



МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

«Казанский национальный исследовательский технологический университет»

Аналитический исследовательский центр

**Определение динамической вязкости на ротационном вискозиметре
Brookfield LVDV-II+ Pro**

Методические указания к лабораторной работе

Казань 2021

УДК 532.137

Составитель: К.А. Мишагин

Определение динамической вязкости на ротационном вискозиметре Brookfield LVDV-II+ Pro. Методические указания к лабораторной работе: Метод. указания /Казан. нац. иссл. технол. ун-т; Сост.: К.А. Мишагин. Казань, 2021. 32 с.

Цель настоящего методического указания дать более полное представление об одном из классических методов измерения вязкости – ротационном методе, на примере ее определения на вискозиметре серии Brookfield модели LVDV-II+ Pro.

Методическое указание предназначено для студентов, магистров, аспирантов ФГБОУ ВО «КНИТУ».

СОДЕРЖАНИЕ

| | |
|---|----|
| Введение..... | 4 |
| 1. Теоретические основы..... | 5 |
| 2. Основы вискозиметрии..... | 20 |
| 3. Ротационный вискозиметр Brookfield LVDV-II+ Pro. Общее описание.... | 26 |
| 4. Лабораторная работа №1 «Определение динамической вязкости водно- солевых растворов полимеров» | 29 |
| 5. Список литературы..... | 32 |
| 6. Приложение..... | 32 |

Введение

Изучение свойств объектов и зависимостей изменения количественной характеристики этих свойств под влиянием различных факторов является одним из наиболее распространенных экспериментальных методов исследования. В зависимости от объектов и целей исследования изучению подвергаются различные свойства. В отдельную группу можно выделить реологические свойства материалов, дающие информацию об объемно-структурных свойствах объектов исследования.

Реология — наука о деформационных свойствах материалов. Она заимствует некоторые основные понятия из механики сплошной среды (МСС), которая устанавливает на основе универсальных принципов механики, термодинамики, геометрии наиболее общие и поэтому справедливые для любых материалов законы их поведения под влиянием деформирующих усилий.

Материалы как реологические объекты характеризуются упругостью, вязкостью, прочностью и другими реологическими константами. Одной из задач реологии является установить, чем на самом деле окажется материал, изготовленный по определенной рецептуре и технологии: упругим твердым веществом, текучей жидкостью, эластичным (каучукоподобным) телом, пластичным составом или чем-то иным и как рецептура и технология влияют на реологическое состояние и величины констант. Так, в зависимости от условий нагружения, битум проявляет свойства жидкого вещества (расплавляется под действием слабой длительно действующей силы собственного веса) или твердого тела (раскалывается при ударе молотком), а также может проявлять упругость при кратковременном действии умеренной по величине импульсной силы.

Вязкость является физическим свойством, которое поддается количественному определению. В различных отраслях промышленности, например, химической, нефтехимической, пищевой, стекольной, лакокрасочной и других, исходные и конечные продукты подвержены колебаниям вязкости. В связи с этим о ходе технологических процессов и качестве выпускаемой продукции удобно судить по измеренным значениям вязкости. Большая зависимость вязкости жидкостей от их состава, структуры, строения молекул позволяет контролировать технологические процессы многих производств. Контроль вязкости жидких веществ наиболее распространен в нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности, по той причине, что вязкость является основным показателем, определяющим качество производимой продукции. Важное место занимает вязкость в системе показателей качества

жидких углеводородных топлив. Важно и то, что измерение вязкости является одним из наиболее массовых анализов.

Цель настоящего пособия дать более полное представление об одном из классических методов измерения вязкости – ротационном методе, на примере ее определения на вискозиметре серии Brookfield модели LVDV-II+ Pro.

1 Теоретические основы

Законы реологии и реологические модели

Реология изучает механические свойства систем по проявлению деформации тел под действием механических нагрузок. *Деформация* – это относительное смещение точек системы, при котором не нарушается ее сплошность. *Напряжение*, вызывающее деформацию тела, по физическому смыслу представляет собой давление и определяется отношением силы к площади, на которую она действует. По направлению приложения силы различают *нормальные напряжения* (сила направлена перпендикулярно к поверхности тела) и *тангенциальные напряжения* (сила направлена по касательной к поверхности). Соответственно существуют два основных вида деформации: *растяжение* (или сжатие) и *сдвиг*. Основные типы деформации представлены на рисунке 1

