

EDN: BGZTXI

УДК 532.137.3

## Using a Tuning Fork Sensor to Measure Viscosity in a Closed Volume

Ivan S. Kozhevnikov\* and Andrey V. Bogoslovsky  
*Institute of Petroleum Chemistry  
Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences  
Tomsk, Russian Federation*

Received 24.10.2023, received in revised form 13.01.2024, accepted 22.01.2024

**Abstract.** The original design of a laboratory viscosity sensor of the tuning fork type is considered, consisting of a tuning fork bracket, to the base of which, through a liquid-impermeable membrane, measuring probes (test bodies) are attached, which are immersed in the test liquid during the measurement process. The membrane divides the internal space of the composite housing shell into two volumes, one of which is measuring; Electromechanical transducers are attached to the branches of the tuning fork bracket, which provide excitation of oscillations of the measuring system and registration of the output signal changing during the experiment. The design of the viscosity sensor provides for its installation on the horizontal movable platform of the universal stand-stand of the vibration viscometer “Reokinetics” with fixation on the sliders, and also provides the possibility of connecting an external circulation thermostat. The proposed design of a viscosity sensor can be used in the development of measuring systems designed to monitor the rheological state of metastable liquids in a closed measuring volume, including evaporating and toxic liquids, as well as gel-forming compositions used in enhanced oil recovery technologies to limit water inflow and redistribute filtration flows, which are initially low-viscosity Newtonian fluids, which after injection into the formation form a gel after a given time. The results of measurements of the viscosity of standard hydrocarbon liquids in a closed measuring volume are presented; It has been established that the dependence of the output signal of the proposed sensor included in the control circuit of the vibration viscometer “Reokinetics” on the square root of the product of the viscosity and density of the liquid under study is linear; The sensitivity of the sensor was determined, the value of which is  $0.1 \text{ V} \cdot (\text{kg} \cdot \text{Pa} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-3})^{-0.5}$ .

**Keywords:** vibration viscometry, gel-forming compositions, tuning fork.

**Acknowledgements.** The work was carried out within the framework of the state assignment of the IKH SB RAS, funded by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (R&D No. 121031500048–1).

---

© Siberian Federal University. All rights reserved

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0).

\* Corresponding author E-mail address: [www.tsu@gmail.com](mailto:www.tsu@gmail.com)



## Использование камертонного датчика для измерения вязкости в закрытом объеме

**И. С. Кожевников, А. В. Богословский**

*Институт химии нефти  
Сибирского отделения Российской академии наук  
Российская Федерация, Томск*

**Аннотация.** Рассмотрена оригинальная конструкция лабораторного датчика вязкости камертонного типа, состоящего из скобы камертона, к основанию которой через непроницаемую для жидкости мембрану присоединены измерительные зонды (пробные тела), которые в процессе измерения погружаются в исследуемую жидкость. Мембрана делит внутреннее пространство составной обечайки корпуса на два объема, один из которых – измерительный; к ветвям скобы камертона присоединены электромеханические преобразователи, которые обеспечивают возбуждение колебаний измерительной системы и регистрацию изменяющегося во время эксперимента выходного сигнала. Конструкция датчика вязкости предусматривает его установку на горизонтальную подвижную платформу универсального стенд-штатива вибрационного вискозиметра «Реокинетика» с фиксацией на ползунах, а также обеспечивает возможность присоединения внешнего циркуляционного термостата. Предлагаемая конструкция датчика вязкости может быть использована при разработке измерительных комплексов, предназначенных для контроля реологического состояния метастабильных жидкостей в закрытом измерительном объеме, в том числе испаряющихся и токсичных жидкостей, а также гелеобразующих составов, используемых в технологиях увеличения нефтеотдачи для ограничения водопритока и перераспределения фильтрационных потоков, представляющих собой изначально маловязкие ньютоновские жидкости, которые после закачки в пласт через заданное время образуют гель. Приведены результаты измерений вязкости стандартных углеводородных жидкостей в замкнутом измерительном объеме; установлено, что зависимость выходного сигнала предлагаемого датчика, включенного в схему управления вибрационного вискозиметра «Реокинетика», от квадратного корня из произведения вязкости и плотности исследуемой жидкости имеет линейный характер; определена чувствительность датчика, величина которой составляет  $0,1 \text{ В} \cdot (\text{кг} \cdot \text{Па} \cdot \text{с} \cdot \text{м}^{-3})^{-0,5}$ .

