

Всероссийский
научно-исследовательский
институт метрологии
им. Д. И. Менделеева,
г. Санкт-Петербург

АНАЛИЗ СТАБИЛЬНОСТИ И ВАРИАТИВНОСТИ МЕТРОЛОГИЧЕСКОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ (КОЭФФИЦИЕНТА ПРЕОБРАЗОВАНИЯ) ВИСКОЗИМЕТРОВ СТЕКЛЯННЫХ КАПИЛЛЯРНЫХ ЭТАЛОННЫХ

Приведены результаты определения стабильности и вариативности основной характеристики вискозиметров стеклянных капиллярных эталонных — коэффициента преобразования путем анализа совокупности данных по вискозиметрам, имеющим разные диаметры измерительного капилляра. Показано, что средние значения по выборке отличаются от средних значений по кривым симметричного нормального распределения в пределах 2–4 %, а также соответствия статистик нормальному закону распределения с помощью обратной стандартной функции и гистограмм, демонстрирующих степень соответствия выборочного распределения теоретическому.

Ключевые слова: STATISTICA, вискозиметр стеклянный капиллярный, коэффициент преобразования, выборка, гистограмма, нормальный закон распределения, средние значения.

Введение. Из всего многообразия существующих сегодня средств измерений для наиболее точных измерений вязкости применяют вискозиметры стеклянные капиллярные Уббелоды (вискозиметры с «висячим уровнем») [1–3]. Такие вискозиметры, как правило, применяют в составе национальных эталонов в виде наборов, состоящих из пар вискозиметров, разделенных на группы по размеру диаметра измерительного капилляра.

В Российской Федерации такие вискозиметры применяют в составе комплексов эталонных ЭК КВх, предназначенных для измерений, а также хранения и передачи единицы кинематической вязкости жидкостей в диапазонах значений вязкости от 0,4 до 10^5 мм²/с и в диапазоне значений температуры от минус 40 °С до 150 °С.

Принцип действия основан на измерении времени истечения определённого объёма исследуемой жидкости через капилляр вискозиметра под действием собственного веса и при постоянном контроле установившегося значения температуры.

Вискозиметры состоят из трех соединенных между собой стеклянных трубок, в одной из которых расположен капилляр и измерительный резервуар, ограниченный двумя кольцевыми рисками. Вискозиметры представляют собой U-образную стеклянную трубку, изготовленную из химически стойкого лабораторного стекла (рис. 1). Вискозиме-

тры маркируют путём нанесения на сферическую поверхность измерительного резервуара его номинального значения объёма, а также меток, определяющих измерительный резервуар вискозиметра. Габаритные размеры вискозиметра: 55 × 610 мм.

Условия эксплуатации вискозиметров:

- температура окружающего воздуха, °С: 20±2;
- относительная влажность воздуха, %: 30–80;
- атмосферное давление, кПа: 84,0–106,7.

Значение коэффициента преобразования (КП) — постоянной вискозиметра зависит от величины диаметра, а точность и стабильность его являются характеристиками метрологической надёжности средства измерений. Вискозиметры являются довольно надёжными и долговечными — срок их службы достигает 25 лет, наработка до отказа — до 48000 часов (согласно описанию типа СИ), а нормированный интервал между поверками — 4 года.

Предел допускаемой относительной погрешности определения постоянных преобразования вискозиметров из состава комплексов эталонных, согласно описанию типа, не должен превышать ± 0,2 % [4].

Уравнение измерений кинематической вязкости основано на уравнении Хагена–Пуазейля, описывающего ламинарное установившееся течение ньютоновской жидкости через капилляр конечной длины под действием силы тяжести с учетом по-



Рис. 1. Общий вид вискозиметра стеклянного капиллярного эталонного

правки на потерю жидкостью кинетической энергии. Поскольку жидкость входит в капилляр из более широкого сосуда, то на некотором расстоянии от капилляра она течет сходящимися струями, скорости которых различны. Различие в скоростях движения частиц жидкости, подходящих к капилляру, обуславливает дополнительное сопротивление течению жидкости. Оно учитывается прибавлением к значению длины капилляра некоторой величины ΔL , пропорциональной радиусу, т.е. $\Delta L = n \cdot R$.

Таким образом, уравнение Пуазейля с учетом двух поправок примет вид

$$v = \frac{\pi r^4 g h}{8V(L + nr)} \tau - \frac{mV}{8V(L + nr)\tau}, \quad (1)$$

где V — объем измерительного резервуара вискозиметра, мм³; τ — время истечения определенного объема исследуемой жидкости через измерительный резервуар вискозиметра, с; L — длина измерительного капилляра вискозиметра, мм; r — радиус измерительного капилляра, мм; g — ускорение свободного падения, мм/с²; h — высота столба исследуемой жидкости в вискозиметре, мм; n — поправка на конечную длину измерительного капилляра (поправка Куэтта) [5]; m — безразмерный коэффициент, учитывающий поправку на потерю жидкостью кинетической энергии, зависящий от формы концов капилляра, а также от числа Рейнольдса (Re) [6, 7].

