



Разработка Нового Метода И Схема Передача Размера Единиц Кинематической Вязкости С Учётом Неопределённости Измерений

Машарипов Шодлик Машарипович

PhD, доцент кафедры «Метрология, технического регулирования, стандартизация и сертификация» Ташкентского государственного технического университета имени

Ислама Каримова;

E-mail: shodlik29081986@mail.ru

Хайдарова Мухтасар Одилджон кизи

докторант кафедры "Метрология стандартизации и менеджмента качества"

Наманганского инженерно-технологического института, Республика Узбекистан, г.

Наманган

E-mail: haydarovamuhdasar769@gmail.com

Аннотация

В статье предложен новый метод передачи величины единиц кинематической вязкости с учетом неопределенности измерений. Современные методы оценки неопределенности в измерениях кинематической вязкости часто не учитывают все возможные источники погрешностей, что может привести к недостаточной точности результатов. Разработанный метод включает комплексный подход, который позволяет учитывать как случайные, так и систематические ошибки, возникающие при измерениях. В статье представлено математическое описание процесса передачи неопределенности с использованием методов, соответствующих международным стандартам, таким как ISO и GUM. Также рассматриваются алгоритмы, позволяющие повысить точность и надежность измерений кинематической вязкости при переходе между различными единицами измерений. Результаты тестирования и верификации метода подтверждают его эффективность и точность, что может существенно улучшить качество измерений в научных и промышленных приложениях. Уточнены требования к точности калибровки каждого параметра с учётом условий работы вискозиметров.

Актуальность

Разработка нового метода передачи размера единиц кинематической вязкости с учётом неопределённости измерений включает в себя создание подхода для точного и надежного перевода значений кинематической вязкости между различными единицами измерений, при этом учитывая влияние неопределённости, возникающей в процессе экспериментальных измерений. Этот метод должен учитывать все источники погрешности, включая как систематические, так и случайные ошибки, и предоставлять обоснованную оценку неопределённости, которая возникает при передаче величины.

Основная часть

Основные этапы разработки:

Анализ источников неопределенности: Неопределённость измерений кинематической вязкости может возникать из-за погрешностей приборов, условий эксперимента, ошибки в методике измерений и других факторов. На этом этапе важно выявить и классифицировать все возможные источники неопределённости.

Математическое описание передачи неопределённости: Существует несколько методов передачи неопределённости, таких как метод Гаусса или метод



Монте-Карло. Важно разработать математическую модель, которая бы корректно описывала, как неопределённости в исходных величинах (например, в измерениях плотности и динамической вязкости) передаются на конечный результат кинематической вязкости.

Определение точности и надежности единиц измерений: Необходимо разработать систему, которая бы позволяла учитывать точность измерительных приборов, а также проводимую калибровку. Это позволит обеспечить перевод значений кинематической вязкости с учетом возможных погрешностей измерений.

Использование теории измерений и стандартизации: Важно, чтобы разработанный метод соответствовал международным стандартам, таким как ISO и GUM (Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement), что обеспечит универсальность и применимость метода для различных лабораторий и научных учреждений.

Верификация и тестирование метода: После разработки теоретической модели необходимо провести серию экспериментов и тестов для проверки метода передачи неопределенности и его эффективности в различных условиях.

Краткое описание выполненной калибровки:

Калибровка осуществляется путём измерения время истечения с использованием двух эталонных вискозиметров одного и того же класса, выбранных в зависимости от вискозиметра, постоянная капиллярного вискозиметра которого должна быть определена.

