

DOI: 10.21122/2220-9506-2024-15-4-334-341

Стабилизация температурных условий при определении плотности жидкости методом гидростатического взвешивания

Н.В. Баковец, К.В. Козадаев

Белорусский государственный университет,
пр-т Независимости, 4, г. Минск 220030, Беларусь

Поступила 07.08.2024

Принята к печати 19.11.2024

При оценке качества продукции, особенно нефти и нефтепродуктов, наряду с другими параметрами широко используется значение плотности. Данные о плотности являются основополагающими для исследования свойств жидкостей, их идентификации и определения степени чистоты. Они также необходимы для косвенной оценки с определённой степенью точности некоторых других свойств жидкости, таких как удельный вес, тепловое расширение или сжатие, масса известного объёма жидкости и т. д. В свою очередь, от точности определения плотности зависит правильность принимаемого решения при технологическом контроле качества выпускаемой продукции. Определение плотности жидкости с высокой точностью требует поддержания стабильных температурных условий в процессе измерений. Цель работы – установить влияние стабильности температурного режима на воспроизведение и передачу единицы плотности жидкости. Для стабилизации температуры предложено техническое решение, реализованное в виде климатической камеры, внутрь которой помещено эталонное оборудование. Проведено исследование температурных условий в технологической камере. Установлено, что благодаря использованным техническим решениям влияние условий окружающей среды на изменение температуры исследуемой жидкости является величиной пренебрежимо малой.

Ключевые слова: плотность жидкости, температура окружающей среды, стабильность температурных условий

Адрес для переписки:

Баковец Н.В.
Белорусский государственный университет,
пр-т Независимости, 4, г. Минск 220030, Беларусь
e-mail: bakavetsnv@bsu.by

Address for correspondence:

Bakovets N.V.
Belarusian State University,
Nezavisimosty Ave., 4, Minsk 220030, Belarus
e-mail: bakavetsnv@bsu.by

Для цитирования:

Н.В. Баковец, К.В. Козадаев.
Стабилизация температурных условий при определении плотности жидкости методом гидростатического взвешивания. Приборы и методы измерений. 2024. Т. 15. № 4. С. 334–341.
DOI: 10.21122/2220-9506-2024-15-4-334-341

For citation:

Bakovets NV, Kozadayev KV.
Stabilization of Environmental Conditions when Liquid Density Measuring by Hydrostatic Weighting. Devices and Methods of Measurements. 2024;15(4):334–341. (In Russ.).
DOI: 10.21122/2220-9506-2024-15-4-334-341

DOI: 10.21122/2220-9506-2024-15-4-334-341

Stabilization of Environmental Conditions when Liquid Density Measuring by Hydrostatic Weighting

N.V. Bakovets, K.V. Kozadayev

Belarusian State University,
Nezavisimosty Ave., 4, Minsk 220030, Belarus

Received 07.08.2024

Accepted for publication 19.11.2024

Abstract

When assessing the quality of products, especially oil and oil products, the density value is widely used along with other parameters. Density data are fundamental for studying the properties of liquids, their identification and determining the degree of purity. They are also necessary for indirectly assessing with a certain degree of accuracy some other properties of the liquid, such as specific gravity, thermal expansion or contraction, the mass of a known volume of liquid, etc. In turn, the accuracy of the density determination determines the correctness of the decision made in the technological quality control of the manufactured products. Determining the density of a liquid with high accuracy requires maintaining stable temperature conditions during the measurement process. The purpose of the work was to establish the effect of temperature stability on the reproduction and transmission of the unit of liquid density. To stabilize the temperature, a technical solution is proposed, implemented in the form of a climatic chamber, inside which reference equipment is placed. A study of the temperature conditions in the process chamber was carried out. It was found that due to the technical solutions used, the influence of environmental conditions on the change in the temperature of the liquid under study is a negligible value.

