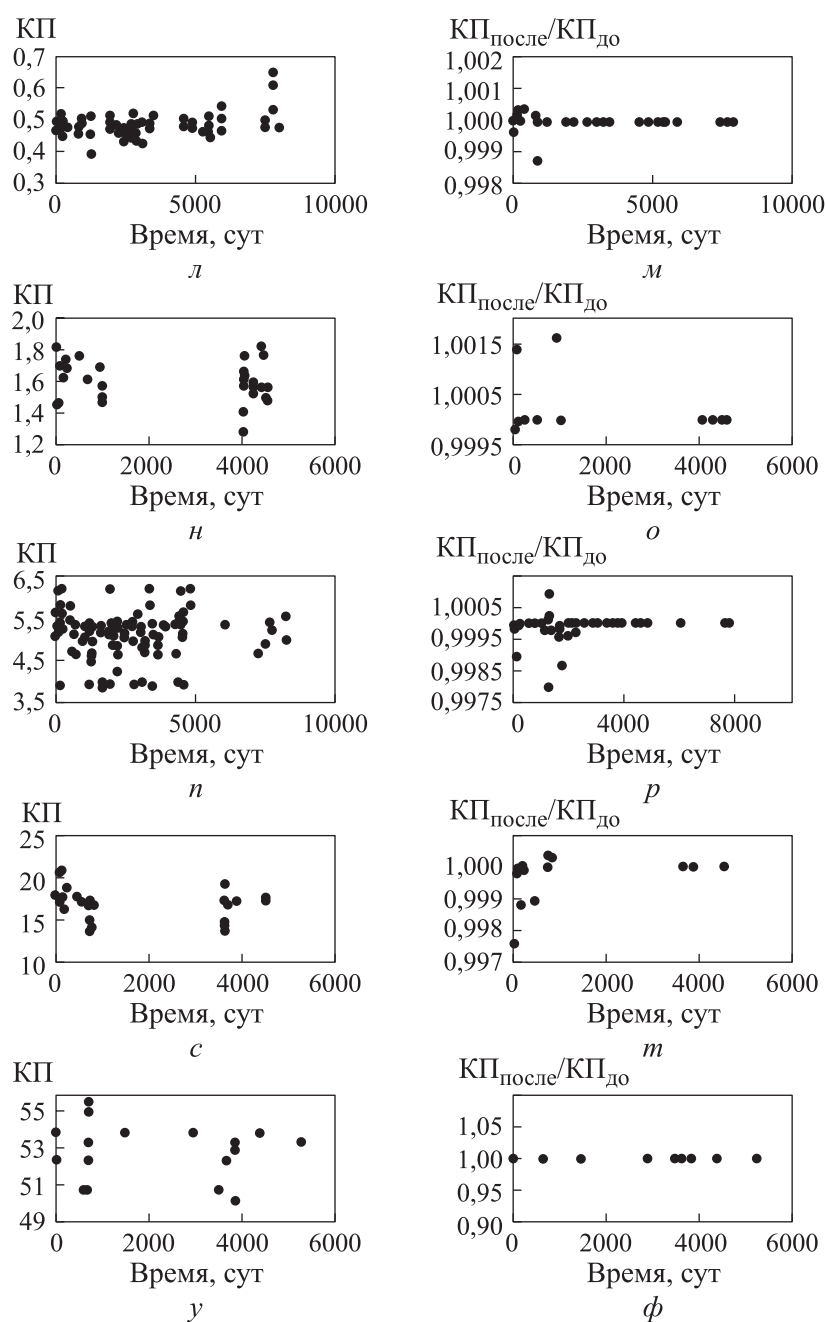


Рис. 3 (окончание). Зависимости КП и отношения $\text{КП}_{\text{после}}/\text{КП}_{\text{до}}$ вискозиметров от времени при диаметре капилляра $d = 1,88$ (*л, м*), $2,55$ (*н, о*), $4,15$ (*п, р*), $5,5$ (*с, т*), $7,25$ мм (*у, ф*)

Уравнение измерений кинематической вязкости капиллярным методом, на котором основаны эталоны, имеет вид

$$\nu = C\tau \frac{g_m}{g_n} - \frac{B}{\tau}, \quad (1)$$

где C — постоянная вискозиметра, определяемая экспериментально; τ — время истечения жидкости из измерительного резервуара; g_m — ускорение свободного падения в месте определения постоянной; g_n — нормальное ускорение свободного падения; B — постоянная вискозиметра, зависящая от потери жидкостью кинетической энергии,

$$B = \frac{mV}{8\pi L}, \quad (2)$$

m — безразмерный коэффициент, учитывающий поправку на кинетическую энергию коэффициента Гагенбаха, $m = 0,581$; V — объем измерительного резервуара; L — длина капилляра.

