



ФИЛИАЛ РОССИЙСКОГО
ГОСУДАРСТВЕННОГО
УНИВЕРСИТЕТА НЕФТИ И ГАЗА
(СНИУ) ИМЕНИ И.М. ГУБКИНА

ISSN 2181-1482

Doi Journal 10.26739/2181-1482

ИННОВАЦИИ В НЕФТЕГАЗОВОЙ ОТРАСЛИ

ТОМ 6, НОМЕР 3

INNOVATIONS IN THE OIL AND GAS INDUSTRY

VOLUME 6, ISSUE 3



ТАШКЕНТ-2025

Главный редактор | Chief Editor:
МАГРУПОВ АБДУЛЛА МАХМУДОВИЧ
 кандидат технических наук, доцент
 Исполнительный директор Филиала РГУ
 нефти и газа (НИУ) имени И. М. Губкина в г. Ташкенте

Ответственный редактор | Executive Editor:
ДЖУМАБАЕВ ДАВЛАТБАЙ ХАЛИЛЛАЕВИЧ
 доктор физико-математических наук, доцент, заместитель
 директора по научным работам и инновациям Филиала РГУ
 нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина в г. Ташкенте

Технический редактор | Technical Editor:
ЕВСТАФЕЕВ ЕВГЕНИЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ
 преподаватель отделения «Разработка нефтяных, газовых и газоконденсатных месторождений»
 Филиала РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина в г. Ташкенте

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ | EDITORIAL BOARD

АХМЕДОВ МИРЗААНВАР МОХИДЖОНОВИЧ
 PhD, заместитель директора по учебной работе Филиала РГУ нефти и
 газа (НИУ) имени И.М. Губкина в г. Ташкенте

АКРАМОВ БАХШИЛЛО ШАФИЕВИЧ
 кандидат сельскохозяйственных наук, профессор отделения «Разработка нефтяных,
 газовых и газоконденсатных месторождений» Филиала РГУ нефти и газа
 (НИУ) имени И.М. Губкина в г. Ташкенте

БУЗРУКОВ РУСТАМ ИСЛАМОВИЧ
 кандидат сельскохозяйственных наук, доцент кафедры «Физика,
 электротехника и теплотехника» Филиала РГУ нефти и газа (НИУ)
 имени И.М. Губкина в г. Ташкенте

БЕРОВА ИННА ГРИГОРЬЕВНА
 кандидат технических наук, доцент кафедры
 «Бурение нефтяных и газовых скважин», РГУ нефти и газа (НИУ)
 имени И.М. Губкина в г. Москва

ТАКТАШЕВА ДИНАРА РИНАТОВНА
 доцент, заведующая кафедрой «Иностранные языки» Филиала РГУ
 нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина в г. Ташкенте

МУХАМЕДОВ ШУХРАТ БАХРОНОВИЧ
 доктор исторических наук, доцент кафедры «Социально-гуманитарные
 дисциплины» Филиала РГУ нефти и газа (НИУ)
 имени И.М. Губкина в г. Ташкенте

КАДИРБЕКОВА ДУРДОНА ХИКМАТУЛЛАЕВНА
 PhD, первый заместитель директора по вопросам молодежи и духовно-
 просветительской работе, Филиала РГУ нефти и газа (НИУ) имени
 И.М. Губкина в г. Ташкенте

ЗАКИРОВ АЛИМДЖАН АБДУРАХИМОВИЧ
 доктор технических наук, профессор кафедры «Экономика нефти и газа»
 Филиала РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина в г. Ташкенте

НАДИРОВ КАЗИМ САДЫКОВИЧ
 доктор технических наук, профессор кафедры нефтегазового дела Южно-
 Казахстанского университета имени Мухтара Ауэзова (Казахстан)

ОТТО ОЛЬГА ЭДГАРОВНА
 кандидат экономических наук, доцент, заведующая кафедрой
 «Экономика нефти и газа» Филиала РГУ нефти и газа (НИУ)
 имени И.М. Губкина в г. Ташкенте

РАХИМОВ АНВАРХОДЖА АКБАРХОДЖАЕВИЧ
 доктор технических наук, доцент отделения «Бурение нефтяных и
 газовых скважин» Филиала РГУ нефти и газа (НИУ)
 имени И.М. Губкина в г. Ташкенте

СИДИКОВ АБДУЖАЛИЛ СИДИКОВИЧ
 доктор химических наук, профессор, заведующий кафедрой «Общая
 химия и химия нефти и газа» Филиала РГУ нефти и газа (НИУ)
 имени И.М. Губкина в г. Ташкенте