Область применения/объект калибровки:

Постоянная капиллярного вискозиметра

Диапазон действия:

0,001 - 100 mm²/s²

Процесс калибровки

Настройка калибровки

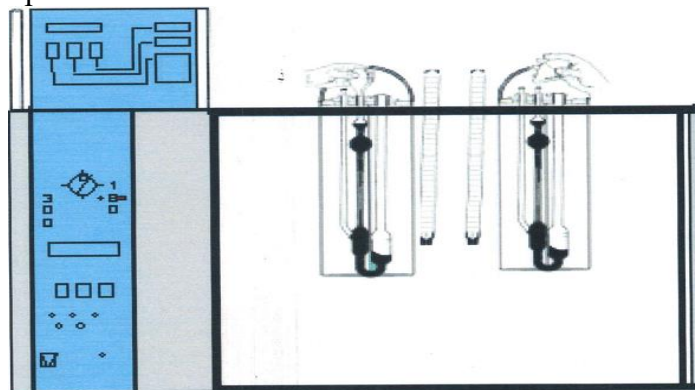


Рисунок 1. Настройка калибровки капиллярного вискозиметра

ИСПОЛЬЗУЕМОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

Наименование устройства	Марка	Тип	Серийный номер	Объяснение (Период и место калибровки)
Ubbelohde Viscometer	Psl-rheotek	0	75525	UKAS Сертификат калибровки (ISO 17025) 02.12.2021 г.
			73942	
		0C	88545	
			75477	
		0B	94534	
			94540	



		1	95031	
			95032	
		1C	92315	
			93086	
		1B	92979	
			92960	
		2	85473	
			91824	
		2C	95628	
			95627	
		2B	90629	
			92297	
		3	95520	
			95522	
		3C	94444	
			94443	
		3B	72258	
			93743	
		4	94428	
			94433	
		4C	74071	
			74067	
		4B	50875	
			70449	
		5	88534	
			88535	

Наименование устройства	Марка	Тип	Серийный номер	Объяснение (Период и место калибровки)
Вискометрическая баня	Tamson	TV7000 LT	19T024	1 год ГУ “УзНИМ”
Стеклянный термометр	TOT IMM AMA	SR5/50C	84785	TÜBİTAK UME
Стеклянный термометр	TOT IMM AMA	GP/105C	83741	TÜBİTAK UME
Термометр милликельвин	Anton Paar	MKT 50	82779658	1 год ГУ “УзНИМ”
Цифровой контактный термометр	Tamson	E20	41B108	1 год ГУ “УзНИМ”
Секундомер	STOPWATCH	ZSD-808	6079	TÜBİTAK UME
Секундомер	Tamson	Timer 8-channel	18TT41	TÜBİTAK UME

Описание процесса калибровки
Определение времени протекания



Установите ванну с регулируемой температурой, которая будет использоваться при калибровке, на температуру, при которой будет осуществляться измерение, затем, чтобы лучше наблюдать отклонение температуры, поместите стеклянных термометра или цифровой контактный термометра в ванну с регулируемой температурой. Установка температуры в термостатной ванне с нестабильностью поддержания установленного значения во время калибровки $\pm 0,02$ °C.

Можно выбрать ньютоновских жидкости в таблице ниже в соответствии с тестовым вискозиметром.

Группа номера	Стандарт жидкости	Время потока, s
0	0	между 350 - 450
	1	между 600 - 800
	2	между 1000 - 1500
между OC-1A	0	между 180 - 250
	1	между 400 - 600
	2	между 800 - 1200
между II-V	1	между 300 - 500
	2	между 700 - 1200

Можно выбрать эталонный вискозиметров **ubbelohde** в соответствии с тестовым вискозиметром. Вы должны использовать два вискозиметра, которые имеют одинаковые размеры. После определения класса вискозиметра время истечения следует определить с помощью жидкостей, взятых из приведенной выше таблицы, с помощью тестового и эталонного вискозиметров.

1. Поместите вискозиметров на соответствующие держатели, которые могут быть предоставлены производителями.

2. Испытываемую жидкость следует заливать в вискозиметры до точки между масштабированными линиями. (MF).

3. Вискозиметры, заполненные исследуемыми жидкостями, следует поместить в ванну, как показано на рисунке 1. Прежде чем поместить его, проверьте, гладкая ли поверхность, используя водный баня (спиртовой уровень). После установки убедитесь, что высота воды в ванне составляет примерно 20 mm над верхней жидкостью вискозиметра.

4. Убедитесь, что вискозиметры, помещенные в баню, не соприкасаются друг с другом во время измерения. Для этой цели также обеспечьте вертикальность.