Keywords: liquid density, ambient temperature, stability of temperature conditions

Адрес для переписки:

Баковец Н.В.
Белорусский государственный университет,
пр-т Независимости, 4, г. Минск 220030, Беларусь
e-mail: bakavetsnv@bsu.by

Address for correspondence:

Bakovets N.V.
Belarusian State University,
Nezavisimosty Ave., 4, Minsk 220030, Belarus
e-mail: bakavetsnv@bsu.by

Для цитирования:

Н.В. Баковец, К.В. Козадаев.
Стабилизация температурных условий при определении
плотности жидкости методом гидростатического взвешивания.
Приборы и методы измерений.
2024. Т. 15. № 4. С. 334–341.
DOI: 10.21122/2220-9506-2024-15-4-334-341

For citation:

Bakovets NV, Kozadayev KV.
Stabilization of Environmental Conditions when Liquid Density
Measuring by Hydrostatic Weighting.
Devices and Methods of Measurements.
2024;15(4):334–341. (In Russ.).
DOI: 10.21122/2220-9506-2024-15-4-334-341

Введение

При определении плотности жидкости существенное влияние на результат измерений оказывает зависимость измеряемого значения плотности от температуры. Температурные флуктуации зачастую приводят не только к увеличению неопределённости измерения, но и к искажению результата в целом. Так, расширение или сжатие жидкости вызывают изменение плотности исследуемого образца, что может привести к неверной классификации исследуемой жидкости. Возможным решением данной проблемы для различных жидкостей может служить определение поправок к их плотности при изменяющихся температурах, однако это многократно увеличивает объём предварительных измерений для каждого типа жидкости [1].

Известен ряд канонических методов определения плотности жидкости. Наиболее распространёнными из них являются ареометрический метод [2], метод гидростатического взвешивания [3], пикнометрический метод [4]. Их существенные достоинства – простота реализации и высокая точность, что даёт возможность реализации одного из этих методов в качестве эталонного. Различие между двумя последними заключается в том, что при использовании пикнометрического метода плотность жидкости определяется в сосуде с постоянным объёмом, а при гидростатическом взвешивании используется эталонная мера с постоянной массой.

При создании Национального эталона единицы плотности жидкости в соответствии с заданием 2.14: «Разработать и создать национальный эталон единицы плотности жидкости» научно-технической подпрограммы «Эталон Беларуси» ГНТП «Разработка и изготовление эталонов Беларуси, уникальных приборов и установок для научных исследований («Эталон и научные приборы») в РУП «Белорусский государственный институт метрологии» с 2018 по 2020 гг. для реализации точного воспроизведения и передачи единицы плотности жидкости был выбран метод гидростатического взвешивания [5]. При измерении плотности жидкости проводят взвешивание в ней тела, масса и объём которого известны.

Для обеспечения постоянства массовых и объёмных характеристик тел, с помощью которых производится определение плотности жидкости, необходимо создать такие условия окружающей среды, при которых влияние температурных флуктуаций на результат измерений будет пренебрежимо мало. В настоящей работе проведены исследования создания и поддержания температурных условий, при которых неопределённость измерения плотности исследуемой жидкости не будет зависеть от влияния температурных флуктуаций [6].

В рамках предложенной математической модели воспроизведения единицы плотности жидкости плотность исследуемой жидкости определяют по формуле [7]:

$$\rho_{ж} = \frac{(C_a m_{ra} + \Delta m_{wa} - C_{al} m_{rl} - \Delta m_{wl}) \cdot \rho_l + \rho_a \cdot (C_a m_{rl} + \Delta m_{wl})}{(C_a m_{ra} + \Delta m_{wa})(1 + \beta_{сферы}(t_{ПЖ} - t_{ак}))},$$

где C_a – поправка на действие выталкивающей силы воздуха (плотности воздуха) во время цикла взвешивания сферы в воздухе; m_{ra} – масса сферы, кг; Δm_{wa} – разность масс взвешивания сферы в воздухе, кг; C_{al} – поправка на действие выталкивающей силы воздуха (плотности воздуха) во время цикла взвешивания сферы в жидкости; m_{rl} – масса противовеса, кг; Δm_{wl} – разность масс взвешивания сферы в жидкости, кг; ρ_l – плотность сферы, кг/м³; ρ_a – плотность воздуха, кг/м³; $\beta_{сферы}$ – коэффициент объёмного расширения сферы, К⁻¹; $t_{ПЖ}$ – текущая температура жидкости, плотность которой определяют, °C; $t_{ак}$ – температура аттестации жидкости, равная 20 °C.

