

**КАЗАНСКИЙ (ПРИВОЛЖСКИЙ) ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ**  
**ИНСТИТУТ ГЕОЛОГИИ И НЕФТЕГАЗОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ**  
*Кафедра разработки и эксплуатации месторождений*  
*трудноизвлекаемых углеводородов*

**Ф.А. АЛИЕВ, Т.А. ХОЛМУРОДОВ, С.А. СИТНОВ,**

**М.А. ВАРФОЛОМЕЕВ, А.В. ВАХИН**

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЯЗКОСТИ НЕНЬЮТОНОВСКИХ НЕФТЕЙ**  
**РОТАЦИОННЫМ ВИСКОЗИМЕТРОМ**

**Учебно-методическое пособие**

**Казань – 2022**

**УДК 532.1**  
**ББК 24.0**

*Принято на заседании Учебно-методической комиссии ИГиНГТ  
Протокол № 9 от 27 мая 2022 г.*

**Рецензенты:**

доктор химических наук, профессор, ведущий научный сотрудник НИЛ  
«Химия и геохимия нефти» Института органической и физической химии им.

**А. Е. Арбузова Г.П. Каюкова;**

кандидат технических наук, доцент кафедры разработки и эксплуатации  
месторождений трудноизвлекаемых углеводородов КФУ **Г.Р. Ганеева**

**Алиев Ф.А.,**

**Определение вязкости неньютоновских нефтей ротационным  
вискозиметром:** учебно-методическое пособие / Ф.А. Алиев, Т.А.

Холмуродов, С.А. Ситнов, М.А. Варфоломеев, А.В. Вахин. – Казань:

Издательство Казанского университета, 2022. – 27 с.

В учебно-методическом пособии изложена теория вязкости неньютоновских жидкостей и приведены методические рекомендации к выполнению практических работ. В работе также рассмотрена температурная зависимость вязкости неньютоновской жидкости. Методическое пособие предназначено студентам, аспирантам и лаборантам при проведении лабораторных и практических занятий.

© Коллектив авторов, 2022

© Издательство Казанского университета, 2022

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>ВВЕДЕНИЕ .....</b>	<b>4</b>
<b>1. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ.....</b>	<b>6</b>
<b>1.1. Основные понятия вязкости .....</b>	<b>6</b>
<b>1.2 Динамическая вязкость. Единицы измерения. ....</b>	<b>7</b>
<b>1.3 Кинематическая вязкость. Единица измерения.....</b>	<b>8</b>
<b>1.4 Ньютоновские и неньютоновские жидкости .....</b>	<b>12</b>
<b>2. ПРАКТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ.....</b>	<b>16</b>
<b>2.1. Описание лабораторной установки .....</b>	<b>16</b>
<b>2.2. Проведение опытов (процедура измерения вязкости) .....</b>	<b>17</b>
<b>2.2.1. Подготовка к работе .....</b>	<b>17</b>
<b>2.2.2. Порядок проведения измерений .....</b>	<b>19</b>
<b>2.2.3. Обработка полученных данных .....</b>	<b>21</b>
<b>3. ЗАДАЧИ .....</b>	<b>23</b>
<b>4. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ .....</b>	<b>25</b>
<b>СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ .....</b>	<b>26</b>

## ВВЕДЕНИЕ

Жидкости очень важны в нашей жизни, и они окружают нас повсюду. Каждый день мы сталкиваемся с различными жидкостями, поэтому изучение свойств и расширение знаний о них всегда будет актуально. Среди таковых можно выделить знания о вязкости жидкостей, которое играет большую роль в различных отраслях промышленности, в частности, нефтехимической, нефтедобывающей, поскольку транспортировка, добыча и переработка, а также конструкция оборудования для различных сред будут зависеть от значений внутреннего трения жидкостной смеси.

Кроме того, знание такого технологического свойства нефти, как вязкость, является важным и необходимым с точки зрения проработки проектов разработки нефтяных месторождений.

Вместе с тем, вязкостные характеристики нефти будут существенно оказывать влияние на характер перемещение ее по пласту, что также будет влиять и на характер и динамику обводнения залежи, а также на эффективность добычи нефти.

Наличие различного рода газов в нефти могут по-разному влиять на значение ее вязкости. Содержание большого количества растворенного газа в пластовой нефти, а также наличие термобарических факторов (повышенное давление и температура) будет давать разницу в значениях вязкости по сравнению с сепарированной нефтью. Как известно, с повышением содержания, например, азота в пластовой нефти ее вязкость будет также возрастать. При наличии растворенного в нефти углеводородного газа (от  $\text{C}_1\text{H}_4$  к  $\text{C}_4\text{H}_{10}$ ) наблюдается снижение вязкости. Физические параметры, такие как температура и давление, а также состав нефти, будут существенно вносить вклад в вязкостные характеристики нефти. Повышение температуры будет способствовать снижению, а давления – повышению вязкости, также как и повышение содержания высокомолекулярных компонентов, таких как смолы и асфальтены. Смолисто-асфальтеновые вещества могут образовывать ассоциированные молекулы, что обуславливает непредсказуемость их

химического и физического поведения в нефтяных системах; это не лучшим образом будет сказываться на процессах добычи и переработки тяжелого углеводородного сырья, в частности предание высоковязким и сверхвязким нефтям неньютоновские свойства течения жидкости по сравнению с легкими нефтями.

Поэтому важность понимания о целесообразности определения вязкости сводится к тому, что величина вязкости является важным параметром и технологическим фактором, которым нельзя пренебрегать при решении таких задач нефтедобывающей отрасли, как определение темпов отбора жидкости из пласта, оценка скорости фильтрации нефти и газа, выбор типа вытесняющего агента, расчет мощности насосов и др., для создания более эффективных и оптимальных условий для повышения нефтеизвлечения.