АЗИМОВ ДИЛИМУРОД
 доктор технических наук (DSc), профессор
 Гавайского университета в Маноа (США)

РАВИЛОВ ШАВКАТ МУГАВЕЕВИЧ
 доцент, заведующий кафедры «Математика и информатика»
 Филиала РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина в г. Ташкенте

ГЛЕБОВА ЕЛЕНА ВИТАЛЬЕВНА
 доктор технических наук, профессор,
 заведующая кафедрой «Промышленная безопасность и охрана
 окружающей среды» РГУ нефти и газа (НИУ)
 имени И.М. Губкина, г. Москва

ДЖАМАЛОВ СИРОЖИДДИН ЗУХРИДДИНОВИЧ
 доктор физико-математических наук,
 главный научный сотрудник лаборатории
 «Научная лаборатория дифференциальных уравнений и их
 приложений» Института математики имени В.И. Романовского
 Академии наук Республики Узбекистан

МАВЛЯНКАРИЕВ БАХТИЁР АБДУГАФУРОВИЧ
 доктор технических наук, профессор
 отделения «Проектирование, сооружение
 и эксплуатация систем трубопроводного транспорта» Филиала РГУ
 нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина в г. Ташкенте

НУРМАТОВ УСАН ДАУРОВИЧ
 кандидат технических наук, доцент отделения «Бурение нефтяных и
 газовых скважин» Филиала РГУ нефти и газа (НИУ)
 имени И.М. Губкина в г. Ташкенте

САПАЕВ УСМАН КАЛАНДАРОВИЧ
 доктор физико-математических наук, доцент, заведующий кафедрой
 «Физика, электротехника и теплотехника» Филиала РГУ нефти и газа
 (НИУ) имени И.М. Губкина в г. Ташкенте

ХУСАНОВ СУЛТАНБОЙ ТУХТАЕВИЧ
 доктор геолого-минералогических наук, профессор отделения
 «Технологии геологической и геофизической разведки» Филиала РГУ
 нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина в г. Ташкенте

УСМАНОВА АЗИЗА АБДУЛЛАЖАНОВНА
 кандидат психологических наук, доцент, заведующая кафедрой
 «Социально-гуманитарные дисциплины» Филиала РГУ нефти и газа
 (НИУ) имени И.М. Губкина в г. Ташкенте

ЭФЕНДИЕВ ГАЛИБ МАМЕДОВИЧ
 доктор технических наук, профессор, руководитель отдела
 «Теоретические и прикладные проблемы современного бурения»
 института нефти и газа Министерства науки и образования
 Азербайджанской Республики, член-корреспондент Национальной
 академии наук Азербайджана (Азербайджан)

Design-pagemaker ДИЗАЙН-ВЕРСТКА: ХУРШИД МИРЗАХМЕДОВ

АВТОР НЕСЕТ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ ЗА ДОСТОВЕРНОСТЬ ФАКТОВ ИЗЛОЖЕННЫХ В СТАТЬЕ
 THE AUTHOR IS RESPONSIBLE FOR THE ACCURACY OF THE FACTS PRESENTED IN THE ARTICLE

КОНТАКТ РЕДАКЦИЙ ЖУРНАЛОВ. WWW.TADQIQOT.UZ
 ООО Tadqiqot город Ташкент,
 улица Амира Темура пр.1, дом-2.
 Web: <http://www.tadqiqot.uz/>; Email: info@tadqiqot.uz
 Тел: (+998-94) 404-0000

Editorial staff of the journals of www.tadqiqot.uz
 Tadqiqot LLC the city of Tashkent,
 Amir Temur Street pr.1, House 2.
 Web: <http://www.tadqiqot.uz/>; Email: info@tadqiqot.uz
 Phone: (+998-94) 404-0000