Несмотря на многочисленные исследования, к настоящему времени отсутствуют твердо установленные значения для величин m и n . Большинство экспериментаторов принимают для обретенных под прямым углом капилляров значения $m = 1,12$, $n = 1,14$. Когда же капилляр имеет на концах закругления, наиболее часто применяемые значения для $m = 0,56 - 0,60$.

Исследования Кеннона показали, что m не является константой, а зависит от числа Рейнольдса, рассчитываемого по формуле:

$$Re = \frac{d\bar{v}}{v}, \quad (2)$$

где d — диаметр капилляра, мм; \bar{v} — средняя скорость течения жидкости, которая определяется как расход Q , деленный на площадь сечения капилляра, мм/с.

Для случая, когда концы капилляра выполнены в виде раструба (неизбежно при пайке капилляра), Кенноном предложена следующая экспериментальная найденная зависимость между m и Re [8]

$$m = 0,037(Re)^{0,5}. \quad (3)$$

Формула Пуазейля справедлива только для ламинарного потока жидкости, то есть при отсутствии скольжения на границе жидкость — стенка капилляра вискозиметра.

В документе D 446 [9] приведена следующая формула для расчета измеренного значения кинематической вязкости исследуемой жидкости

$$v = \left(\frac{10^6 \pi g D^4 H \tau}{128 V L} - \frac{E}{\tau^2} \right), \quad (4)$$

где v — кинематическая вязкость, мм²/с; π — число Пи; g — нормальное ускорение свободного падения, мм/с²; D — диаметр капилляра вискозиметра, мм; H — среднее расстояние между верхним и нижним менисками, мм; τ — время истечения исследуемой жидкости через капилляр вискозиметра, с; V — объем исследуемой жидкости, протекающий через капилляр вискозиметра (приблизительно равный объему измерительного резервуара вискозиметра), мм³; L — длина капилляра вискозиметра, мм; E — поправка на потерю жидкостью кинетической энергии, мм²·с.

Для вискозиметров с постоянными, значение которых составляет 0,05 мм²/с² и менее, влияние поправки на потерю жидкостью кинетической энергии может быть существенным, к тому же коэффициент E не является константой, но он может быть рассчитан по формуле

$$E = \frac{52,5V^{3/2}}{L(Cd)^{1/2}}, \quad (5)$$

где V — объем измерительного резервуара вискозиметра, мм³; L — длина капилляра вискозиметра, мм; d — диаметр капилляра вискозиметра, мм; C — постоянная вискозиметра, мм²/с².

При небольших числах Re для рассматриваемых вискозиметров, значение m приближается к нулю с уменьшением числа Re, кроме того, выражение $(L + nr)$ может быть упрощено до L , тогда уравнение (1) можно записать в виде [10]:

$$v = C\tau - \frac{B}{\tau^2}, \quad (6)$$

$$B = \frac{1,66V^{3/2}}{L\sqrt{rC}} = \frac{mV}{8\pi L}, \quad (7)$$

где C — коэффициент преобразования (далее — КП), мм²/с; B — постоянная вискозиметра, учитывающая потерю жидкостью кинетической энергии, мм².

Для малых значений вязкости, при которых поправка на потерю жидкостью кинетической энергии наиболее существенна — для поддиапазонов измерений до 100 мм²/с для рассматриваемых вискозиметров [11]. Несмотря на то, что величина поправки мала, ею нельзя пренебречь.

За эталонную меру для вискозиметров большинства стран принято фиксированное значение абсолютной вязкости воды при значении температуры, равном 20,000 °С, и атмосферном давлении, установленном в [12, 13] как 1,0034 мм²/с.

Для обоснования необходимого уровня точности передачи размера единицы кинематической вязкости, а также обеспечения компетентности лабораторий, эксплуатирующих вискозиметры стеклянные капиллярные эталонные, необходимо оценить их метрологическую надежность, характеризующуюся в том числе и такими показателями, как стабильность и вариативность коэффициента преобразования (далее — КП).