Конструктивно-технические решения

Для эталонных измерений рядом нормативных актов установлены условия, при которых определяются значения плотностей жидкостей, в том числе и для изготовления и аттестации Государственных стандартных образцов (ГСО) плотности жидкости и эталонных растворов плотности (РЭП) [8].

В данной работе мерой для воспроизведения и хранения единицы плотности жидкости методом гидростатического взвешивания выбрана прецизионная сфера кремниевая (далее – сфера), производства фирмы «Hafner», Германия. Сфера изготовлена из высокочистого кремния массой 1 кг.

Исследуемая жидкость помещалась в термостат со стабильностью поддержания температуры термостатирующей жидкости не хуже $\pm 0,01$ °С. При проведении измерений массы сферы в воздушной среде и затем при погружении сферы в исследуемую жидкость не должно происходить изменение температуры жидкости, для чего сфера должна быть термостабилизирована в воздушной среде

при температуре воздуха 20 °С [9]. Для реализации этих требований предложено техническое решение в виде климатической камеры большого объёма (далее – камера) с высокой точностью установления и поддержания внешних условий. Внешний вид климатической камеры показан на рисунке 1, а технические характеристики её работы изложены в таблице 1.



a



b

Рисунок 1 – климатическая камера: a – внешний вид; b – размещение эталонного оборудования внутри камеры
Figure 1 – climatic chamber: a – appearance; b – placement of reference equipment inside the chamber

Таблица 1 / Table 1

Технические характеристики климатической камеры

Technical characteristics of the climatic chamber

Температурный диапазон / Temperature range	от плюс 10 °С до плюс 50 °С / from plus 10 °С to plus 50 °С
Диапазон влажности / Humidity range	от 40 % до 70 % относительной влажности / from 40% to 70% relative humidity
Стабильность поддержания температуры / Temperature stability	от ± 0.1 °С до ± 0.3 °С (без нагрузки) / from ± 0.1 °С to ± 0.3 °С (without load)
Точность установления температуры / Temperature setting accuracy	± 0.1 °С
Точность установления влажности / Humidity setting accuracy	± 0.1 % относительной влажности / ± 0.1 % relative humidity
Время непрерывной работы / Continuous operation time	10 ч / 10 h

Эталонная установка была помещена внутрь камеры, где поддерживались заданные условия окружающей среды: относительная влажность воздуха 50 % и температура воздуха окружающей среды 20 °С.

Поскольку при определении плотности жидкости необходимо поддерживать и контролировать даже несущественные изменения температуры окружающего воздуха и термостатируемой жидкости, были проведены исследования стабильности поддержания параметров окружающей среды внутри климатической камеры в автоматическом режиме.

Для измерения температуры вблизи составных частей эталонной установки использовались преобразователи температуры измерительные JUMO серии 707030 [10] (классификация по СТБ EN 60751: Pt100, погрешность измерения 0,1 °С) (далее – преобразователь) и термо-гигрометры Testo 608 [11] (погрешность измерения температуры 0,6 °С, погрешность измерения относительной влажности 3 %).

Предложена следующая схема измерений. Преобразователи и термогигрометры располагались в наиболее важных точках камеры с установленным оборудованием – возле передней и задней стенок компаратора, на фронтальной и боковой стенках термостата, на поверхности подъёмника (рисунок 2). Места расположения измерительных приборов выбраны таким образом, чтобы контролировать изменение температуры на границах различных сред: воздух–жидкость, гранит–жидкость, гранит–воздух. При установке измерительных приборов принимались соответствующие меры предосторожности, чтобы исключить попадание органических частиц на чувствительные элементы приборов и поверхности, на которых будут производиться измерения.