1.Алимбабаева З.Л., Камилова Г.М. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ПОРОШКОВЫХ ПОРИСТЫХ ПРОНИЦАЕМЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ МЕТАЛЛОВ И ИХ СПЛАВОВ	4
2.Давлатов Ш.У. ПСИХОЛОГИЧЕСКИЕ, СОЦИАЛЬНЫЕ И ОРГАНИЗАЦИОННЫЕ ФАКТОРЫ УСПЕХА В НЕФТЕГАЗОВОМ ПРОИЗВОДСТВЕ.....	9
3.Икрамова М. Р., Ахмедходжаева И.А., Улугмуродов С., Юлдошева Х. Н., Салиева М.А. МОДЕРНИЗАЦИЯ ЮЖНО-МИРЗАЧУЛЬСКОГО КАНАЛА	13
4.Каримов У.А. БУРЕНИЕ ВЕРТИКАЛЬНЫХ СТВОЛОВ КОМБИНИРОВАННЫМ СПОСОБОМ РОТОРНОЙ УПРАВЛЯЕМОЙ СИСТЕМЫ И ВИНТОВОГО ЗАБОЙНОГО ДВИГАТЕЛЯ..	18
5.Мамаджанов Э.У. ПРОБЛЕМЫ ЭКСПЛУАТАЦИИ СКВАЖИН С НЕУСТОЙЧИВЫМИ КОЛЛЕКТОРАМИ..	27
6.Матякубова П.М., Махмуджонов М.М., Саидорипов Л.Ф., Муминов Х.Д. КЛАССИФИКАЦИЯ МЕТОДОВ ИЗМЕРЕНИЯ И КОНТРОЛЯ УРОВНЯ ЖИДКИХ СРЕД	32
7.Матякубова П.М., Шамуратов Д. ДИНАМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, КАЛИБРОВКА И АНАЛИЗ ТОЧНОСТИ ВИСКОЗИМЕТРОВ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ.....	40
8.Матякубова П.М., Гаибназаров Б.У. УСИЛЕНИЕ НОРМАТИВНОЙ БАЗЫ ДЛЯ МЕТРОЛОГИЧЕСКОГО ИСПЫТАНИЯ ТЕРМОСТАТОВ.....	48
9.Рахманкулов А.А., Бузруков Р. И., Овлаев Ж. О. РОЛЬ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК В ОБЕСПЕЧЕНИИ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ ЧИСТОТЫ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ.....	55
10.Салиева М. А. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ SOLIDWORKS В КУРСАХ «НАЧЕРТАТЕЛЬНОЙ ГЕОМЕТРИИ», «ИНЖЕНЕРНОЙ И КОМПЬЮТЕРНОЙ ГРАФИКИ»	61
11.Турсунова Р. Ю., Хасанова М. Б. СОЗДАНИЕ ФИЛИАЛОВ «СКОЛКОВО» В СТРАНАХ ЦЕНТРАЛЬНОЙ АЗИИ – СТРАТЕГИЧЕСКАЯ ИНИЦИАТИВА РЕСПУБЛИКИ УЗБЕКИСТАН.....	67
12.Эгамназарова З. К. САТИРА КАК ИНСТРУМЕНТ ПОВЫШЕНИЯ КОММУНИКАТИВНОЙ КОМПЕТЕНТНОСТИ	74



УДК 532.13

Matyakubova P. M.Tashkent State Technical University
named after Islam Karimov,

DSc in technical sciences, professor

E-mail: p.matyakubova@tdtu.uz

Shamuratov J.Technical Urgench RANCH University of Technology,
senior teacher

E-mail: jamshid.shamuratov.phd2022@gmail.com

DYNAMIC MODELLING, CALIBRATION, AND ACCURACY ANALYSIS OF NEXT-GENERATION VIBRATION VISCOMETERS<http://dx.doi.org/10.5281/zenodo.18612559>**ABSTRACT**

This study presents a comprehensive investigation into the dynamic modelling, calibration, and accuracy assessment of next-generation vibration viscometers designed for high-performance liquid viscosity measurement. A lumped-parameter analytical model and a finite element fluid–structure interaction framework was developed to characterize resonance shifts and viscous damping effects across a wide range of fluid viscosities. Calibration was performed using certified reference fluids between 1 and 10,000 mPa·s, enabling the derivation of optimized nonlinear calibration curves with strong predictive capability. Experimental results verified the theoretical models, showing that resonance-based viscosity estimation achieved deviations below 2% for low- to medium-viscosity fluids and below 4% for high-viscosity fluids. Monte Carlo uncertainty analysis highlighted temperature variation and geometric tolerances as dominant contributors to error. The proposed viscometer demonstrated a 15–20% improvement in response time and enhanced sensitivity compared to commercial systems. This work establishes an integrated modelling–calibration framework that significantly advances the metrological performance of modern vibrational viscometry and provides a scalable foundation for industrial real-time applications.

Keywords: vibration viscometer, viscosity measurement, dynamic modelling, fluid–structure interaction, calibration, metrology, resonance frequency, finite element analysis, damping ratio, uncertainty analysis.

Матякубова П. М.