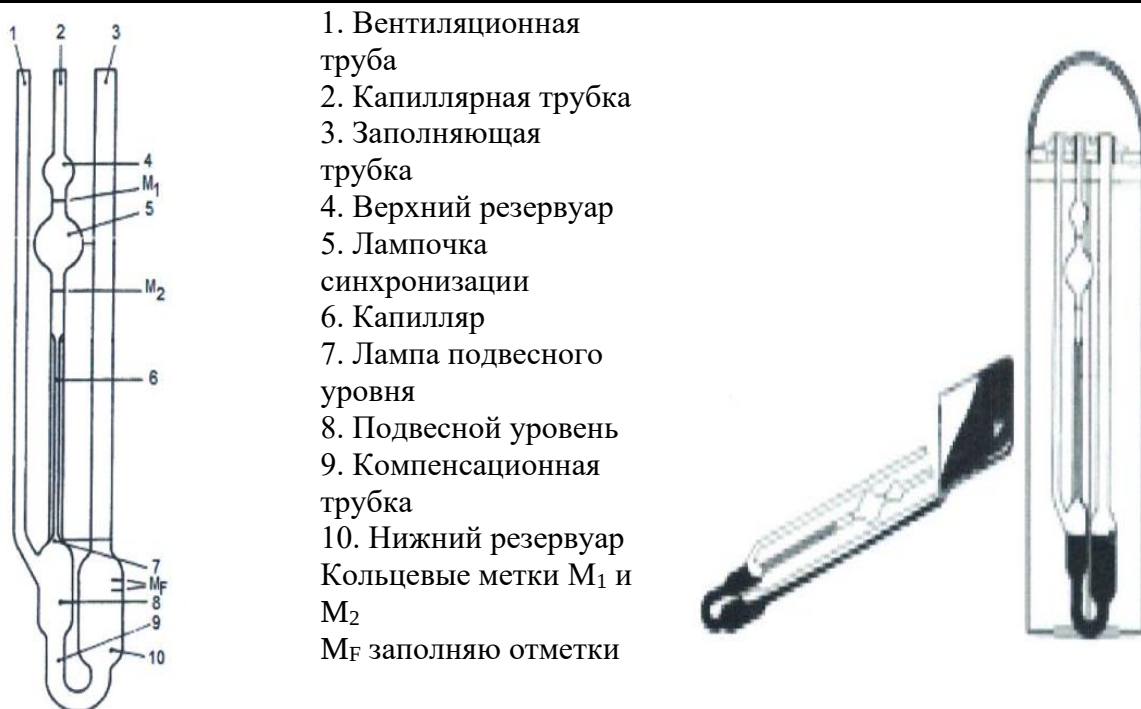


Рисунок 2. Вискозиметр Ubbelohde

5. Закройте воздуховод вискозиметра с помощью устройства (заглушки), обозначенного 1 на рисунке выше.

6. Пропылесосьте жидкость в капиллярной трубке (обозначенной 2 на рисунке 2) вискозиметра сверху, либо с помощью абсорбера, либо с помощью устройства, и поднимите ее примерно до верхнего уровня верхней жидкой посуды (обозначено 4). Выполняйте эту операцию очень медленно, чтобы избежать образования пузырьков воздуха в жидкости. Когда вакуумная операция закончится, закройте трубу сверху с помощью устройства (заглушки).

7. Откройте воздуховод вискозиметра (сверху) и подождите, пока жидкость не опустится на дно уровня погружения, отмеченного 8 на рисунке 2 (~5 минут).

8. Снова откройте капиллярную трубку (обозначенную 2 на рисунке 2) вискозиметра и наблюдайте за движением жидкости в капиллярной трубке вниз и запустите секундомера, когда он достигнет линии, отмеченной M_1 . Остановите секундомера, когда жидкость достигнет линии, отмеченной M_2 .

9. Сохраните значение, указанное на секундомера, в протоколе и повторите вышеупомянутые процессы для двух вискозиметров (6, 7, 8, 9) и сохраните 5 значений расхода. Если время потока превышает 400 s, вы можете выполнить три измерения. Вы можете опустить первое измеренное время потока и выполнить ещё одно измерение.

