

УДК 534.1.532.137

## АНАЛИЗ МЕТОДОВ И СРЕДСТВ ВИСКОЗИМЕТРИИ

© Жамшидбек Улугбек угли Шамуратов

Ташкентский Государственный технический университет имени И. Каримова, Ташкент,  
Узбекистан

[jamshid.shamuratov.phd2022@gmail.com](mailto:jamshid.shamuratov.phd2022@gmail.com)

***Аннотация.** В статье представлены понятия методов определения вязкости жидкостей и выражения методов определения вязкости. Также подробно описаны современные приборы для измерения вязкости, доступные сегодня. Приборы для измерения вязкости являются одними из наиболее широко используемых устройств контроля качества в нефтяной и газовой промышленности. По этой причине приборы для измерения вязкости жидкостей в основном рассматриваются как неотъемлемая часть системы измерения количества нефти. Преимущества современных приборов для измерения вязкости также заключаются в возможности автоматизации и непрерывного контроля результатов. Осциллирующие вискозиметры являются наиболее распространенными из-за их точности измерения и относительной погрешности.*

***Ключевые слова:** вискозиметр, капиллярный метод, метод падающего шарика, ротационный метод, вибрационный метод, закон Пуазейля.*

## ANALYSIS OF VISCOMETRY METHODS AND TOOLS

© Jamshidbek Shamuratov

Tashkent State technical university named after I.Karimov, Tashkent, Uzbekistan

[jamshid.shamuratov.phd2022@gmail.com](mailto:jamshid.shamuratov.phd2022@gmail.com)

***Abstract.** The article presents concepts of methods of determining the viscosity of liquids and expressions of methods of determining viscosity. Also detailed are the state-of-the-art viscosity measuring instruments available today. Viscosity measuring devices are among the most widely used quality control devices in the oil and gas industry. For this reason, instruments for measuring the viscosity of liquids are mainly considered as an integral part of oil quality measuring systems. Modern viscosity measuring instruments are also advantageous because of the possibility of automation and continuous monitoring of results. Oscillation viscometers are the most common due to their measurement accuracy and relative error.*

***Keywords:** viscometer, capillary method, falling ball method, rotation method, vibration method, Poiseuille's law.*

## 1. Классификация методов вискозиметрии.

Вискозиметр – прибор или устройство осуществляющее измерение вязкости. Их классификация осуществляется по ряду показателей [1]:

- по точности измерения: рабочие и эталонные;
- по области применения; лабораторные, промышленные, медицинские;
- по свойствам исследуемой вязкой среды: универсальные и специальные;
- по методу вискозиметрии: капиллярные, ротационные, вискозиметры с падающим шариком, вибрационные, ультразвуковые;
- по температуре и давлению исследуемой среды: в области нормальных, высоких и экстремальных значений.

Выбор вискозиметра для измерения обусловлен, в основном, задачей и целями исследования. В настоящее время известно довольно много конструкций вискозиметров, однако большинство из них основано на четырех наиболее распространенных методах вискозиметрии:

- капиллярный метод;
- метод падающего шарика;
- ротационный метод;
- вибрационный метод.

### 1.1 Метод капиллярной вискозиметрии.

Метод капиллярной вискозиметрии основан на законе Пуазейля. Согласно закону, течение вязкой несжимаемой жидкости через тонкую цилиндрическую трубку описывается уравнением [2]:

$$Q = \frac{\pi R^4}{8\mu l} (p_1 - p_2) = \frac{\pi d^4}{128\mu l} \Delta p \Rightarrow \mu = \frac{\pi d^4 \Delta p}{128 Q l} \quad (1)$$

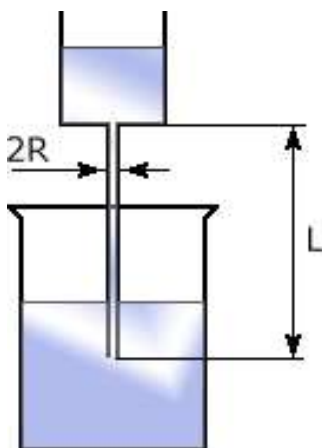
где  $p_1 - p_2 = \Delta p$  – перепад давления на концах капилляра;

$Q$  – объемный расход жидкости через капилляр трубки, м<sup>3</sup>/с;

$R$  – радиус капилляра, м;  $d$  – диаметр капилляра, м;  $l$  – длина капилляра, м

$\mu$  – коэффициент динамической вязкости, Па·с.

Стоит отметить, что данная формула справедлива лишь для ламинарного течения жидкости, т.е. при отсутствии скольжения на границе стенка капилляра – жидкость. На **рисунке 1** представлено схематическое изображение капиллярного вискозиметра.