Как правило, на неопределенность измерений времени истечения жидкости через капилляр вискозиметра влияет реакция наблюдателя, которая обычно составляет 0,2 с [13]; неопределенность (погрешность) секундомера; визуальная ошибка фиксирования момента (параллакс и др.) прохождения мениском жидкости рисок, нанесенных на капилляр вискозиметра.

Для уменьшения вкладов в неопределенность от перечисленных влияний проводят не менее 10 измерений времени истечения исследуемой жидкости и подбирают вискозиметры с диаметром капилляра так, чтобы время истечения было не менее 200 с и не более 2000 с.

Постоянную вискозиметра, зависящую от потери жидкостью кинетической энергии [14], определяют по (2) для вискозиметров с капиллярами диаметром 0,33...0,97 мм, предварительно измерив длину капилляра и объем измерительного резервуара.

Влияние второго члена уравнения (1) на результат измерения вязкости признают минимальным при условии $mV / (8\pi L\tau) \leq 0,0005$, что существенно для вискозиметров с капиллярами диаметром 0,33...0,97 мм.

Коэффициенты преобразования — постоянные C вискозиметров, зависящие от геометрических размеров, определяют экспериментально методом сличения с применением градуировочных жидкостей и Государственного первичного эталона единиц динамической и кинематической вязкости жидкости (ГЭТ 17–2018) [15–20].

Время истечения градуировочных жидкостей в исследуемом вискозиметре и вискозиметре из состава ГЭТ 17–2018 измеряют одновременно

при одних и тех же условиях. Вискозиметры из состава ГЭТ 17–2018 подбирают так, чтобы значения их постоянных C были близки к номинальным значениям постоянных C исследуемых вискозиметров, а время истечения градуировочных жидкостей находилось в пределах 200...2000 с.

Постоянные C исследуемых вискозиметров измеряют не менее чем по двум градуировочным жидкостям, при этом их вязкость должна отличаться не менее чем в 1,5 раза. Одной и той же градуировочной жидкостью заполняют вискозиметры, входящие в ГЭТ 17–2018, и исследуемый вискозиметр. За действительное значение времени истечения градуировочной жидкости принимают среднее арифметическое измеренных значений. Если действительное значение времени истечения градуировочной жидкости отличается более чем на 0,1 % от каждого измеренного значения, то измерения повторяют.

Постоянные C вискозиметров с капиллярами диаметром 0,33...0,97 мм рассчитывают как среднее арифметическое постоянных вискозиметра C_1, C_2 , определенных по двум градуировочным жидкостям:

$$C_1 = \left(\frac{v_1}{\bar{\tau}_1} + \frac{B}{\bar{\tau}_1^2} \right) \frac{g_H}{g_M}; \quad C_2 = \left(\frac{v_2}{\bar{\tau}_2} + \frac{B}{\bar{\tau}_2^2} \right) \frac{g_H}{g_M},$$

где v_1, v_2 — кинематическая вязкость градуировочных жидкостей; $\bar{\tau}_1, \bar{\tau}_2$ — средние арифметические значения времени истечения градуировочных жидкостей.

Постоянные вискозиметров с капиллярами диаметром от 1,33 мм вычисляют как среднее арифметическое C_1, C_2 , определенных по формулам

$$C_1 = \frac{v_1}{\bar{\tau}_1} \frac{g_H}{g_M}; \quad C_2 = \frac{v_2}{\bar{\tau}_2} \frac{g_H}{g_M}.$$

Значения постоянных C вискозиметров округляют до пяти значащих цифр.

Основные характеристики вискозиметров стеклянных капиллярных эталонных соответствуют номинальным значениям, приведенным в табл. 2.

Консервативную оценку относительной доверительной границы погрешности $\delta(C)$ или относительной расширенной неопределенности измерений постоянных C вискозиметров из состава комплекса эталонного можно рассчитать из выражения $U_R(C) = \pm (0,0109 \ln(C) + 0,2714)$, %. С учетом этого показателем высокой метрологической надежности капиллярного вискозиметра является именно высокая стабильность получаемых значений КП вискозиметра. Таким образом, КП оказывается параметром

метрологической надежности этого вида СИ, а точнее, специфической методики определения метрологической характеристики вискозиметра стеклянного капиллярного.