**Ключевые слова:** вибрационная вискозиметрия, гелеобразующие составы, камертон.

**Благодарности.** Работа выполнена в рамках государственного задания ИХН СО РАН, финансируемого Министерством науки и высшего образования Российской Федерации (НИОКТР № 121031500048–1).

Цитирование: Кожевников И. С. Использование камертонного датчика для измерения вязкости в закрытом объеме / И. С. Кожевников, А. В. Богословский // Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии, 2024, 17(1). С. 6–13. EDN: BGZTXI

### Введение

В условиях роста доли трудноизвлекаемых запасов актуальны работы, посвященные физико-химическим методам повышения нефтеотдачи пластов [1–9]. В пласт закачиваются специально разработанные гелеобразующие составы, обеспечивающие ограничение водо-

притока в добывающие скважины, выравнивание профиля приемистости для нагнетательных скважин, а также создание в пласте гелевых экранов для перераспределения фильтрационных потоков. Эти мероприятия проводятся, как правило, на месторождениях, находящихся на поздней стадии разработки, направлены на повышение коэффициента нефтеизвлечения, приводят к снижению обводненности добываемой продукции.

При лабораторных исследованиях по разработке гелеобразующих систем в ходе их применения на промысле существует потребность в исследовании и контроле динамики изменения реологических свойств объекта, однако методы классической реологии к таким системам применимы ограниченно. Наиболее перспективны неразрушающие формирующуюся структуру методы, основанные на колебательном режиме движения пробного тела – вибрационные вискозиметры и реометры, работающие в режиме осцилляции [10, 11]. Дополнительным преимуществом вибрационной вискозиметрии является широкий диапазон измерения вязкости, позволяющий в одном эксперименте охватить изменение вязкости образца при его эволюции от маловязкой ньютоновской жидкости до нетекучего структурированного геля; серийно выпускаемые устройства, позволяющие проводить измерения в осцилляционном режиме, хорошо подходят для характеристики сформировавшегося геля, однако недостаточно чувствительны в области малых вязкостей.

### Техника и методика эксперимента

Для контроля реологического состояния метастабильных технологических жидкостей, в том числе закачиваемых в нефтяной пласт гелеобразующих составов, могут быть использованы вибрационные датчики вязкости [12–14]. Их выходной сигнал пропорционален  $(\rho \cdot \eta)^{1/2}$  контролируемой жидкости, где  $\rho$  – плотность жидкости, а  $\eta$  – ее вязкость, однако высокочастотные камертонные устройства в традиционном варианте исполнения [15] не предназначены для измерений в закрытом объеме. Это ограничивает их применение, поскольку некоторые исследуемые составы могут быть токсичны либо содержать низкомолекулярный растворитель, испаряющийся в условиях эксперимента, и такие измерения желательно проводить в системе замкнутого объема.

Как правило, в составе такого рода девайсов выделяют собственно вибратор (обычно электрически управляемый) и пробное тело – зонд, непосредственно контактирующий с жидкостью в процессе измерения. Камертонные вискозиметры содержат в составе собственно тело камертона в виде скобы, сложная форма которой создает различные варианты присоединения зонда к разным точкам ее поверхности. Перспективным представляется симметричное присоединение зондов к основанию подвешенной на растяжках скобы (рис. 1) таким образом, что они являются продолжением ее ветвей [16], на которых расположены области возбуждения и контроля движения.

В процессе измерения зонды с пробными телами погружаются в открытый сверху сосуд. Это осложняет возможность измерения токсичных и испаряющихся во время эксперимента, жидкостей. Для устранения указанного недостатка очевидно использование закрытого измерительного объема, при этом колебательное движение должно быть передано зондам через непроницаемую для жидкости поверхность.