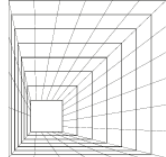
Формулы и расчёты, необходимые для определения кинематической вязкости и постоянной вискозиметра Ubbelohde.

Выполните следующие процессы для расчета кинематической вязкости.

1. Определите среднее время потока для каждого вискозиметра.

$$t = \frac{1}{n} \sum t_1$$

2. Найдите относительную разницу между самым длинным и самым коротким время истечения каждого вискозиметра.



$$\varepsilon_t = \frac{t_{\max} - t_{\min}}{t}$$

3. ε_t проверьте уравнение t для обоих двух вискозиметров. Если равенства нет, повторите измерение.

$$\varepsilon_v \leq \begin{cases} \text{для } 1 \cdot 10^{-3} v \leq 1000 \text{ mm}^2 / \text{s} \\ \text{для } 2 \cdot 10^{-3} v > 1000 \text{ mm}^2 / \text{s} \end{cases}$$

4. Значения кинематической вязкости стандартных жидкостей могут быть определены с помощью эталонных вискозиметров. Значения K_0 , K_1 , K_2 рассчитываются по приведенной ниже формуле с использованием среднего значения время истечения (для каждой измеренной нами жидкости).

$$K_0 = \frac{v_0}{t_0}; \quad K_1 = \frac{v_1}{t_1}; \quad K_2 = \frac{v_2}{t_2};$$

5. Приведённые константы вискозиметра можно использовать в приведённом ниже выражении и проверить, имеет ли уравнение равенство, в противном случае измерение следует повторить измерение с использованием жидкостей для K_1 и K_2 .

$$\frac{|K_1 - K_2|}{t_0} \leq U'_v$$

U'_v если относительное неопределённость значений вязкости v_1 и v_2 различна, то среднее значение этих значений должно быть взято и записано вместо U'_v .

6. Если калиброванный вискозиметр находится в диапазоне от 0 до 1а, мы должны посмотреть, предусмотрены ли требования ниже.

$$\frac{|K_0 - K_2|}{K_2} \geq 1.5 \cdot \frac{|K_1 - K_2|}{K_2}; \quad \frac{|K_0 - K_1|}{K_1} \geq 1.5 \cdot \frac{|K_1 - K_2|}{K_2}$$

7. Если требования выполнены, поправка на кинетическую энергию должна быть рассчитана с использованием приведенной ниже формулы.

$$H = K_2 \cdot t_0^3 - v_0 \cdot t_0^2;$$

* Если значение H положительное, мы должны найти скорректированное время потока, используя приведенную ниже формулу, и значение K_1 снова вычисляется с использованием скорректированного времени потока.

$$t_{1\text{kor}} = t_1 \cdot \Delta t_H = t_1 - \frac{H}{v_1 \cdot t_1}$$

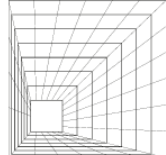
В результате постоянная тестового вискозиметра рассчитывается по приведенной ниже формуле.

$$K = \frac{|K_1 + K_2|}{2}$$

Функция модели

$$S_k = S_{KN} \cdot (\delta S_{Ti} + \delta S_t + \delta S_{incl} + \delta S_{\vartheta v})$$

S_v	Значение кинематической вязкости калибровочной жидкости
S_k	Постоянной значение эталонного вискозиметра



δS_{Timer}	Влияние хронометра, используемого при измерении
δS_t	Влияния время истечения
δS_{incl}	Эффект наклона
δS_{g_v}	Влияние изменений температуры на измерение

Компоненты неопределённости

а) Постоянная вискозиметра, S'_{KN}

Объяснения неопределённости, связанные с эталонным вискозиметром,

$$(S'_{KN})^2 = \frac{1}{4}(U'_{KN})^2$$

U'_{KN} Неопределённость калибровки эталонного вискозиметра Ubbelohde была откалибрована вискозиметром лаборатории вязкости UKAS, где коэффициент охвата (объем) $k=2$ и уровень надёжности составляет 95%.