# 1. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

## 1.1. Основные понятия вязкости

Вязкость – сила трения, возникающая между двумя смежными слоями внутри жидкости или газа на единице поверхности при их взаимном перемещении. Вязкость определяется как свойство элемента при изучении течения жидкости для любого применения. Понятие о вязкости дает нам представление насколько густым является продукт или насколько хорошо он течет. На самом деле существует несколько различных терминов, относящихся к вязкости. Эти термины связаны со способом измерения вязкости. Различают кинематическую и динамическую вязкости.

Динамическая вязкость характеризует сопротивления жидкости течению при приложении внешней силы. Другой способ заключается в измерении сопротивления потока жидкости под действием силы тяжести. Результатом является кинематическая вязкость. Иными словами, кинематическая вязкость — это мера собственного сопротивления жидкости течению, когда на нее не действует никакая внешняя сила, кроме силы тяжести [1-3].

Единицей измерения кинематической вязкости является сантистокс (сСт). Основное различие между измерениями динамической и кинематической вязкости заключается в плотности. Плотность фактически обеспечивает способ преобразования между кинематическим и динамическим измерением вязкости. Формула для преобразование выражается таким образом [4]:

- Кинематика ( сСт ) x Плотность = Динамика ( сП )
- Динамический ( сП ) / Плотность = Кинематический ( сСт )

## 1.2 Динамическая вязкость. Единицы измерения.

Вы проводите измерение динамической вязкости, когда хотите узнать внутреннее сопротивление жидкости или силу, необходимую для перемещения одной плоскости жидкости по другой. Измерение динамической вязкости наиболее полезно для жидкостей, которые изменяют свои кажущиеся характеристики при приложении силы или давления. Эти жидкости известны как неньютоновские жидкости.

Неньютоновские жидкости чувствительны к изменениям силы, действующей на них, и иногда могут даже необратимо изменить свою вязкость, если на них воздействовала постоянная сила в течение определенного периода времени. Примером важности измерения динамической вязкости является определение надлежащих характеристик текучести кетчупа. Этот продукт должен иметь более низкую вязкость, когда он течет, чтобы получить его из бутылки, но он должен быть густым (или не таким склонным к течению), когда он сидит на гамбургере. Тестирование вязкости кетчупа при разных скоростях (соответствующих разным уровням силы) поможет убедиться, что кетчуп ведет себя должным образом [5][6].

В качестве еще одного примера можно рассмотреть проектирование насосных систем. Поскольку вязкость неньютоновских жидкостей меняется в зависимости от скорости движения, давление и скорость насоса оказывают серьезное влияние на технические характеристики соответствующих насосов, давление и размер трубопровода. Тестирование продукта на разных скоростях поможет получить рекомендации по проектированию насосной системы.

Динамическая вязкость – это мера сопротивления течению жидкости или ее деформации. Для выражения динамической вязкости чаще всего используется Пуаз и сантипуаз, в международной системе единиц (СИ) – Па·с. Кроме этого, для измерения показателя могут использоваться такие единицы, как  $\text{дин}\cdot\text{с}/\text{см}^2$  и  $\text{кгс}\cdot\text{с}/\text{м}^2$  и производных от них [7].

$$\mu = \frac{F \cdot l}{S \cdot v}$$

где F-сила сопротивления сдвигу, l-расстояние. S-площадь поверхности, v – скорость.

Соотношение единиц:

- 1 Пуаз = 1 дин·с/см<sup>2</sup> = 0.010197162 кгс·с/м<sup>2</sup> = 0.0000010197162 кгс·с/см<sup>2</sup> = 0.1 Па·с = 0.1 Н·с/м<sup>2</sup>
- 1 Сантипуаз = 0.0001010197162 кгс·с/м<sup>2</sup> = 0.01 П = 0.001 Па·с
- 1 кгс·с/м<sup>2</sup> = 98.0665 П = 9806.65 сП = 9.80665 Па·с.

### 1.3 Кинематическая вязкость. Единица измерения.

Кинематическая измерение вязкости используется в основном для ньютоновских жидкостей — жидкостей, вязкость которых не изменяется при изменении приложенной силы (скорости сдвига).

Тестирование смазочных масел является важной областью применения. С помощью этого метода испытаний можно определить изменения вязкости при различных температурах и в различных условиях окружающей среды. С помощью этой информации можно оценить изменения эффективности смазки.

К другим продуктам, для которых подходит кинематический метод, относятся масло, бензин, глицерин и спирт. Ньютоновские жидкости обладают присущей им вязкостью, которая не меняется при изменении силы, приложенной к жидкости. Эту характеристическую вязкость можно легко и точно измерить с помощью прибора капиллярного типа, использующего гравитацию для перемещения жидкости.

С другой стороны, неньютоновские жидкости демонстрируют большие колебания вязкости в зависимости от приложенной силы. Для этих испытаний требуются такие инструменты, как ротационные вискозиметры, которые могут измерять изменения во времени и в диапазоне приложенных сил [8][9].



Кинематической вязкостью ( $\nu$ ) называют отношение вязкости динамической к плотности жидкости. Для выражения показателя используется следующая формула:

$$\nu = \frac{\mu}{\rho}$$

где  $\mu$  – динамическая вязкость,  $\rho$  – плотность жидкости,  $\text{кг/м}^3$ .

Для выражения показателя чаще всего используются стокс и производное от него сантистокс. В международной системе единиц для измерения кинематической вязкости применяется  $\text{м}^2/\text{с}$  [10].