**Рис. 1** – схематическое изображение капиллярного вискозиметра.

В капиллярном вискозиметре жидкость перетекает из одного резервуара в другой под действием разности давления через капилляр круглого сечения диаметра  $d$  и длины  $l$ . Нужно заметить, что скорость движения жидкости в верхнем и нижнем сосуде значительно меньше скорости движения жидкости в капилляре. Очевидно, что не все давление будет расходоваться на преодоление сил вязкого трения, часть его пойдет на придание определенной кинетической энергии жидкости. В связи с этим вводят поправку, называемую поправкой Хагенбаха. Уравнение Пуазейля с поправкой Хагенбаха:

$$\mu = \frac{\pi d^4 \Delta p}{128 Q l} - \frac{h Q \rho}{8 \pi} \quad (2)$$

где  $h$  – коэффициент Хагенбаха,  $\text{м}^{-1}$ ;  $\rho$  – плотность жидкости,  $\text{кг}/\text{м}^3$ .

Нужно учесть, что при определении вязкости органических жидкостей с большой кинематической вязкостью поправка Хагенбаха равна долям процента. Однако может достигать 15 % при высокотемпературной вискозиметрии.

Метод капиллярной вискозиметрии принято относить к высокоточному методу измерения вязкости, по причине сравнительно малой относительной погрешности измерения, которая колеблется в долях процента. Величина погрешности зависит в основном от двух параметров: корректность изготовления прибора и точности отсчета времени.

### 1.2 Метод падающего шарика вискозиметрии.

Данный метод основывается на законе Стокса, который гласит, что скорость свободного падения твердого шарика в вязкой неограниченной среде описывается уравнением [3]:

$$u = \frac{2(\rho_{\text{ш}} - \rho_{\text{ж}})gr^2}{9\mu} \quad (3)$$

где  $u$  – скорость поступательного равномерного движения шарика,  $\text{м}/\text{с}$ ;  $\rho_{\text{ш}}$  – плотность материала шарика,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;

$\rho_{\text{ж}}$  – плотность жидкости,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;

$\mu$  – коэффициент динамической вязкости;  $r$  – радиус шарика,  $\text{м}$ ;

$g$  – ускорение свободного падения,  $\text{м}/\text{с}^2$ .

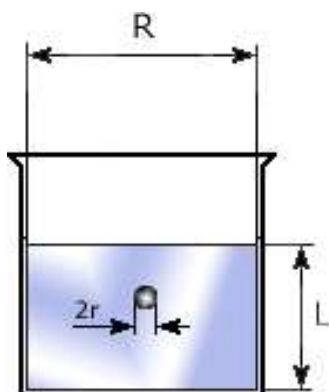
Стоит отметить, данное уравнение справедливо лишь в случае, когда скорость падения шарика довольно мала, а также соблюдается соотношение:

$$r \leq \frac{0.6u}{\rho_{\text{ш}}u} \quad (4)$$

На **рисунке 2** представлено схематическое изображение вискозиметра, основанного на методе падающего шарика.

При использовании данного метода необходимо учитывать возникающие поправки на конечные размеры сосуда с исследуемой жидкостью ( $L$  – высота жидкости в сосуде,  $R$  – радиус сосуда и  $r$  – радиус падающего шарика). Кроме того, должно выполняться соотношение  $r/R < 0.1$ , тогда уравнение (3) принимает вид:

$$\mu = \frac{2r^2(\rho_{\text{ш}} - \rho_{\text{ж}})g}{9u(1 + 2.4r/R)} \quad (5)$$



**Рис. 2** – Схематическое изображение вискозиметра, основанного на методе падающего шарика.

На основе этого метода создано огромное множество моделей вискозиметров, однако не все из них могут выполнять измерения в поточном режиме, что актуально для системы измерения количества нефти (СИКН). Одним из вискозиметров, основанных на методе падающего шарика и удовлетворяющим данному требованию, является Вискозиметр JSW Японского производства. Схема вискозиметра JSW представлена на рисунке 3.

Вискозиметр, представленный на **рисунке 3**, имеет две основные части: датчик вязкости и блок управления. Механическая часть включает в себя следующие составляющие [4]:

- измерительную трубку с расположенным в ней стальным шариком;
- безконтактный датчик падения в нижней части, для фиксации момента падения шарика и ограничительный стопор в верхней части, для удержания шарика;
- трехходовой соленоидный клапан, для направления течения жидкости.

В одном положении клапана жидкость поступает непосредственно в измерительную трубку, для поднятия шарика в верхнюю точку, в другом поступает в пространство между корпусом и измерительной трубкой и уходит через верхний выход корпуса.