Так как области возбуждения и контроля движения рассматриваемого вертикально ориентированного датчика и пробные тела на концах зондов находятся по разные стороны плоскости

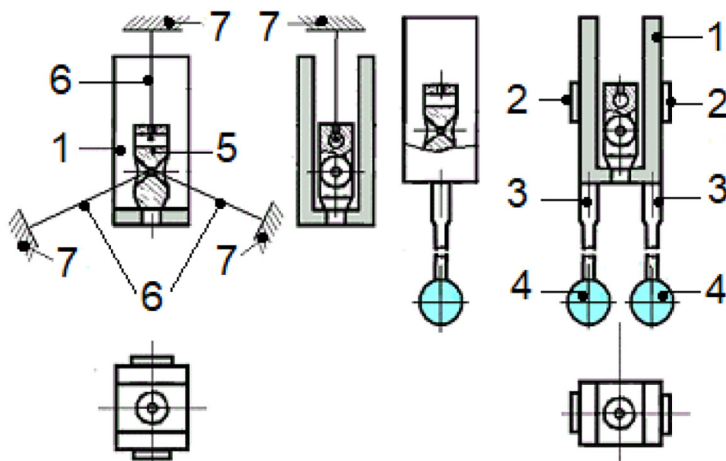


Рис. 1. Подвес скобы на растяжках (слева) и присоединение пробных тел к основанию камертона (справа): 1 – скоба, 2 – пьезокерамика, 3 – зонд, 4 – пробное тело, 5 – ось камертона, 6 – растяжка, 7 – масса (корпус датчика)

Fig. 1. Taut-band suspension of the fork (at the left) and attachment of test bodies to the base of the tuning fork (at the right): 1 – fork, 2 – piezoceramics, 3 – probe, 4 – test body, 5 – axis of the tuning fork, 6 – taut, 7 – mass (sensor body)

основания скобы, очевидным техническим решением является введение в состав устройства параллельной основанию разделительной стенки.

В конструкции, приведенной на рис. 2, корпус – составная обечайка разделен непроницаемой для жидкости перегородкой на два объема, один из которых является измерительным [17].

Электромеханические преобразователи установлены на ветвях скобы камертона, которая плоским основанием ориентирована к перегородке. Два цилиндрических зонда находятся в измерительном объеме по другую сторону перегородки и через отверстия в ней соединены с основанием скобы камертона. Для уменьшения площади контакта между основанием камертона и перегородкой, в местах установки зондов присутствуют две шайбы минимальной толщины, отодвигающие камертон от перегородки на минимальное расстояние, чтобы исключить возможность их соприкосновения при механических колебаниях, а площадь указанных шайб много меньше площади основания камертона.

К ножкам камертона симметрично приклеены электромеханические преобразователи из керамики ЦТС-19, соединенные проводами со схемой управления.

Мы использовали приведенную конструкцию в сочетании со схемой управления вискозиметра «Реокинетика», устройство которого описано в [18–20]. Автогенератор схемы управления обеспечивает возбуждающее напряжение резонансной частоты в диапазоне от 100 до 1000 Гц, поддерживает постоянную амплитуду движения камертона и формирует соответствующий аналоговый сигнал, который пропорционален механической нагрузке и величине  $(\eta \cdot \rho)^{1/2}$  контролируемой среды. При не заполненном измерительном объеме, когда зонды находятся в воздухе, её значение соответствует 0.

Указанный сигнал измеряли при заполнении объема датчика органическими жидкостями с известными значениями вязкости и плотности при комнатной температуре.

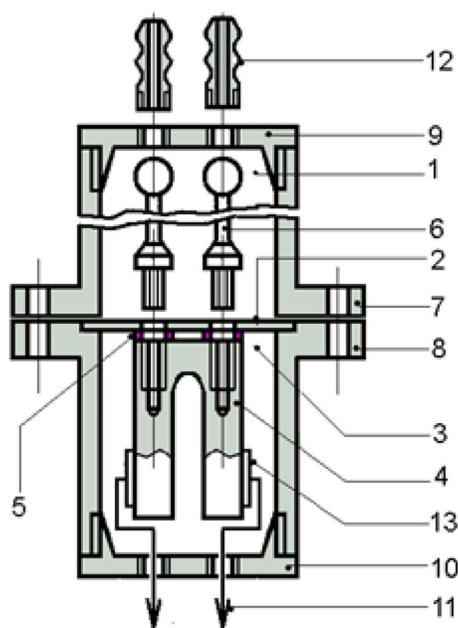


Рис. 2. Камертонный датчик вязкости: 1 – измерительный объем, 2 – перегородка, 3 – объем скобы, 4 – камертон, 5 – шайба, 6 – зонд, 7 и 8 – части обечайки, 9 – крышка с штуцерами, 10 – крышка с проводами, 11 – провод, 12 – штуцер, 13 – пьезокерамика

