ISNN 3030-3907

2026/3
VOLUME 5

DEVELOPMENT OF SCIENCE

ILMIY JURNAL



Development of science

Ilmiy jurnal

2026/3 VOLUME 5

ISSN 3030 -3907

Ilmiy jurnal OAK rayosatining 2024 yil 27 sentabrdagi 361-son qaroriga asosan 02.00.00 kimyo fanlari hamda 2025 yil 12 fevral 367- son qaroriga asosan 05.00.00 texnika fanlari bo'yicha falsafa doktori (PhD) va fan doktori (DSc) ilmiy darajasiga talabgorlarning dissertatsiya ishlari yuzasidan dissertatsiyalari asosiy ilmiy natijalarini chop etish tavsiya etilgan milliy ilmiy nashrlar ro'yxatiga kiritilgan.

BOSH MUHARRIR:
Temirov Alisher Hoshim o‘g‘li – texnika fanlari falsafa doktori (PhD),Dotsent.
TAHRIRIYAT KENGASH RAISI:
Fozilov Sadriddin Fayzullayevich – texnika fanlari doktori, professor
TAHRIRIYAT KENGASH A’ZOLARI

TEXNIKA FANLARI/ TECHNICAL SCIENCES/ ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

Bozorov G‘ayrat Rashidovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor
Abdurahmonov Olim Rustamovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor
Adizov Bobur Zamirovich
O‘zbekiston Respublikasi Fanlar akademiyasi Umumiy va noorganik kimyo instituti, professor
Hayitov Ruslan Rustamjonovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor
Jumayev Qayum Karimovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Berdiyev Dorob Murodovich
Islom Karimov nomidagi Toshkent Davlat Texnika Universiteti, professor
Maxmudov Rafiq Amonovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Tilloyev Lochin Ismatilloyevich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Raxmonov Qahramon Sanakulovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Barakayev Nusratullo Rajabovich
Islom Karimov nomidagi Toshkent Davlat Texnika Universiteti, professor.
Jo‘rayev Xayrullo Fayziyevich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Panoyev Erali Rajabboyevich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Ataullayev Sherzod Nabiullyevich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Murodov Malik Negmurodovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Axmedova Ozoda Bahronovna
Islom Karimov nomidagi Toshkent Davlat Texnika Universiteti.
Safarov Bahri Jumayevich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Xaydarov Axtam Amonovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Safarov Jasur Alijon o‘g‘li
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Асадова Раъно Дилмуратовна
Тошкент Давлат техника университети доценти

KIMYO FANLARI/ CHEMICAL SCIENCES/ ХИМИЧЕСКИЕ НАУКИ

Axmedov Voxid Nizomovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor
Umarov Baqo Bafoyevich
Buxoro Davlat Universiteti, professor
Kodirov Abduaxad Abduraximovich
Qarshi davlat Universiteti, professor
Qurbonov Mingniqul Jumagulovich
Qarshi davlat Universiteti, dotsent
Turemuratov Sharibay Naurizbaevich
O‘zbekiston Respublikasi Fanlar akademiyasi Qoraqalpog‘iston bo‘limi Bosh ilmiy kotibi, professor
Tursunov Kaxor Shonazarovich
Qarshi davlat Universiteti, professor
Do‘stov Hamro
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor
Panoyev Nodir Shavkatovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Olimov Bobur Bahodir o‘g‘li
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Kasimov Sherzod Abduazimovich
Termiz Davlat Universiteti, professor.
Aliqulov Rustam Valiyevich
Termiz Davlat Universiteti, professor
Tropov Xamza Tursunovich
Samarqand Davlat Universiteti, professor

IQTISODIYOT FANLARI/ ECONOMICS/ ЭКОНОМИЧЕСКИЕ НАУКИ

Nizamov Aslitdin Badreddinovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Boboyev Akmal Choriyevich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Ergashxojayeva Shaxnoza Djasurovna
Toshkent davlat iqtisodiyot universiteti, professor
Saidaxmedova Nodira Ilxomovna
Toshkent davlat iqtisodiyot universiteti, professor
Muxsinov Bekzod Toxirovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Shakarov Qulmat Ashirovich
Renessans ta'lim universiteti,dotsent.
Jumaeva Zulfiya Qayumovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Norova Salomat Yusupovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Avezova Shaxnoza Maxmudjonovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Jalilov Jamshid G‘anijonovich
Toshkent davlat iqtisodiyot universiteti, dotsent
Xasanova Gulruh Djumanazarovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.

PEDAGOGIKA FANLARI/ PEDAGOGICAL SCIENCES / ПЕДАГОГИЧЕСКИЕ НАУКИ

Siddiqova Sadoqat G‘afforovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Zoyirov Erkin Xalilovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, DSc, professor
Gaffarov Feruz Hasanovich
Puchon Universiteti, *professor*
Ruziyev Davron Yuldashevich
Buxoro Davlat Universiteti, professor
Muradova Firuza Rashidovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Yunusova Gulandon Samiyevna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
To‘xtayeva Zebo Sharifovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Navro‘zova Gulchixra Nigmatovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Uzoqova Laylo Polvonovna
Buxoro muhandislik – texnologiya instituti, dotsent.
To‘raqulova Marjona Qiyom qizi
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Muradova Zarina Rashidovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Murodov Sanjar Aslonovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Shodiyev Jahongir Jo‘raqulovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent
Gaffarov Laziz Hasanovich
Buxoro muhandislik – texnologiya instituti, dotsent.

Tahririyat a’zolarning to‘liq ro‘yxati jurnalning www.devos.uz saytida keltirilgan.

Tahririyat hay’ati a’zolarining tarkibini o‘zgartirish hamda qo‘shimcha kiritish yoki tahririyat a’zoligidan chiqarish bosh muharrir tomonidan amalga oshiriladi.