Данная конструкция обеспечивает непрерывное протекание исследуемой жидкости через прибор, а сам процесс измерения вязкости происходит циклически. Один полный цикл состоит из фазы вытеснения и фазы измерения. Во время фазы вытеснения, посредством переключения положения соленоидного клапана, жидкость подается в измерительную трубку и происходит поднятие шарика до верхней точки (стопора). Далее соленоидный клапан переключается и жидкость течет за измерительной трубкой, происходит фаза измерения (при этом шарик падает в неподвижной жидкости). В момент опускания шарика в нижнее положение, чувствительный элемент безконтактного датчика посылает сигнал в блок управления. Блок управления определяет время падения шарика, и в дальнейшем производит расчет вязкости. По истечению заданного промежутка времени датчик вязкости снова переходит в фазу вытеснения, и процесс повторяется многократно.



Рис. 3 – Схема поточного вискозиметра с падающим шариком, модели JSW.

### 1.3 Ротационный метод вискозиметрии.

В вискозиметрах ротационного типа исследуемая жидкость помещается в зазор между двумя коаксиальными цилиндрами. Один из них (ротор) вращается, а другой (статор) неподвижен. При этом силоизмерительным элементом может быть или ротор, или статор. Для этого необходимо измерить крутящий момент  $M$  и угловую скорость вращения ротора  $\omega$  [5].

Рассмотрим инверсную модель, т.е. внешнее совершает вращение, внутренне неподвижно и ему будет сообщен момент вращения. Схема ротационного вискозиметра представлена на рисунке 4.

Формула определения момента вращения, передаваемого через вязкую среду, имеет вид:

$$M_1 = \frac{4\pi L \omega \mu R_1^2 R_2^2}{R_2^2 - R_1^2} \quad (6)$$

где  $M_1$  – момент вращения, передаваемый внутреннему цилиндру, Н·м;

$R_1$  и  $R_2$  – радиус внутреннего и внешнего цилиндра, м;

$\omega$  – постоянная угловая скорость внешнего цилиндра, рад/с;

$L$  – длина внутреннего цилиндра, м;

$\eta$  – коэффициент динамической вязкости, Па·с.

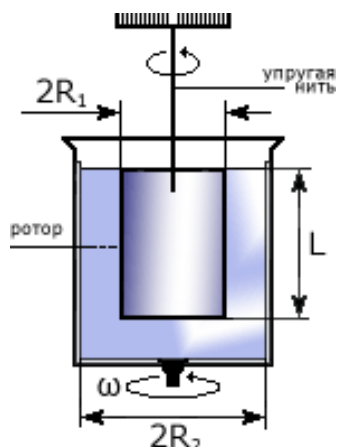


Рис. 4 – Схема ротационного вискозиметра.

С другой стороны, момент  $M_1$  уравновесится моментом сил упругости нити  $M_2$ :

$$M_2 = \frac{\pi d^2 G \varphi}{32l} \quad (7)$$

где  $d$ ,  $l$  – диаметр и длина нити, м;  
 $\varphi$  – угол закручивания неподвижно закрепленной нити;  
 $G$  – сила упругости нити, Н.

Поскольку  $M_1 = M_2$ , произведя некоторые преобразования, можно вывести формулу определения  $\eta$ :

$$\mu = \frac{\pi d^2 G \varphi (R_2^2 - R_1^2)}{128 \pi L \omega l R_1^2 R_2^2} \quad (8)$$

Так как ряд параметров, входящих в уравнение постоянны, то можно упростить уравнение введя в него постоянный коэффициент  $K$ , тогда:

$$\mu = \frac{K \varphi}{\omega} \quad (9)$$

#### 1.4 Вибрационный метод вискозиметрии.

Сущность метода вибрационной вискозиметрии заключается в следующем, в исследуемую жидкость погружается плоская тонкая пластина (вилка, шарик, цилиндр или другое тело) и приводится в колебательное движение за счет внешней гармонической силы. Параметры колебаний: амплитуда, частота и сдвиг фаз между колебаниями тела и колебаниями внешней, возбуждающей колебаний силы – будут зависеть от вязкости исследуемой жидкости [6]. На **рисунке 5** представлена схема вибрационного вискозиметра.

Существуют различные варианты осуществления вибрационного метода:

1. амплитудный,
2. частотный,
3. фазовый.

Выбор варианта прежде всего зависит от диапазона измерения вязкости. Так, к примеру, для определения вязкости жидкостей со средней вязкостью, чаще всего используется частотно-фазовый метод. Расчетная формула в данном случае имеет вид:

$$\mu = \frac{m_0^2 (\omega_0^2 - \omega^2)^2}{8S^2 \omega^3 \rho} \quad (10)$$

где  $\eta$  – коэффициент динамической вязкости, Па·с.