Соотношение единиц:

- $1 \text{ Ст} = 0.0001 \text{ м}^2/\text{с} = 1 \text{ см}^2/\text{с}$
- $1 \text{ сСт} = 1 \text{ мм}^2/\text{с} = 0.000001 \text{ м}^2/\text{с}$
- $1 \text{ м}^2/\text{с} = 10000 \text{ Ст} = 1000000 \text{ сСт}$ .

### **1.3 Отличия между кинематической и динамической вязкостями.**

#### **Другие виды вязкости.**

Помимо различия между динамической и кинематической вязкостями, следует уточнить несколько соотношений этого понятия. Внутреннее сопротивление потока жидкости предполагает наличие внешней силы, приложенной к движению жидкости. Чтобы разграничить эти два типа жидкостей:

- Динамическая вязкость: вязкость, связанная с внешней силой, приложенной к неньютоновским жидкостям.
- Кинематическая вязкость: присущая ньютоновским жидкостям вязкость, которая не изменяется при изменении приложенной силы.

Измерение вязкости ньютоновских жидкостей можно выполнить с помощью ротационных вискозиметров (с помощью, приведенной выше

формулы преобразования). Однако проще использовать капиллярные инструменты. В ряде случаев капиллярные приборы более точны для определения кинематической вязкости.

Когда вам нужно определить вязкостные характеристики жидкости, на которую не действуют внешние физические силы (другими словами, когда гравитация является единственной силой, действующей на жидкость), предпочтительным методом должен быть кинематический метод [11].

Однако, чтобы иметь более широкие знания о разнице между кинематической и динамической вязкостью, учащиеся могут следовать табличному представлению различий, которые показано на таблице 1.

*Таблица 1*

Сравнение между кинематической вязкостью и динамической вязкостью

Кинематическая вязкость	Динамическая вязкость
Определяется как диффузионная способность импульса. Если быть точным, это объясняет, насколько быстро движется жидкость при приложении определенной внешней силы.	Определяется как абсолютная вязкость. Он дает больше информации о силе, необходимой для того, чтобы заставить жидкость течь с определенной скоростью.
Представляет собой инерцию, а также силу вязкости жидкости.	Представляет собой только силу вязкости жидкости.
Символ кинематической вязкости - $\nu$ .	Символ динамической вязкости - $\mu$ .
Представляет собой отношение между динамической вязкостью и плотностью.	Представляет собой отношение между напряжением сдвига и деформацией сдвига.
Используется, когда преобладают инерция и сила вязкости.	Используется, только тогда, когда преобладает сила вязкости.
Кинематическая вязкость является более фундаментальным свойством.	Динамическая вязкость является производным свойством.
Единицей кинематической вязкости является $\text{м}^2/\text{с}$ .	Единицей динамической вязкости является $\text{Нс}/\text{м}^2$ .

Вязкость обычно не зависит от давления, но жидкости под экстремальным давлением испытывают увеличение вязкости. Поскольку жидкости обычно несжимаемы, увеличение давления не приводит к значительному сближению молекул. Простые модели молекулярных взаимодействий не смогут объяснить такое поведение. Вязкость в первую очередь зависит от материала. Вязкость воды при 20°C составляет 1,0020 миллипаскаль-секунд (что удобно близко к единице только по совпадению). Вязкость большинства обычных жидкостей составляет от 1 до 1000 мПа·с, а газов – от 1 до 10 мкПа·с. Пасты, гели, эмульсии и другие сложные жидкости труднее обобщить. Некоторые жиры, такие как масло или маргарин, настолько вязкие, что кажутся скорее мягкими твердыми веществами, чем текучими жидкостями. Расплавленное стекло чрезвычайно вязкое и приближается к бесконечной вязкости по мере затвердевания. Поскольку этот процесс не так хорошо определен, как истинное замораживание, некоторые считают, что стекло может течь даже после полного охлаждения, что не так. При обычных температурах стекла такие же твердые, как настоящие твердые тела. Жидкая фаза, вероятно, наименее изучена из всех состояний вещества [12].

Касательное напряжение: если направление внешней силы на объект параллельно плоскости объекта, деформация будет вдоль плоскости, и давление, ощущаемое на объекте, считается напряжением сдвига.

Градиент скорости-это разница между соседними слоями жидкости:

$$\eta = \frac{2ga^2(\Delta\rho)}{9v}$$

$\eta$  = вязкость;

$\Delta\rho$  = разность плотностей жидкости и испытываемой сферы;

$a$  = радиус сферы;

$v$  = скорость сферы.

Относительная вязкость – отношение вязкости раствора к вязкости используемой жидкости.

Вязкость при растяжении — это связано с фактом сопротивления жидкости потоку при растяжении (течении через фиксированную площадь с внезапным изменением площади поперечного сечения). Жидкость при растяжении важна при измерении любого потока в пределах площади поперечного сечения.

Вискозиметр можно использовать для определения вязкости, и для этого на рынке доступно множество видов прибора, но лишь немногие инструменты способны точно определить вязкость. Некоторые могут точно измерить вязкость только ньютоновских жидкостей, в то время как большинство жидкостей неньютоновские [13-15].

#### 1.4 Ньютоновские и неньютоновские жидкости

По характеру течения жидкости делят на ньютоновские и неньютоновские, а по поведению во времени — на тиксотропные и реопексные.

Ньютоновские жидкости (подчиняются уравнению Ньютона) — это жидкости, вязкость которых при наложении внешнего воздействия (скорости деформации) остается постоянной и не зависит от скорости сдвига. В качестве примера ньютоновских жидкостей можно привести воду, маловязкие моторные топлива, спирты, легкие фракции нефти (рис. 1).