Таблица 2

Основные характеристики вискозиметров стеклянных капиллярных эталонных²

Группа	Постоянная вискозиметра C , мм ² /с ²	Объем измерительного резервуара V , см ³	Диаметра капилляра d , мм	Кинематическая вязкость ν , мм ² /с
I	0,0017	2,0 ± 0,2	0,33 ± 0,02	0,4–3,4
II	0,005	3,0 ± 0,2	0,48 ± 0,02	1–10
III	0,010		0,53 ± 0,02	2–20
IV	0,017		0,65 ± 0,03	3,4–34,0
V	0,048		0,85 ± 0,03	8–80
VI	0,05	5,0 ± 0,3	0,97 ± 0,03	10–100
VII	0,04		1,03 ± 0,03	8–80
VIII	0,10		1,20 ± 0,03	20–200
IX	0,17		1,33 ± 0,03	34–340
X	0,24	7,0 ± 0,3	1,50 ± 0,03	48–480
XI	0,27		1,70 ± 0,03	54–540
XII	0,5		1,88 ± 0,03	100–1000
XIII	1,2		2,30 ± 0,05	240–2400
XIV	1,7		2,55 ± 0,05	340–3400
XV	4,5	15 ± 1	3,60 ± 0,05	900–9000
XVI	5,0		4,15 ± 0,05	1000–10 000
XVII	10,0		4,44 ± 0,05	2000–20 000
XVIII	17,0		5,50 ± 0,05	3400–34 000
XIX	50,0		7,25 ± 0,05	10 000–100 000

Нормированный интервал между поверками вискозиметров стеклянных капиллярных эталонных (4 года) оправдан потребностью в максимально возможном снижении риска эксплуатации СИ в состоянии метрологического отказа. Это особенно важно, когда речь идет о государственном регулировании обеспечения единства измерений. В то же время в рекомендациях OIML D 10³ описаны различные методы оценивания,

² Вискозиметры стеклянные капиллярные эталонные. Руководство по эксплуатации. ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева», 2020.

³ ILAC-G24/OIML D 10: Guidelines for the determination of recalibration intervals of measuring equipment used in testing laboratories, 2019.

назначения и корректировки интервалов между поверками СИ. Документ не содержит подробного описания последовательности действий, но предлагает вполне практически реализуемые методы повышения метрологической надежности СИ. Эти методы классифицированы и образуют несколько групп.

1. Автоматическая настройка, или «лестница» (календарное время между поверками). Основным критерий — близость неопределенности измерений к целевому значению (для практического использования рекомендуется в качестве порогового значения принимать 0,8 максимального значения целевой неопределенности). Использование этого метода позволяет оперативно корректировать интервалы между калибровками СИ.

2. Контрольная диаграмма (календарное время) — диаграмма Шухарта — является одним из наиболее важных инструментов статистического контроля качества; результаты промежуточных калибровок отображаются на графиках в зависимости от времени; на основе этих графиков рассчитывается инструментальный дрейф характеристики (неопределенность или погрешность).

3. Время работы (наработка) — разновидность предыдущих методов; интервал между поверками выражается в часах использования, а не в календарном времени эксплуатации.

4. Проверка работоспособности («черный ящик») — разновидность методов № 1 и 2. Реализует упрощенную и быструю калибровку атрибутов измерительного оборудования. Используется мобильное калибровочное устройство или «черный ящик», специально предназначенный для проверки выбранных компонентов измерительного устройства.

5. Другие статистические подходы, основанные на применении методов прикладной статистики для анализа отдельного измерительного оборудования или типа СИ. Применяются при поверке большого числа идентичных измерительных приборов (групп измерительных приборов). Интервал между поверками оценивается статистическими методами. Эта группа методов содержательно близка методам, описанным в RP-1 [1].

Следует отметить, что на рис. 3 приведены результаты проверок вискозиметров за период 2000–2023 гг. (более 960 поверок вискозиметров 10 типоразмеров). Близость значений КП до и после поверки вискозиметров не согласуется с заметными различиями значений КП одного диаметра. Однако это объясняется тем, что имеется исходное различие КП даже для однотипных вискозиметров, которая и сохраняется в дальнейшем (табл. 3). Согласно полученным результатам анализа, значение КП вискозиметра существенно зависит от диаметра капилляра (см. табл. 3, рис. 4).

**Коэффициенты преобразования вискозиметров
с капиллярами различных диаметров**

КП	Диаметр, мм									
	7,25	5,5	4,15	2,55	1,88	1,33	0,97	0,65	0,48	0,33
КП	55,60-50,19	20,80-13,87	6,211-3,888	1,816-1,273	0,648-0,390	0,191-0,141	0,0555-0,0334	0,0208-0,0129	0,00671-0,00343	0,00207-0,00126
KP_{max} / KP_{min}	1,08	1,50	1,60	1,43	1,66	1,35	1,66	1,61	1,96	1,64
$KP_{ном} \pm \Delta \%$	52,9 \pm 5 %	17,3 \pm 20 %	5,05 \pm 23 %	1,545 \pm 18 %	0,519 \pm 25%	0,166 \pm 15 %	0,0445 \pm 25 %	0,0169 \pm 14 %	0,00510 \pm 32 %	0,00167 \pm 24 %

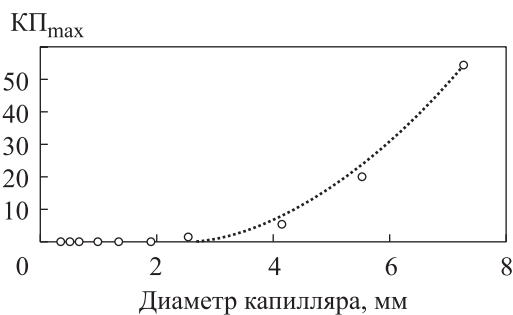


Рис. 4. Зависимость КП вискозиметра от диаметра капилляра

В соответствии с полученными данными зависимость КП от диаметра капилляра существенна почти для всех типоразмеров, за исключением диаметра 0,48 мм, отклонения КП от номинального значения не превышают $\pm 25 \%$.