Сфера помещалась на подвес компаратора и погружалась в жидкость. При этом соблюдались следующие меры предосторожности работы со сферой:

– со сферой необходимо работать и хранить её таким образом, чтобы она всегда оставалась чистой;

– сфера перед проведением любого измерения должна быть очищена от пыли и других инородных частиц;

– после очистки сферы необходимо осуществить ее просушку;

– работать со сферой только в перчатках из нейлона.

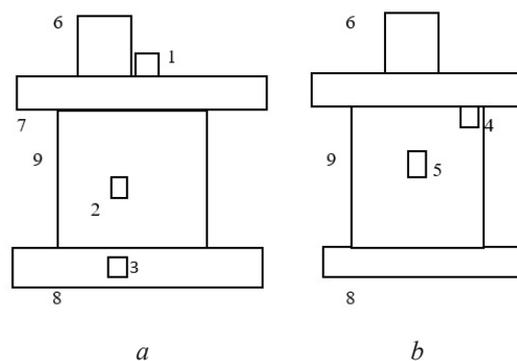


Рисунок 2 – Схема размещения преобразователей температуры и термогигрометров: *a* – вид спереди; *b* – вид сбоку; 1–5 – преобразователи температуры и термогигрометры; 6 – компаратор; 7 – гранитная плита; 8 – поддон; 9 – термостат

Figure 2 – Layout diagram of temperature converters and thermohygrometers: *a* – front view; *b* – side view; 1–5 – temperature converters and thermohygrometers; 6 – granite slab; 7 – tray; 8 – thermostat; 9 – comparator

Затем камера герметично закрывалась, чтобы исключить попадание воздуха из внешней среды внутрь, включался термостат для поддержания температуры жидкости, в которую погружена жидкость, на уровне 20 °С. Параллельно включалась камера для создания внутри климатических условий: температура внутри камеры – 20 °С, относительная влажность воздуха – 50 %. Условия выбраны таким образом, чтобы исключить образование влаги на поверхностях эталонной установки. Открывать дверь камеры и находиться внутри во время проведения эксперимента категорически запрещалось. В ходе эксперимента измерялись показания температуры от преобразователей через определённые промежутки времени. Показания термогигрометров учитывались как справочные для контроля выпадения влаги.

Время непрерывной работы камеры предельно составляет 10 ч (это заявлено производителем в эксплуатационных документах). В первый день, с учётом технологической подготовки камеры, измерения проводились в течение 8 ч, на второй и третий – по 9 ч. Данные измерений температуры T °С и относительной влажности воздуха внутри камеры R % представлены в таблице 2.

Первые значения температуры и влажности, приведённые в таблице 2, являются начальными точками отсчёта для выхода камеры на заданные режимы параметров.

Проведённые исследования показали, что, несмотря на колебания относительной влажности воздуха, обусловленные испарением исследуемой жидкости и жидкости в термостате, выпадения влаги на составных частях установки не происходит. Следовательно, колебания относительной влажности воздуха в объёме камеры не влияют на результат измерения и не вносят дополнительный вклад в неопределённость измерений. Измерения температуры на поверхности составных частей установок показывают, что термостабилизация составных частей эталонной установки происходит в течение как минимум трёх часов

с момента запуска камеры и остаются стабильными на протяжении времени проведения исследования (рисунок 3).

Нужно отметить, что термостабилизация оборудования возможна только при стабильной работе камеры в течение длительного времени. Были проведены исследования стабильности температурных условий внутри камеры в течение непрерывной работы на протяжении суток. Во время эксперимента отключать камеру и открывать дверь камеры строго запрещалось.

На рисунке 4 приведён график изменения температуры внутри климатической камеры в течение суток.