Fig.2. Tuning fork viscosity sensor. 1 – test volume, 2 – membrane, 3 – volume of the fork, 4 – tuning fork, 5 – washer, 6 – probe, 7 and 8 – parts of the body shell, 9 – cover with fittings, 10 – cover with wires, 11 – wire, 12 – fitting, 13 – piezoceramics

Измерения проводили в следующей последовательности:

1. Включили схему управления.
2. Сняли крышку измерительного объема.
3. Промыли и просушили измерительный объем и зонды.
4. Установили крышку измерительного объема.
5. Измерили  $U_0$  при незаполненном измерительном объеме.
6. Измерительный объем заполнили 40 мл декана.
7. Измерили  $U$  при заполненном измерительном объеме.
8. Слили декан.
9. Промыли и просушили измерительный объем и зонды.
10. Измерили  $U_0$  при незаполненном измерительном объеме.
11. Измерительный объем заполнили 40 мл диэтилфталата.
12. Измерили  $U$  при заполненном измерительном объеме.
13. Слили диэтилфталат.
14. Промыли и просушили измерительный объем и зонды.
15. Измерили  $U_0$  при незаполненном измерительном объеме.
16. Измерительный объем заполнили 40 мл циклогексанола.
17. Измерили  $U$  при заполненном измерительном объеме.
18. Слили циклогексанол.

19. Промыли и просушили измерительный объем и зонды.

20. Измерили  $U_0$  при незаполненном измерительном объеме.

В результате получена зависимость  $U = U_{ж} - U_0$  от заполняющей жидкости (рис. 3). Точки на графике соответствуют: 1 – декану, 2 – диэтилфталату, 3 – циклогексанолу.

### Результаты и их обсуждение

На рис. 3. представлена зависимость выходного сигнала датчика от величины заполняющей жидкости (калибровочная кривая датчика). Зависимость имеет линейный вид ( $R=0,99$ ), а определенная по графику чувствительность равна  $0,1 \text{ В} \cdot (\text{кг} \cdot \text{Па} \cdot \text{с} \cdot \text{м}^{-3})^{-0,5}$ . Такая чувстви-

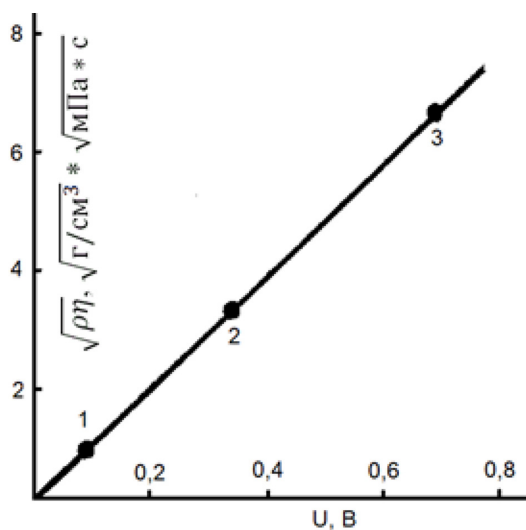


Рис. 3. Зависимость между выходным напряжением датчика и  $(\eta \cdot \rho)^{1/2}$  заполняющей жидкости

Fig. 3. Relationship between sensor output voltage and  $(\eta \cdot \rho)^{1/2}$  of the fill fluid

тельность позволяет использовать датчик для контроля вязкости маловязких ньютоновских жидкостей, а также для реокинетических измерений в метастабильных, склонных к образованию структуры системах.

### Заключение

Таким образом, рассмотрена конструкция камертонного датчика, позволяющего проводить измерения стационарной и изменяющейся вязкости образца в замкнутом измерительном объеме. Датчики предлагаемой конструкции могут быть использованы при разработке измерительных комплексов контроля реологического состояния метастабильных жидкостей, в том числе гелеобразующих составов, используемых в технологиях увеличения нефтеотдачи для ограничения водопритока и перераспределения фильтрационных потоков. Установлено, что зависимость выходного сигнала предлагаемого датчика от величины имеет линейный характер, а чувствительность датчика составляет  $0,1 \text{ В} \cdot (\text{кг} \cdot \text{Па} \cdot \text{с} \cdot \text{м}^{-3})^{-0,5}$ .