Измеренные значения КП

КП вискозиметра (группировка по диапазонам)	Число точек данного диапазона	p — доля количества точек в данном диапазоне от общего их числа
1	2	3
капилляр 0,33 мм		
$0,0013 < x \leq 0,0015$	11	0,159
$0,0015 < x \leq 0,0017$	29	0,420
$0,0017 < x \leq 0,0020$	27	0,391
$0,0020 < x \leq 0,0022$	2	0,0289
итоговое среднее: 0,0017	общее число точек совокупности: 69	
капилляр 0,48 мм		
$0,0034 < x \leq 0,0041$	5	0,0471
$0,0041 < x \leq 0,0047$	16	0,151
$0,0047 < x \leq 0,0054$	44	0,415
$0,0054 < x \leq 0,0061$	31	0,292
$0,0061 < x \leq 0,0067$	10	0,0943
итоговое среднее: 0,0052	общее число точек совокупности: 106	
капилляр 0,65 мм		
$0,0122 < x \leq 0,0141$	7	0,0534
$0,0141 < x \leq 0,0159$	36	0,275
$0,0159 < x \leq 0,0178$	46	0,351
$0,0178 < x \leq 0,0196$	30	0,229
$0,0196 < x \leq 0,0214$	8	0,0611
$0,0214 < x \leq 0,0233$	4	0,0305
итоговое среднее: 0,0173	общее число точек совокупности: 131	
капилляр 0,97 мм		
$0,0334 < x \leq 0,0371$	2	0,0129
$0,0371 < x \leq 0,0408$	13	0,0839
$0,0408 < x \leq 0,0444$	38	0,245
$0,0444 < x \leq 0,0481$	55	0,355
$0,0481 < x \leq 0,0518$	28	0,181
$0,0518 < x \leq 0,0555$	19	0,123
итоговое среднее: 0,0463	общее число точек совокупности: 155	
капилляр 1,33 мм		
$0,141 < x \leq 0,150$	9	0,0612
$0,150 < x \leq 0,159$	22	0,150
$0,159 < x \leq 0,169$	58	0,395
$0,169 < x \leq 0,178$	31	0,211
$0,178 < x \leq 0,187$	22	0,150
$0,187 < x \leq 0,196$	5	0,034
итоговое среднее: 0,167	общее число точек совокупности: 147	
капилляр 1,88 мм		
$0,390 < x \leq 0,418$	1	0,0065
$0,418 < x \leq 0,447$	9	0,0584
$0,447 < x \leq 0,475$	63	0,409
$0,475 < x \leq 0,503$	57	0,370
$0,503 < x \leq 0,532$	18	0,117
$0,532 < x \leq 0,560$	6	0,0390
итоговое среднее: 0,479	общее число точек совокупности: 154	

1	2	3
капилляр 2,55 мм		
$1,272 < x <= 1,381$	1	0,0256
$1,381 < x <= 1,490$	7	0,179
$1,490 < x <= 1,600$	12	0,308
$1,600 < x <= 1,710$	12	0,308
$1,710 < x <= 1,816$	7	0,179
итоговое среднее: 1,60	Общее число точек совокупности: 39	
капилляр 4,15 мм		
$3,888 < x <= 4,352$	10	0,0943
$4,352 < x <= 4,817$	13	0,123
$4,817 < x <= 5,282$	36	0,340
$5,282 < x <= 5,746$	37	0,349
$5,746 < x <= 6,211$	10	0,0943
итоговое среднее: 5,13	общее число точек совокупности: 106	
капилляр 5,50 мм		
$13,866 < x <= 15,599$	7	0,25
$15,599 < x <= 17,333$	9	0,32
$17,333 < x <= 19,066$	9	0,32
$19,066 < x <= 20,8$	3	0,11
итоговое среднее: 16,95	общее число точек совокупности: 28	
капилляр 7,25 мм		
$50,189 < x <= 51,542$	4	0,211
$51,542 < x <= 52,895$	3	0,158
$52,895 < x <= 54,247$	10	0,526
$54,247 < x <= 55,60$	2	0,105
Итоговое среднее: 52,94	общее число точек совокупности: 19	

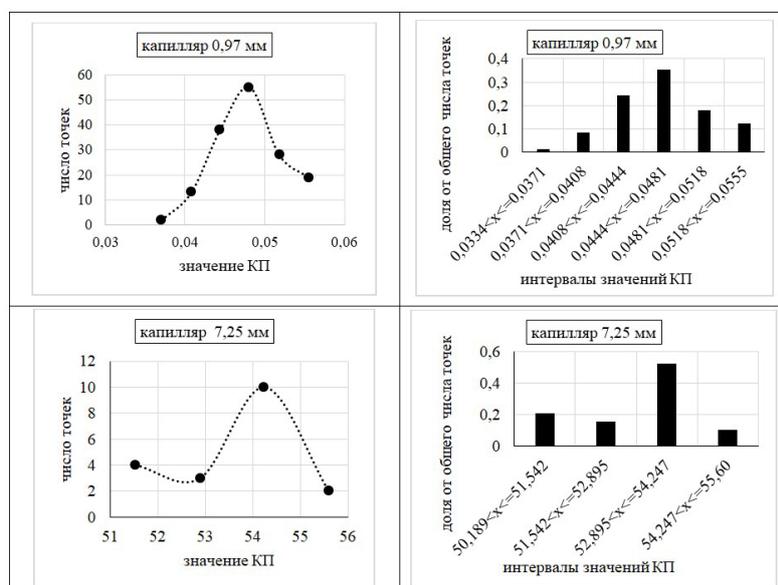


Рис. 2. Измеренные значения КП для вискозиметров с диаметрами капилляра 0,97 и 7,25 мм