$m_0$  – масса вибрирующего элемента, кг;

$\omega_0$  – частота гармонической возбуждающей силы в воздухе, 1/с;

$\omega$  – частота гармонической возбуждающей силы в исследуемой жидкости, 1/с;

$S$  – площадь поверхности вибрирующего элемента, м<sup>2</sup>;

$\rho$  – плотность исследуемой жидкости, кг/м<sup>3</sup>.

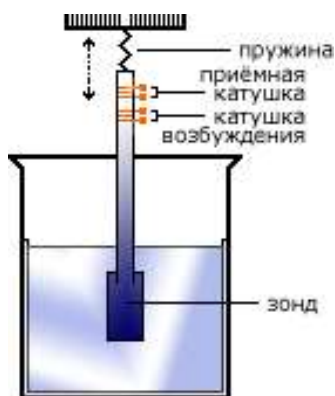


Рис. 5 – Схема вибрационного вискозиметра.

## 2. Сравнение методов вискозиметрии.

Сравнение производилось по наиболее широко применяемым методам вискозиметрии, описанным ранее. В таблице 1 представлена сравнительная таблица основных методов вискозиметрии [7].

Таблица 1

Сравнение основных методов вискозиметрии

Критерии	Капиллярный вискозиметр	Вискозиметр с падающим шариком	Ротационный вискозиметр	Вибрационный вискозиметр
Подходит для газов	Да	нет	да	Да
Измеряет плотность	Нет	нет	да	Да
Прямое измерение	Нет	да	да	нет
Движущиеся части, детали	Нет	да	да	нет
Диапазон измерения	Узкий	узкий	широкий	широкий
Возможность непрерывного режима работы	Нет	нет	да	Да
Размер конструкции для поточного измерения	–	большой	большой	средний

Проведя сравнительный анализ методов вискозиметрии, была подтверждена правильность выбора метода вискозиметрии для разработки преобразователя вязкости. Данный выбор сделан по ряду преимуществ вибрационного метода вискозиметрии, по сравнению с другими рассмотренными выше.

### 3. Современные модели преобразователей вязкости.

В настоящее время, для поточной вискозиметрии в подавляющем большинстве применяются вискозиметры зарубежного производства. Особо следует отметить продукт компании «mobrey measurement» – поточный преобразователь вязкости micromotion 7827 (далее ММ), рисунок 6.



Рис. 6 – Поточный преобразователь вязкости Solartron 7827.

Вискозиметры данной серии предназначены, в первую очередь, для измерения вязкости в потоке жидкости в непрерывном режиме, а также имеет возможность расчета плотности и температуры исследуемой среды. Принцип измерения основан на вибрационном методе – изменение плотности жидкости ведет к изменению резонансной частоты колебаний системы, а вязкость является функцией ширины диапазона затухающих колебаний т.е. добротности [8].

В основном, данный преобразователь вязкости применяется в нефтяной промышленности, где требуется измерение величины вязкости с высокой точностью.

Их основным конкурентом на Российском рынке можно считать поточный вискозиметр DC-51 производства Латвийской компании «LEMIS Baltic», внешний вид прибора представлен на рисунок 7.



Рис. 7 – Поточный вискозиметр DC-51 в установочном модуле.

Предназначен для точных измерений динамической вязкости жидкостей с вязкостью до 1200 мПас. Основным элементом датчика — это резонансная трубка, которая омывается измеряемой жидкостью. Применение чувствительного элемента такого типа гарантирует высокую



точность и многолетнюю стабильную работу прибора. Помимо прибора, производитель предлагает большой выбор установочных модулей, что значительно снижает расходы на установку и сокращают время простоя [9].

Еще один зарубежный представитель из Швеции – компания «SocTrade», предлагает поточные преобразователи вязкости XL7 **рисунок 8**. Вискозиметры этой серии предназначены для непрерывного измерения динамической вязкости, и возможностью расчета кинематической вязкости. Данный преобразователь имеет прочную конструкцию без движущихся частей, уплотнений и подшипников, таким образом нет потребности в дополнительном обслуживании прибора. Каждую секунду прибор определяет динамическую вязкость с высокой точностью и воспроизводимостью [10].



**Рис. 8** – Преобразователь вязкости XL7.

Принцип действия вышеупомянутых вискозиметров основан на погружении колеблющегося тела в исследуемую жидкость. В отличие от них кориолисовый расходомер Proline Promass 831 (**рисунок 9**) компании Endress+Hauser имеет конструкцию однотрубного плотномера.