## Список литературы / References

- [1] Муслимов Р.Х. *Нефтеотдача – прошлое, настоящее, будущее*. Казань: ФЭН, 2012. 664 с. [Muslimov R. X. *Oil recovery: Past, Present, Future*. Kazan': FÉN, 2012. 664 p. (in Rus.)]
- [2] Romero-Zeron L. *Chemical Enhanced Oil Recovery (cEOR) – a Practical Overview*. London: InTechOpen Limited, 2016. 200 p.
- [3] Алтунина Л.К., Кувшинов В.А. Физико-химические методы увеличения нефтеотдачи пластов нефтяных месторождений (обзор), *Успехи химии*, 2007, 76(10), 1034–1052 [Altunina L. K., Kuvshinov V. A. Physico-chemical methods for enhanced oil recovery of oil fields (review), *Russian Chemical Reviews*, 2007, 76(10), 1034–1052 (in Rus.)]
- [4] Шрамм Лорье Л. *Поверхностно-активные вещества в нефтегазовой отрасли. Состав, свойства, применение: пер. с англ. яз. под ред. М.С. Подзоровой, В.Р. Магадова*, СПб.: ЦОП «Профессия», 2018, 592 с. [Laurier L. Schramm, *Surfactants in the oil and gas industry. Compositions, properties, applications*. St. Petersburg: TsOP «Professiya», 2018, 592 p. Edited and Translated from English to Russian by Podzorova M. S. and Magadova V. R. (in Rus.); Original Editon: Laurier L. Schramm, *Surfactants: Fundamentals and Applications in the Petroleum Industry*]
- [5] Муслимов Р.Х. Повышение нефтеотдачи пластов – приоритетное направление развития нефтяной отрасли современной России, *Нефть. Газ. Новации*, 2013, 4(171), 63–73 [Muslimov R. Kh. Enhanced oil recovery is a priority direction for the development of the oil industry in modern Russia, *Neft. Gaz. Novacii*, 2013, 4(171), 63–73 (In Rus.)]
- [6] Рузин Л.М., Морозюк О.А., Дуркин С.М. Особенности и инновационные направления освоения ресурсов высоковязких нефтей, *Нефтяное хозяйство*, 2013, 8, 51–53 [Ruzin L. M., Morozyuk O. A., Durkin S. M. Features and innovative directions for the development of high-viscosity oil resources, *Oil Industry*, 2013, 8, 51–53 (In Rus.)]
- [7] Алтунина Л.К., Кувшинов В.А., Стасьева Л.А., Кувшинов И.В. Увеличение нефтеотдачи залежей высоковязких нефтей кислотными композициями на основе поверхностно-активных веществ, координирующих растворителей и комплексных соединений, *Георесурсы*, 2019, 21(4), 103–113 [Altunina L. K., Kuvshinov V. A., Stasyeva L. A., Kuvshinov I. V. Enhanced high-viscosity oil recovery using acid compositions based on surfactants, coordinating solvents, and complex compounds, *Georesources*, 2019, 21(4), 103–113 (In Rus.)]
- [8] Кувшинов И.В, Кувшинов В.А., Алтунина Л.К. Применение термотропных композиций для повышения нефтеотдачи, *Нефтяное хозяйство*, 2017, 1, 44–47 [Kuvshinov I. V., Kuvshinov V. A., Altunina L. K. Application of thermotropic compositions for enhanced oil recovery, *Oil industry*, 2017, 1, 44–47 (In Rus.)]
- [9] Alvarado V., Manrique E. Enhanced oil recovery: An update review. *Energies*, 2010, 3(9), 1529–1575.
- [10] Малкин А.Я. *Основы реологии*. СПб.: ЦОП «Профессия», 2018, 336 с. [Malkin A. Ya. *Fundamentals of rheology*. St. Petersburg: TsOP «Professiya», 2018, 336 p. (In Rus.)]
- [11] Шрамм Г. *Основы практической реологии и реометрии*. М.: Колосс, 2003, 311 с. [Shramm G. *Fundamentals of Practical Rheology and Rheometry*. Moskow: Koloss, 2003, 311 p. (In Rus.)]
- [12] Колешко В.М., Сунка В.Я., Полинкова Е.В., Крупская Е.В. *Проектирование интеллектуальных сенсорных систем измерения вязкости*. Минск: изд-во БНТУ, 2010, 81 с.