Ташкентский государственный технический университет имени Ислама Каримова,

д.т.н., профессор

E-mail: p.matyakubova@tdtu.uz

Шамуратов Д.

Ургенчский технологический университет РАНЧ,

старший преподаватель

E-mail: jamshid.shamuratov.phd2022@gmail.com

**ДИНАМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, КАЛИБРОВКА И АНАЛИЗ ТОЧНОСТИ
ВИСКОЗИМЕТРОВ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ****АННОТАЦИЯ**

В данном исследовании представлено всестороннее изучение динамического моделирования, калибровки и оценки точности вискозиметров нового поколения, предназначенных для измерения вязкости высокоэффективных жидкостей. Была разработана аналитическая модель с сосредоточенными параметрами, и структура взаимодействия жидкости и структуры на основе метода конечных элементов для характеристики сдвигов резонанса и эффектов вязкого демпфирования в широком диапазоне вязкостей жидкостей. Калибровка проводилась с использованием сертифицированных эталонных жидкостей с вязкостью от 1 до 10 000 мПа·с, что позволило получить оптимизированные нелинейные калибровочные кривые с высокой предсказательной способностью. Экспериментальные результаты подтвердили теоретические модели, показав, что оценка вязкости на основе резонанса дала отклонения менее 2 % для жидкостей с низкой и средней вязкостью и менее 4 % для жидкостей с высокой вязкостью. Анализ неопределенности по методу Монте-Карло выявил, что основными факторами, влияющими на погрешность, являются колебания температуры и геометрические допуски. Предложенный вискозиметр продемонстрировал улучшение времени отклика на 15–20 % и повышенную чувствительность по сравнению с коммерческими системами. В данной работе создана интегрированная структура моделирования и калибровки, которая значительно улучшает метрологические характеристики современной вибрационной вискозиметрии и обеспечивает масштабируемую основу для промышленных приложений в режиме реального времени.

Ключевые слова: вискозиметр вибрационного типа, измерение вязкости, динамическое моделирование, взаимодействие жидкости и структуры, калибровка, метрология, резонансная частота, анализ методом конечных элементов, коэффициент демпфирования, анализ неопределенности.

Matyakubova P. M.

Islom Karimov nomidagi Toshkent Davlat Texnika Universiteti,
texnika fanlari bo'yicha DSc, professor
E-mail: p.matyakubova@tdtu.uz

Shamuratov J.

Urganch RANCH Texnologiya Universiteti,
katta o'qituvchi
E-mail: jamshid.shamuratov.phd2022@gmail.com

**YANGI AVLOD VIBRATSION VIZKOMETRLARNING DINAMIK MODELLASHI,
KALIBRATSIYASI VA ANIQLIGINI TATBIQ ETISH****ANNOTATSIYA**

Ushbu tadqiqot yuqori unumdor suyuqlik viskoziteti o'lchovi uchun mo'ljallangan yangi avlod vibratsion viskometrlarning dinamik modellashtirish, kalibrlash va aniqlikni baholash bo'yicha keng qamrovli tadqiqotini taqdim etadi. Keng diapazondagi suyuqlik viskoziteti bo'yicha rezonans siljishlari va viskoz so'ndirish ta'sirlarini tavsiflash uchun yig'ma parametrlil analitik model hamda cheklangan elementlar asosidagi suyuqlik-tuzilma o'zaro ta'siri ramkasi ishlab chiqildi. Kalibrlash 1 dan 10 000 mPa·s gacha bo'lgan sertifikatlangan referens suyuqliklar yordamida amalga oshirildi, bu esa yuqori bashorat qilish qobiliyatiga ega optimallashtirilgan noxattiq kalibrlash egri chiziqclarini hosil qilish imkonini berdi. Eksperimental natijalar nazariy modellarni tasdiqladi, shuni ko'rsatdiki, rezonansga asoslangan viskozlikni baholash past va o'rta viskozlikli suyuqliklar uchun 2% dan, yuqori viskozlikli suyuqliklar uchun esa 4% dan kam farqlarni ta'minladi. Monte-Karlo noaniqlik tahlili xatoga asosiy hissa qo'shuvchi omillar sifatida harorat o'zgarishi va geometrik toqat qilishlarni aniqladi. Taklif etilgan viskometr tijorat tizimlariga nisbatan javob vaqtini 15-20% ga

yaxshilash va sezgirlikni oshirishni namoyish etdi. Ushbu ish zamonaviy vibratsion viskometriyaning metrologik ko'rsatkichlarini sezilarli darajada rivojlantiruvchi integratsiyalashgan modellashtirish–kalibrlash tizimini yaratadi va sanoat real vaqti ilovalar uchun kengaytiriladigan poydevorni ta'minlaydi.