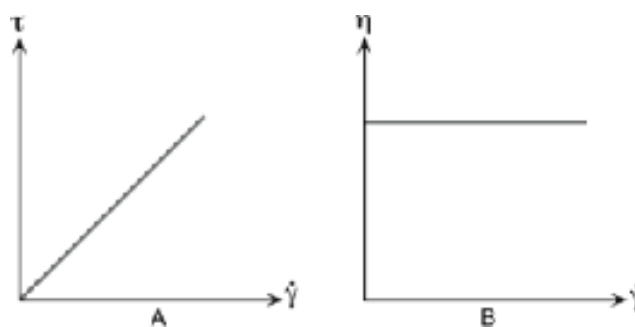


Рис.1. Зависимость напряжения сдвига (А), вязкости (В) от скорости сдвига для ньютоновских жидкостей.

Если при изменении скорости сдвига вязкость жидкости изменяется в ту или иную сторону, то такая жидкость называется неньютоновской. Такие

жидкости в своём составе имеют либо высокомолекулярные соединения, либо представляют собой эмульсии, суспензии различных форменных элементов [6]. И в этом в этом случае будет измеряться, так называемая, «кажущаяся вязкость». Воспроизводимость и точность определения «кажущейся вязкости» для таких жидкостей будет достигаться только в случае поддержания идентичности всех параметров измерений (модели вискозиметра, шпинделя, температуры и т.д.). Существует по крайней мере три наиболее известных типа неньютоновских жидкостей, для которых изменение скорости сдвига будет влиять на характер изменения вязкости:

- псевдопластичные жидкости
- дилатантные жидкости
- пластичные жидкости

Для псевдопластичных жидкостей характерно уменьшение вязкости при увеличении скорости сдвига (рис.2). К таковым можно отнести краски, эмульсии и некоторые суспензии. В данном случае, в момент наложения нагрузки (например, при вращении шпинделя вискозиметра), молекулы исследуемой жидкости будут ориентироваться параллельно движению поверхности шпинделя, при этом снижение вязкости будет обосновываться ослаблением сопротивления между отдельными слоями вещества. В дальнейшем при увеличении скорости вращения вязкость будет также понижаться в результате разрушения первоначальной структуры и свободного «скольжения» молекул относительно друг друга.

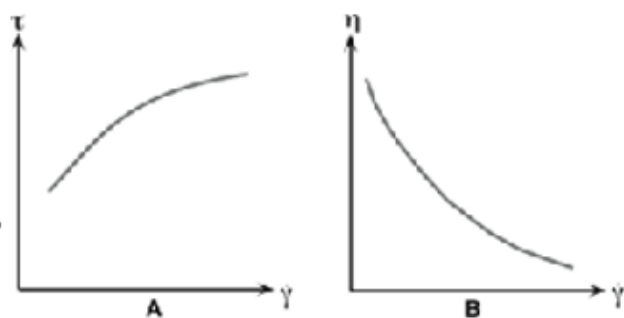


Рис.2. Зависимость напряжения сдвига (А) или вязкости (В) от скорости сдвига.

Для псевдопластичных жидкостей.

У дилатантных жидкостей наблюдается обратный эффект, когда увеличение скорости сдвига приводит и к возрастанию вязкости (рис.3).

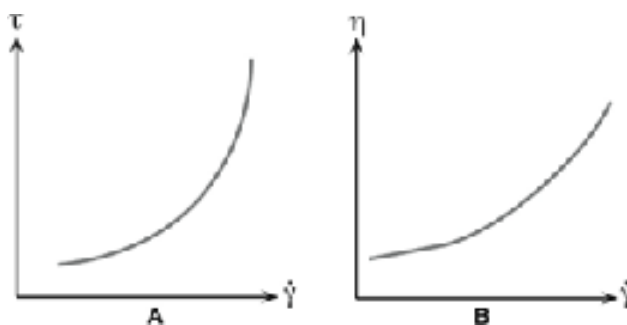


Рис.3. Зависимость напряжения сдвига (А) или вязкости (В) от скорости сдвига.

Для дилатантных жидкостей.

Жидкости, обладающие дилатантными свойствами, не так распространены, как выше описанные. К ним можно отнести такие вещества, как дефлокулянты: суспензии глинистых веществ, кукурузного крахмала в воде, системы песок - вода и др. [16][17].

Поведение пластичных жидкостей достаточно своеобразно: при отсутствии внешнего воздействия (напряжения сдвига) такие жидкости ведут себя как твердые материалы, но при наложении на них определенного воздействия они начинают течь. Минимальное усилие, которое необходимо приложить к системе, чтобы она начала течь называется предельным напряжением сдвига (рис.4).

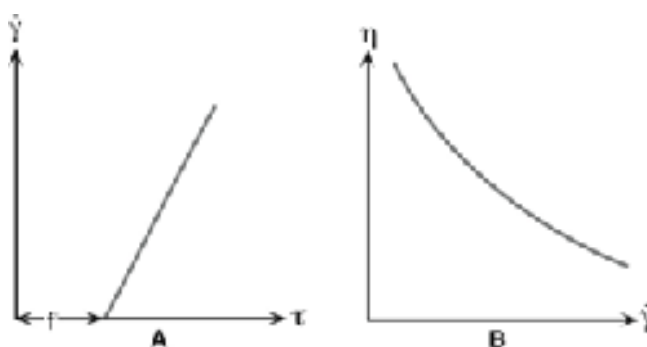


Рис.4. Зависимость напряжения сдвига (А) или вязкости (В) от скорости сдвига.

Для пластичные жидкостей.

В качестве примера пластичной жидкости можно привести томатный кетчуп, который начинает течь только после того, как ударить или потрясти емкость с ним. После преодоления критического напряжения

сдвига пластичные жидкости могут вести себя как ньютоновские, псевдопластичные или дилатантные[18].