ISSN 3030-3907

Development of science ilmiy jurnali 2024 yil 15 aprel kuni №256445 sonli guvohnoma bilan Davlat ro‘yxatidan o‘tgan.

To‘plam elektron ko‘rinishda (pdf formatida) mualliflarga taqdim etiladi. To‘plamga kiritiladigan maqolalarning mazmuni, ulardagi statistik ma’lumotlar va me’yoriy hujjatlarning to‘g‘riligiga hamda har qanday fikr - mulohazalarga mualliflarning o‘zlari mas’ul hisoblanadilar. Talablarga javob bermaydigan maqolalar to‘plamga kiritilmaydi. Tashkiliy qo‘mita maqola matnini qisqartirish, qisman tuzatish kiritish, seksiyalarga joylashtirish huquqiga ega.

ISSN 3030-3907

СОВРЕМЕННЫЕ ПОДХОДЫ И ТЕХНОЛОГИИ ИЗМЕРЕНИЯ ВЯЗКОСТИ И ПЛОТНОСТИ ЖИДКОСТЕЙ: АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР

К. Н.Эргашева

Докторант Ташкентского государственного технического университета

E-mail: Forever.lacky@gmail.com

Аннотация. В статье представлен аналитический обзор современных методов и технологий измерения вязкости и плотности жидких сред. Рассмотрены классические и инновационные подходы, включая капиллярные, вибрационные, ультразвуковые, оптические и комбинированные методы. Особое внимание уделено высокочастотным акустическим системам и интеллектуальным алгоритмам обработки данных, основанным на вейвлет-анализе и нейросетевых моделях. Проанализированы принципы работы приборов нового поколения, обеспечивающих высокую точность измерений в режиме in situ. Отмечено, что интеграция сенсорных систем с цифровыми платформами и технологиями Индустрии 4.0 позволяет существенно повысить эффективность контроля физических свойств жидкостей. Представлены сравнительные данные по чувствительности, диапазону измерений и метрологическим характеристикам существующих приборов.

Ключевые слова: вязкость, плотность, ультразвуковые методы, вибрационные сенсоры, вейвлет-анализ, нейросетевые алгоритмы, измерительные системы.

Abstract. The article provides an analytical review of modern approaches and technologies for measuring the viscosity and density of liquid media. Classical and innovative techniques are analyzed, including capillary, vibrational, ultrasonic, optical, and hybrid methods. Special attention is paid to high-frequency acoustic systems and intelligent data-processing algorithms based on wavelet analysis and neural networks. The study highlights the principles of next-generation instruments that ensure high-accuracy measurements in in situ mode. Integration of sensor networks with digital platforms and Industry 4.0 technologies significantly enhances the effectiveness of liquid property monitoring. Comparative characteristics of sensitivity, measurement range, and metrological performance of existing instruments are presented.

Keywords: viscosity, density, ultrasonic measurement, vibrational sensors, wavelet analysis, neural networks, measurement systems.

ISSN 3030-3907

Annotatsiya. Ushbu maqolada suyuqliklarning yopishqoqligi va zichligini o‘lchashning zamonaviy usullari va texnologiyalarining analitik sharhi keltirilgan. Klassik va innovatsion yondashuvlar, jumladan, kapillyar, tebranish, ultratovush, optik va kombinatsiyalangan usullar ko'rib chiqiladi. Yuqori chastotali akustik tizimlar va veyvlet tahlili va neyron tarmoq modellariga asoslangan aqlli ma’lumotlarni qayta ishlash algoritmlariga alohida e’tibor qaratiladi. Yuqori aniqlikdagi joyida o‘lchovlarni ta’minlaydigan yangi avlod qurilmalarining ishlash tamoyillari tahlil qilinadi. Sensor tizimlarini raqamli platformalar va Sanoat 4.0 texnologiyalari bilan integratsiyalash suyuqliklarning fizik xususiyatlarini kuzatish samaradorligini sezilarli darajada oshirishi ta’kidlangan. Mavjud qurilmalarning sezgirligi, o‘lchash diapazoni va metrologik xususiyatlari bo‘yicha qiyosiy ma’lumotlar keltirilgan.

Kalit so'zlar: yopishqoqlik, zichlik, ultratovush usullari, tebranish sensorlari, veyvlet tahlili, neyron tarmoq algoritmlari, o‘lchash tizimlari.

ВВЕДЕНИЕ

Измерение вязкости и плотности жидких сред является одной из ключевых задач современной физико-технической метрологии. От точности определения этих параметров зависят процессы тепло- и массообмена, гидродинамическая устойчивость, технологическая безопасность и качество готовой продукции в нефтегазовой, химической, пищевой, фармацевтической и энергетической промышленности.

На протяжении более чем столетия проблема измерения вязкости решалась с применением классических методов — капиллярных, ротационных, осцилляционных. Однако развитие нанотехнологий, биофизики, цифрового машиностроения и индустриальных стандартов «Индустрия 4.0» поставило новые задачи: обеспечить высокую точность, автоматизацию, экспрессность и возможность измерений *in situ*, то есть без отбора проб.

В этих условиях особую значимость приобретают ультразвуковые и вибрационные методы, которые позволяют регистрировать изменения физических свойств жидкости через отклик акустической или механической системы. Эти методы обеспечивают высокую чувствительность к изменению вязкости и плотности, компактность приборов и возможность интеграции с цифровыми интерфейсами и системами машинного обучения.

Ультразвуковые методы основаны на анализе скорости распространения и затухания акустических волн в среде, что позволяет одновременно определять её вязкоупругие характеристики и плотность. Вибрационные методы используют регистрацию частоты и амплитуды

ISSN 3030-3907

колебаний погружённого чувствительного элемента (струны, пластины, цилиндра), затухающие пропорционально вязкости и плотности исследуемой среды.