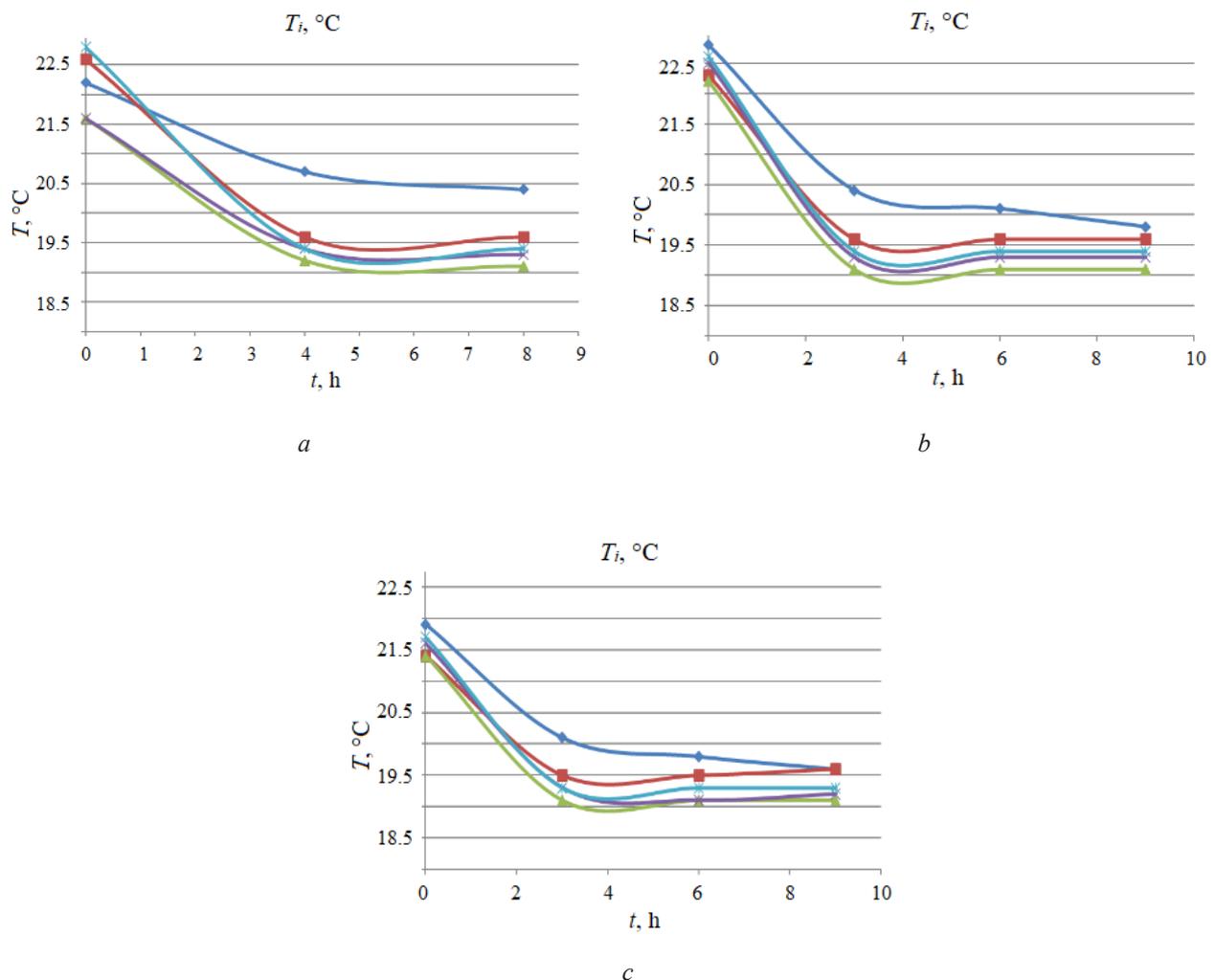


Рисунок 3 – Время установления заданного режима работы: a – день 1-й; b – день 2-й; c – день 3-й

Figure 3 – Time for establishing a given operating mode: a – day 1th; b – day 2th; c – day 3th