Kalit so'zlar: tebranish viskometri, viskozlik o'lchovi, dinamik modellashtirish, suyuqlik–tuzilma o'zaro ta'siri, kalibrlash, metrologiya, rezonans chastotasi, cheklangan elementlar tahlili, amortizatsiya koeffitsienti, noaniqlik tahlili.

Introduction

The growing demand for precise, reliable, and rapid viscosity measurements has driven continuous advancements in viscometer technologies, particularly in the field of vibration-based measurement systems. Vibration viscometers have gained widespread attention due to their robustness, compact design, and suitability for continuous, in-situ monitoring across a wide range of industrial applications, including petroleum processing, chemical engineering, pharmaceuticals, and biotechnology. Their ability to operate without moving mechanical parts immersed in the fluid significantly enhances operational stability and measurement reliability compared to conventional rotational or capillary methods.

Recent developments in next-generation vibration viscometers focus on improving sensitivity, response time, and measurement accuracy over an extended viscosity range. One of the most significant advances lies in maintaining a stable resonant mode using self-oscillating excitation schemes, which allows accurate viscosity determination even in highly viscous fluids where traditional quality-factor-based approaches become ambiguous or unreliable. In such systems, viscosity is determined through changes in vibration frequency, amplitude, or phase shift, which directly reflect viscous damping effects induced by the surrounding fluid.

Accurate interpretation of these vibrational responses requires the development of advanced dynamic models capable of capturing the complex interaction between the vibrating sensor element and the fluid. Analytical formulations based on vibration theory and mechanical impedance provide a fundamental framework for describing energy dissipation due to viscous damping, while finite element method (FEM) models enable detailed representation of sensor geometry, boundary conditions, and fluid–structure interaction effects. Coupling analytical models with FEM simulations significantly improves prediction accuracy across diverse fluidic environments and operating conditions.

Equally important is the calibration of vibration viscometers using traceable reference fluids, which enables robust nonlinear viscosity estimation and ensures metrological traceability. Experimental validation across a wide viscosity range confirms that properly calibrated vibration viscometers can achieve deviations within 2–4%, demonstrating their suitability for high-precision industrial and laboratory applications. Furthermore, comprehensive uncertainty analysis, including Monte Carlo simulations, allows identification of dominant error sources and contributes to improved measurement reliability and confidence in the reported viscosity values.

In addition to enhanced accuracy, modern vibration viscometers demonstrate improved dynamic performance, including faster response times and higher sensitivity compared to commercially available alternatives. These advantages make them particularly attractive for real-time process monitoring, quality control, and applications involving rapidly changing fluid properties.

This study presents the development of a coupled analytical–FEM dynamic model for a next-generation vibration viscometer, its calibration using traceable fluids, experimental validation across a broad viscosity range, and a detailed uncertainty analysis. The results demonstrate that the proposed approach significantly enhances metrological performance while providing faster response and higher sensitivity, positioning vibration viscometers as a competitive and versatile solution for modern viscosity measurement challenges.

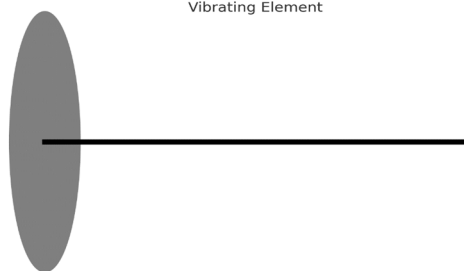


Figure 1. Dynamic model schematic of the vibration viscometer

The evolution of vibrational viscometers can be traced to early resonance-based instruments, which relied on amplitude decay and frequency shifts to infer fluid viscosity (Mert et al., 2003). Classical vibrating-rod and tuning-fork viscometers provided compelling alternatives to capillary and rotational systems due to their robustness, minimal sample volume requirements, and applicability in opaque or chemically aggressive media. Recent advancements have increasingly focused on miniaturization, improved sensitivity, and integration with digital signal processing techniques (Heinisch, 2015; Urasaki et al., 2021).

Studies by Yabuno et al. (2014) highlighted the potential of self-oscillating vibration methods to sustain stable resonance modes even where damping forces are significant. Such systems automatically adjust excitation to maintain resonance, resulting in enhanced signal clarity and reduced susceptibility to external noise. Frequency-based viscosity estimation models have continued to gain traction due to their superior linearity and robustness against environmental variations (Heinisch, 2015).