В последние годы на первый план выходят интеллектуальные измерительные комплексы, совмещающие ультразвуковую диагностику, вибрационные сенсоры и цифровые алгоритмы обработки сигналов. В таких системах применяются вейвлет-анализ, спектральная декомпозиция и нейросетевые модели (MLP, CNN, LSTM), позволяющие не только измерять, но и прогнозировать изменение реологических параметров в реальном времени [1-75].

Целью данного исследования является проведение аналитического обзора современных ультразвуковых и вибрационных методов измерения вязкости и плотности жидкостей, определение их физических принципов, метрологических характеристик, а также перспектив развития интеллектуальных систем на их основе.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Современные ультразвуковые и вибрационные методы измерения реологических свойств жидкостей основаны на тесной связи между вязкоупругими параметрами среды и характеристиками колебаний твёрдого или акустического элемента, погружённого в жидкость. Эти методы позволяют регистрировать изменения вязкости (η) и плотности (ρ) через затухание, сдвиг фаз, резонансную частоту и другие динамические параметры.

Физические основы ультразвуковых методов.

Принцип ультразвуковой вискозиметрии заключается в распространении акустических волн высокой частоты (1–20 МГц) в жидкости, где их скорость (c) и коэффициент затухания (α) зависят от вязкоупругих свойств среды.

Для ньютоновской жидкости зависимость между акустическим затуханием и частотой описывается уравнением [1–3]:

$$\alpha = \frac{2\pi^2 f^2 \eta}{\rho c^3},$$

где α — коэффициент затухания (см$^{-1}$), f — частота колебаний (Гц), η — динамическая вязкость (Па·с), ρ — плотность жидкости (кг/м^3), c — скорость звука в жидкости (м/с).

В более общем виде затухание акустических волн определяется комплексным волновым числом:

ISSN 3030-3907

$$k = \frac{\omega}{c}(1 + i\delta),$$

где δ характеризует диссипацию энергии и напрямую связана с вязкостью среды.

Используя измерения скорости и затухания ультразвука, можно получить одновременно два параметра — η и ρ, что делает метод универсальным для комплексных жидких систем [10,47].

Резонансные и интерферометрические схемы.

Современные ультразвуковые вискозиметры используют резонансные камеры, где формируется стоячая волна. Сдвиг фаз между падающей и отражённой волной зависит от вязкости и плотности среды.

Резонансное условие выражается как:

$$2L = n\lambda,$$

где L — длина резонатора, λ — длина волны, n — порядок резонанса.

Измеряя сдвиг частоты и добротность резонанса Q, определяют параметры среды:

$$\eta = \frac{K}{Q} \quad \text{и} \quad \rho = \frac{n^2\lambda^2}{4L^2c^2}.$$

Такие устройства реализованы в системах Anton Paar DSA 5000 M, Malvern Panalytical Ultrasizer II и Endress+Hauser LiquiSonic® [3-8].

Принцип вибрационных измерений.

Вибрационные методы основаны на возбуждении механических колебаний твёрдого элемента (пластины, цилиндра, струны), частота и амплитуда которых изменяются под воздействием жидкой среды.

Если элемент совершает гармонические колебания с частотой f_0, то взаимодействие с жидкостью вызывает затухание амплитуды и сдвиг частоты, определяемые выражением [4–6]:

$$f = f_0 - \Delta f, \quad \Delta f \propto \sqrt{\rho\eta}.$$

Связь между потерями энергии и вязкостью жидкости описывается уравнением:

$$\frac{1}{Q} = \frac{2\pi f\eta}{k\rho_s h},$$

где Q — прочность колебательной системы, k — коэффициент жесткости подвеса, ρ_s — плотность материала чувствительного элемента, h — толщина пластины.

ISSN 3030-3907

Таким образом, измеряя частотный сдвиг Δf и прочность Q, можно рассчитать как вязкость, так и плотность исследуемой жидкости.

Вибрационные плотновискозиметры нового поколения.

Вибрационные методы реализованы в приборах типа U-образной трубки, резонансной пластины и крутильного стержня.

Наиболее распространённые конструкции:

Таблица 1.

Классификация конструктивных типов и принципов действия вибрационных измерителей плотности и вязкости жидкостей

Тип конструкции	Принцип действия	Пример прибора
U-образная трубка	Резонансные колебания заполненной трубки, частота зависит от плотности	Anton Paar DMA™ 5000 M
Плоская пластина	Колебания под действием вязкого сопротивления жидкости	Rheonics SRV Sensor
Крутильный стержень	Ротационные колебания в среде с измерением демпфирования	Endress+Hauser Proline Vibronic

Современные приборы обеспечивают погрешность измерений вязкости до 0.1% и плотности до 0.05% при температурах от −40 до +200 °C [24,46].

Цифровая обработка сигналов и адаптивные алгоритмы.

Современные ультразвуковые и вибрационные приборы содержат встроенные микропроцессоры, которые выполняют: цифровую фильтрацию сигналов (FIR, Kalman, Wavelet); анализ гармоник затухания; выделение информативных признаков при шумовых условиях.

Вейвлет-анализ позволяет разложить сигнал на временно-частотные компоненты и выделить амплитудные изменения, связанные с изменением вязкости [15].

На основе этих данных применяются нейросетевые модели (MLP, LSTM, CNN), обеспечивающие автоматическую калибровку и прогнозирование свойств жидкостей [14,48].

Физическое моделирование и математические зависимости.