б) Устройство синхронизации, S'_{Ti}

В общем, если мы будем использовать два вискозиметра, мы будем использовать два секундомера. Минимальный диапазон показаний хронометров должен составлять $<0,01$ s. Время хранения не должно превышать $2 \cdot 10^{-4}$, что является относительной неопределённостью. Затем,

$$(S'_{Ti})^2 = \frac{1}{3}(U_h)^2 = \frac{1}{3}(2 \cdot 10^{-4})^2 = 1.3 \cdot 10^{-8} \quad (S'_{Ti})^2 = \frac{1}{3}(U_h)^2 = \frac{1}{3}(2 \cdot 10^{-4})^2 = 1.3 \cdot 10^{-8}$$

с) Измерение температуры S'_{g_v}

При определении вязкости влияние температуры на неопределённость определяется следующим образом:

$$S'^2_{g_v} = (S'_g \cdot U'_v)^2$$

$$(S'_{g_v})^2 = \frac{1}{3}(\Delta T)^2$$

ΔT : Максимальный температурный дрейф (температурный дрейф от 20 °C из-за температурного дрейфа (10 mK) с неопределённостью используемых термометров + температурный градиент измерительной ванны (20 mK).

ΔT : 30 mK

U'_v : Постоянная температуры кинематической вязкости исследуемой жидкости

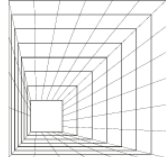
$$U'_v \leq 0.1K^2$$

$$S'^2_{g,v} = \frac{1}{3}(S'_g \cdot U'_v)^2 = \frac{1}{3}(0,03 \cdot 0,1)^2 = 3 \cdot 10^{-9}$$

д) Ошибка наклона, S'_{incl}

Когда вы помещаете вискозиметр вместе с его устройством в ванну с регулируемой температурой, убедитесь, что верхняя часть устройства расположена горизонтально по отношению к ванне, а горизонтальный дрейф не превышает 2°. Кроме того, смещение оси капилляра вискозиметра, прикрепленного к устройству вискозиметра путём подвешивания вниз, не должно превышать 2° по вертикали по сравнению с горизонтальным положением верхней части устройства если эти условия будут обеспечены,

$$C' = C \cdot \frac{\cos \theta}{\cos \theta_0}; \quad \theta = 2^\circ, \quad \theta_0 = 0$$



$$S_{incl}'^2 = \frac{1}{3} \left(\frac{C - C'}{C} \right)^2 = \frac{1}{3} \left(\frac{\cos \theta'}{\cos \theta_0} \right)^2 = \frac{1}{3} (0,06 \cdot 10^{-2})^2 = 1,2 \cdot 10^{-7}$$

е) Время потока, $S_t'^2$

Определите среднее время потока для каждого вискозиметра.

$$t = \frac{1}{n} \sum t_i$$

Найдите относительную разницу между самым длинным и самым коротким временем потока каждого вискозиметра.

$$\varepsilon_t = \frac{t_{\max} - t_{\min}}{t}$$

Используя эти данные, найдите значение, $S_t'^2$ в следующей таблице.

n	ε_t	F_2	$S_t'^2 = \frac{(\varepsilon_t \cdot F_2)}{n}$
3	$1 \cdot 10^{-3}$	0,591	$11,6 \cdot 10^{-8}$
3	$2 \cdot 10^{-3}$	0,591	$46,7 \cdot 10^{-8}$
4	$1 \cdot 10^{-3}$	0,486	$5,9 \cdot 10^{-8}$
4	$2 \cdot 10^{-3}$	0,486	$23,6 \cdot 10^{-8}$
5	$1 \cdot 10^{-3}$	0,430	$3,7 \cdot 10^{-8}$
5	$2 \cdot 10^{-3}$	0,430	$14,9 \cdot 10^{-8}$

Общая относительная неопределённость вычисляется по формуле:

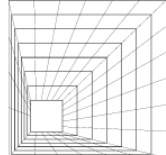
$$S_K'^2 = (S_{KN})^2 + \frac{3}{2} [(S_{gv}')^2 + (S_{Ti}')^2 + (S_{incl}')^2] + \frac{3}{4} (S_t')^2$$

$U_K' = k \cdot S_K'$ $k=2$ коэффициент охвата (охвата) и уровень надёжности составляет 95%

Таблица бюджета неопределённости формируется на основании экспериментальных данных.