**Рис. 9** – Кориолисовый расходомер Proline Promass 831.

Расходомер Promass 831 исполнен с прямой измерительной трубкой, что позволяет осуществлять измерения массового расхода, плотности и температуры, а также вязкости в качестве дополнительного параметра [11].

Существует преобразователь вязкости и отечественного производства такой как, вискозиметр вибрационный низкочастотный ВВН-8 **рисунок 10**.



Рис. 10 – Вискозиметр вибрационный низкочастотный ВВН-8.

ВВН-8 предназначен для измерения вязкости жидкостей, выпускается в пяти исполнениях в зависимости от диапазона измерения и может быть использован для автоматизации аналитического контроля технологических процессов и создания АСУ ТП. Функционально состоит из электронного блока БЭ-63 и измерительного преобразователя ПИ-72 [12].

Таблица 2

Сравнительная таблица наиболее вибрационных преобразователей вязкости

Наименование	Модель вискозиметра				
	micromotion 7827	DC-51	XL7	Proline Promass 831	ВВН-8
Диапазон измерения вязкости среды, мПа·с	0,5...12500	0,5...1200	0,5...106	1...500	0.5...108 Па·с·кг/м <sup>3</sup>
Основная погрешность преобразования вязкости, %	±1	± 1	± 1	± 5	±2,5 %
Возможность расчета плотности	+	-	-	+	-
Диапазон преобразования плотности, кг/ м <sup>3</sup>	0...3000	-	-	0...3000	-
Диапазон температур исследуемой среды, °С	от -50 °С до +110 °С	от -200 °С до +200 °С	от -40 °С до +85 °С	от -50 °С до +150 °С	от -40 °С до +85 °С
Максимальное рабочее давление, МПа	10	10	10	свыше 6	6,3
Диапазон температур окружающей среды, °С	от -40 °С до +85 °С	от -40 °С до +85 °С	от -40 °С до +6 °С	от -20 °С до +65 °С	от -45 °С до +40 °С

Параметры электрического питания: - напряжение (пост.), В	18 – 28	6-12	6 – 14	24	6,5 – 20
Выходной сигнал: - цифровой	RS485 Modbus, HART	RS485 Modbus, HART	RS485, RS232, Modbus LEM	RS485 Modbus, HART	RS485 Modbus, ИРПТ
- аналоговый, мА	4 – 20	4 – 20	4 – 20	4 – 20	4 – 20
Масса, не более, кг	22	15	11	11...67	12,5
Степень влаго/пылезащиты	IP65	IP65	IP68	IP69K	IP54

Основные технические параметры и характеристики преобразователей вязкости представлены в **таблице 2**.

#### 4. Вискозиметр для измерения вязкости жидкостей

Предлагаемое изобретение по своей технической сущности и достигаемому результату представляет собой вибрационный вискозиметр, основанный на измерении максимальной амплитуды колебаний объекта контроля (тонкой пластины), погруженного в исследуемую жидкость [13].

Новое предлагаемое устройство состоит из тонкой U-образной пластины, погруженной в исследуемую жидкость, корпуса, системы линейных упругих элементов в виде удлинённых нитей, прочно прикрепленных к стенкам пластины и корпуса, термочувствительного элемента, устройство, определяющее расстояние, на которое пластина перемещается в воздухе и в испытываемой жидкости, имеет индуктивный измерительный элемент, устройство возбуждения вибрации (двигатель) и блок обработки данных.

Вязкость определяют путем измерения значения максимальной амплитуды колебаний пластины, погруженной в исследуемую жидкость, ее колебательной системой (например, путем измерения частоты вибровозбудителя) при работе вискозиметра.

Недостатком вновь предложенного вискозиметра является низкая чувствительность измерительного устройства.

Колебательный вискозиметр (**рисунок 11**) включает в себя следующие детали и элементы: пластина 1 (**рисунок 12**) погружена в емкость 2, содержащую испытываемую жидкость 3. Нижняя стенка 6 (из ферромагнитного материала) жестко закреплена на стенке корпуса 10 и при пуске двигателя 9 вращает толкатель 5 и расположена для предотвращения вибраций, возникающих в плите 1. Между двумя П-образными ветвями пластины установлен термометр 7 для измерения температуры испытываемой жидкости. Также установлен индуктивный чувствительный элемент 8 для измерения амплитуды колебаний пластины в воздухе и в исследуемой жидкости. Тонкий упругий элемент 4 в виде нити служит для обеспечения вертикального положения пластины.