Отклонения значений КП вискозиметров до и после очередной проверки укладываются в допускаемую (согласно описанию типа) погрешность определения КП вискозиметров комплекса эталонного. При этом в процессе эксплуатации прослеживаются некоторые изменения КП вискозиметров, хотя в абсолютных значениях эти изменения малы (рис. 5),

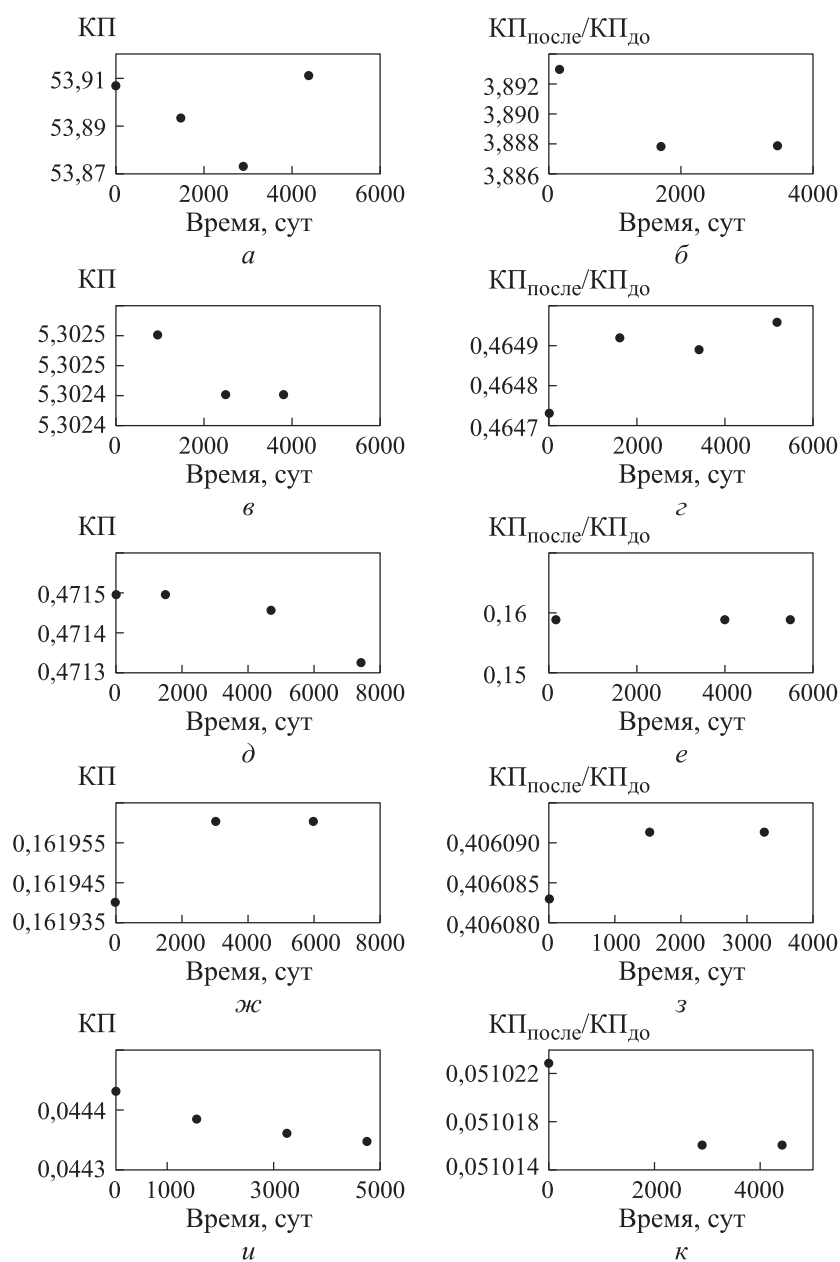


Рис. 5 (начало). Примеры изменения с течением времени значений КП различных вискозиметров:

а — $d = 7,25$ мм, инв. № 810109, изменение на 0,07 %; *б* — $d = 4,15$ мм, инв. № 25, изменение на 0,1 %; *в* — $d = 4,15$ мм, инв. № 781002, изменение на 0,002 %; *г* — $d = 1,88$ мм, инв. № 110491, изменение на 0,05 %; *д* — $d = 1,88$ мм, инв. № 2, изменение на 0,05 %; *е* — $d = 1,33$ мм, инв. № 740225, изменение на 0; *ж* — $d = 1,33$ мм, инв. № 110272, изменение на 0,012 %; *з* — $d = 0,97$ мм, инв. № 740202, изменение на 0,017 %; *и* — $d = 0,97$ мм, инв. № 861226, изменение на 0,18 %; *к* — $d = 0,97$ мм, инв. № 760415, изменение на 0,014 %

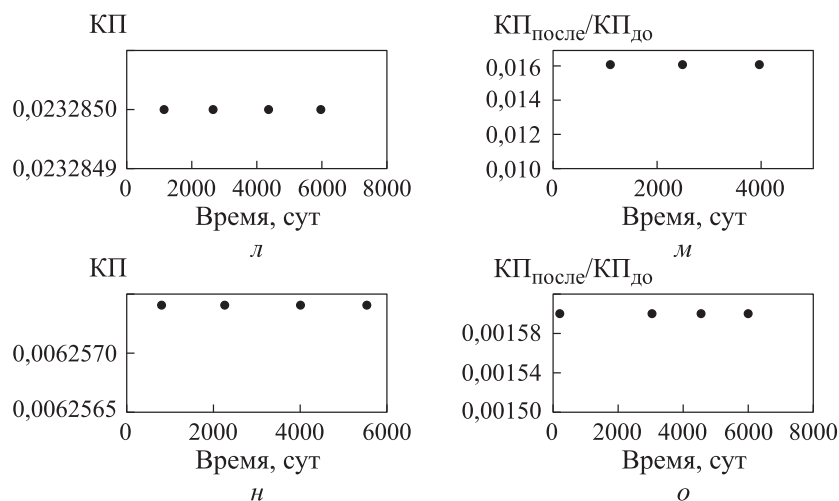


Рис. 5 (окончание). Примеры изменения с течением времени значений КП различных вискозиметров:

$л$ — $d = 0,65$ мм, инв. № 850105, изменение на 0; $м$ — $d = 0,65$ мм, инв. № 870223, изменение на 0; $н$ — $d = 0,48$ мм, инв. № 780417, изменение на 0; $о$ — $d = 0,33$ мм, инв. № 740409, изменение на 0

т. е. стабильность вискозиметров стеклянных капиллярных эталонных очень высокая. Согласно руководству по эксплуатации вискозиметров, предельное значение отклонения КП от номинального не должно превышать $\pm 30\%$ для каждого соответствующего типоразмера.

Результаты анализа данных по поверкам вискозиметров с капиллярами различных диаметров показывают, что совокупность значений КП для вискозиметров одного типоразмера соответствует статистической закономерности, описываемой одномодальным и практически симметричным распределением плотности вероятности. В качестве примеров на рис. 6 приведены кривые статистического распределения измеренных значений КП вискозиметров трех типоразмеров, для которых имеется наибольший объем данных по поверкам. Приведенная статистика характеризует стабильность и воспроизводимость характеристики вискозиметров указанного типоразмера при их производстве, т. е. не связана со стабильностью КП конкретных вискозиметров во времени при их эксплуатации (см. рис. 5).

Заключение. Приведены результаты исследований метрологической надежности вискозиметров, входящих в состав комплексов эталонных ЭЖ КВх. Показано, что метрологическая надежность СИ вязкости характеризуется вероятностью безотказной работы, наработкой на отказ и обеспечивается высокой стабильностью КП вискозиметров с капиллярами разного диаметра.

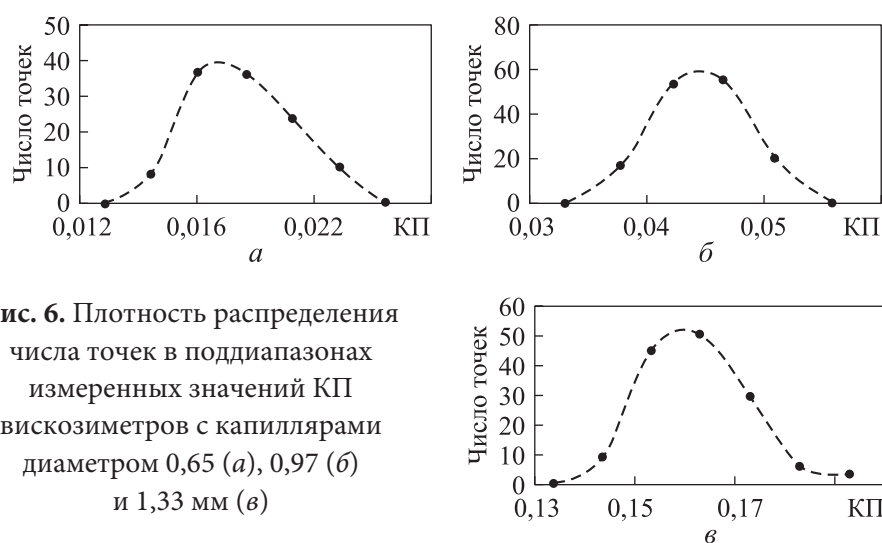


Рис. 6. Плотность распределения числа точек в поддиапазонах измеренных значений КП вискозиметров с капиллярами диаметром 0,65 (а), 0,97 (б) и 1,33 мм (в)

Детальное изучение зависимости КП вискозиметра от времени работы позволяет обосновать интервал между поверками с очень незначительным риском использования СИ в неисправном (с позиции допустимой погрешности) состоянии.