Таким образом, целью настоящего исследования являлось определение стабильности и вариативности основной характеристики вискозиметров стеклянных капиллярных эталонных — коэффициента преобразования.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

1) составлено упорядоченное описание совокупности данных по определению КП в процессе проверок вискозиметров разных типоразмеров (все-

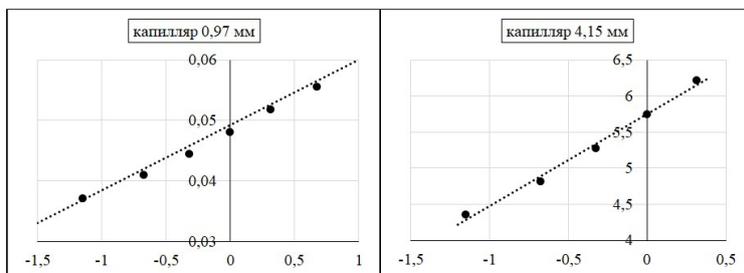


Рис. 3. Графики, показывающие соответствие нормальному закону распределения в EXCEL для вискозиметров с диаметрами капилляра 0,97 и 4,15 мм

го проанализированы примерно 1000 результатов определения КП вискозиметров десяти типоразмеров, подвергнутых поверкам и/или калибровкам в лаборатории с 2000 по 2022 годы);

2) проведен анализ, по результатам которого установлено, что во всех (т.е. для каждого типоразмера) совокупностях измеренных значений КП наблюдается разброс, характеризующий вариативность значений КП для разных инвентарных номеров вискозиметров данного типоразмера. При этом стабильность определяемых значений КП для одного инвентарного номера высокая — отношение «КП до поверки (калибровки) / КП после поверки (калибровки)» близко к единице, за редким исключением (всего по несколько точек);

3) оценена стабильность значений КП вискозиметров одного инвентарного номера по имеющимся в общей совокупности соответствующим точкам;

4) проведен анализ совокупности данных по вискозиметрам разных размеров, включающий:

4.1) систематизацию измеренных значений КП в таблицах и графиках в EXCEL;

4.2) анализ соответствия нормальному закону распределения в EXCEL с помощью обратной стандартной функции НОРМ.СТ.ОБР.;

4.3) анализ соответствия нормальному закону распределения с помощью обратной стандартной функции НОРМ.СТ.ОБР в программе STATISTICA;

4.4) построение гистограмм проверки соответствия нормальному распределению в программе STATISTICA.

Результаты выполнения задач 1–3 подробно изложены в работе [14].

Получаемые и анализируемые значения КП вискозиметров стеклянных капиллярных эталонных являются показателем их высокой метрологической надёжности за счет высокой вероятности безотказной работы, точности, стабильности и повторяемости. Результаты, полученные в данном исследовании, носят новый научный характер и получены впервые для данного типа средств измерений.

Систематизация измеренных значений КП в таблицах и графиках в EXCEL. Для систематизации измеренных значений КП массив данных, содержащий сведения о поверках и/или калибровках вискозиметров стеклянных капиллярных эталонных за период с 2000 до 2022 годы был подвергнут систематизации путем группировки данных по диапазонам и оценки количества точек данного диапазона, как это показано в табл. 1. По данным табл. 1 были построены зависимости значений КП от числа точек для всех типоразмеров вискозиметров, а также гистограммы в EXCEL. На рис. 2 представлены зависимости КП от числа точек и гистограммы для вискозиметров с диаметрами капилляра 0,97 и 7,25 мм.

Из приведенных выше диаграмм видно, что для более-менее достоверной оценки соответствия выборки стандартному нормальному распределению необходимо иметь представительную статистику — желательно более 100 точек.

В целом, по представленным данным можно сделать предположение о соответствии значений КП разных экземпляров вискозиметров одного диаметра нормальному закону распределения. Приводимые ниже результаты анализа по программам EXCEL и STATISTICA и уточняют, и, в основном, подтверждают это предположение.

Анализ соответствия нормальному закону распределения в EXCEL с помощью обратной стандартной функции НОРМ.СТ.ОБР. Обобщённое нормальное распределение приращения $x(t)$ значения КП за время t означает, что нормальному распределению подчиняется значение

$$y(t) = \text{sign}x|x|^F, \quad (8)$$

где $\text{sign}x$ — знак величины $x(t)$; F — показатель степени, характерный для данного вискозиметра.