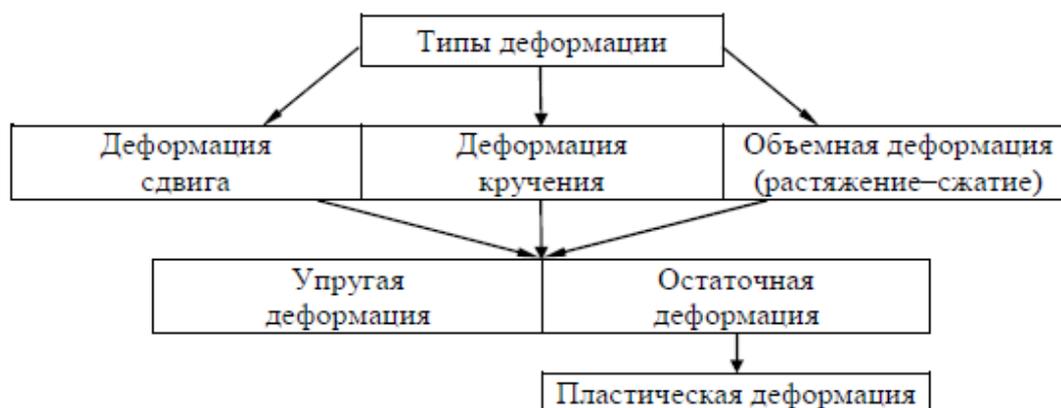


Рисунок 1 - Основные типы деформации

При *упругой деформации* структура тела полностью восстанавливается после снятия нагрузки (напряжения) – эта деформация обратима. При *остаточной деформации* изменения в системе остаются и после снятия нагрузки – такая деформация необратима. Остаточная деформация, при которой не происходит разрушения тела, называется *пластической*.

Соответствие характера деформации виду напряжения подтверждает *первая аксиома реологии*: при всестороннем равномерном (изотропном) сжа-

тии все материальные системы ведут себя одинаково – как идеальные упругие тела. При снятии нагрузки тело принимает первоначальную форму, т.е. изотропное сжатие не позволяет выявить различия в структуре тел.

Согласно *второй аксиоме реологии* любая материальная система обладает всеми реологическими свойствами (вязкость, упругость, пластичность, прочность), которые проявляются при сдвиговой деформации, наиболее важной в реологических исследованиях.

Количественную меру сдвига можно установить на примере деформации образца в виде прямоугольного параллелепипеда (рис. 2).

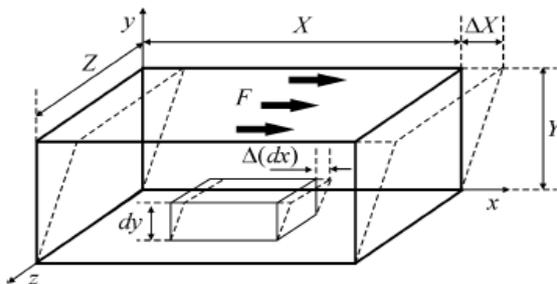


Рисунок 2 - Схематическое изображение деформации сдвига

Пусть *деформирующее усилие* F приложено по касательной к верхней грани площадью S . Оно создает напряжение сдвига во всем образце. Нижняя грань закреплена неподвижно.

Деформация материала должна быть выражена величиной, не зависящей от его формы и размера. В данном случае это отношение $\gamma = \Delta X / Y$, которое имеет ту же величину ($\gamma = dx / dy$) и для любого элемента объема внутри образца. Соответственно, *напряжение* $\tau = F / S$, приложенное к верхней грани, такое же, как и напряжение в любом элементе объема внутри образца, действующее на его грань, параллельную плоскости xz . Скорость деформации $\gamma' = d\gamma / dt$ в данном случае — это *скорость сдвига*. Так как время t и координата z — независимые переменные, то, изменив порядок дифференцирования по этим переменным, можно получить следующие соотношения:

$\gamma' = d(dx/dt) / dy = du / dy$, т. е. скорость деформации при простом сдвиге равна градиенту *скорости течения* $u = dx/dt$.

Реологические законы должны устанавливать связь между τ , γ , γ' через константы, характеризующие материал.