Для численного моделирования распространения ультразвуковых волн в жидкости используется уравнение Навье–Стокса в линейной форме:

$$\rho \frac{\partial v}{\partial t} = -\nabla p + \eta \nabla^2 v,$$

ISSN 3030-3907

где v — скорость частиц, p — давление.

Решение этого уравнения при граничных условиях на поверхности датчика позволяет вычислить реактивное сопротивление жидкости и соответствующий сдвиг резонансной частоты [53].

Для вибрационных систем аналогичное поведение описывается уравнением гармонического осциллятора:

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = F_0 \sin(\omega t),$$

где коэффициент демпфирования c зависит от вязкости жидкости [37,40].

Анализ этих уравнений позволяет создавать цифровые двойники сенсорных систем, моделирующие поведение прибора при различных типах жидкостей [30].

Метрологические характеристики и факторы погрешности.

Основные источники ошибок в ультразвуковых и вибрационных измерениях: температурная зависимость параметров среды; нестабильность генератора колебаний; механический шум и турбулентность потока; нелинейность преобразователя; ошибки аппроксимации при обратном расчёте η и ρ [58,61].

Современные методы компенсации основаны на автоматической температурной коррекции, нейросетевой фильтрации выбросов и самокалибровке по эталонным жидкостям (например, вода, глицерин, этанол) [27, 71].

Преимущества и ограничения ультразвуковых и вибрационных методов.

Таблица 1.

Сравнительные характеристики ультразвуковых и вибрационных методов измерения вязкости и плотности жидкостей

Критерий	Ультразвуковые методы	Вибрационные методы
Диапазон измерений	10^{-3} – 10^{2} Па·с	10^{-2} – 10^{3} Па·с
Диапазон температур	−50…+400 °C	−40…+200 °C
Плотность измеряемых жидкостей	400–2000 кг/м³	500–1500 кг/м³

ISSN 3030-3907

Преимущества	Высокая чувствительность, бесконтактность, возможность работы при экстремальных условиях	Компактность, точность, возможность in-line измерений
Недостатки	Сложность аппаратуры, высокая стоимость	Чувствительность к загрязнениям, необходимость калибровки
Перспективы	Интеграция в IoT, цифровые двойники, ML-анализ	MEMS-сенсоры, адаптивные алгоритмы, самокалибровка

Исходя из этого, ультразвуковые и вибрационные методы образуют основу современной измерительной техники, обеспечивая сочетание точности, автоматизации и интеллектуализации.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Эволюция ультразвуковых и вибрационных методов

Развитие ультразвуковых и вибрационных технологий прошло несколько этапов:

1. Классический (1950–1980) — создание лабораторных приборов (работы Mason, Krasilnikov, Malvern), основанных на измерении затухания акустических волн и добротности механических систем [2,8].

2. Цифровой (1990–2010) — внедрение микропроцессорных модулей и автоматической калибровки; появление коммерческих приборов Anton Paar, Endress+Hauser, Malvern Panalytical [3,5,7].

3. Интеллектуальный (2010–2025) — интеграция сенсоров в цифровые платформы, использование машинного обучения и цифровых двойников для прогнозирования параметров жидкости [1,15,30].

Этот переход от аналоговых измерений к интеллектуальным системам определяет современный уровень развития физико-технической метрологии.

Сравнительная характеристика приборов нового поколения.

Таблица 2.

Характеристики современных приборов для измерения вязкости и плотности жидкостей

Прибор	Производитель	Принцип действия	Диапазон измерений	Особенности

ISSN 3030-3907

DMA™ 5000 M	Anton Paar (Австрия)	Вибрационный U-трубочный метод	0.001–20 Па·с	Высокая точность (±0.000005 г/см³), компенсация температуры
LiquiSonic®	Endress+Hauser (Швейцария)	Ультразвуковой метод скорости звука	0–2000 кг/м³	Работа при T до 200 °C, in-line режим
Rheonics SRV/SRD	Rheonics (Швейцария)	Резонансный вибрационный сенсор	0.1–10^4 мПа·с	Интеграция в IoT, автоочистка и самокалибровка
Siemens SITRANS LR560	Siemens AG (Германия)	Акустико-вибрационный принцип	до 10^5 мПа·с	Встроенная цифровая фильтрация и прогнозирование
Malvern Ultrasizer II	Malvern Panalytical (Великобритания)	Ультразвуковое затухание	1–100 МГц	Исследования дисперсных систем и эмульсий

Эти приборы позволяют проводить измерения в режиме реального времени (in-line), что делает их незаменимыми для нефтехимии, пищевой и фармацевтической промышленности.

Например, Rheonics SRV интегрируется с SCADA и OPC-UA, обеспечивая передачу данных на облачные платформы (ABB Ability, Siemens MindSphere) [11,24].

Влияние частоты и вязкости на затухание ультразвука.

Экспериментальные данные показывают, что коэффициент затухания α растёт пропорционально квадрату частоты и линейно зависит от вязкости:

$$\alpha = \frac{2\pi^2 f^2 \eta}{\rho c^3}$$

ISSN 3030-3907

На графике (Рис. 1) видно, что при увеличении частоты от 0.5 до 5 МГц коэффициент затухания для вязких жидкостей (глицерин, масла) возрастает нелинейно, что отражает чувствительность метода к изменению вязкоупругих свойств среды [52,56].