Также известны жидкости, вязкость которых изменяется со временем при постоянных значениях скорости сдвига и внешних условиях. Соответственно, тиксотропной называется жидкость, вязкость которой уменьшается со временем, в том случае, если увеличивается, то – реопексной (рис.5).

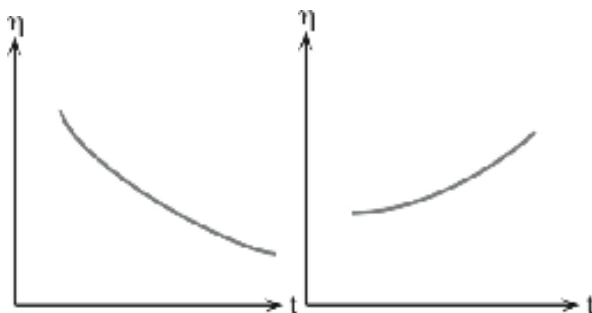


Рис.5. Зависимость напряжения сдвига (А) или вязкости (В) от скорости сдвига.

Для реопексной жидкостей

Оба поведения могут встречаться как вместе с вышеописанными типами течения жидкостей, так и только при определенных скоростях сдвига. При этом, для разных веществ время достижения постоянного значения вязкости будет варьироваться от нескольких секунд до нескольких дней. По распространенности реопексные материалы достаточно редко встречаются, в отличие от тиксотропных, к которым можно отнести смазки, вязкие печатные чернила, краски.

Характер поведения тиксотропных жидкостей при изучении влияния времени и скорости сдвига отражают кривые.

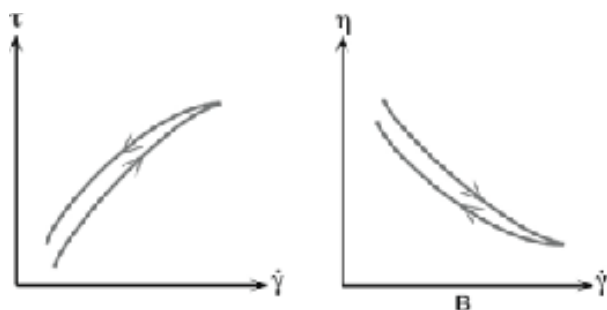


Рис.6. Зависимость напряжения сдвига (А) или вязкости (В) от скорости сдвига.

Для тиксотропных жидкостей

На рис.6. наблюдается образование «петли гистерезиса», когда исходящая и восходящая кривые не совпадают. Это обусловлено снижением вязкости жидкости при длительных деформациях. При этом, явление гистерезиса для различных систем может быть как обратимым, так и необратимым, то есть вязкость определенных систем может вернуться к первоначальным значениям, для других – это невозможно [19].

## 2. ПРАКТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

### 2.1. Описание лабораторной установки

Эксперименты проводятся с использованием ротационного вискозиметра серии «Alpha» фирмы «Fungilab» (рис.7) в НИЛ «Внутрипластовое горение» Института геологии и нефтегазовых технологий КФУ. Принцип действия прибора основан на измерении момента кручения вращающегося шпинделя в жидком образце при заданной скорости вращения. Диапазон измерения прибора в зависимости от шпинделя варьируется в пределах 15 – 6 000 000 мПа·с.





Рис.7. Ротационный вискозиметр серии «ALPHA»

Цифрами на рисунке обозначены: 1 - Дисплей, 2 - Клавиатура, 3 - Винтовой зажим, 4 - Защита шпинделя, 5 - Стойка, 6 - Шпиндель, 7 - Основание, 8 - Регулируемая опора

## **2.2. Проведение опытов (процедура измерения вязкости)**

### **2.2.1. Подготовка к работе**

Для достижения точного результата измерения вязкости неньютоновских жидкостей, необходимо знать их зависимость от времени и скорости сдвига. На реологические свойства жидкости также влияют ряд факторов: температура, условия измерения и старение образцов. Поэтому будет полезно фиксировать используемый шпиндель, частота вращения, температуры образцов и процедуру подготовки образцов каждый раз при измерении вязкости для сравнения полученных результатов с результатами других организаций и гарантировать воспроизведение полученных результатов. Перед началом работы внимательно осматривайте каждый шпиндель перед его установкой. Если он поврежден и его габаритные размеры изменились, это приведет к ошибочным результатам при измерении вязкости. Если значения вязкости измеряемой жидкости приблизительно известно, то тип шпинделя выбирается в соответствии с таблицей по максимально допускаемым значениям вязкости (таблица 2). Если вы не знаете даже примерную вязкость измеряемой жидкости, то лучший способ выбора шпинделя для каждой скорости - «метод проб и ошибок». Задача - получить значения момент кручения от 15 до 95 %. Но, рекомендуется, чтобы момент кручения был не ниже 50 %.

Таблица 2

Максимально допустимые значения вязкости в зависимости от типа шпинделя и скорости вращения

RPM/SP	TL5	TL6	TL7
0,01	300K	3M	6M
0,3	10K	100K	200K
0,5	6K	60K	120K
0,6	5K	50K	100K
1	3K	30K	60K
1,5	2K	20K	40K
2	1,5K	15K	30K
2,5	1,2K	12K	24K
3	1K	10K	20K
4	750	7,5K	15K
5	600	6K	12K
6	500	5K	10K
10	300	3K	6K
12	250	2,5K	5K
20	150	1,5K	3K
30	100	1K	2K
50	60	600	1,2K
60	50	500	1K
100	30	300	600
200	15	150	300

*Примечания*

- В таблице приведены рекомендации по максимально допускаемым значениям вязкости (в единицах cP, или mPa·S) для заданных значений отношения RPM/SP.*
- Буква K означает 1000, буква M – 1000000. Например, 7,8K=7800, 1,56M=1560000*
- Рекомендуется выбирать скорости вращения, обеспечивающие значения параметра RPM/SP не ниже 15 % от указанных в таблице значений*

Образцы не должны содержать воздушных пузырьков. Они должны быть хорошо перемешаны, и выдержаны при постоянной и однородной температуре. Объем пробы загружаем в цилиндр в зависимости от типа шпинделя (таблица 3).