Плотность обобщённого нормального распределения случайной величины $x(t)$ имеет вид:

$$\varphi_t(x) = \frac{|F|}{\sqrt{2\pi}\sigma_F(t)|x|^{1-F}} \times \exp\left\{-\frac{[\text{sign}x|x|^F - m_F(t)]^2}{2\sigma_F^2(t)}\right\}, \quad (9)$$

где m_F , σ_F — среднее значение и СКО величины $\text{sign}x|x|^F$ соответственно.

В частном случае, при $F = 1$, зависимость (9) преобразуется в плотность нормального распределения

$$\varphi_t(x) = \frac{1}{\sigma_1(t)} \exp\left\{-\frac{[x - m_1(t)]^2}{2\sigma_1^2(t)}\right\}. \quad (10)$$

В приведенных ниже графиках (рис. 2) по горизонтальной оси X отложены значения функции НОРМ.СТ.ОБР, а по вертикальной оси Y — значения КП вискозиметров (по значениям в интервалах разбиения совокупности измеренных значений — более 100 точек для капилляра одного диаметра).

На рис. 3 приведен пример полученных графиков для вискозиметров с диаметрами капилляра 0,97 и 4,15 мм.

Расположение точек на прямой линии в этих графиках — признак соответствия совокупности данных нормальному закону распределения.

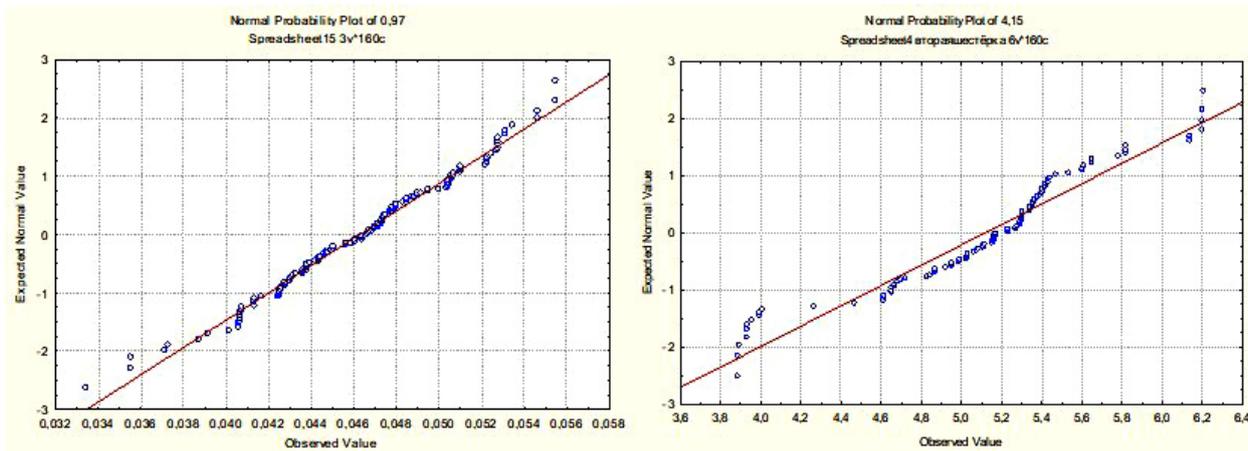


Рис. 4. Результаты анализа соответствия нормальному закону распределения набора значений КП вискозиметров с диаметрами капилляра 0,97 и 4,15 мм (капилляр 0,97 мм по оси X — значения КП, 155 точек, капилляр 4,15 мм по оси X — значения КП, 106 точек)