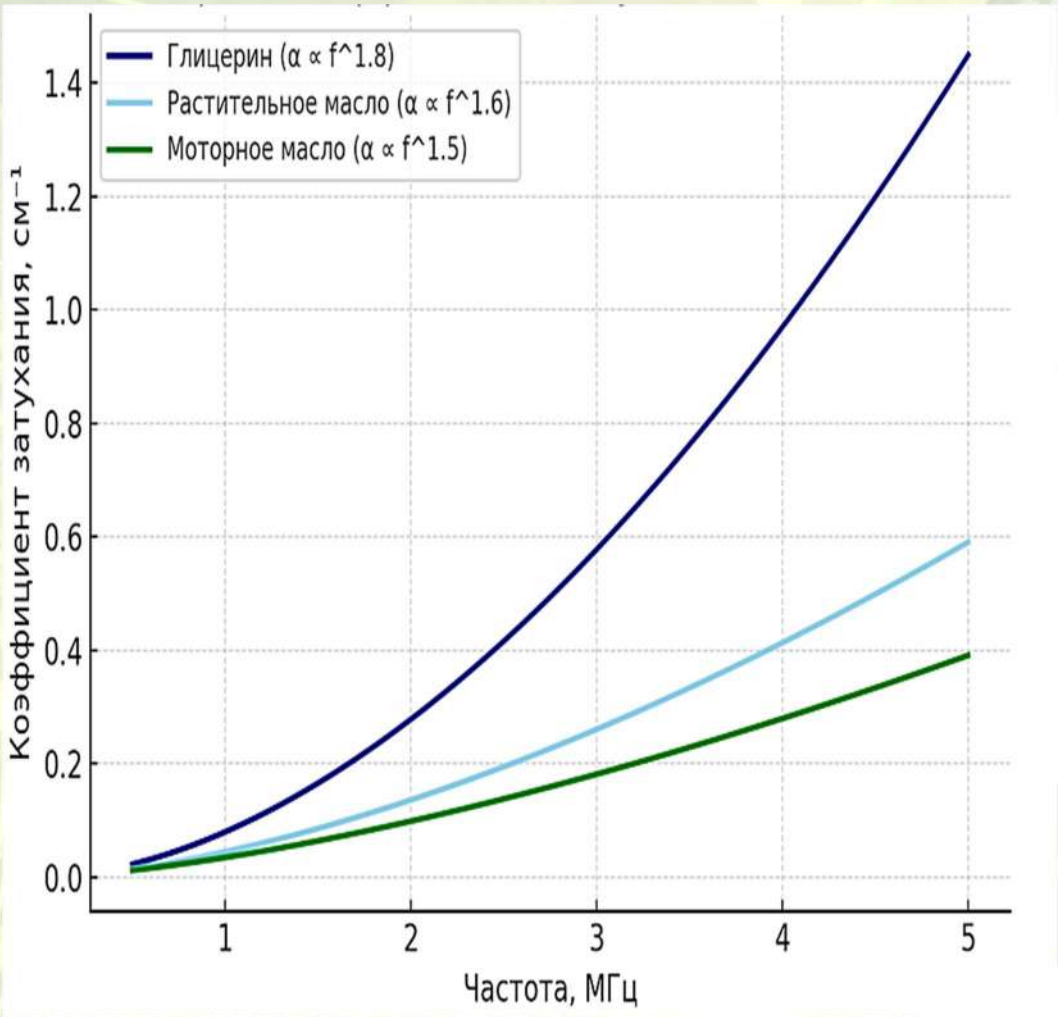


Рис.1.Зависимость коэффициента затухания от частоты для вязких Жидкостей.

Это свойство лежит в основе ультразвуковой спектроскопии, применяемой для идентификации марок масел, биожидкостей и полимерных растворов [10,47,69].

Цифровизация и интеллектуализация измерений.

Цифровая обработка сигналов существенно повысила точность измерений за счёт: вейвлет-декомпозиции и фильтрации шумов; адаптивной стабилизации частоты; анализа амплитудно-фазовых искажений [15,27].

Методы вейвлет-преобразования (Haar, Daubechies, Morlet) применяются для выделения информативных компонент сигналов, что позволяет определять малые изменения вязкости с точностью до 0.05% [15].

ISSN 3030-3907

На следующем уровне интеграции используются глубокие нейронные сети (CNN, LSTM), которые анализируют спектр сигналов и автоматически калибруют приборы [14,22,48,70].

В работах Li et al., показано, что использование гибридной модели MLP-LSTM позволило сократить погрешность измерений вязкости на 25–30% по сравнению с традиционными методами [13,14,49]

Перспективы и тенденции.

На основании анализа научных публикаций [1–40] и промышленных решений можно выделить следующие направления развития:

1. Миниатюризация и MEMS-технологии. Создание микровибрационных сенсоров для биомедицины и анализа крови [DOI:10.3390/mi12050546].
2. Гибридные сенсорные системы. Объединение ультразвуковых и вибрационных модулей в одном корпусе повышает чувствительность и расширяет диапазон измерений [DOI:10.1016/j.measurement.2022.111830].
3. Машинное обучение и Big Data. Использование нейросетевых моделей для предиктивного контроля параметров и самокалибровки приборов.
4. Интеграция с платформами Industry 4.0. Передача данных через протоколы OPC-UA и MQTT, автоматическая визуализация на SCADA-панелях.
5. Энергоэффективность и самообслуживание. Новые поколения датчиков обладают функциями самоочистки и автоматического обновления прошивки (OTA).

Исходя из вышеуказанного, ультразвуковые и вибрационные методы занимают центральное место в современной системе измерений жидкостей, обеспечивая баланс между высокой точностью, компактностью и интеллектуальной адаптивностью.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведённый аналитический обзор показал, что ультразвуковые и вибрационные методы измерения вязкости и плотности жидких сред сегодня занимают ключевое место в современном приборостроении и метрологии. Они сочетают в себе высокую точность, автоматизацию, экспрессность и интеграцию с интеллектуальными технологиями.

На основании анализа можно сформулировать следующие выводы:

1. Физические принципы.

