

А. В. Богословский (к.х.н., с.н.с.), И.С. Кожевников (к.т.н., н.с.)

АРХИТЕКТУРА КАМЕРТОННЫХ ДАТЧИКОВ ВЯЗКОСТИ

Институт химии нефти Сибирского отделения Российской Академии наук,
лаборатория коллоидной химии нефти
634055, г. Томск, пр. Академический, 4; e-mail: bav@ipc.tsc.ru

A. V. Bogoslovskii, I. S. Kozhevnikov

ARCHITECTURE OF TUNING-FORK VISCOSITY SENSORS

*Institute of Petroleum Chemistry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences
4, Akademicheskii Prospekt Str., Tomsk, 634055, Russia; e-mail: bav@ipc.tsc.ru*

Рассмотрены базовые конструкции камертонных датчиков вязкости. Приведены варианты с горизонтальной и вертикальной ориентацией главной оси камертона относительно горизонта. Одно или два пробных тела могут находиться перпендикулярно, параллельно и на продолжении главной оси и совершать в процессе измерения крутильные или возвратно-поступательные колебания. Указанные конструкции могут быть использованы при разработке измерительных комплексов контроля метастабильных жидкостей, в том числе гелеобразующих, используемых в технологиях увеличения нефтеотдачи.

Ключевые слова: вибрационная вискозиметрия; гелеобразующие составы; камертон.

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

В условиях неуклонного роста доли трудно-извлекаемых запасов в общем балансе добываемого углеводородного сырья одним из способов повышения эффективности добычи является применение современных физико-химических методов увеличения нефтеотдачи – наукоемких технологий, основанных на применении специально разработанных составов с заданной динамикой изменения реологического состояния^{1–4}. Соответственно, в ходе технологического процесса возникает проблема контроля закачиваемого раствора. Диапазон его возможного изменения весьма широк – от маловязкой ньютоновской жидкости до практически нетекучего твердообразного тела.

Дата поступления 16.11.22

The basic designs of tuning fork viscosity sensors are considered. Versions of horizontal and vertical orientation of the main axis of the tuning fork relative to the horizon are given. One or two test bodies positioned perpendicular, parallel or in a continuation of the main axis execute torsional or reciprocating vibrations during the measurement. These designs can be used in the development of systems for measurement of viscosity of metastable liquids, in particular gelling liquids, which are used in enhanced oil recovery technologies.

Key words: gel-forming compositions; tuning fork; vibrational viscometry.

The work was carried out within the framework of the state task of the Institute of Petroleum Chemistry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, funded by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (no. 121031500048-1).

Для оценки реологического состояния обычно используют вискозиметрию. Одновременно с началом закачки состава начинают измерение его вязкости в параллельном лабораторном эксперименте, по возможности имитирующем реальные условия в разрабатываемом пласте.

Традиционные способы измерения вязкости обычно требуют времени не менее пяти минут. Под действием внешних условий реологическое состояние образца может измениться и за меньшее время. С другой стороны, для контроля маловязких и гелеобразующих жидкостей используются разные средства измерения. Для адекватного контроля ситуации требуется специальная техника.

Из существующих способов измерения вязкости наибольшим быстродействием обладает

вибрационный метод⁵⁻⁹. При этом в контролирующую среду погружают колеблющееся пробное тело (рис. 1) и определяют происходящее под ее влиянием (по сравнению с воздухом) изменение параметров движения – величины силы, необходимой для поддержания заданной амплитуды движения, или амплитуды движения при заданной величине возбуждающей его силы (рис. 1,2).

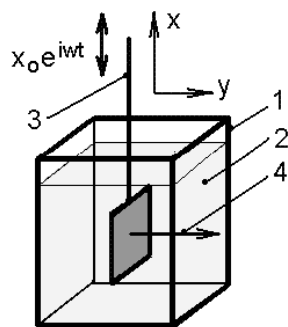


Рис.1. Базовая геометрия эксперимента: 1 – измерительный объем; 2 – жидкость; 3 – вибронд с пробным телом; 4 – направление распространения волны