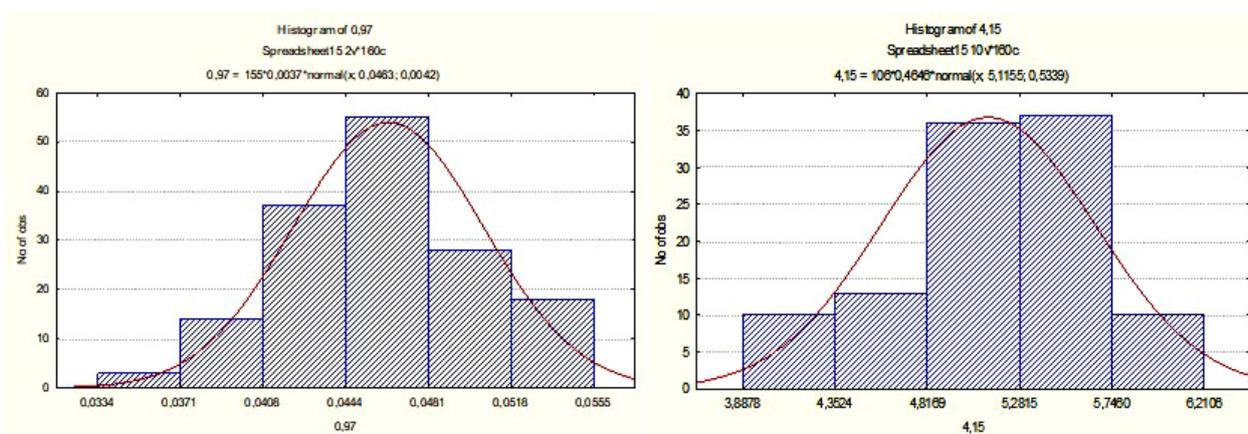


Рис. 5. Гистограммы проверки соответствия нормальному закону распределения в программе STATISTICA для вискозиметров с диаметрами капилляра 0,97 и 4,15 мм

Анализ соответствия нормальному закону распределения с помощью обратной стандартной функции НОРМ.СТ.ОБР в программе STATISTICA. Для построения графика соответствия набора значений КП вискозиметра критерию нормальности закона распределения (обратная нормальная стандартная функция) в программе STATISTICA-7 открывалась таблица и осуществлялось последовательное применение программных модулей: Data/Statistics/Graphs/2DGraphs/NormalProbabilityPlots.

Для расчета моментов распределения (среднее и СКО) создавалась специальная таблица: Statistics/BasicStatistics/Var/Tables.

Для построения диаграммы с наложенной кривой нормального распределения открывался файл и создавалась таблица с необходимым числом переменных и числом реализаций, затем применялись модули: Statistics/DistributionFitting/VariableVar1, Distribution:Normal и далее GraphsHistogram [15].

На рис. 4 представлены результаты анализа соответствия нормальному закону распределения набора значений КП вискозиметров с диаметрами капилляра 0,97 и 4,15 мм.

На рис. 5 представлены гистограммы проверки соответствия нормальному закону распределения в программе STATISTICA для вискозиметров с диаметрами капилляра 0,97 и 4,15 мм.

Заключение. Исследования, направленные на определение стабильности и вариативности ос-

новной характеристики вискозиметров стеклянных капиллярных эталонных — коэффициента преобразования, проведенные по совокупности данных по вискозиметрам с разными диаметрами измерительного капилляра, показали, что средние значения по выборке отличаются от средних значений по кривым симметричного нормального распределения в пределах 2–4 %. Кроме того, проведенное сравнение статистик нормальному закону распределения с помощью обратной стандартной функции и гистограмм продемонстрировало степень соответствия выборочного распределения теоретическому для представительных выборок (число точек ≈ 100 и более).

Библиографический список

1. Gu H., Tang X., Hong R. Y. [et al.]. Ubbelohde viscometer measurement of water-based Fe_3O_4 magnetic fluid prepared by coprecipitation // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2013. Vol. 348. P. 88–92. DOI: 10.1016/j.jmmm.2013.07.033.
2. Loreface S., Saba F. The Italian primary kinematic viscosity standard: The viscosity scale // *Measurement*. 2017. Vol. 112. P. 1–8. DOI: 10.1016/j.measurement.2017.08.006.
3. Fujita Y., Kurano Y., Fujii K. Evaluation of uncertainty in viscosity measurements by capillary master viscometers // *Metrologia*. 2009. Vol. 46. P. 237–248. DOI: 10.1088/0026-1394/46/3/010.