Для описания свойств реологических материалов часто используют их механические эквиваленты. В реологии структурно-механические свойства реальных тел и материалов представляют в виде реологических моделей, которые базируются на трех основных идеальных законах, связывающих напряжение с деформацией. Им соответствуют элементарные модели: идеально упругое тело Гука, идеально вязкое тело Ньютона и идеально пласти-

ческое тело Сен-Венана-Кулона. Схемы реологических моделей описывающие их поведение под действием напряжения называются *реологическими кривыми* (или *кривыми течения*).

Идеально упругое тело Гука представляют в виде спиральной пружины. После снятия нагрузки такая система мгновенно переходит в первоначальное состояние, т.е. тело приобретает исходную форму. В соответствии с *законом Гука* деформация γ в упругом теле пропорциональна напряжению сдвига τ :

$$\tau = G \gamma. \quad (1)$$

где G – *модуль Юнга* (или *модуль сдвига*), количественно отражающий упругие свойства материала. Величина G — *модуль сдвиговой упругости* — полностью характеризует реологические свойства идеального упругого материала. Закон Гука следует также рассматривать как определение понятия «упругость» и определение количественной меры G этого свойства.



Рисунок 3 - Схема модели идеально упругого тела Гука

Идеально вязкое тело Ньютона изображают в виде поршня с отверстиями, помещенного в цилиндр с жидкостью. В идеально вязком материале (жидкости) напряжение пропорционально скорости деформации (обычно этот закон называют законом Ньютона):

$$F \tau = \eta \gamma'. \quad (2)$$

Реологические свойства жидкости при сдвиге полностью характеризуются ее *вязкостью* η (в ламинарном режиме течения). Формально ее можно определить как силу сопротивления относительно перемещению слоев жидкости, приходящуюся на единицу площади слоя и отнесенную к скорости сдвига.

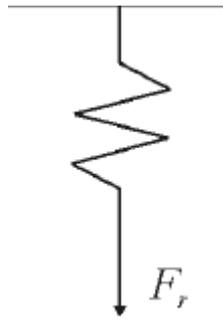


Рисунок 4 - Схема модели идеально вязкого тела

Идеально пластическое тело Сен-Венана-Кулона представляется как находящееся на плоскости твердое тело, при движении которого трение постоянно и не зависит от силы, перпендикулярной поверхности. В основе этой модели лежит закон сухого трения, в соответствии с которым деформация отсутствует, если напряжение сдвига меньше некоторой величины τ_s , т.е. если:

$$\tau < \tau_s \text{ то } \gamma = 0 \text{ и } \dot{\gamma} = 0. \quad (3)$$

Величина τ_s называется пределом текучести и характеризует усилие, необходимое для разрушения структуры тела, т.е. ее прочность. К идеально пластическому телу не может быть приложено напряжение, превышающее предел текучести. Если напряжение достигнет значения τ_s , то структура разрушается, после чего сопротивление напряжению полностью отсутствует. Развиваемая при этом деформация идеально пластического тела не имеет предела, и течение происходит с любой скоростью, т.е.:

$$\tau = \tau_s \text{ то } \gamma > 0 \text{ и } \dot{\gamma} > 0. \quad (4)$$



Рисунок 5 - Схема модели идеально пластического тела

Приведенные выше законы исчерпывают перечень фундаментальных эмпирических законов реологии и соответствующих им типов сил, возникающих при деформировании тел разной природы. Это не означает, что с их помощью можно с необходимой полнотой описать поведение любого мате-

риала. Реальные материалы ведут себя сложнее, а законы (1)–(4) относятся скорее к некоторым идеальным (реологически простым) материалам.

Многообразные реологические свойства реальных тел можно моделировать с помощью различных сочетаний рассмотренных идеальных моделей. Накопленный опыт изучения реологических свойств реальных объектов, а также результаты теоретических исследований их механических (идеализированных) эквивалентов, позволяют выделить следующие классы материалов (таблица 1), описываемые соответствующими реологическими законами.