Трение между колеблющимся телом и окружающей средой описывается функцией механического сопротивления Z , которой при стабилизации амплитуды пропорционален выходной электрический сигнал датчика U . Предполагается, что пробное тело движется в бесконечно большой среде, и стенки сосуда не влияют на результат измерения. В этом случае для ньютоновских жидкостей Z и U связано с значением вязкости:

$$Z = F/\xi' = A \cdot F/\xi = C \cdot (\rho\eta)^{1/2} = \\ = B \cdot (U - U_0)/(U_s - U_0),$$

где Z – механическое сопротивление жидкости, Н·с/м;
 F – сила, вызывающая движение, Н;
 ξ – амплитуда колебаний, м;
 ξ' – амплитуда скорости движения, м/с;
 ρ – плотность жидкости, кг/м³;
 η – вязкость жидкости, Па·с;
 U_0, U_s, U – выходной электрический сигнал датчика в воздухе, эталоне и исследуемой жидкости, соответственно, В.

A, B, C – коэффициенты пропорциональности.

Коэффициенты пропорциональности A, B, C включают в себя составляющие, связанные с площадью трущейся о жидкость твердой боковой поверхности, скоростью движения (частотой) и лобовым сопротивлением, однако все они в эксперименте остаются постоянными и, таким образом, исчезают при представлении результатов в виде относительных значений.

Пробное тело – зонд современного лабораторного вибрационного вискозиметра – присоединено к электрически управляемому вибратору. Возможно, наиболее распространенными в настоящее время являются устройства на основе вибраторов типа «веретена» (рис. 2): «Marimex ViscoScore», вискозиметры серии ВВН⁷. Пробное тело и область возбуждения (измерения параметров движения) находятся в этом случае по разные стороны изолирующей мембраны. Это дает возможность встраивать датчик в замкнутый измерительный объем или трубопровод, но не обеспечивает требуемую для отслеживания слабых межмолекулярных взаимодействий чувствительность измерений.

Добротность вибратора определяет возможную предельную чувствительность. С этой точки зрения более перспективными являются устройства на основе камертона с малыми значениями Z_0 и U_0 , которые определяется при движении пробного тела на воздухе. Конструктивно к одному из плеч акустического камертона крепится вибронд, а второе плечо выполняет функцию компенсатора.

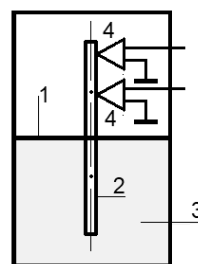


Рис.2. Датчик с вибратором-веретеном: 1 – мембрана; 2 – вибронд; 3 – измерительный объем; 4 – электромеханический преобразователь

В работе⁸ показано, что при использовании компенсатора передача колебательной энергии от возбудителя на основание датчика уменьшается, при этом пропорционально уменьшается влияние на амплитуду колебаний механического сопротивления связи между камертоном и массой (землей). Результатом является повышение стабильности амплитуды движения пробного тела и увеличение чувствительности датчика к изменениям вязкости. Такие датчики обеспечивают непрерывность измерения, имеют достаточно высокое быстродействие и могут быть размещены в пробах малого объема. Недостатком является ограниченный динамический диапазон измерения. В предельном случае геометрия датчика представляет собой зажатую с конца консольную пластину – вторая ветвь камертона отключается.

Геометрическая форма вибратора-камертона создает возможность нескольких вариантов построения измерительного узла (рис. 3–9).

Во всех рассматриваемых устройствах «виртуально» присутствует главная ось камертона, относительно которой разнесены параллельные ей ветви, и на которой находится область нулевой фазы – узел рассматриваемой колебательной системы с распределенными параметрами.

Используются крутильные (рис. 6, 7) и возвратно-поступательные (рис. 3–5) колебания одного или пары (рис. 5, 8) пробных тел в устройствах с разной степенью симметрии построения измерительного узла, горизонтальная (рис. 3, 4) и вертикальная (рис. 5–8) ориентация главной оси камертона относительно горизонта. При этом пробное тело может находиться перпендикулярно (рис. 3, 4), параллельно и на продолжении главной оси (рис. 5, 6, 8) с совмещением или разнесением (рис. 8, 9) зоны крепления устройства относительно узловой точки. Области возбуждения и регистрации движения могут быть расположены на противоположных ветвях камертона, по одну и по разные стороны относительно узловой точки вдоль главной оси, а противовесы смещены относительно нее, создавая при возвратно-поступательном движении ножек камертона крутящий момент относительно главной оси.