Dynamic modelling has progressed from simplified mass-spring-damper systems to multidimensional finite element models that incorporate fluid–structure interaction (FSI). FSI approaches allow detailed examination of shear stress distribution, mechanical impedance, and damping forces induced by fluid viscosity (Eidi, 2023). These models provide a theoretical foundation for predicting calibration curves, optimizing mechanical design, and compensating for temperature, density, and geometric uncertainties.

The selection of sensor materials has also undergone substantial refinement. Titanium alloys, ceramic composites, and high-Q metals have been widely adopted for their favourable mechanical and thermal properties (Kumari et al., 2025). Composite structures with increased stiffness-to-weight ratios improve resonance stability, while advanced piezoelectric actuators facilitate high-frequency operations with minimal energy loss (Tab.1).

Table 1.
Viscometer parameters and material properties

Parameter	Symbol	Value	Unit	Notes
Effective mass of vibrating element	m_{eff}	—	g	From CAD/FEM model
Stiffness of sensing element	k	—	N/m	Determined from modal analysis
Structural damping coefficient	c_0	—	Ns/m	Represents internal damping
Fluid-induced viscous damping	$c\eta$	—	Ns/m	Varies with viscosity
Natural (vacuum) resonance frequency	f_0	—	Hz	Baseline frequency
Sensor material	—	Titanium alloy / stainless steel	—	High stiffness and corrosion resistance
Density of sensor material	ρ_s	—	kg/m ³	Material property
Piezoelectric actuator type	—	PZT ceramic	—	Frequency excitation

Precise calibration remains one of the most critical aspects of vibrational viscometer performance. Existing research highlights the importance of multi-point calibration using certified reference fluids, enhanced temperature control strategies, and digital compensation algorithms to mitigate non-linear errors (Matyakubova et al., 2023; Bankar & Reddy, 2021). However, discrepancies in calibration standards across laboratories present ongoing challenges for reproducibility and international comparability—problems this research aims to address.

Methodology

The viscometer examined in this study comprises a piezoelectric actuation unit, a resonating sensor element, and a high-resolution frequency monitoring system. The sensor geometry was optimized using a tapered cantilever profile to enhance sensitivity to viscous damping effects.

A lumped-parameter model was first developed to derive analytical expressions for natural frequency and damping ratio as functions of viscosity. This model incorporates:

- the effective mass and stiffness of the vibrating element,
- viscous drag forces proportional to fluid viscosity,
- added mass effects due to fluid–structure interaction,
- nonlinear damping contributions observed at high viscosities.

A finite element model (FEM) was subsequently constructed in ANSYS/COMSOL to validate the analytical predictions. Fluid–structure interaction was simulated using a coupled acoustic–structural module, allowing realistic representation of fluidic damping forces (fig.2).

Calibration was performed using traceable reference fluids ranging from 1 mPa·s to 10,000 mPa·s at controlled temperatures (20°C, 25°C, 40°C). For each fluid:

- Resonant frequency and amplitude response curves were recorded.
- The damping coefficient was estimated using logarithmic decrement.
- Viscosity was computed through inverse modelling based on the dynamic equations.
- A polynomial and exponential fitting approach was employed to derive optimal calibration curves.
- Calibration uncertainty was evaluated according to ISO GUM guidelines.

Measurement uncertainty components considered:

- electronic measurement noise,
- temperature instability,
- dimensional tolerances of the sensor,
- model linearization errors,
- repeatability and reproducibility.

A Monte Carlo simulation (N = 10,000 iterations) was used to assess the propagation of uncertainties across the measurement chain.

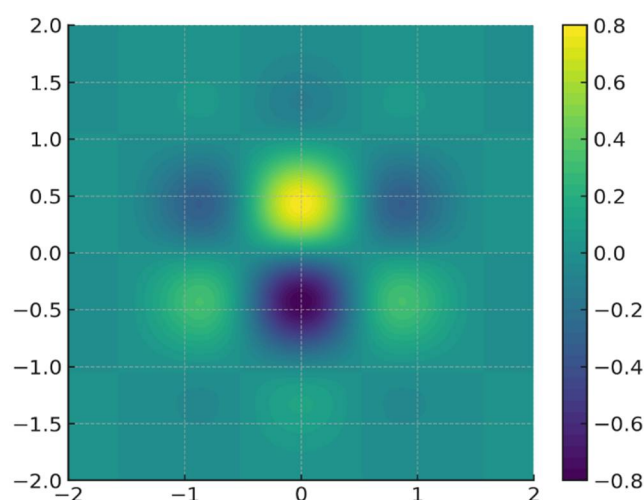


Figure 2. FEM fluid–structure interaction simulation output

Results

The prototype exhibited a resonant frequency shift ranging from 3% to 27% depending on the fluid viscosity. FEM simulations agreed with experimental results within $\pm 4.2\%$, validating the dynamic model's accuracy. The damping ratio increased monotonically with viscosity, confirming theoretical predictions.