Высокая метрологическая надежность вискозиметров стеклянных в качестве СИ утвержденного типа характеризуется как высокой вероятностью безотказной работы, так и точностью, стабильностью и повторяемостью такого показателя, как КП для вискозиметров каждого типоразмера (диаметра капилляра).

Исследования характеристик вискозиметров, их стабильности для каждого капилляра различных диаметров во времени, высокая точность определения КП позволяют достигнуть и поддерживать требуемый уровень точности передачи размера кинематической вязкости, обосновать и обеспечить уровень компетентности лаборатории — эксплуатанта эталонного комплекса, соответствующий требованиям стандарта ГОСТ ISO/IEC 17025–2019⁴. Следует отметить, что при этом создаются условия, обеспечивающие успешное участие лаборатории в международных и ключевых сличениях в области измерений вязкости жидких сред.

Проблема метрологической надежности СИ была и остается актуальной, особенно в сфере государственного регулирования обеспечения единства измерений, в частности, в области эталонных измерений. Постоянное использование термина «метрологическая надежность» требует его опреде-

⁴ ГОСТ ISO/IEC 17025–2019. Общие требования к компетентности испытательных и калибровочных лабораторий. М., Стандартиформ, 2019.

ления в соответствующих словарях^{5, 6} на уровне, не позволяющем его неоднозначной трактовки и тем более применения не по назначению. В словаре РМГ 29–2013⁶ под метрологической надежностью понимается «надежность средства измерений в части сохранения его метрологической исправности» (термин 7.48). Предлагается дополнить определение примечаниями.

Примечание 1. Сохранение в СИ установленных значений метрологических характеристик в течение заданного времени при определенных режимах и условиях эксплуатации гарантирует применение в измерительной задаче СИ, находящихся в состоянии *метрологической исправности* (термин из РМГ 29–2013 7.47).

Примечание 2. Метрологическую надежность могут характеризовать такие показатели, как вероятность безотказной работы, наработка на отказ — в этом случае речь идет о периодических внезапных отказах, вероятность реализации которых в процессе решения конкретной измерительной задачи уменьшается до приемлемого (с позиции рисков) значения путем проведения промежуточных поверок и корректировки интервала до следующей поверки. Таким образом, правильно назначенный интервал между очередными поверками, по сути, характеризует наработку на отказ и гарантирует высокую вероятность применения СИ, находящегося в исправном состоянии, т. е. обеспечивает требуемое качество измерений.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] NCSLI. Recommended practice RP-1: Establishment and adjustment of calibration intervals. 2010.
- [2] Шрамм Г. Основы практической реологии и реометрии. М., КолосС, 2003.
- [3] Мордасов М.М. Пневматический контроль вязкости жидких веществ. Ч. 1. Капиллярные методы измерений и устройства их реализации. Тамбов, Изд-во ТГТУ, 2007.
- [4] Катюхин В.Е., Карбаинова С.Н. Определение вязкости жидкостей. Томск, Изд-во ТПУ, 2007.
- [5] Малкин А.Я., Исаев А.И. Реология: концепции, методы, приложения. СПб., Профессия, 2007.
- [6] Кутепов А.М., ред. Экспериментальные методы химии растворов. М., Наука, 1997.
- [7] Степанов Л.П. Измерение вязкости жидкостей. М., б.и., 1966.

⁵ JCGM 2008. Международный словарь по метрологии. Основные и общие понятия и соответствующие термины. СПб., НПО «Профессионал», 2008.

⁶ РМГ 29–2013. ГСОЕИ. Метрология. Основные термины и определения. М., Стандартиформ, 2014.