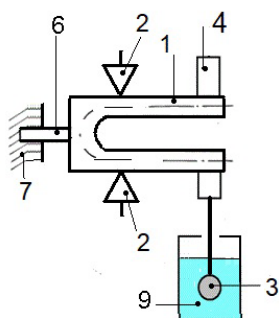


Рис. 3. Горизонтальный датчик: 1 – скоба камертона из двух ветвей и неподвижной узловой области; 2 – электро-механический преобразователь (пьезокерамика или электродинамический); 3 – пробное тело; 4 – противовес; 6 – планка; 7 – масса; 9 – исследуемая жидкость

Горизонтальная ориентация присутствует, например, в устройствах, описанных в работах ^{8,9}, «Реокинетика» ¹⁰ и «Виброскан» ¹¹. Вертикально расположен датчик вискозиметра Гернета ¹², устройств серии SV компании A&D ¹³, вискозиметров Степичева и Кремлевского ^{14,15}.

Горизонтально ориентированные датчики имеют высокую чувствительность. Это дает возможность использовать в качестве пробного тела объекты небольшого размера и соответственно уменьшить необходимое для измерения количе-

ство вещества. Например, вискозиметр ⁹ имеет пробное тело 3 в виде шара диаметром 4 мм. Их главным недостатком является невозможность герметизации измерительного объема, и несимметричность механической нагрузки ветвей, что существенно ограничивает область их применения и круг контролируемых объектов.

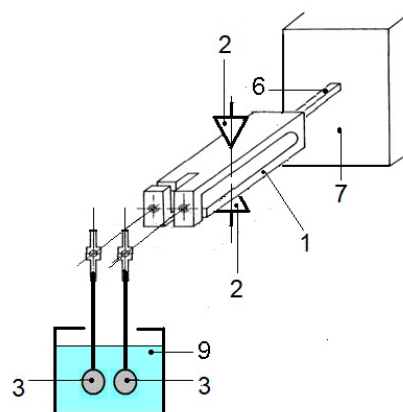


Рис. 4. Горизонтальный датчик с симметричной нагрузкой ветвей: 1 – скоба камертона из двух ветвей и неподвижной узловой области; 2 – электро-механический преобразователь (пьезокерамика или электродинамический); 3 – пробное тело; 6 – планка; 7 – масса; 9 – исследуемая жидкость

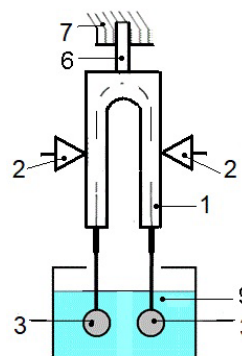


Рис. 5. Вертикальный датчик с симметричной нагрузкой: 1 – скоба камертона из двух ветвей и неподвижной узловой области; 2 – электро-механический преобразователь (пьезокерамика или электродинамический); 3 – пробное тело; 6 – планка; 7 – масса; 9 – исследуемая жидкость

Область возбуждения вертикально ориентированного камертона, электро-механические преобразователи (рис. 6, 8), и два пробных тела – продолжения его ветвей, находятся по разные стороны формирующей узловую точку мембраны 8 или его основания (рис. 8). Это дает потенциальную возможность герметизировать измерительный объем, проводить долговременные непрерывные измерения и контролировать токсичные и летучие жидкости.

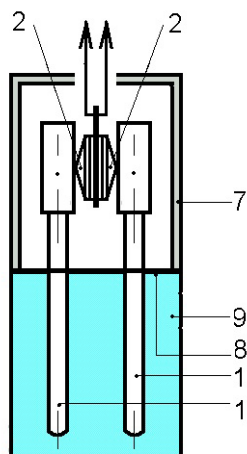


Рис. 6. Вертикальный датчик с симметричной нагрузкой и мембраной: 1 – скоба камертона из двух ветвей и неподвижной узловой области; 2 – электромеханический преобразователь (пьезокерамика или электродинамический); 7 – масса; 8 – изолирующая мембрана; 9 – исследуемая жидкость