4. Неклюдова А. А., Сулаберидзе В. Ш. Научно-методические основы метрологического обеспечения современных методов измерений вязкости жидких сред: моногр. Санкт-Петербург: КОСТА, 2023. 232 с. ISBN 978-5-91258-497-8.
5. Kawata M., Kurase K., Nagashima A. [et al.]. Capillary Viscometers, Measurement of the Transport Properties of fluids / ed. by Wakeham W. A., Nagashima A., Sengers J. V. Oxford: Blackwell, 1991. 479 p.
6. Swindells J. F., Hardy R. C., Cottington R. L. Precise Measurements with Bingham viscometers and Cannon master viscometers // Journal of Research of the National Bureau of Standards. 1954. Vol. 52 (3). P. 105–220.
7. Kawata M. Effects of length and exit-end shape of capillary tube on instrumental constants in capillary viscometer // Bulletin of the National Research Laboratory of Metrology. 1965. Vol. 10. P. 1–7.
8. Степанов Л. П. Измерение вязкости жидкостей. Москва: [б. и.], 1966. 43 с.
9. ASTM D446-12. Стандартные спецификации и инструкции по эксплуатации стеклянных капиллярных кинематических вискозиметров. 2017. URL: <https://www.astm.org/standards/d446> (дата обращения: 09.01.2024).
10. Cannon M. R., Manning R. E., Bell J. D. Viscosity Measurement. Kinetic Energy Correction and New Viscometer // Analytical Chemistry. 1960. Vol. 32, no. 3. P. 355–358. DOI: 10.1021/AC60159A015.
11. Неклюдова А. А. Совершенствование метрологического обеспечения измерений вязкости жидких сред в интервале температуры от минус 40 °С до 150 °С: дис. ... канд. тех. наук. Санкт-Петербург, 2019. 179 с.
12. ISO/TR 3666:1998 Viscosity of water. URL: <https://cdn.standards.iteh.ai/samples/28607/3c44fe1006904b7ab70511a4c3be583d/ISO-TR-3666-1998.pdf> (дата обращения: 09.01.2024).
13. ASTM D 2162-06. Standard practice for basic calibration of master viscometers and viscosity oil standards. URL: <https://catalogue.normdocs.ru/?type=card&cid=com.normdocs.astm.card.d2162-06> (дата обращения: 21.11.2023).
14. Неклюдова А. А., Сулаберидзе В. Ш. Анализ показателей метрологической надёжности вискозиметров стеклянных капиллярных эталонных // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Серия «Приборостроение». 2024. № 1 (146). С. 38–56.
15. Куприенко Н. В., Пономарева О. А., Тихонов Д. В. Статистика. Методы анализа распределений. Выборочное наблюдение. 3-е изд. Санкт-Петербург: Изд-во Политехн. ун-та, 2009. 138 с.

СУЛАБЕРИДЗЕ Владимир Шалвович, доктор технических наук, старший научный сотрудник, ведущий научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории госэталонов в области измерений плотности и вязкости жидкости Всероссийского научно-исследовательского института метрологии им. Д. И. Менделеева (ВНИИМ им. Д. И. Менделеева), г. Санкт-Петербург.

SPIN-код: 1481-4297

ResearcherID: AAD 1295-2021

Адрес для переписки: sula_vlad@mail.ru

НЕКЛЮДОВА Анастасия Александровна, кандидат технических наук, заместитель руководителя научно-исследовательской лаборатории государственных эталонов в области измерений плотности и вязкости жидкости, доцент кафедры «Теоретическая и прикладная метрология» ВНИИМ им. Д. И. Менделеева, г. Санкт-Петербург.

SPIN-код: 7595-1830

ResearcherID: O-3887-2018

ORCID: 0009-0005-0472-6962

Адрес для переписки: A.A.Tsurko@vniim.ru

Для цитирования

Сулаберидзе В. Ш., Неклюдова А. А. Анализ стабильности и вариативности метрологической характеристики (коэффициента преобразования) вискозиметров стеклянных капиллярных эталонных // Омский научный вестник. 2024. № 2 (190). С. 126–134. DOI: 10.25206/1813-8225-2024-190-126-134.

Статья поступила в редакцию 21.11.2023 г.

© В. Ш. Сулаберидзе, А. А. Неклюдова

THE ANALYSIS OF STABILITY AND VARIABILITY OF METROLOGICAL CHARACTERISTIC (CONVERSION COEFFICIENT) OF GLASS CAPILLARY REFERENCE VISCOMETERS

The results of determining the stability and variability of the main characteristic of glass capillary reference viscometers — conversion coefficient — by analyzing a set of data on viscometers having different diameters of the measuring capillary are presented. It is shown that the mean values of the sample differ from the mean values of the symmetric normal distribution curves within [2–4] %, as well as the correspondence of statistics to the normal distribution law by means of the inverse standard function and histograms showing the degree of correspondence of the sample distribution to the theoretical one.

Keywords: STATISTICA, glass capillary viscometer, conversion factor, sample, histogram, normal distribution law, mean values.