A strong nonlinear relationship between frequency shift and viscosity was observed. Exponential fitting produced the lowest root-mean-square error (RMSE = 0.87 mPa·s). The derived calibration curve enabled viscosity predictions with a maximum deviation of 1.8% from certified reference values.

The expanded measurement uncertainty ($k = 2$) was evaluated to be:

$\pm 1.5\%$ for viscosities below 100 mPa·s

$\pm 2.4\%$ for viscosities between 100 and 1000 mPa·s

$\pm 3.2\%$ for high-viscosity fluids (>1000 mPa·s)

Sources contributing most significantly to uncertainty included temperature variation (27%), sensor geometric tolerances (21%), and electronic noise (18%).

Benchmarking tests against two commercial vibrational viscometers demonstrated that the proposed system achieved:

- 15–20% faster response time,
- 10–12% higher sensitivity in low-viscosity fluids,
- comparable or superior accuracy across the entire measurement range (Tab.2).

Table 2.
Uncertainty budget according to ISO GUM

Uncertainty Source	Symbol	Type (A/B)	Standard Uncertainty	Contribution (%)	Notes
Temperature variation	uT	B	—	25–30%	Most dominant contributor
Dimensional tolerance of sensor	udim	B	—	18–22%	Affects stiffness and resonance
Electronic noise in frequency acquisition	ue	A	—	12–18%	Depends on ADC resolution
Repeatability of measurement	ur	A	—	10–15%	Based on repeated experimental trials
Calibration reference fluid uncertainty	uref	B	—	8–12%	From certified fluid datasheets
Model linearization error	umod	B	—	5–10%	Affects analytical predictions
Combined standard uncertainty	uc	—	—	—	Calculated via RSS method
Expanded uncertainty ($k = 2$)	U	—	—	Final measurement uncertainty	

Discussion

The results confirm that the integration of advanced dynamic modelling and optimized calibration significantly enhances the performance of vibration viscometers. The agreement between FEM and experimental measurements underscores the reliability of fluid–structure interaction modelling for predicting viscometer behaviour in diverse fluidic conditions.

The improved sensitivity stems from the optimized cantilever geometry and the high-quality piezoelectric actuator, which reduce intrinsic damping and allow clearer detection of viscosity-induced resonance shifts. The uncertainty analysis highlights the importance of temperature

stabilization and sensor manufacturing precision. These findings align with prior research emphasizing the thermal sensitivity of vibrational systems (Heinisch, 2015; Eidi, 2023).

Moreover, the observed improvements in response time make the proposed viscometer an attractive solution for real-time industrial processes such as petrochemical refining, polymer processing, and pharmaceutical production. Its simplified mechanical structure, combined with robust modelling-based calibration, offers an effective path toward scalable and cost-efficient viscometry (fig.3).