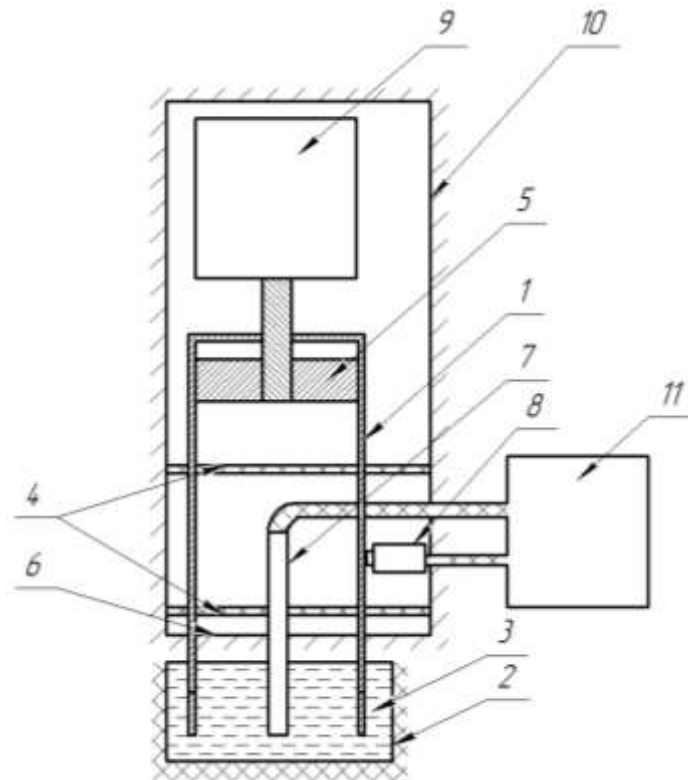


Рис. 11 – Схематический вид предлагаемого вибрационного вискозиметра.

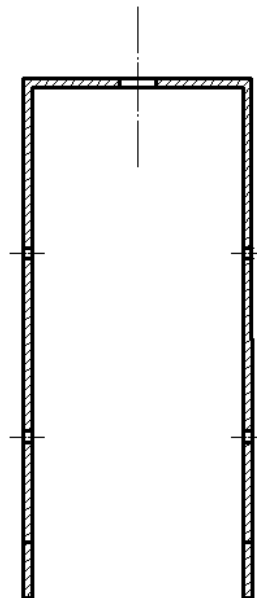


Рис. 12– Прямой обзор колеблющейся пластины вискозиметра.

#### 4.1. Вискозиметр работает следующим образом:

Вискозиметр, показанный на **рисунке 11**, основан на вибрации плоской пластины в жидкости с постоянной движущей силой. Амплитуда движения зависит от вязкости

жидкости. Амплитуда колебаний пластин измеряется в воздухе и жидкости, а вязкость жидкостей рассчитывается по следующей зависимости:

$$\rho\eta = \frac{R_M^2}{\pi f_{\text{жид}} S} \left( \frac{f_{\text{воз}} A_{\text{воз}}}{f_{\text{жид}} A_{\text{жид}}} - 1 \right)^2 = K\theta \quad (11)$$

здесь,  $\rho$  – жидкостиплотность, кг/м<sup>3</sup>;  $A_{\text{воз}}$  и  $A_{\text{жид}}$  – амплитуды колебаний в воздухе и жидкости соответственно, мм;  $f_{\text{воз}}$  и  $f_{\text{жид}}$  – резонансные частоты колебаний в воздухе и жидкости, Гц;  $S$  – рабочая поверхность плиты м<sup>2</sup>;  $R_M$  – фактическое значение механического сопротивления.

Следующие предположения вытекают из конструкции вновь предложенного вибрационного вискозиметра:

1. Тестовая жидкость — ньютоновская жидкость;
2. Турбулентное течение не происходит;
3. Между пластиной и жидкостью нет взаимного скольжения;
4. Размер виброплиты должен быть больше одной длины волны вибрационной волны и должен быть плоским;
5. Не следует учитывать результирующее влияние амплитуды пластины на демпфирование пластины;
6. Размер емкости с тестовой жидкостью достаточно велик, чтобы можно было пренебречь влиянием волн, отраженных от стенок.

Показано, что резонансную частоту в воздухе и жидкости можно считать одинаковой для всех практических приложений.

$$\rho\eta = \frac{R_M^2}{\pi f_{\text{жид}} S} \left( \frac{A_{\text{воз}}}{A_{\text{жид}}} - 1 \right)^2 = K \cdot \theta \quad (12)$$

$\theta = \frac{R_M^2}{\pi f_{\text{жид}} S}$  – выражение коэффициента смачиваемости пластины;

$K = \left( \frac{A_{\text{воз}}}{A_{\text{жид}}} - 1 \right)$  – постоянная вибрационного вискозиметра (определяется экспериментально с использованием соответствующих значений вязкости).

$$\eta = \frac{K \cdot \theta}{\rho} \quad (13)$$

Сравнение этого осциллирующего вискозиметра с вискозиметрами с вращающимся цилиндром для ньютоновских жидкостей обычно показывает точные значения измерения в пределах  $\pm 7\%$ . Хотя принцип работы предлагаемого вискозиметра теоретически прост, для маловязких жидкостей тонкая колеблющаяся пластина должна медленно колебаться в жидкости.