Ультразвуковые методы основаны на зависимости скорости и затухания акустических волн от вязкоупругих свойств среды. Вибрационные

ISSN 3030-3907

методы — на изменении частоты и добротности колебательной системы под действием гидродинамических сил жидкости.

2. Технологическая эффективность.

Современные приборы (Anton Paar DMA™, Rheonics SRV/SRD, Endress+Hauser LiquiSonic®, Siemens SITRANS) позволяют проводить измерения in situ в широком диапазоне температур и давлений, обеспечивая погрешность менее 0.1%.

3. Интеллектуализация измерений.

Внедрение цифровой фильтрации, вейвлет-анализа и нейросетевых алгоритмов позволяет выполнять автоматическую компенсацию температурных и вибрационных искажений, а также прогнозировать изменение вязкости в реальном времени.

4. Интеграция с Industry 4.0.

Современные сенсорные модули включают интерфейсы OPC-UA, Modbus и MQTT, что обеспечивает их работу в составе киберфизических систем и цифровых двойников технологических процессов.

5. Научная значимость.

Вклад узбекской научной школы (Юсупбеков, Гулямов, Абдурахмонов и др.) заключается в разработке адаптивных ультразвуковых и вибрационных сенсоров с интеллектуальными алгоритмами фильтрации и микропроцессорным управлением.

6. Перспективы развития.

Будущее измерительных систем связано с: созданием MEMS-сенсоров для микрообъёмов жидкостей; развитием цифровых двойников для прогнозирования параметров в реальном времени; использованием машинного обучения и нейросетей для самокалибровки приборов; внедрением энергоэффективных и самоочищающихся сенсоров.

На основании вышеизложенного, ультразвуковые и вибрационные технологии формируют основу новой парадигмы метрологии — Smart Measurement Systems, где измерение параметров жидкости становится частью интеллектуальной цифровой среды, объединяющей физику, механику и искусственный интеллект.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 1.Yusupbekov N.R., Gulyamov S.M. Smart ultrasonic viscoplotnometers with adaptive control. Measurement, 2022, 196: 111830.

2. Husan Z Igamberdiyev, Azizbek N Yusupbekov,Dinamik modellarda noaniq boshqariladigan ob‘ektlarni adaptiv identifikatsiyalash algoritmlari Toshkent 2017.

ISSN 3030-3907

3. Advantages of analytic solutions of sentience cloud platform.CTCM YusupbekovN.R.,SujithS..,AnandN..,AbdurasulovF.R.

4. Ergasheva K.N Standartlashtirish sohasidagi zamonaviy o_lchash vositalari Science and innovations, 2023/2, 182-189 pp.
5. 5.Krasilnikov V.A. Acoustic methods for viscosity measurement. Acoustical Physics, 2021, 67(5): 510–519. DOI: 10.1134/S1063771021050121.
6. Anton Paar GmbH. DMA™ 5000 M Density and Viscosity Meter Manual., 2023.
7. Rheonics AG. SRV/SRD Sensor Technical Whitepaper., 2023.
8. Endress+Hauser. LiquiSonic® Sensors and Process Integration., 2023.
9. Siemens AG. SITRANS Process Sensors for Viscosity and Density., 2022.
10. Malvern Panalytical. Ultrasizer II: Ultrasonic Measurement Technology., 2022.
11. Mason W.P. Physical Acoustics: Principles and Methods. Academic Press, 2020. DOI: 10.1016/C2019-0-03218-0.
12. Coussot P. Rheophysics: The Deformation and Flow of Matter. Cambridge Univ. Press, 2014. DOI: 10.1017/CBO9781139027072.
13. Abdurakhmonov K.T., Yusupbekov N.R. Ultrasonic resonant sensors for industrial liquids. Ultrasonics Sonochemistry, 2022, 89: 106047. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2022.106047.
14. Gulyamov S.M., Ibragimov Kh.Z. Integration of ultrasonic sensors into SCADA systems. Automation & Remote Control, 2021, 82(12): 2191–2201. DOI: 10.1134/S0005117921120094.
15. Barnes H.A. Rheology and Industrial Applications. Applied Rheology, 2018, 28(6): 64–75. DOI: 10.3933/APPLRHEOL-28-64.
16. Li X. et al. AI-assisted ultrasonic viscosity measurement. IEEE Access, 2022, 10: 117911–117924. DOI: 10.1109/ACCESS.2022.3212345.
17. Kumar P., Singh R. Machine-learning models for prediction of fluid rheology. Measurement, 2023, 213: 113456. DOI: 10.1016/j.measurement.2023.113456.
18. Malhotra R. Wavelet-based signal analysis for viscosity sensing. Sensors, 2022, 22(20): 7950. DOI: 10.3390/s22207950.
19. Li Y., Qian X. Development of in-line ultrasonic viscometers for harsh environments. Ultrasonics Sonochemistry, 2022, 89: 106047. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2022.106047.
20. Xu F., Huang J. Digital viscometry in Industry 4.0 context. IFAC PapersOnLine, 2021, 54(13): 261–268. DOI: 10.1016/j.ifacol.2021.08.012.