[Koleshko V. M., Sunka V. Ya, Polynkova E. V., Krupskaya E. V. *Designing intelligent sensor systems for viscosity measurement*. Minsk: BNTU, 2010, 81 p. (In Rus.)]

[13]. Соловьев А. Н., Каплун А. Б. *Вибрационный метод измерения вязкости жидкостей*. Новосибирск: Наука, 1970, 142 с. [Solov'ev A. N., Kaplun A. B. *Vibration method for measuring the viscosity of liquids*. Novosibirsk: Nauka, 1970, 142 p. (In Rus.)]

[14] Крутин В. Н. *Колебательные реометры*. М.: Машиностроение, 1985, 160 с. [Krutin V. N. *Oscillatory rheometers*. Moscow: Mechanical engineering, 1985, 160 p. (In Rus.)]

[15] *Вибровискозиметр серии SV. Руководство по эксплуатации*. Электронный ресурс: <https://www.mirvesov.ru/docs/guide/10138.pdf>. [Vibroviscometer of the SV series. Manual. Electronic resource: <https://www.mirvesov.ru/docs/guide/10138.pdf>.]

[16] Богословский А. В., Кожевников И. С. Архитектура камертонных датчиков вязкости, *Башкирский Химический Журнал*, 2023, 30 (1), 129–133 [Bogoslovskii A. V., Kozhevnikov I. S. Architecture of tuning-fork viscosity sensors, *Bashkirskij ximicheskij Zhurnal*, 2023, 30 (1), 129–133 (In Rus.)]

[17] Богословский А. В., Кожевников И. С., Алтунина Л. К. Вискозиметр тиксотропных жидкостей, *Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии*, 2023, 16 (3), 287–295. [Bogoslovskii A. V., Kozhevnikov I. S., Altunina L. K. Viscometer of thixotropic liquids, *Zhurnal Sibirskogo Federalnogo Universiteta. Tehnika i texnologii*, 2023, 16(3), 287–295 (In Rus.)]

[18] Богословский А. В., Кожевников И. С., Стасьева Л. А., Алтунина Л. К. Определение точки гелеобразования полимерсодержащих составов вибрационным методом, *Вестник ТвГУ. Серия: Химия*, 2017, 4, 91–98 [Bogoslovskii A. V., Kozhevnikov I. S., Stasyeva L. A., Altunina L. K. Determination of the gelation point of polymer-containing compositions by vibration method, *Bulletin of TvGU. Series: Chemistry*, 2017, 4, 91–98 (In Rus.)]

[19] Богословский А. В., Галкин В. М., Кожевников И. С. Определение момента гелеобразования с использованием измерительных сосудов разной величины, *Газовая промышленность*, 2013, 11, 98–100 [Bogoslovskii A. V., Galkin V. M., Kozhevnikov I. S. Determination of the gelation point using measuring vessels of various sizes, *Gas industry*, 2013, 11, 98–100 (In Rus.)]

[20] Вискозиметрический комплекс «Реосканк». *Каталог оборудования ЦКП РГУ нефти и газа имени И. М. Губкина*. Т. 1. Москва, 2010, С. 88. Электронный ресурс: [www.gubkin.ru/general/structure/scientific\\_activity/files/Center\\_RGU.pdf](http://www.gubkin.ru/general/structure/scientific_activity/files/Center_RGU.pdf) [Viscometric complex 'Reoskank'. *Catalog of the equipment of the Central Collective Use Center of the I. M. Gubkin Russian State University of Oil and Gas*. V 1. Moskva, 2010, P. 88. Electronic resource: [www.gubkin.ru/general/structure/scientific\\_activity/files/Center\\_RGU.pdf](http://www.gubkin.ru/general/structure/scientific_activity/files/Center_RGU.pdf)]