Таблица 1 – Классификация неньютоновских и вязкоупругих материалов.

| Реологический класс материалов | Подкласс | Описание | Примеры |
|---|-----------------------------|---|---|
| Вязкоупругие | Тело Максвелла | Последовательное линейное соединение упругого и вязкого элемента | Механические модели, получаемые сочетанием механических эквивалентов простых реологических тел. |
| | Тело Кельвина (Фойгта) | Параллельное линейное соединение упругого и вязкого элемента | |
| Вязкопластичные | Тело Бингама | Параллельное соединение вязкого элемента и элемента сухого трения | |
| Вязкость материала не изменяется с продолжительностью механического воздействия | Бингамовский пластик | Минимальное напряжение (напряжение сдвига) необходимо для течения | Зубная паста, маргарин, майонез, суспензия глины, шоколад, томатный кетчуп |
| | Псевдопластичные (ползучие) | Кажущая вязкость понижается с увеличением напряжения сдвига. | Бумажная масса в воде, мороженное, кровь, сироп, гель для укладки волос, краски. |

| | | | |
|--|--------------|--|--|
| | Дилантные | Кажущая вязкость возрастает с увеличением напряжения сдвига. | Суспензия крахмала или песка в воде. |
| Вязкость материала изменяется с продолжительностью механического воздействия | Реопексные | Кажущаяся вязкость возрастает с продолжительностью сдвига | Взбитые кремы. |
| | Тиксотропные | Кажущаяся вязкость понижается с продолжительностью сдвига. | Некоторые глины, многие краски, чернила. |

Примером тела, проявляющего в зависимости от напряжения вязкие или упругие свойства, является **вязкопластическая модель Бингама (тело Бингама)**, которая представляет собой комбинацию из всех трех идеальных элементов. Схема модели Бингама приведена в Рис. 6.

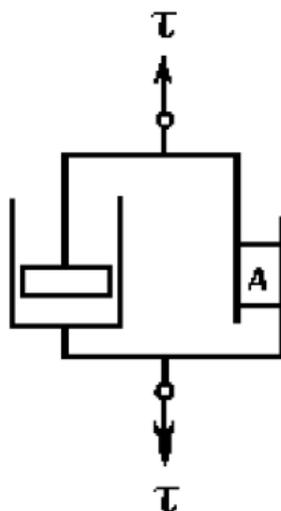


Рисунок 6 - Схема модели тела Бингама

В модели Бингама при малых напряжениях развиваются только упругие деформации и при $\tau < \tau_s$ величина $\gamma' = 0$. При достижении $\tau > \tau_s$ имеет место пластическая деформация, растущая до бесконечности, и вязкопластическое тело начинает течь. Напряжение P как бы разбивается на две составляющие, сложение которых приводит к **уравнению Шведова — Бингама**..:

$$\tau = \tau_s + \eta^* \gamma', \quad (5)$$

где η^* – *пластическая вязкость*. Величина η^* является частью ньютоновской вязкости и не учитывает прочности структуры, характеризуемой пределом текучести τ_s , но отражает скорость ее разрушения.

Тело Максвелла

Если мгновенно создать деформацию тела Максвелла величиной $\gamma\theta$ (например, переместив цилиндр до упора на рис. 7, и далее удерживать ее постоянной, то в первый момент времени эта деформация будет целиком обусловлена растяжением пружины, поскольку упругая часть деформации γr не требует для своего развития какого-либо времени. Растянутая пружина будет вызывать движение поршня со скоростью $d\gamma/dt = -\tau/\eta$. Отрицательный знак означает, что деформация пружины со временем уменьшается, а деформация вязкого элемента увеличивается на ту же величину. Этот процесс является внутренним — невидимым для наблюдателя по условиям опыта (общая деформация, равная сумме упругой и вязкой составляющих, остается неизменной). Если выразить в приведенном выше уравнении напряжение через деформацию с помощью закона Гука $\tau = G\gamma$ и решить уравнение при начальном условии $\gamma r = \gamma\theta$ при $\tau = 0$, то получатся уравнения:

$$\gamma r = \gamma\theta \exp(-Gt/\eta), \quad (6a)$$

$$\tau = \tau\theta \exp(-Gt/\eta). \quad (6б)$$

Так как $\tau = G\gamma r$ и $\tau\theta = G\gamma\theta$, то одновременно с упругой деформацией уменьшается во времени и величина напряжения, необходимого для поддержания первоначальной деформации $\gamma\theta$. Этот процесс имеет внешнее проявление в виде уменьшения усилия, создаваемого экспериментатором для поддержания первоначальной деформации. Таким образом, в этом опыте наблюдаемым параметром реологического состояния тела является действующее на него внешнее напряжение, а ненаблюдаемым — внутренние, скрытые от экспериментатора деформации. По истечении достаточно большого времени по сравнению с величиной η/G (теоретически бесконечно большого) τ становится практически равным нулю и для дальнейшего сохранения деформации $\gamma\theta$ уже не требуется приложения силы, т. е. изменение состояния тела становится необратимым. Полная необратимость деформации является признаком жидкости, поэтому тела Максвелла следует относить к жидкостям. Величина $t^* = \eta/G$ представляет собой время релаксации внешних напряжений или время релаксации упругих внутренних деформаций. В вязкоупругих жидкостях действуют равные напряжения на ее упругие и вязкие элементы. Деформации этих элементов аддитивны, т. е. складываясь, дают наблюдаемую суммарную величину деформации. Аналогично можно показать, что если в момент времени $t = 0$ начать деформацию тела с постоянной скоростью γ' , то необходимое для этого напряжение будет расти во времени по закону:

$$\tau = \eta\gamma' [1 - \exp(-t/t^*)]. \quad (7)$$

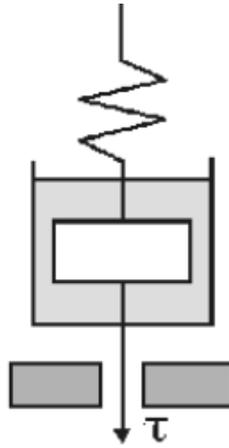


Рисунок 7 - Схема модели тела Максвелла

Тело Кельвина (Фойгта)

Напряжение, приложенное к телу Кельвина, распределяется между упругим и вязким сопротивлениями деформированию:

$$\tau = G\gamma + \eta\dot{\gamma}. \quad (8)$$

Иначе говоря, напряжения в нем аддитивны. Деформации обоих элементов сопротивления — упругого и вязкого — в любой момент времени одинаковы и совпадают с наблюдаемой величиной деформации.

Характерные свойства вязкоупругих твердых тел можно обнаружить с помощью следующего воображаемого или реального эксперимента: произвольным усилием τ в произвольном режиме вызовем деформацию тела величиной γ_0 и затем устраним деформирующее усилие, предоставив материалу возможность самопроизвольно изменять свое состояние.

Внутренние напряжения (растянутая пружина) будут возвращать тело Кельвина в недеформированное состояние, а вязкие силы будут тормозить этот процесс релаксации деформации в соответствии с уравнением $G\dot{\gamma} + \eta\dot{\gamma}' = 0$ или $d\gamma/\gamma = -dt/\eta$. Его интегрирование при условии $\gamma = \gamma_0$ при $t = 0$ дает закон убывания первоначальной деформации γ после разгрузки материала, т. е. при $\tau = 0$:

$$\gamma = \gamma_0 \exp(-Gt/\eta). \quad (9)$$

При умножении левой и правой частей формулы (9) на $G\tau$ получается закон убывания внутренних напряжений τ_r во времени:

$$\tau_r = \tau_0 \exp(-Gt/\eta). \quad (10)$$

По форме уравнения релаксации (9), (10) совпадают с уравнениями (6), но по содержанию они различны: уравнение (9) описывает полную, наблюдаемую величину деформации, а уравнения (6) — невидимый внутренний процесс. Уравнение (10) описывает ненаблюдаемый процесс релаксации внутренних напряжений, а аналогичная формула в наборе (6) — внешнего действующего напряжения.

При мгновенном нагружении тела Кельвина постоянной силой $\tau = G\gamma\theta$ деформация растет во времени в соответствии с формулой:

$\gamma = \gamma\theta[1 - \exp(-t/t^*)]$, а скорость деформации уменьшается от начальной величины $\gamma\theta' = \gamma\theta/t^*$ до нуля за бесконечно большое время по закону:

$$\gamma = \gamma\theta \exp(-Gt/\eta). \quad (11)$$

Здесь по-прежнему величина $t^* = \eta/G$ представляет собой время релаксации напряжений и деформаций, но в вязкоупругом твердом теле Кельвина оно относится к релаксации наблюдаемой деформации и невидимых внутренних напряжений при постоянстве приложенного извне деформирующего усилия. По истечении времени, достаточно большого по сравнению со временем релаксации, деформация достигает постоянной равновесной величины $\gamma\theta$, предопределенной величиной действующего усилия $\tau = G\gamma\theta$.

После снятия нагрузки эта деформация исчезнет в соответствии с законами, отражаемыми формулами (9) и (10), что и является признаком твердого тела. Время релаксации вязкоупругого твердого тела соответствует времени запаздывания в установлении равновесной деформации.