Объём загружаемой пробы в цилиндр в зависимости от шпинделя

Тип шпинделя	Объём пробы, мл
TL5	6,7
TL6	9
TL7	9,4

Перед измерением вязкости убедитесь, что шпиндель и его защита имеют ту же самую температуру. Как правило, для поддержания нужной температуры образцов используются термостаты. Образец должен иметь свойства однородной жидкости; это означает, что он не должен иметь частиц, способных к осаждению, деформирующихся под действием напряжения сдвига или распадающихся на более мелкие частицы. Течение жидкости, по возможности, должно быть ламинарным. Нужно избегать условий, при которых возникает турбулентный режим течения жидкости. В процессе измерений не должно происходить ускорение или замедление шпинделя. Стандартный шпиндель должен быть погружен до половины относительно метки на его оси. Неправильное погружение шпинделя может привести к ошибочным результатам измерения вязкости. При использовании дисковых шпинделей Вы должны избежать образования воздушных пузырьков, которые могут оставаться под диском. По этой причине Вы должны погружать шпиндель в жидкость наклонно и плавно, и затем помещать его в центр образца. Только после этого можно закреплять шпиндель на оси вискозиметра.

### 2.2.2. Порядок проведения измерений

- 1) Пуск: включите сетевой выключатель на задней панели прибора. Прибор подаст звуковой сигнал, указывая, что он включен, и на дисплее появится информация относительно используемой программной версии и модели прибора, а также относительно выбранного языка сообщений.
- 2) Проверяем работу вискозиметра на неисправность электромотора простым и практичным способом: нажатием на кнопку “ENTER”. В

случае успешной проверки, по окончании теста самодиагностики прибор подаст звуковой сигнал, и на дисплее появится главное меню.

**ВАЖНОЕ ПРИМЕЧАНИЕ. Испытательный тест должен выполняться без шпинделя.**

- 3) Находясь в главном меню, перемещаем курсор с помощью клавиш  $\uparrow$  и  $\downarrow$  и нажатием  $\langle$ ENTER $\rangle$  выбираем опцию ‘Measurement’. Меню “Measurement” откроет Вам доступ к основным функциям измерения вязкости жидких сред (рис.8). Перемещаясь по всем полям экрана с помощью клавиш со стрелками и клавиши  $\langle$ TAB $\rangle$ , Вы можете приступить к редактированию каждого из полей.



Рис. 8. Интерфейс “Measurement”. Основные функции измерения вязкости

Поле SP вместе с выбранной скоростью определит максимальные и минимальные измеренные значения вязкости (см. таблица №1). Чтобы изменить тип шпинделя (для неньютоновских жидкостей обычно устанавливают шпиндели TL5, TL6 и TL7), Вы должны сначала выбрать поле SP нажатием клавиши  $\langle$ ENTER $\rangle$ .

Поле RPM. Ряд скоростей включает 18 predetermined скоростей: 0,3; 0,5; 0,6; 1; 1,5; 2; 2,5; 3; 4; 5; 6; 10; 12; 20; 30; 50; 60; 100 об/мин. Вязкость жидкости и тип используемого шпинделя определяют выбор скорости (см. таблицу 1).

- 4) Как только введены все установки экрана Measurements, нажатие на клавишу  $\langle$ ON $\rangle$  включит вращение шпинделя, что означает, что он готов к измерениям. Так как вискозиметр постоянно получает данных по

вязкости образца (одна точка данных при каждом обороте шпинделя), информация на экране будет постоянно изменяться. В зависимости от выбранной скорости может оказаться так, что значение скорости появится только через несколько секунд или даже минут. Необходимо, чтобы шпиндель сделал, по крайней мере, пять оборотов (что равносильно пяти измерениям) перед тем, как можно будет считать измерения состоявшимися, так как для стабилизации показаний требуется некоторое время. Необходимо также принимать во внимание установившуюся температуру образца. В дополнение к визуализации процесса измерения вязкости, с помощью клавиш  $\updownarrow$ , Вы можете увеличить или уменьшить скорость вращения шпинделя. Когда Вы нажимаете на одну из этих двух клавиш, частота вращения увеличивается или уменьшается относительно предыдущей скорости. Этим путем Вы можете изменить скорость вращения шпинделя, не выходя из экрана измерений. **ВАЖНОЕ ПРИМЕЧАНИЕ. Если процентная величина будет ниже 15% или приблизится к 100%, результат измерения нельзя считать значимым; в этом случае прибор будет подавать предупреждающий звуковой сигнал при каждом обороте шпинделя.**

- 5) Нажатием на клавишу <ON> Вы можете остановить или запустить электромотор, что позволит сделать мгновенную паузу в эксперименте.

### 2.2.3. Обработка полученных данных

Для неньютоновских жидкостей характерно привести данные в самом широком диапазоне скоростей сдвига, чтобы иметь возможность определить зависимость вязкости от скорости сдвига. Сравнение вязкости неньютоновских жидкостей проводят при одинаковых или очень близких скоростях сдвига. Если прибор не позволяет определить вязкость при одной из подобранных скоростей сдвига, то проводят испытание при самых близких по значению скоростях. Для каждой пробы вычисляют среднее арифметическое значение всех определений и обязательно в скобках указывают температуру испытания и скорость сдвига.