СПИСОК НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЕЙ (ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ), ОБОЗНАЧАЮЩИЙ ДИАПАЗОН КАЛИБРОВКИ

Измерение количество и калиброванные устройства	Интервал калибровки	Наилучшая измерительная способность (Расширенная неопределённость $k=2$)	Описание
Капиллярные вискозиметры	0.001 - 0.01 mm ² /s ²	±0.15 %	с вискозиметром Ubbelohde
	0.01 - 0.05 mm ² /s ²	±0.19 %	с вискозиметром Ubbelohde
	0.05 - 3 mm ² /s ²	±0.27 %	с вискозиметром Ubbelohde
	3 - 30 mm ² /s ²	±0.34 %	с вискозиметром Ubbelohde
	30 - 100 mm ² /s ²	±0.46 %	с вискозиметром Ubbelohde



Закключение:

1. Результаты калибровки оформляются сертификатом о калибровке, установленной по форме Приложения D O'z DSt 8.029:2014

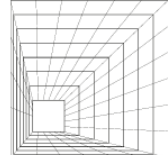
2. Вискозиметры, не удовлетворённые требованиям настоящей методики, к эксплуатации не допускаются, а сертификат о предыдущей калибровке аннулируется.

3. Анализ современных измерительных приборов и стандартных образцов, образцовых измерительных приборов вязкости жидких сред показал, что в настоящее время государственной системе обеспечения единства измерений существует острая потребность в разработки средств измерений высокой точности для воспроизведения, хранения и передачи размера кинематической вязкости. Разработанная нормативно-методическая основа для обеспечения метрологической прослеживаемости результатов измерений устранил технические барьеры в области метрологии.

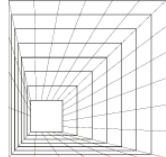
Разработка метода передачи единиц кинематической вязкости с учётом неопределённости измерений играет ключевую роль в обеспечении точности и надёжности физических измерений в этой области. Новый метод будет способствовать улучшению качества измерений и обеспечит более точные и обоснованные данные для научных исследований и промышленности.

Список цитируемой литературы:

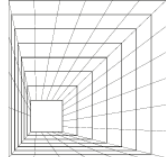
1. GUM, ISO2. Basim 1995 Руководство по выражению неопределённости в измерении
2. EA 4/02 (EA, 1999) Выражение неопределённости измерения при калибровке
3. ISO/TR 3666:1998 Вязкость воды
4. FRM-05-G2V1-04-03 Форма калибровки капиллярных вискозиметров.
5. ГОСТ 33-2000 (ИСО 3104-94) Нефтепродукты. Прозрачные и непрозрачные жидкости. Определение кинематической вязкости и расчёт динамической вязкости.
6. DIN 53017:1993 Определение температурного коэффициента вязкости жидкостей.
7. DIN 53012.2003 Капиллярная вискозиметрия ньютоновских жидкостей - Источники ошибок и исправлений.
8. ASTM D445-06 Стандартный метод определения кинематической вязкости прозрачных и непрозрачных жидкостей (и расчёт динамической вязкости) 1
9. ASTM D2162 - 17 Стандартные методы базовой калибровки эталонных вискозиметров и стандартов вязкости масла
10. O'z DSt 8.029:2017 Государственный стандарт республики Узбекистан. Система обеспечения единства измерений Республики Узбекистан Калибровка средств измерений. Основные положения.
11. PTB-Bericht ThEx-22 EUROMET.M.V-K3 key intercomparison of liquid viscosity measurements
12. ASTM D2162 - 17 Standard Practices for Basic Calibration of Master Viscometers and Viscosity Oil Standards
13. COOMET.M.V-S2 (587/Ru-a/12) COOMET supplementary comparison in the field of measurements of liquids kinematic viscosity.
14. Miraliyeva, A.K., Rashidov, A.S., Ernazarova, Z.X., Masharipov, Sh.M., Mirpayziyeva, G.M. Experimental quantification of measurement uncertainty and other verification criteria for analytical test methods. Journal of Physics: Conference Series. , 2021, 2094(5), 052031 <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/2094/5/052031/pdf>.