- [8] Mortier R.M., Fox M.F., Orszulik S.T. Chemistry and technology of lubricants. Springer, 2010.
- [9] Severa L., Havlíček M., Kumbár V. Temperature dependent kinematic viscosity of different types of engine oils. *Acta Univ. Agric. Silvic. Mendelianae Brun.*, 2009, vol. 57, no. 4, pp. 95–102. DOI: <http://dx.doi.org/10.11118/actaun200957040095>
- [10] Tanveer S., Sharma U.Ch., Prasad R. Rheology of multigrade engine oils. *Indian J. Chem. Technol.*, 2006, vol. 13, pp. 180–184.
- [11] Ластовкина Г.А., Радченко Е.Д., Рудина М.Г. Справочник нефтепереработчика. Л., Химия, 1986.
- [12] Белов П.С. Практикум по нефтехимическому синтезу. М., Химия, 1987.
- [13] Богданов К.Ю. Физик в гостях у биолога. М., Изд-во МЦНМО, 2015.
- [14] Рыбак Б.М. Анализ нефти и нефтепродуктов. М., Гостоптехиздат, 1962.
- [15] Нгуен М.Т., Неклюдова А.А., Демьянов А.А. и др. О совершенствовании обеспечения единства измерений вязкости жидкостей в Российской Федерации. *Евразийский Союз Ученых. Технические науки*, 2019, т. 1, № 63, с. 50–54.
- [16] Tsurko A.A., Dem'yanov A.A. The state of measurement assurance of measurements of the viscosity of petroleum products. *Meas. Tech.*, 2014, vol. 57, no. 4, pp. 466–467. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11018-014-0479-z>
- [17] Демьянов А.А., Неклюдова А.А. Государственный первичный эталон единицы кинематической вязкости жидкости ГЭТ 17-96. *Приборы*, 2016, № 5, с. 38–40.
- [18] Неклюдова А.А., Демьянов А.А. Метрологическое обеспечение измерений вязкости жидкостей. *Металлообработка*, 2017, № 5, с. 44–48.
- [19] Неклюдова А.А., Демьянов А.А., Сулаберидзе В.Ш. Обеспечение единства измерений вязкости — важнейшее условие повышения качества нефтепродуктов. *Качество. Инновации. Образование*, 2017, № 3, с. 28–33.
- [20] Neklyudova A., Demyanov A. Improvement unity of measurement of the viscosity liquid medium in the ranges of temperature minus 40 °C to minus 5 °C and 100 °C to 150 °C. *Proc. VII Int. Competition of COOMET The Best Young Metrologist*. Astana, Kazakhstan, 2017, pp. 45–48.

Неклюдова Анастасия Александровна — канд. техн. наук, заместитель руководителя научно-исследовательской лаборатории государственных эталонов в области измерений плотности и вязкости жидкости, доцент кафедры «Теоретическая и прикладная метрология» ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева» (Российская Федерация, 190005, Санкт-Петербург, пр-т Московский, д. 19).

Сулаберидзе Владимир Шалвович — д-р техн. наук, профессор, главный специалист лаборатории законодательной метрологии и метрологического программного обеспечения ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева» (Российская Федерация, 190005, Санкт-Петербург, пр-т Московский, д. 19).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Неклюдова А.А., Сулаберидзе В.Ш. Анализ показателей метрологической надежности вискозиметров стеклянных капиллярных эталонных. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение*, 2024, № 1 (146), с. 38–56. EDN: EPSEET

**METROLOGICAL DEPENDABILITY INDICATORS ANALYSIS
OF THE GLASS CAPILLARY REFERENCE VISCOMETERS**

A.A. Neklyudova
V.Sh. Sulaberidze

a.a.tsurko@vniim.ru
v.sh.sulaberidze@vniim.ru

D.I. Mendeleev Institute for Metrology, St. Petersburg, Russian Federation

Abstract

The paper presents results of studying metrological reliability indicators of the glass capillary reference viscometers. They are included in the EC KVx reference systems designed for measuring, storing and transmitting the kinematic viscosity unit of liquids corresponding to the working standards level of the 1st category according to the state verification scheme for instruments measuring the liquids viscosity. It was approved by the Order of the Federal Agency for Technical Regulation and Metrology dated November 5, 2019 no. 2622. The paper shows that metrological reliability of the viscosity measuring instruments is characterized by such indicators as probability of the failure-free operation and time between failures, and it is ensured by the high stability of the conversion coefficient for viscometers with the capillaries of various diameters. Clarification of the “metrological reliability” term is proposed, providing the required degree of unambiguity in its definition and interpretation. High stability over time and accuracy of determining the conversion coefficient are the viscometer main characteristics. They make it possible to maintain the required accuracy level in transmitting the kinematic viscosity size and justify compliance of the competence level of the laboratory operating in the reference systems with requirements of the GOST ISO/IEC 17025–2019. It creates conditions ensuring successful participation of the laboratory in international and key comparisons in measuring the liquid media viscosity

Keywords

Kinematic viscosity, glass capillary viscometer, conversion factor, metrological reliability, failure-free operation probability, time between failures, service life