Температурная зависимость вязкости жидкостей предлагаемого осциллирующего вискозиметра выражается уравнением Аррениуса следующим образом [14].

$$\eta(T) = \eta_0 \exp(E/RT) \quad (14)$$

здесь,  $E$  – энергия активации вязкого течения исследуемой жидкости;  $\eta_0$  – начальная экспоненциальная вязкость ( $E$  и  $\eta_0$  эти две константы).  $T$  – температура исследуемой жидкости в  $K$  ( $T = t\text{ }^\circ\text{C} + 271,14$ ),  $R$  – универсальная газовая постоянная ( $R = 8,3144\text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ).

Таким образом, основным технико-экономическим преимуществом изобретения является высокая чувствительность измерений, что в конечном итоге позволяет определять вязкость исследуемой жидкости с высокой точностью.

## 5. Выводы.

С помощью предлагаемого вибрационного вискозиметра были проведены опыты по определению вязкости глицерина в лабораторных условиях при частоте 40-50 Гц. В экспериментах высокие значения погрешности формировались в основном в результатах определения динамической вязкости глицерина (рис. 13). Факторы, влияющие на результаты, тщательно изучаются и принимаются меры для уменьшения погрешности.

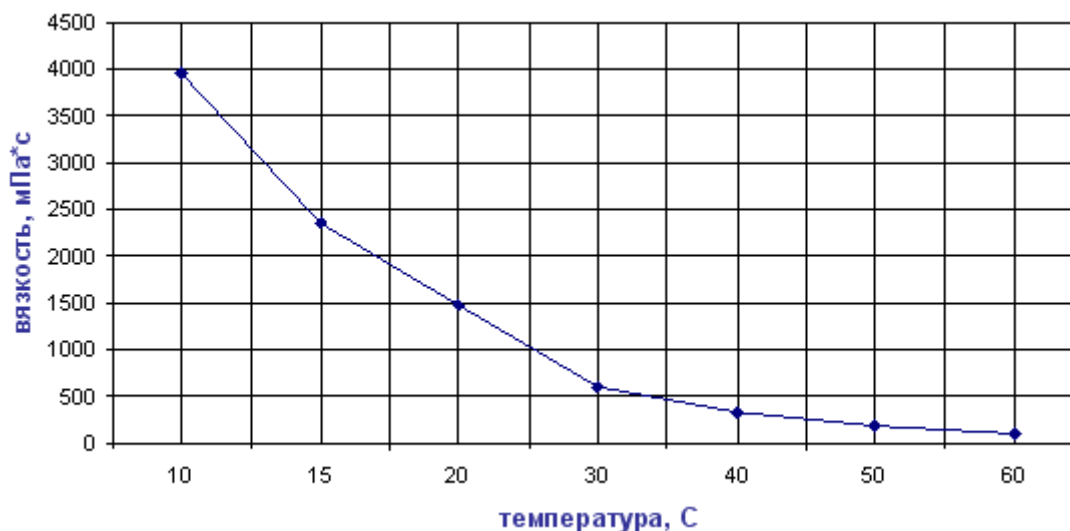


Рис. 13– Зависимость динамического коэффициента вязкости чистого глицерина от температуры.

## Заключение

В ходе анализа различных методов вискозиметрии было установлено, что для применения в блоках СИКН наиболее подходящим является вискозиметр, основанный на вибрационном принципе действия.

Проведенный патентный обзор выявил массив патентных документов, характеризующих уровень техники в области разработок преобразователей вязкости.

Анализ различных способов соединения деталей (резонатор – переходник резонатор – сильфон) из сильно различающихся материалов, показал, что наиболее подходящим способом является пайка.

В результате обобщения полученных теоретических знаний, был разработан и изготовлен опытный образец преобразователя вязкости.

Экспериментальное исследование выявило ряд проблем в разрабатываемом преобразователе вязкости:

– большая погрешность, сопоставимая с реальным значением динамической вязкости;

– низкий уровень помехозащищенности конструкции.

Были предложены решения по улучшению конструкции, разработанной на данный момент.