15. Masharipov, Sh.M., Ruzmatov, K.R., Rahmatullayev, S.A., ...Mahmudjonov, M.M., Isaqov, A.G. Assessment and investigation of measurement uncertainty of standard samples of substances and materials in physicochemical measurements based on standard test methods. *Journal of Physics: Conference Series* this link is disabled, 2021, 2094(5), 052011. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/2094/5/052011/pdf>
16. Masharipov, S.M., Azimov, R.K. Multifunctional Information and Measuring Complex for Controlling the Parameters of Fibrous Materials and Dispersed Media Measurement Techniques this link is disabled, 2017, 60(6), стр. 643–646. <https://www.springerprofessional.de/en/multifunctional-information-and-measuring-complex-for-controllin/15100128>
17. Matyakubova P.M, Masharipov SH.M., Ruzmatov K.R, Sultanov M.K.. Published under licence by IOP Publishing Ltd. Methods for monitoring metrological characteristics of scientific and physical parameters of intelligent sensors in real operating conditions. *Journal of Physics: Conference Series*, Volume 1889, Cybernetics, economics and information measuring systems. Citation Parahat M Matyakubova et al 2021 J. Phys.: Conf. Ser. 1889 032037.
18. Masharipov, Sh.M., Ruzmatov, K.R., Rahmatullayev, S.A., ...Mahmudjonov, M.M., Isaqov, A.G. Assessment and investigation of measurement uncertainty of standard samples of substances and materials in physicochemical measurements based on standard test methods. *Journal of Physics: Conference Series* this link is disabled, 2021, 2094(5), 052011
19. Sh. M. Masharipov, K. R. Ruzmatov, B. X. Ametova, N. A. Djumaniyazova, and Z. S. Kenjayeva . Verification of food testing methods in the operations of accredited testing laboratories according to ISO/IEC 17025:2017 // *AIP Conference Proceedings* 2647, 070006 (2022)
20. SH.M.Masharipov. Software for measurement uncertainty assessment and actual metrological characteristics of viscometers // Published under licence by IOP Publishing Ltd *Journal of Physics: Conference Series*, Volume 2373, Cybernetics, Computational Science and Information Measuring, Ser. 2373 052001, DOI 10.1088/1742-6596/2373/5/052001.
21. Xaydarova, M., Masharipov, S. Processing the results of joint measurements when measuring physical and chemical values, *AIP Conference Proceedings.*, 2024, 3045(1), 040035.
22. Masharipov, S., Qudratov, J. Experimental study of accuracy, precision, stability and uncertainty of physical and chemical quantities using certified reference materials, *AIP Conference Proceedings.*, 2024, 3045(1), 030072
23. Atamirzayev, N., Masharipov, S. Processing of several groups of direct measurements with multiple observations, *AIP Conference Proceedings.*, 2024, 3045(1), 04004.
24. Erkaboyev, A., Masharipov, S. Risk management and monitoring in accredited analytical testing laboratories, *AIP Conference Proceedings.*, 2024, 3045(1), 030077.
25. Masharipov, S.M., Mavlyanov, M.A., Abdumajidov, I.B. Metrological Requirements of International Standard ISO/IEC 17025:2017 and Experimental Study Questions on Metrological Traceability of Measurement Results, *AIP Conference Proceedings.*, 2024, 2969(1), 060043.