References

1. Gu H., Tang X., Hong R. Y. [et al.]. Ubbelohde viscometer measurement of water-based Fe_3O_4 magnetic fluid prepared by coprecipitation // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2013. Vol. 348. P. 88–92. DOI: 10.1016/j.jmmm.2013.07.033. (In Engl.).
2. Lorefice S., Saba F. The Italian primary kinematic viscosity standard: The viscosity scale // *Measurement*. 2017. Vol. 112. P. 1–8. DOI: 10.1016/j.measurement.2017.08.006. (In Engl.).
3. Fujita Y., Kurano Y., Fujii K. Evaluation of uncertainty in viscosity measurements by capillary master viscometers // *Metrologia*. 2009. Vol. 46. 237–248. DOI: 10.1088/0026-1394/46/3/010. (In Engl.).
4. Neklyudova A. A., Sulaberidze V. Sh. Nauchno-metodicheskiye osnovy metrologicheskogo obespecheniya sovremennykh metodov izmereniy vyazkosti zhidkikh sred [Scientific and methodological bases of metrological support of modern methods of viscosity measurements of liquid media]. Saint Petersburg, 2023. 232 p. ISBN 978-5-91258-497-8. (In Russ.).
5. Kawata M., Kurase K., Nagashima A. [et al.]. Capillary Viscometers, Measurement of the Transport Properties of fluids / Ed. by Wakeham W. A., Nagashima A., Sengers J. V. Oxford: Blackwell, 1991. 479 p. (In Engl.).
6. Swindells J. F., Hardy R. C., Cottington R. L. Precise Measurements with Bingham viscometers and Cannon master viscometers // *Journal of Research of the National Bureau of Standards*. 1954. Vol. 52 (3). P. 105–220. (In Engl.).
7. Kawata M. Effects of length and exit-end shape of capillary tube on instrumental constants in capillary viscometer // *Bulletin of the National Research Laboratory of Metrology*. 1965. Vol. 10. P. 1–7. (In Engl.).
8. Stepanov L. P. *Izmereniye vyazkosti zhidkostey* [Measuring the viscosity of liquids]. Moscow, 1966. 43 p. (In Russ.).
9. ASTM D446-12. Standartnyye spetsifikatsii i instruksii po ekspluatatsii steklyannykh kapillyarnykh kinemacheskikh viskozimetrov [Standard Specification and Operating Instructions for Glass Capillary Kinematic Viscometers]. 2017. URL: <https://www.astm.org/standards/d446> (accessed: 09.01.2024). (In Russ.).
10. Cannon M. R., Manning R. E., Bell J. D. Viscosity Measurement. Kinetic Energy Correction and New Viscometer // *Analytical Chemistry*. 1960. Vol. 32, no. 3. P. 355–358. (In Engl.).
11. Neklyudova A. A. Sovershenstvovaniye metrologicheskogo obespecheniya izmereniy vyazkosti zhidkikh sred v intervale temperature ot minus 40 °C do 150 °C [Improvement of metrological support of viscosity measurements of liquid media in the temperature range from minus 40 °C to 150 °C to 150 °C]. Saint Petersburg, 2019. 179 p. (In Russ.).
12. ISO/TR 3666:1998 Viscosity of water. URL: <https://cdn.standards.iteh.ai/samples/28607/3c44fe1006904b7ab70511a4c3be583d/ISO-TR-3666-1998.pdf> (accessed: 09.01.2024). (In Engl.).
13. ASTM D 2162-06. Standard practice for basic calibration of master viscometers and viscosity oil standards. URL: <https://catalogue.normdocs.ru/?type=card&cid=com.normdocs.astm.card.d2162-06> (accessed: 21.11.2023). (In Engl.).
14. Neklyudova A. A., Sulaberidze V. Sh. Analiz pokazateley metrologicheskoy nadezhnosti viskozimetrov steklyannykh kapillyarnykh etalonnnykh [Metrological dependability indicators analysis of the glass capillary reference viscometers] // *Vestnik MG TU im. N. E. Baumana. Seriya «Priborostroyeniye»*. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Instrument Engineering*. 2024. No. 1 (146). P. 38–56. (In Russ.).
15. Kupriyenko N. V., Ponomareva O. A., Tikhonov D. V. Statistika. Metody analiza raspredeleniy. Vyborochnoye

nablyudeniye. [Statistics. Methods of analyzing distributions. Sample observation]. 3rd ed. Saint Petersburg, 2009. 138 p. (In Russ.).

SULABERIDZE Vladimir Shalvovich, Doctor of Technical Sciences, Senior Researcher, Leading Researcher of the Research Laboratory of State Standards in the Field of Density and Viscosity Measurements of Liquids, The D. I. Mendeleev All-Russian Institute for Metrology (VNIIM), Saint Petersburg.

SPIN-code: 1481-4297

ResearcherID: AAD 1295-2021

Correspondence address: sula_vlad@mail.ru

NEKLYUDOVA Anastasiya Aleksandrovna, Candidate of Technical Sciences, Deputy Head of Research Laboratory of State Standards in the Field of Measurements of Density and Viscosity of Liquids,

Associate Professor of Theoretical and Applied Metrology Department, VNIIM, Saint Petersburg.

SPIN-code: 7595-1830

ResearcherID: O-3887-2018

ORCID: 0009-0005-0472-6962

Correspondence address: A.A.Tsurko@vniim.ru

For citations

Sulaberidze V. Sh., Neklyudova A. A. The analysis of stability and variability of metrological characteristic (conversion coefficient) of glass capillary reference viscometers // Omsk Scientific Bulletin. 2024. No. 2 (190). P. 126–134. DOI: 10.25206/1813-8225-2024-190-126-134.

Received November 21, 2023.

© V. Sh. Sulaberidze, A. A. Neklyudova