Таблица 2 / Table 2

Измерение параметров окружающей среды внутри климатической камеры

Measuring environmental parameters inside the climate chamber

Эксперимент	T_1R_1		T_2R_2		T_3R_3		T_4R_4		T_5R_5	
Experiment	$T, ^\circ\text{C}$	$R, \%$								
День 1, ч										
Day 1, h										
0	22.2	37.0	22.6	40.9	21.6	41.5	21.6	39.5	22.8	37.8
4	20.7	43.1	19.6	46.1	19.2	51.9	19.4	45.8	19.4	47.1
8	20.4	43.9	19.6	46.4	19.1	52.4	19.3	46.9	19.4	47.3
День 2, ч										
Day 1, h										
0	22.8	34.9	22.3	36.7	22.2	40.5	22.5	36.3	22.6	35.2
3	20.4	43.8	19.6	46.3	19.1	51.6	19.3	47.0	19.4	47.0
6	20.1	45.2	19.6	46.6	19.1	51.7	19.3	47.8	19.4	47.4
9	19.8	46.3	19.6	46.9	19.1	49.9	19.3	48.3	19.4	47.6
День 3, ч										
Day 1, h										
0	21.9	27.0	21.4	28.8	21.4	26.7	21.6	27.8	21.7	27.0
3	20.1	44.0	19.5	46.1	19.1	45.0	19.3	46.2	19.3	47.4
6	19.8	47.2	19.5	46.4	19.1	45.1	19.1	47.4	19.3	47.4
9	19.6	46.5	19.6	46.6	19.1	45.6	19.2	47.9	19.3	47.7

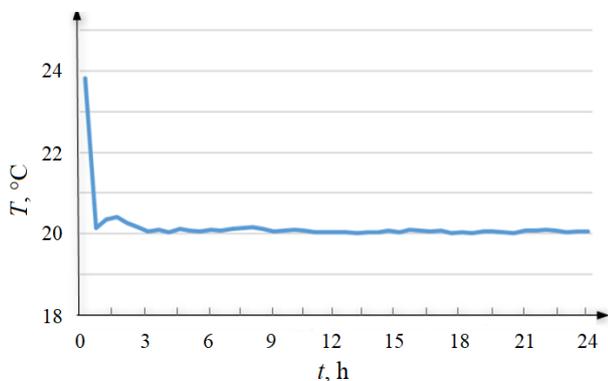


Рисунок 4 – График изменения температуры внутри климатической камеры в течение суток

Figure 4 – Graph of temperature changes inside the climate chamber during the day

Исследования показали, что после установления рабочего режима камеры и достижения заданного показателя температуры в 20 °С, стабильность поддержания температуры внутри камеры сохраняется на заданном уровне в течение всего времени непрерывной работы, соответственно, неопределённость измерения температуры внутри камеры зависит только

от калибровки термометров (определяется по типу В) [12] и составляет не более 0,057 °С. Полученные результаты справедливы и для процесса передачи единицы плотности жидкости средствам измерений, так как данное техническое решение используется в обоих процессах (воспроизведение и передача единицы плотности жидкости) без проведения конструктивных изменений установки.

Заключение

Установлено, что благодаря использованным техническим решениям влияние условий окружающей среды на изменение температуры исследуемой жидкости является величиной пренебрежимо малой. Основной вклад в неопределённость измерения температуры исследуемой жидкости будет вноситься термометрами, измеряющими температуру исследуемой жидкости вблизи погружённой в жидкость меры плотности – кремниевой сферы. Поскольку влияние условий окружающей среды на исследуемую жидкость нивелировано с помощью технических средств,

то неопределённость измерений температуры жидкости будет относиться к неопределённости по типу В, т. е. зависеть от точности калибровки используемых термометров.

Список использованных источников

1. ССД СНГ 2-77 «ГСССД 2-77. Таблицы стандартных справочных данных. Вода. Плотность при атмосферном давлении и температурах от 0 до 100 °С». – Москва, Издательство стандартов, 1978. – 6 с.

2. ГОСТ ИСО 3675-2014. Сырая нефть и жидкие нефтепродукты. Лабораторный метод определения плотности ареометром. Введен 01.01.2017. – Москва: Стандартинформ, 2019. – 12 с.

3. OIML G14 Edition 2011(E) Density measurement. International Organization Of Legal Metrology – 2011 – 29 p.

4. ИСО 2811-1:1997. Краски и лаки. Определение плотности. Часть 1. Пикнометрический метод (МОД). Введен 01.07.2014. – Женева: Международная организация по стандартизации, 1997. – 9 с.