Например: 4200 мПа·с (20 °С, 1600 с<sup>-1</sup>). Если вязкость измерялась при разных температурах или разных скоростях сдвига, строят кривые, характеризующие эти зависимости (рис. 12). Зависимость вязкости от температуры строят в системе  $\log \eta - T$  или  $\ln \eta - 1/T$ . Если для данной пробы измерения проводились при различных температурах и разных скоростях сдвига, следует составить диаграмму, выражающую зависимость, причем каждой температуре будет соответствовать отдельная кривая. Если определялись только зависимости вязкости от температуры для неньютоновских жидкостей, отдельные пункты кривой зависимости должны соответствовать той же скорости сдвига. Переводные коэффициенты для расчета кинематической и динамической вязкости приведены ниже в (таблице 4).

Таблица 4

Переводные коэффициенты для расчета вязкости

Кинематическая вязкость  $\nu$

Единицы	мм <sup>2</sup> /с (сСт)	см <sup>2</sup> /с (Ст)	м <sup>2</sup> /с	м <sup>2</sup> /ч
мм <sup>2</sup> /с (сСт)	1	10 <sup>-2</sup>	10 <sup>-6</sup>	3,6·10 <sup>-3</sup>
см <sup>2</sup> /с (Ст)	10 <sup>2</sup>	1	10 <sup>-4</sup>	0,36
м <sup>2</sup> /с	10 <sup>6</sup>	10 <sup>4</sup>	1	3,6·10 <sup>3</sup>
м <sup>2</sup> /ч	2,78·10 <sup>2</sup>	2,78	2,78·10 <sup>-4</sup>	1

Динамическая вязкость  $\eta$

Единицы	Микро- пуаз (мкП)	Сан- типуаз (сП)	Пуаз [г/(см·с)]	кг/(м·с)	кг/(м·ч)	кг·с/м <sup>2</sup>	Па·с
Микропуаз (мкП)	1	10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-6</sup>	10 <sup>-7</sup>	3,6·10 <sup>-4</sup>	1,02·10 <sup>-8</sup>	10 <sup>-7</sup>
Сантипуаз (сП)	10 <sup>4</sup>	1	10 <sup>-2</sup>	10 <sup>-3</sup>	3,6	1,02·10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-3</sup>
Пуаз [г/(см·с)]	10 <sup>6</sup>	10 <sup>2</sup>	1	10 <sup>-1</sup>	3,6·10 <sup>2</sup>	1,02·10 <sup>-2</sup>	10 <sup>-1</sup>
Па·с [кг/(м·с)]	10 <sup>7</sup>	10 <sup>3</sup>	10	1	3,6·10 <sup>3</sup>	1,02·10 <sup>-1</sup>	1
кг/(м·ч)	2,78·10 <sup>3</sup>	2,78·10 <sup>-1</sup>	2,78·10 <sup>-3</sup>	2,78·10 <sup>-4</sup>	1	2,84·10 <sup>-3</sup>	2,78·10 <sup>-4</sup>
кг·с/м <sup>2</sup>	9,81·10 <sup>7</sup>	9,81·10 <sup>3</sup>	9,81·10 <sup>2</sup>	9,81	3,53·10 <sup>4</sup>	1	9,81

### 3. ЗАДАЧИ

#### Задача №1

Кинематическая вязкость при 50°C нефтепродукта с плотностью = 0,815 г/см<sup>3</sup> равна 10,2 мм<sup>2</sup>/с. Рассчитайте динамическую вязкость при этой температуре.

Решение:

Кинематическая и динамическая вязкости связаны уравнением

$\nu = \mu / \rho$ , где  $\mu$  — динамическая вязкость;  $\nu$  — кинематическая вязкость;  $\rho$  — плотность. Подставив в него значения  $\nu_{50}$  и  $\rho_{50}$ , получим:

$$\mu_{50} = \nu_{50} \cdot \rho_{50} = 10,2 \cdot 10^{-6} \cdot 815 = 8,313 \cdot 10^{-3} \text{ Па} \cdot \text{с} = 83,13 \text{ Ст}$$

#### Задача №2

Определить коэффициент кинематической вязкости нефти, если известно, что коэффициент динамической вязкости  $\mu = 0,75$  кг/(м·с), а плотность  $\rho = 950$  кг/м<sup>3</sup>

Решение:

Коэффициент кинематической вязкости  $\nu$  представляет собой отношение коэффициента динамической вязкости  $\mu$  жидкости к ее плотности:

$$\nu = \mu / \rho = 0,75 / 950 = 8,15 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$$