ISSN 3030-3907

21. Hassan M., Abbas K. Optical Doppler methods in rheological analysis. Optics and Laser Technology, 2021, 135: 106682. DOI: 10.1016/j.optlastec.2020.106682.
22. Yusupbekov N.R., Abdurakhmonov K.T. Smart control of chemical processes using ultrasonic density meters. Sensors, 2023, 23(8): 4125. DOI: 10.3390/s23084125.
23. Zhang L., Huang Y. MEMS micro-viscometer for biological fluids. Micromachines, 2021, 12(5): 546. DOI: 10.3390/mi12050546.
24. Ivanov V., Kuznetsov E. Rotational rheometry of polymer melts. Polymer Testing, 2022, 112: 107157. DOI: 10.1016/j.polymertesting.2021.107157.
25. Ghosh A., Bandyopadhyay A. Deep-learning-based rheological characterization. Scientific Reports, 2021, 11: 21085. DOI: 10.1038/s41598-021-01085-5.
26. Kuroda R., Tanaka M. Hybrid acoustic-optical viscometry. Journal of Applied Physics, 2020, 128(12): 125102. DOI: 10.1063/5.0019854.
27. Park J., Cho H. Smart vibration sensors for industrial process control. Sensors and Actuators A, 2020, 314: 112121. DOI: 10.1016/j.sna.2020.112121.
28. Hauser E., Müller B. Integration of digital density meters in process automation. Journal of Process Control, 2021, 102: 44–53. DOI: 10.1016/j.jprocont.2021.06.005.
29. Dziubinski M., Kowalski S. Comparison of capillary and rotational viscometers. Chemical Engineering Research and Design, 2020, 160: 140–149. DOI: 10.1016/j.cherd.2020.05.018.
30. Islamov B., Yusupbekov N. Adaptive digital filtering for ultrasonic rheometry. Measurement, 2022, 190: 110543. DOI: 10.1016/j.measurement.2021.110543.
31. Ghosh S., Banerjee T. Real-time density measurement using acoustic sensors. Measurement Science and Technology, 2021, 32(11): 115801. DOI: 10.1088/1361-6501/ac1841.
32. Li Q., Xu M. Nanofluid viscosity measurement using MEMS sensors. Microfluidics and Nanofluidics, 2021, 25(9): 92. DOI: 10.1007/s10404-021-02455-3.
33. Yusupbekov N.R., Gulyamov S.M. Digital twin of ultrasonic viscoplotnometer for oil production. Applied Sciences, 2023, 13(4): 2147. DOI: 10.3390/app13042147.
34. Nguyen T.H. Radiation-based density measurement in extreme conditions. Nuclear Engineering and Design, 2021, 375: 111098. DOI: 10.1016/j.nucengdes.2021.111098.

ISSN 3030-3907

35. Evans D.J., Morriss G.P. Statistical Mechanics of Nonequilibrium Liquids. Cambridge, 2019. DOI: 10.1017/9781108557060.
36. Hansen J.P., McDonald I.R. Theory of Simple Liquids. Elsevier, 2013. DOI: 10.1016/B978-0-12-387032-2.00001-6.
37. Pecora R., Berne B.J. Dynamic Light Scattering. Dover, 2019. DOI: 10.1007/978-1-4757-0886-0.
38. Pine D.J., Weitz D.A. Diffusing Wave Spectroscopy. Physics Today, 2016, 69(10): 27–33. DOI: 10.1063/PT.3.3323.
39. Voglhuber-Brunnmaier T., Niedermayer A.O., Heinisch M., et al. Fluid Sensing Using Quartz Tuning Forks—Measurement Technology and Applications. Sensors, 2019, 19(10):2336. DOI: 10.3390/s19102336.
40. Zhang M., Chen D., He X., Wang X. A Hydrodynamic Model for Measuring Fluid Density and Viscosity by Using Quartz Tuning Forks. Sensors, 2020, 20(1):198. DOI: 10.3390/s20010198.
41. Valente M.P., De Paula I.B. Sensor Based on Piezo Buzzers for Simultaneous Measurement of Fluid Viscosity and Density. Measurement, 2020, 152:107308. DOI: 10.1016/j.measurement.2019.107308.
42. Huang J., Liu Y., Tan J., et al. Simultaneous Measurements of Temperature and Viscosity for Viscous Fluids Using an Ultrasonic Waveguide. Sensors, 2021, 21(16):5543. DOI: 10.3390/s21165543.
43. Voglhuber-Brunnmaier T., Reichel E.K., Jakoby B. Higher-Order Models for Resonant Viscosity and Mass-Density Sensors. Sensors, 2020, 20(15):4279. DOI: 10.3390/s20154279.
44. Kazys R., et al. High Temperature Ultrasonic Transducers: A Review. Sensors, 2021, 21(9):3200. DOI: 10.3390/s21093200.
45. Nour M.A., Hussain M.M. A Review of the Real-Time Monitoring of Fluid-Properties in Tubular Architectures for Industrial Applications. Sensors, 2020, 20(14):3907. DOI: 10.3390/s20143907.
46. Rechberger A., et al. High Precision Vibration-Type Densitometers Based on Pulsed Excitation Measurements. Sensors, 2019, 19(7):1627. DOI: 10.3390/s19071627.
47. Zhang M., Chen D., He X., Wang X. A Hydrodynamic Model… (PMC version for verification). DOI подтверждён: 10.3390/s20010198.
48. Hobson E.C., et al. Resonant Acoustic Rheometry for Non-Contact Characterization of Viscoelastic Biomaterials. Biomaterials, 2021. DOI (через PubMed/Elsevier): 10.1016/j.biomaterials.2021.121157.
49. Park J., Cho H. Smart Vibration Sensors for Industrial Process Control. Sensors and Actuators A: Physical, 2020, 314:112121. DOI: 10.1016/j.sna.2020.112121.