5. Bakovets N.V., Konicheva E.N. Measuring liquid density in a system for ensuring uniformity of measurements. Физика. – БГУ, Минск, 2022. – №3. – С. 113–119.

6. Баковец Н.В. Источники неопределенности измерений при определении плотности жидкости / Н.В. Баковец, Е.Н. Коничева, К.В. Козадаев // Материалы Международной научно-технической конференции «Метрология – 2024». – Минск, БелГИМ, 2024. – С.167– 169.

7. ГОСТ OIML R 111-1 – 2009 «Государственная система обеспечения единства измерений. Гири классов E1, E2, F1, F2, M1, M1-2, M2, M2-3 и M3. Часть 1. Метрологические и технические требования».

8. ГОСТ 8.395-80 «Государственная система обеспечения единства измерений. Нормальные условия измерений при поверке. Общие требования». Введён 01.07.1081. – Москва: ИПК Издательство стандартов, 1980. – 7 с.

9. Р 50.2.041-2004 Рекомендации по метрологии. «ГСОЕИ. Ареометры стеклянные. Методика поверки». – Москва, Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии, 2004.

10. Государственный информационный фонд по обеспечению единства измерений: URL: <http://mediaold.belgim.by/grsi/12532.pdf> (дата обращения: 23.05.2024).

11. Государственный информационный фонд по обеспечению единства измерений: oei.by. URL: <https://oei.by/grsi/view?id=14477513> (дата обращения: 23.05.2024).

12. Руководство по выражению неопределённости измерения Guide to the Expression of Uncertainty in Mea-

surement Перевод с англ. под науч. ред. проф. Слаева В.А. ВНИИМ им. Д.И. Менделеева, С.-Пб., 1999. – 134 с.

References

1. CCD CNG 2-77. GCCCD 2-77. Tables of standard reference data. Water. Density at atmospheric pressure and temperatures from 0 to 100 °C. Publishing standards, 1978, 6 p. (In Russ.).

2. GOST ISO 3675-2014. Crude oil and liquid petroleum products. Laboratory method for determining density with a hydrometer. Introduced 01.01.2017. Standartinform, 2019, 12 p. (In Russ.).

3. OIML G14 Edition 2011(E) Density measurement. International Organization Of Legal Metrology. 2011, 29 p.

4. ISO 2811-1:1997. Paints and varnishes. Determination of density. Part 1. Pycnometric method (MOD). Introduced 01.07.2014. International Organization for Standardization, 1997, 9 p. (In Russ.).

5. Bakovets NV, Konicheva EN. Measuring liquid density in a system for ensuring uniformity of measurements. Journal of the Belarusian State University. Physics. 2022;3:113-119.

6. Bakovets N.V., Konicheva E.N., Kozadaev K.V. Sources of measurement uncertainty in determining liquid density. Materials of the International Scientific and Technical Conference "Metrology – 2024", pp. 167–169. (In Russ.).

7. GOST OIML R 111-1 – 2009 State system for ensuring the uniformity of measurements. Weights of classes E1, E2, F1, F2, M1, M1-2, M2, M2-3 and M3. Part 1. Metrological and technical requirements. (In Russ.).

8. GOST 8.395-80 State system for ensuring the uniformity of measurements. Normal measurement conditions during verification. General requirements. Introduced 01.07.1081. Publishing standards, 1980, 7 p. (In Russ.).

9. R 50.2.041-2004 Recommendations on metrology. "SSEUM. Glass hydrometers. Verification procedure] Federal Agency for Technical Regulation and Metrology, 2004. (In Russ.).

10. Website State Information Fund for Ensuring the Uniformity of Measurements. Available at: <http://mediaold.belgim.by/grsi/12532.pdf> (accessed 23.05.2024). (In Russ.).

11. Website State Information Fund for Ensuring the Uniformity of Measurements. Available at: <https://oei.by/grsi/view?id=14477513> (accessed: 23.05.2024). (In Russ.).

12. Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement. Translation from English under scientific editorship of prof. Slaev V.A. VNIIM by D.I. Mendeleev, 1999, 134 p. (In Russ.).