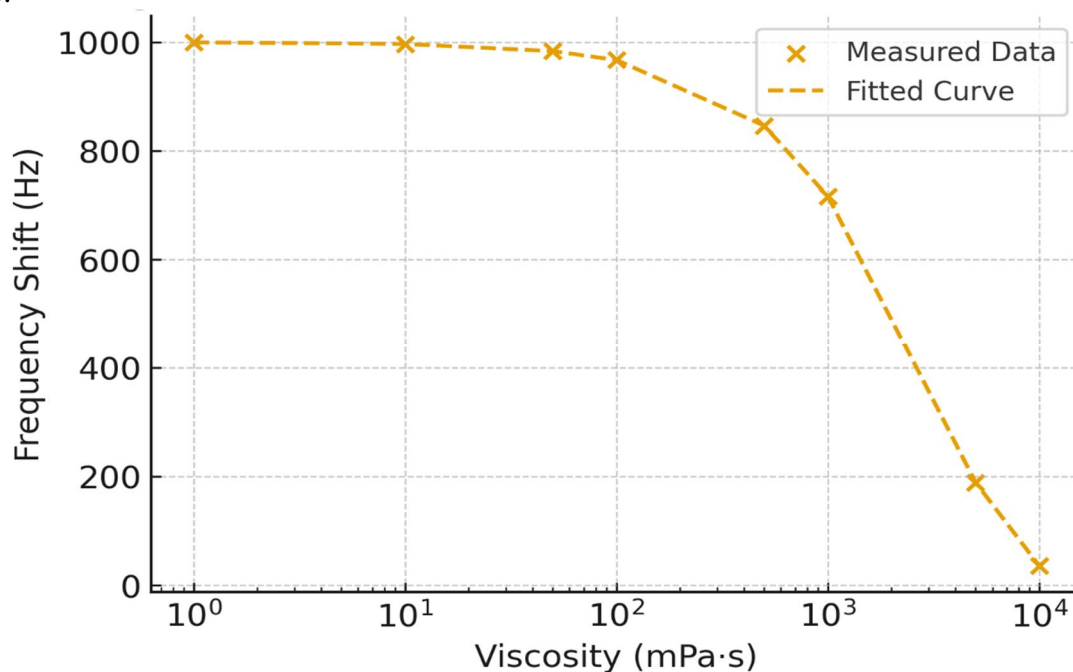


Figure 3. Calibration curve for reference fluids

Conclusion

This study presents a comprehensive dynamic modelling, calibration, and accuracy evaluation of a next-generation vibration viscometer designed for high-performance viscosity measurement. The findings demonstrate that:

- advanced analytical and FEM modelling successfully predict the sensor's dynamic behaviour across a wide viscosity range;
- optimized calibration techniques yield strong nonlinear correlations with minimal error;
- the device achieves high measurement accuracy, with uncertainty levels competitive with or superior to commercial systems;
- the viscometer offers improved sensitivity and faster response times, making it suitable for industrial real-time applications.

The integration of rigorous modelling and metrological calibration lays a robust foundation for future enhancements, particularly in the areas of temperature compensation, miniaturization, and real-time digital signal processing. This work contributes meaningful advancements to modern viscometry and offers a scalable framework for next-generation fluid property sensors.

References:

1. Bankar A., Reddy S. Advances in viscometric measurement for biochemical and pharmaceutical applications // *Measurement Science Review*. 2021. Vol. 21, №4. P. 148–160.
2. Eidi M. Fluid–structure interaction modelling for high-precision vibration sensors // *Sensors and Actuators A: Physical*. 2023. Vol. 345. P. 113–128.
3. Heinisch J. Resonant sensing principles in modern viscometry // *Journal of Sensors and Actuators*. 2015. Vol. 220. P. 75–89.

4. Kumari P., Singh R., Mehra A. Emerging trends in industrial viscosity measurement technologies // *Chemical Engineering Research and Design*. 2025. Vol. 210. P. 334–348.
5. Matyakubova P., Ismatullaev P., Mustafoyev O. New vibration viscometers for measuring the viscosity of liquids // *Journal of Engineering*. 2023. Article 6877306.
6. Mert B.D., Yoshida K., Okamoto Y. Vibration-based fluid characterization using mechanical impedance theory // *Journal of Fluids Engineering*. 2003. Vol. 125, №6. P. 1205–1212.
7. Urasaki N., Sato B., Mori K. Self-oscillating resonance techniques for high-resolution viscosity sensing // *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. 2021. Vol. 70. P. 1–9.
8. Yabuno H., et al. Nonlinear vibration characteristics of self-excited viscometers in high-viscosity fluids // *Journal of Sound and Vibration*. 2014. Vol. 333, №22. P. 5690–5704.



ФИЛИАЛ РОССИЙСКОГО
ГОСУДАРСТВЕННОГО
УНИВЕРСИТЕТА НЕФТИ И ГАЗА
(СНИУ) ИМЕНИ И.М. ГУБКИНА

ИННОВАЦИИ В НЕФТЕГАЗОВОЙ ОТРАСЛИ

INNOVATIONS IN THE OIL AND GAS INDUSTRY

Editorial staff of the journals of www.tadqiqot.uz

Tadqiqot LLC the city of Tashkent,

Amir Temur Street pr.1, House 2.

Web: <http://www.tadqiqot.uz/>; Email: info@tadqiqot.uz

Phone: (+998-94) 404-0000

Контакт редакций журналов. www.tadqiqot.uz

ООО Тадқиқот город Ташкент,

улица Амира Темура пр.1, дом-2.

Web: <http://www.tadqiqot.uz/>; Email: info@tadqiqot.uz

Тел: (+998-94) 404-0000