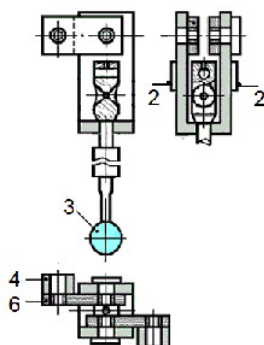


Рис. 7. Камертонный датчик с крутильным движением пробного тела, присоединенного к основанию на продолжении вертикальной оси: 2 – электромеханический преобразователь (пьезокерамика или электродинамический); 3 – пробное тело; 4 – противовес; 6 – планка;

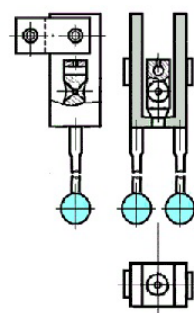


Рис. 8. Датчик с возвратно-поступательным движением двух пробных тел, присоединенных к основанию камертона, параллельно смещенных относительно его вертикальной оси

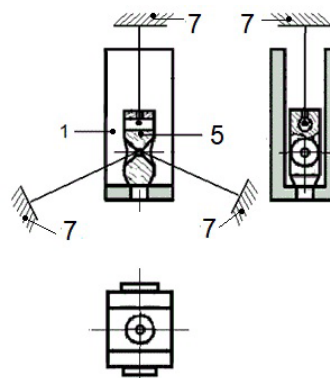


Рис. 9. Вертикальный подвес камертона на растяжках, используемый в устройствах, которые изображены на рис. 7 и 8: 1 – скоба камертона из двух ветвей и неподвижной узловой области; 5 – утолщенная ось; 7 – масса

Таким образом, представленный анализ базовых конструкции лабораторных датчиков вязкости камертонного типа позволяет формировать объектоориентированные измерительные комплексы под конкретные технологии увеличения нефтеотдачи, в том числе на основе закачки в пласт метастабильных нефтевытесняющих и гелеобразующих систем.

Литература

1. Лозин Е.В. Хлебников В.Н. Применение коллоидных реагентов для повышения нефтеотдачи. – Уфа: БашНИПИнефть, 2003. – 233 с.
2. Алтунина Л.К., Кувшинов В.А. Физико-химические методы увеличения нефтеотдачи пластов нефтяных месторождений // Успехи химии. – 2007. – Т.76, №10. – С.1034-1052.
3. Шрамм Лорье Л. Поверхностно-активные вещества в нефтегазовой отрасли. Состав, свойства, применение. – СПб.: ЦОП Профессия, 2018. – 592 с.
4. Лейк Л. Основы методов увеличения нефтеотдачи. – Остин: Университет Техас, 2005. – 449 с.
5. Соловьев А.Н., Каплун А.Б. Вибрационный метод измерения вязкости жидкостей. – Новосибирск: Наука, 1970. – 142 с.
6. Кузьмин В.Я., Торопин С.И., Тарбеев Ю.В. и др. Измерения массы, плотности и вязкости. – М.: Изд-во стандартов, 1988. – 175 с.

References

1. Lozin E.V. Khlebnikov V.N. *Primenenie kolloidnykh reagentov dlya povysheniya nefteotdachi* [Application of colloidal reagents for enhanced oil recovery]. Ufa, BashNIPIneft' Publ., 2003, 233 p.
2. Altunina L.K., Kuvshinov V.A. [Physicochemical methods for enhancing oil recovery from oil fields]. *Russian Chemical Reviews*, 2007, vol.76, no.10, pp.971-987.
3. Laurier L. Schramm *Poverkhnostno-aktivnye veshchestva v neftegazovoy otrasli. Sostav, svoystva, primeneniye* [Surfactants in the oil and gas industry. Compositions, properties, applications]. St. Petersburg, Professiya Publ., 2018, 592 p.
4. Lake L. *Osnovy metodov uvelicheniya nefteotdachi* [Enhanced Oil Recovery Fundamentals]. Austin, University of Texas, 2005, 449 p.
5. Soloviev A.N., Kaplun A.B. *Vibratsionnyi metod izmereniya vyazkosti zhidkostey* [Vibration method for