#### Задача №3

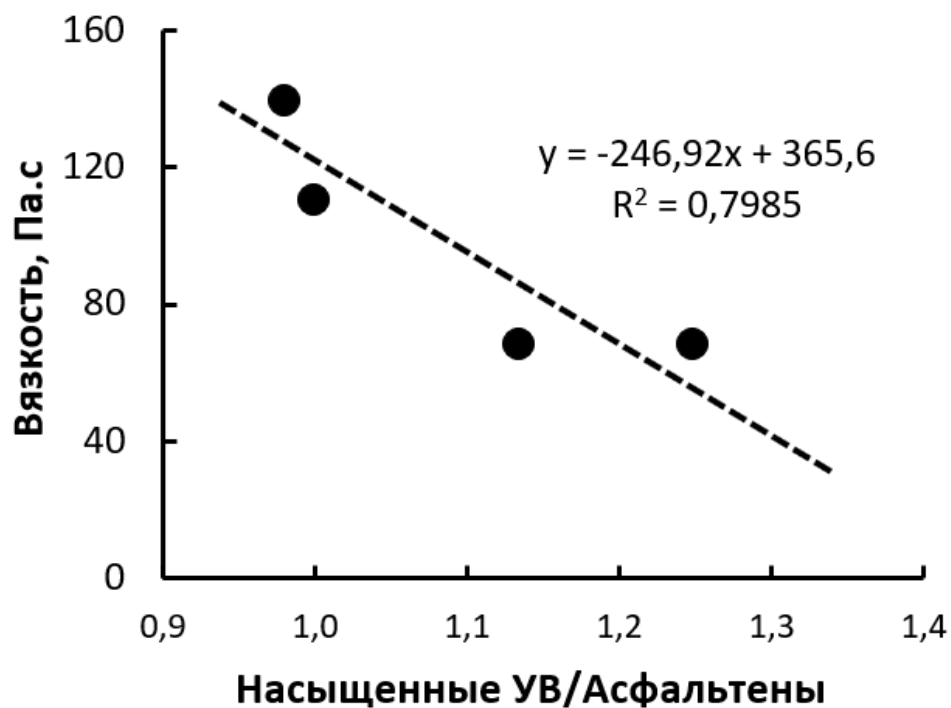
Высоковязкая нефть (271 Па·с при 20°C и 0,4 с<sup>-1</sup>) подвергается каталитическому паротепловому воздействию при продолжительности 6, 12, 18 и 24 часов. Результаты вязкости и группового состава нефти после облагораживания приведены в (таблице 5). Определить степень зависимости динамической вязкости нефти от ее группового состава.

Таблица 5

Вязкость (при 20С и 0,4 с<sup>-1</sup>) и групповой состав нефти в зависимости от продолжительности термокаталитического воздействия

Продолжительность воздействия, ч	ЛОВ, мас.%	Групповой состав, мас.%				Вязкость, Па·с
		Насыщенные УВ	Ароматические УВ	Смолы	Асфальтены	
6	1.92	19.6	23.4	37	20	139
12	1.98	18.5	38.1	24.8	18.5	110
18	2.05	20.2	38.3	23.8	17.8	68
24	2.21	20.1	39.1	24.7	16.1	68

Решение:





#### 4. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое вязкость?
2. Чем отличается кинематическая вязкость от динамической?
3. Дайте определение ньютоновским флюидам
4. Почему легкую нефть принято считать ньютоновским, а тяжелую неньютоновским?
5. Назовите распространенные типы неньютоновских жидкостей
6. Как связана кинематическая и динамическая вязкость?
7. Какая зависимость динамической вязкости от группового состава нефти?
8. Почему важно указывать при какой скорости сдвига было проведено измерение вязкости неньютоновских жидкостей?

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 33-2000. Нефтепродукты. Прозрачные и непрозрачные жидкости. Определение кинематической вязкости и расчет динамической вязкости.
2. Рыбак, Б.М. Анализ нефти и нефтепродуктов. – М.: Гостоптехиздат, 1962. – 888 стр.
3. Маскет, М. Физические основы технологии добычи нефти. – М., 2004.
4. Жданов, М.А. Нефтегазопромысловая геология и подсчет запасов нефти и газа. – М.: Недра, 1981. – 453 стр.
5. Беляев, В.В. Физические методы измерения коэффициентов вязкости нематических жидких кристаллов. Успехи физических наук. – 2001. – 3(171). – С. 267-298.
6. Гиматудинов, М.К., Ширковский, А.И. Физика нефтяного и газового пласта. – М.: Альянс, 2005. – 311 стр.
7. Мархасин, И.Л. Физико-химическая механика нефтяного пласта. – М.: Недра, 1977. – 214 стр.
8. Фукс, Г.И. Вязкость и пластичность нефтепродуктов. – М., 1959.
9. Тарг, С.М. Основные задачи теории ламинарных течений. – М., 1951.
10. Девликамов, В.В., Хабибуллин, З.А., Кабиров, Н.М. Аномальные нефти. – М.: Недра, 1975.
11. Фукс, Г.И. О течении жидкостей в узких зазорах между сближающимися плоскими телами / Г.И. Фукс // Доклады АН СССР. – 1957. – Т. 113. – №3. – С. 635-638.
12. Карасев, В.В. Измерения граничной вязкости по кинетике утолщения смачивающих пленок жидкостей в процессе сдувания / В.В. Карасев, Б.В. Дерягин // Журнал физической химии. – Т. 33. – Вып. 1. – 1959. – С. 100-106.
13. Базаров, Д.В. Исследование сдвиговой упругости жидкостей в объеме и граничных слоях / Д.В. Базаров, Б.В. Дерягин, А.В. Булгадаев // Исследования в области поверхностных сил. – М.: Наука, 1967. – С. 43-52.

14. Бейбутова, А.А. Некоторые пути регулирования неньютоновскими системами технологических показаний нефтедобычи: автореф. дис. ... канд. техн. наук / А.А. Бейбутова. – Баку, 1974.
15. Нерпин, С.В. Исследование механических свойств тонких слоев жидкости в концентрированных эмульсиях методом фильтрации / С.В. Нерпин, Н.В. Бондаренко // Доклады АН СССР. – 1957. – Т. 114. – №4. – С. 833-836.
16. Табидзе, А.А., Кошкин, Н.И. Деп. ВИНТИ. Ультразвуковой метод измерения вязкости. – №2081-В88 (1988), с. 1.
17. Богданов, В.Г. Термореологические свойства растворов нефтеполимерных смол / В.Г. Богданов, С.И. Приходько, З.Т. Дмитриева // Химия и химическая технология. – Т. 46. – Вып. 5. – 2003. – С. 112-114.
18. Желтов, Ю.В. Разработка сложнопостроенных месторождений вязкой нефти в карбонатных коллекторах. – 1997.
19. ГОСТ 3900-85. Нефть и нефтепродукты. Методы определения плотности.