26. Masharipov, S.M., Rakhmatullaev, S.A. Kinematic viscosity of liquid media and providing metrological observability of experimental results, *E3S Web of Conferences.*, 2023, 390, 01006.
27. Axmedov, G., Masharipov, S. Development of metrological support for measurement of physico-chemical quantities. *E3S Web of Conferences*, 2024, 538, 03027.
28. Raxmonov, A., Masharipov, S., Rakhmatullaev, S., Miraliyeva, A. Metrological reliability of primary transducers taking into account element stability and accuracy. *E3S Web of Conferences*, 2024, 548, 08001
29. **BIPM. (2008).** "The International System of Units (SI)". Bureau International des Poids et Mesures.
30. **ISO/IEC Guide 98-3:2008.** "Uncertainty of Measurement – Part 3: Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (GUM)".
31. **Koch, M., Hohenberg, P. (1999).** "Uncertainty analysis for viscosity measurements". *Journal of Chemical Physics*, 110(18), 8873-8881.
32. **JCGM 100:2008.** "Evaluation of measurement data – Guide to the expression of uncertainty in measurement". Joint Committee for Guides in Metrology.
33. **Taylor, B. N., Kuyatt, C. E. (1994).** "Guidelines for Evaluating and Expressing the Uncertainty of NIST Measurement Results". *NIST Technical Note*, 1297.
34. **Van den Ende, J., Moore, L. (2002).** "Measurement uncertainty in fluid dynamics". *Journal of Fluid Mechanics*, 470, 127-153.
35. **Massey, B. S., Ward-Smith, A. J. (2006).** "Mechanics of Fluids". 8th edition, CRC Press.
36. **López, M. I., Cruz, E. (2010).** "Uncertainty propagation in fluid mechanics experiments". *International Journal of Fluid Mechanics*, 22(4), 423-430.
37. **Sack, R. A., Clemens, W. (1999).** "Measuring Viscosity: The Impact of Uncertainty on Rheology". *Springer Handbook of Rheology*.
38. **NIST. (2015).** "Measurement Science for Viscosity". *National Institute of Standards and Technology*.
39. **Cox, M. G. (2002).** "The role of measurement uncertainty in the modern science of viscosity". *Journal of Applied Chemistry*, 52(7), 435-439.
40. **Parker, L., Lowe, C. (2009).** "Uncertainty analysis in dynamic viscosity measurement". *Measurement Science and Technology*, 20(5), 055203.
41. **Harris, D. C. (2010).** "Quantitative Chemical Analysis". 8th edition, W.H. Freeman and Company.
42. **Knauss, W. G., Wong, F. M. (2007).** "Viscosity Measurement and Uncertainty Quantification". *Journal of Rheology*, 51(1), 45-56.
43. **Baird, D. G. (2010).** "Viscosity Measurement in Industrial Applications". *Journal of Industrial Rheology*, 24(3), 789-794.
44. **Norton, M. R., Sayers, P. L. (1995).** "The Influence of Temperature on the Viscosity of Fluids". *Fluid Dynamics Journal*, 33(4), 198-204.
45. **ISO 3105:2006.** "Liquid-in-glass thermometers for measuring kinematic viscosity". International Organization for Standardization.



-
46. **Torre, L., Letestu, S. (2008).** "Viscosity and its uncertainty in chemical engineering processes". *Chemical Engineering Science*, 63(3), 412-419.
 47. **Schneider, H. (2003).** "Uncertainty propagation in the measurement of viscosity". *Journal of Metrology*, 25(1), 94-105.
 48. **Hensel, M., Pollock, D. (2000).** "Estimation of Viscosity Uncertainty in Flow Measurements". *Proceedings of the International Conference on Fluid Measurement*
 49. **Lawson, J., Stewart, J. (2007).** "Analysis of uncertainty in kinematic viscosity measurement using rotational viscometers". *Measurement and Control*, 39(2), 80-84.
 50. **ISO 17025:2017.** "General Requirements for the Competence of Testing and Calibration Laboratories". International Organization for Standardization.
 51. **Perry, R. H., Green, D. W. (2008).** "Perry's Chemical Engineers' Handbook". 8th edition, McGraw-Hill Education.
 52. **Schmidt, J., Thorsen, T. (2015).** "Fluid Viscosity Measurement Techniques in Research and Industry". *Journal of Applied Fluid Mechanics*, 8(3), 123-129.
 53. **ISO 80000-6:2009.** "Quantities and Units – Part 6: Physical Chemistry and Molecular Physics". International Organization for Standardization.