7. Крутин В.Н. Колебательные реометры. – М.: Машиностроение, 1985. – 160 с.
8. Соломин Б.А. Низаметдинов А.М., Конторович М.Л., Черторийский А.А. Камертонный вибровискозиметрический датчик для исследования термостимулированных процессов в жидкостях // Известия Самарского научного центра РАН. – 2015. – Т.17, №2. – С.26-30.
9. Гочжень Ч., Лаоли С. Измерение вязкости и плотности при помощи колеблющегося шарика // Приборы для научных исследований. – 1985. – №8. – С.144-147.
10. 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. – С.91-98.
11. Богословский А.В. Кожевников И.С. Сканирование ПВС содержащей двухфазной системы бензол-вода неподвижным и вибрирующим зондом // Вестник ТвГУ. Серия: Химия. – 2016. – №1. – С.6-13.
12. А.с. № 612160 Гернет М.М., Денисов В.И., Маршалкин Г.А., Казаков П.В. Вибрационный вискозиметр // Б.И. – 1978. – №23.
13. Вибровискозиметр серии SV. Руководство по эксплуатации. Электронный ресурс: <https://www.mirvesov.ru/docs/guide/10138.pdf>.
14. А.с. №329445 Степичев А.А. Двухчастотный измеритель вязкости камертонного типа // Б.И. – 1972. – №7.
15. Gupta S. V. Viscometry for Liquids Calibration of Viscometers // Springer Series in Materials Science. – 2016. – Book 194. – 266 p.
6. Kuz'min V.Ya., Toropin S.I., Tarbeev Yu.V. *Izmereniya massy, plotnosti i vyazkosti* [Measurements of mass, density and viscosity]. Moscow, Publishing house of standards, 1988, 175p.
7. Krutin V.N. *Kolebatel'nye reometry* [Oscillatory rheometers]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1985, 160 p.
8. Solomin B.A. Nizametdinov A.M., Kontorovich M.L., Chertoriyskiy A.A. *Kamertonnyi vibroviskozimetricheskiy datchik dlya issledovaniya termostimulirovannykh protsessov v zhidkostyakh* [A tuning fork vibroviscometer for the study of thermally stimulated processes in liquids]. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra RAN* [Proceedings of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences], 2015, vol.17, no.2, pp.26-30.
9. Guozhen Ch., Laoli S. *Izmerenie vyazkosti i plotnosti pri pomoshchi kolebliushchegosya sharika* [Measurement of viscosity and density using an oscillating ball]. *Pribory dlya nauchnykh issledovaniy* [Scientific Instruments], 1985, no.8, pp.144-147.
10. Bogoslovskii A.V., Kozhevnikov I.S., Stas'eva L.A., and Altunina L.K. *Opredelenie tochki geleobrazovaniya polimersoderzhashchikh sostavov vibratsionnym metodom* [Determination of the gelation point of polymer-containing compositions by vibration method]. *Vestnik TvGU. Seriya: Khimiya* [Bulletin of TvGU. Series: Chemistry], 2017, no.4, pp.91-98.
11. Bogoslovskii A.V., Kozhevnikov I.S. *Skanirovanie PVS soderzhashchei dvukhfaznoy sistemy benzol-voda nepodvizhnym i vibriruyushchim zondom* [Scanning of PVA-containing two-phase benzene-water system with fixed and vibrating probe]. *Vestnik TvGU. Seriya: Khimiya* [Bulletin of TvGU. Series: Chemistry], 2016, no.1, pp.6-13.
12. Gernet M.M., Denisov V.I., Marshalkin G.A., Kazakov P.V. *Vibratsionnyi viskozimetr* [Vibration viscometer]. Inventor's Certificate USSR no.612160, 1978.
13. Vibroviskozimetr serii SV. *Rukovodstvo po ekspluatatsii* [SV Vibroviscometer. Operation manual]. Available at: <https://www.mirvesov.ru/docs/guide/10138.pdf>.
14. Stepichev A.A. *Dvukhchastotnyi izmeritel' viazkosti kamertonного tipa* [Two-frequency tuning fork viscometer]. Inventor's Certificate USSR no.329445, 1972.
15. Gupta S.V. [Viscometry for Liquids. Calibration of Viscometers]. Springer Series in Materials Science, 2016, Book 194, 266 p.