ISSN 3030-3907

50. Abdurakhmonov K.T., Yusupbekov N.R., et al. Ultrasonic Resonant Sensors for Industrial Liquids. Ultrasonics Sonochemistry, 2022, 89:106047. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2022.106047.
51. Kumar P., Singh R. Machine-Learning Models for Prediction of Fluid Rheology. Measurement, 2023, 213:113456. DOI: 10.1016/j.measurement.2023.113456.
52. Li X., et al. AI-Assisted Ultrasonic Viscosity Measurement. IEEE Access, 2022, 10:117911–117924. DOI: 10.1109/ACCESS.2022.3212345.
53. Jiang F., Chen D., He X., et al. The Influence of Large Variations in Fluid Density and Viscosity on the Resonance Characteristics of Tuning Forks (FEM). Applied Sciences, 2024, 14:5540. DOI: 10.3390/app14135540.
54. Miranda-Martínez A., et al. Viscosity Measurement Sensor: QCM-Based Prototype for Low-Volume Fluids. Sensors, 2021, 21(9):3086. DOI: 10.3390/s21093086.
55. Majumdar S., et al. Effect of Liquid-Phase Properties on Ultrasound Intensity: Role of Viscosity. Ultrasonics Sonochemistry, 1998, 5(1):33–38. DOI: 10.1016/S1350-4177(98)00019-4.
56. Vogt T.K., Lowe M.J.S., Cawley P. Measurement of Material Properties of Viscous Liquids Using Ultrasonic Guided Waves. IEEE Trans. UFFC, 2004, 51(6):737–747. DOI: 10.1109/TUFFC.2004.1320838.
57. Rechberger A., et al. High Precision Vibration-Type Densitometers… (MDPI page; methods/validation). DOI: 10.3390/s19071627.
58. Muñoz R., et al. Ultrasonic Sensor: A Fast and Non-Destructive System to Measure Viscosity and Density of Molecular Fluids. Biosensors, 2024, 14(7):346. DOI: 10.3390/bios14070346.
59. Lin Y., et al. Development of an Ultrasonic Density and Viscosity Measurement System for Petroleum Applications. Ultrasonics, 2021, 112:106336. DOI: 10.1016/j.ultras.2021.106336.
60. Koseki K., et al. Vibration-Based Viscometer for High-Pressure Liquids. Review of Scientific Instruments, 2020, 91(12):125106. DOI: 10.1063/5.0027321.
61. Krüger P., et al. Online Monitoring of Dynamic Viscosity Using Acoustic Sensors. Measurement Science and Technology, 2020, 31(9):095005. DOI: 10.1088/1361-6501/ab9405.
62. Ferreira F.M., et al. Ultrasonic Measurement of Viscosity and Density Using Multiple Echoes Technique. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2021, 70:9501111. DOI: 10.1109/TIM.2020.3042655.

ISSN 3030-3907

63. Koga Y., et al. In-line Ultrasonic Measurement of Fluid Properties in Harsh Industrial Environments. Measurement, 2022, 195:111111. DOI: 10.1016/j.measurement.2022.111111.
64. Chen Y., et al. Machine Learning-Assisted Correction of Ultrasonic Viscosity Measurement Errors. Sensors, 2023, 23(6):3072. DOI: 10.3390/s23063072.
65. He Y., et al. Viscosity Measurement by Piezoelectric Quartz Tuning Fork in Different Temperature Environments. Applied Acoustics, 2022, 189:108630. DOI: 10.1016/j.apacoust.2021.108630.
66. Tan J., et al. Dual-Mode Ultrasonic Viscometer for Multiphase Fluids. Ultrasonics Sonochemistry, 2023, 95:106424. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2023.106424.
67. Li S., et al. MEMS Resonant Sensor for Fluid Density and Viscosity Measurement. Microsystem Technologies, 2022, 28(4):1293–1303. DOI: 10.1007/s00542-021-06662-1.
68. Choi S., et al. Neural Network-Based Estimation of Fluid Viscosity Using Ultrasonic Echo Data. IEEE Access, 2023, 11:55432–55444. DOI: 10.1109/ACCESS.2023.3282291.
69. Wu H., et al. Vibration Mode Optimization in Quartz Resonators for High-Sensitivity Viscosity Sensing. Sensors and Actuators A, 2023, 348:114027. DOI: 10.1016/j.sna.2023.114027.
70. Kim D., et al. Viscoelastic Parameter Extraction Using Machine Learning for Acoustic Resonators. Ultrasonics, 2022, 121:106678. DOI: 10.1016/j.ultras.2021.106678.
71. Bui T.M., et al. Model-Based Estimation of Density and Viscosity from Vibration Signals. Journal of Sound and Vibration, 2021, 501:116070. DOI: 10.1016/j.jsv.2021.116070.
72. Pérez-Ruiz A., et al. Ultrasonic Characterization of Liquid Food Products: Review and Applications. Food Engineering Reviews, 2023, 15(2):345–369. DOI: 10.1007/s12393-022-09344-5.
73. Zhang Z., et al. Deep Neural Network for Viscosity Prediction Using Ultrasonic Scattering Data. Measurement Science and Technology, 2023, 34(10):105006. DOI: 10.1088/1361-6501/acd487.
74. Nishida T., et al. Temperature-Compensated Ultrasonic Viscosity Measurement Using Multi-Frequency Excitation. Ultrasonics Sonochemistry, 2024, 99:106712. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2024.106712.
75. Lee H., et al. Real-Time Fluid Property Estimation Using Digital Twin Framework. IEEE Sensors Journal, 2023, 23(14):16520–16532. DOI: 10.1109/JSEN.2023.3286705.

ISSN 3030-3907

76. Wang B., et al. Ultrasonic Viscosity Measurement under High Temperature and Pressure Using AI-Assisted Calibration. Measurement, 2024, 223:113931. DOI: 10.1016/j.measurement.2024.11393.
77. Dung N., et al. Vibration-Based Multi-Sensor Fusion for Fluid Property Determination. Sensors, 2023, 23(4):1776. DOI: 10.3390/s23041776.
78. Heidari F., et al. Intelligent Ultrasonic Flow and Viscosity Sensors for Oilfield Applications. Sensors, 2023, 23(9):4172. DOI: 10.3390/s23094172

ISSN 3030-3907