Received 14.04.2023
Accepted 22.06.2023
© Author(s), 2024

REFERENCES

- [1] NCSLI. Recommended practice RP-1: Establishment and adjustment of calibration intervals. 2010.
- [2] Schramm G. A practical approach to rheology and rheometry. Karlsruhe, Gebrueder Haake, 1994.
- [3] Mordasov M.M. Pnevmaticheskiy kontrol vyazkosti zhidkikh veshchestv. Ch. 1. Kapillyarnye metody izmereniy i ustroystva ikh realizatsii [Pneumatic viscosity control of liquid substances. P. 1. Capillary methods of measurements and devices for their realization]. Tambov, TSTU Publ., 2007.
- [4] Katyukhin V.E., Karbainova S.N. Opredelenie vyazkosti zhidkostey [Assessment of liquid viscosity]. Tomsk, TPU Publ., 2007.
- [5] Malkin A.I., Isayev A.I. Rheology: concepts, methods and applications. ChemTec, 2006.
- [6] Kutepov A.M., ed. Eksperimentalnye metody khimii rastvorov [Experimental methods of solution chemistry]. Moscow, Nauka Publ., 1997.
- [7] Stepanov L.P. Izmerenie vyazkosti zhidkostey [Measuring viscosity of liquids]. Moscow, 1966.
- [8] Mortier R.M., Fox M.F., Orszulik S.T. Chemistry and technology of lubricants. Springer, 2010.
- [9] Severa L., Havlíček M., Kumbár V. Temperature dependent kinematic viscosity of different types of engine oils. *Acta Univ. Agric. Silvic. Mendelianae Brun.*, 2009, vol. 57, no. 4, pp. 95–102. DOI: <http://dx.doi.org/10.11118/actaun200957040095>
- [10] Tanveer S., Sharma U.Ch., Prasad R. Rheology of multigrade engine oils. *Indian J. Chem. Technol.*, 2006, vol. 13, pp. 180–184.
- [11] Lastovkina G.A., Radchenko E.D., Rudina M.G. Spravochnik neftepererabotchika [Reference book of oil refiner]. Leningrad, Khimiya Publ., 1986.
- [12] Belov P.S. Praktikum po neftekhimicheskomu sintezu [Practicum on petrochemical synthesis]. Moscow, Khimiya Publ., 1987.
- [13] Bogdanov K.Yu. Fizik v gostyakh u biologa [Physicist in a visit to a biologist]. Moscow, MTsNMO Publ., 2015.
- [14] Rybak B.M. Analiz nefi i nefteproduktov [Analysis of oil and petroleum products]. Moscow, Gostoptekhizdat Publ., 1962.
- [15] Nguen M.T., Neklyudova A.A., Demyanov A.A., et al. On improvement of uniformity of liquid viscosity measurements in the Russian Federation. *Evraziyskiy Soyuz Uchenykh. Tekhnicheskie nauki* [Eurasian Union of Scientists. Ser. Technical Sciences], 2019, vol. 1, no. 63, pp. 50–54 (in Russ.).
- [16] Tsurko A.A., Dem'yanov A.A. The state of measurement assurance of measurements of the viscosity of petroleum products. *Meas. Tech.*, 2014, vol. 57, no. 4, pp. 466–467. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11018-014-0479-z>

- [17] Demyanov A.A., Neklyudova A.A. National primary standard of the unit kinematic viscosity of the liquid GET 17-96. *Pribory*, 2016, no. 5, pp. 38–40 (in Russ.).
- [18] Neklyudova A.A., Demyanov A.A. Metrological provision of measuring the viscosity of liquids. *Metalloobrabotka* [Metalworking], 2017, no. 5, pp. 44–48 (in Russ.).
- [19] Neklyudova A.A., Demyanov A.A., Sulaberidze V.Sh. Providing unity of viscosity measurement — the most important condition for improving the quality of petroleum products. *Kachestvo. Innovatsii. Obrazovanie*, 2017, no. 3, pp. 28–33 (in Russ.).
- [20] Neklyudova A., Demyanov A. Improvement unity of measurement of the viscosity liquid medium in the ranges of temperature minus 40 °C to minus 5 °C and 100 °C to 150 °C. *Proc. VII Int. Competition of COOMET The Best Young Metrologist*. Astana, Kazakhstan, 2017, pp. 45–48.

Neklyudova A.A. — Cand. Sc. (Eng.), Deputy Head of Density and Viscosity Laboratory, Assoc. Professor, Department of Theoretical and Applied Metrology, D.I. Mendeleev Institute for Metrology (Moskovskiy prospekt 19, St. Petersburg, 190005 Russian Federation).

Sulaberidze V.Sh. — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Chief Specialist of the Laboratory of Legal Metrology and Metrological Support, D.I. Mendeleev Institute for Metrology (Moskovskiy prospekt 19, St. Petersburg, 190005 Russian Federation).

Please cite this article in English as:

Neklyudova A.A., Sulaberidze V.Sh. Metrological dependability indicators analysis of the glass capillary reference viscometers. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Instrument Engineering*, 2024, no. 1 (146), pp. 38–56 (in Russ.). EDN: EPSEET