### Список литературы

1. ГОСТ 29226-91 ВИСКОЗИМЕТРЫ ЖИДКОСТЕЙ. ОБЩИЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ ТРЕБОВАНИЯ И МЕТОДЫ ИСПЫТАНИЙ.
2. VISCOSITY AND DENSITY OF REFERENCE FLUID / Masaed Moti Almotari, University of Canterbury, 2006.
3. Определение вязкости жидкости методом Стокса /: С.С. Никулин, А.С. Чех методические указания / сост. – Тамбов: Изд-во ГОУ ВПО ТГТУ, 2011. – 12 с. – 100 экз.
4. Исследование углеводородных систем при определении качественных характеристик в системе магистральных трубопроводов: учебное пособие / Н.В. Чухарева, А.А. Новиков; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2009. – 289 с. ISBN 5-98298-431-0.
5. Определение динамической вязкости на ротационном вискозиметре Brookfield RVDV-II+ Pro: Методическое указание/ В.Е. Крупенникова, В.Д. Раднаева, Б.Б. Танганов. – Улан-Удэ: Изд-во ВСГТУ, 2011. – 48 с.
6. Вибрационный метод измерения вязкости жидкости / А.Н. Соловьев, А.Б. Каплун изд. «Наука» сибирское отделение, Новосибирск, 1967. – 140 с.
7. <http://www.emersonprocess.com/> Официальный сайт Emerson Process.
8. <http://www.lemis-baltic.ru/> официальный сайт Lemis.
9. <http://www.soctrade.com/> Официальный сайт SocTrade.
10. <http://www.endress.com/> Официальный сайт Endress + Hauser.
11. 5Д1.560. 024.ТУ Технические условия Вискозиметры вибрационные низкочастотные ВВН-8.
12. Введение в теорию колебаний / С.П. Стрелков: Учебник, 3-е изд., испр. – СПб.: Издательство «Лань», 2005. – 440 с.
13. Авторское свидетельство СССР № 1744593 А1, кл. G 01 N 11/16, 1992/.
14. “The measurement of viscosity of alloys - A review of methods, data and models” R.F. Brooks, A.T. Dinsdale and P.N. Quedstedt, Meas. Sci. Technol. **16** (2005) 354–362. [stacks.iop.org/MST/16/354](http://stacks.iop.org/MST/16/354)

### References

1. GOST 29226-91 VISCOMETER OF LIQUIDS. GENERAL TECHNICAL REQUIREMENTS AND TEST METHODS (in Russian).
2. VISCOSITY AND DENSITY OF REFERENCE FLUID / Masaed Moti Almotari, University of Canterbury, 2006.
3. Determination of the viscosity of a liquid by the Stokes method /: S.S. Nikulin, A.S. Czech guidelines / comp. - Tambov: Publishing House of GOU VPO TSTU, 2011. - 12 p. - 100 copies (in Russian).
4. The study of hydrocarbon systems in determining the qualitative characteristics in the system of main pipelines: study guide / N.V. Chukharev, A.A. Novikov; Tomsk Polytechnic University. - Tomsk: Publishing House of the Tomsk Polytechnic University, 2009. - 289 p. ISBN 5-98298-431-0 (in Russian).

5. Determination of dynamic viscosity on a rotational viscometer Brookfield RVDV-II + Pro: Guidelines / V.E. Krupennikova, V.D. Radnaeva, B.B. Tanganov. - Ulan-Ude: Publishing House of the ESGTU, 2011. - 48 p (in Russian).
6. Vibration method for measuring the viscosity of a liquid / A.N. Solovyov, A.B. Kaplun ed. "Science" Siberian branch, Novosibirsk, 1967. - 140 p (in Russian).
7. <http://www.emersonprocess.com> / Official website of Emerson Process.
8. <http://www.lemis-baltic.ru/> official website of Lemis.
9. <http://www.soctrade.com/> Official website of SocTrade.
10. <http://www.endress.com/> Endress + Hauser official website.
11. 5D1.560. 024.TU Specifications Vibrating low-frequency viscometers BBH-8 (in Russian).
12. Introduction to the theory of oscillations / S.P. Strelkov: Textbook, 3rd ed., corrected. - St. Petersburg: Publishing house "Lan", 2005. - 440 p (in Russian).
13. Patent USSR № 1744593 A1, cl. G 01 N 11/16,1992/ (in Russian).
14. "The measurement of viscosity of alloys - A review of methods, data and models" R.F. Brooks, A.T. Dinsdale and P.N. Quedsted, Meas. Sci. Technol. 16 (2005) 354–362. [stacks.iop.org/MST/16/354](http://stacks.iop.org/MST/16/354)

*Дата поступления: 19 ноября 2022 г.*