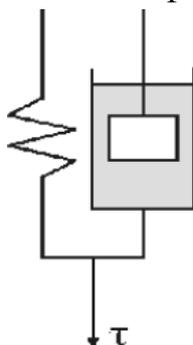


Рисунок 8 - Схема модели тела Кельвина (Фойгта)

Бингамовский пластик (идеальный пластик)

Бингамовский пластик представляет собой вязкопластичный материал, который при малых напряжениях сдвига ведет себя как твердое тело и течет как вязкая жидкость при напряжениях сдвига, превышающих τ_s . Одним из примеров может служить зубная паста, которая не вытекает из тюбика до приложения определенного усилия, а после этого сохраняет свою форму. Физической причиной этого поведения является то, что частицы дисперсной фазы (например, частицы глины или полимера), образуют пространственную структуру (за счет физических сил притяжения) и для разрушения этой структуры необходимо приложить определенное усилие. После разрушения структуры система течет как вязкая структура, а при снятии напряжения снова структурируется. Такие тела называют телами Шведова – Бингама (или

бингамовскими пластиками). Зависимости скорости сдвига и вязкости от напряжения сдвига для таких систем представлены на рисунке 9. Аналитически эти зависимости описываются уравнениями (5).

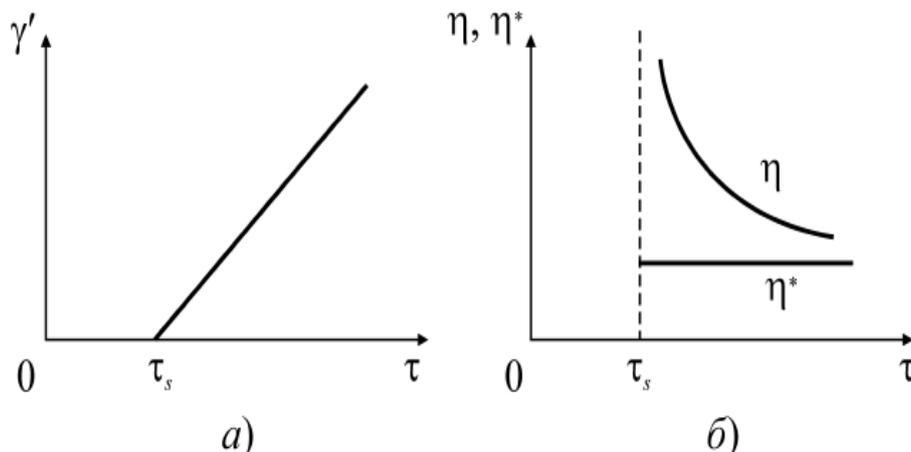


Рисунок 9 - Реологические кривые скорости деформации (а) и вязкости (б) пластичного материала: η – вязкость; η^* – пластическая вязкость материала

Реологическое поведение идеального пластичного материала исчерпывающе характеризуется двумя константами τ_s и η^* . Величина η^* – «пластическая вязкость» — по смыслу отличается от ньютоновской вязкости η . На основании уравнения (5) вязкость по Бингаму:

$$\eta^* = (\tau - \tau_s) / \gamma' \quad (12)$$

есть тангенс угла наклона графика $\gamma'(\tau)$ (рис. 8) к оси γ' и имеет смысл только при $\tau > \tau_s$, поскольку при $\tau < \tau_s$ материал не течет. Из уравнения (12) видно, что η^* учитывает только ту часть полного сопротивления деформации τ , которая пропорциональна скорости сдвига. Другая часть сопротивления, не зависящая от γ' , учитывается величиной сдвиговой прочности τ_s . В отличие от этого ньютоновская вязкость $\eta = \tau / \gamma'$ пластичного материала учитывает все сопротивление деформации:

$$\eta = \eta^* + \tau_s / \gamma' \quad (13a)$$

или

$$\eta = \eta^* \tau / (\tau - \tau_s). \quad (13b)$$

Она складывается из постоянной величины η^* , которая называется пластической вязкостью, и переменного слагаемого τ_s / γ' (структурной составляющей вязкости), которое в форме вязкости учитывает сопротивление, обусловленное наличием прочности на сдвиг τ_s .

Таким образом, поведение пластичного материала при деформировании может быть представлено в форме уравнения Шведова — Бингама (5). Тогда оно характеризуется двумя константами τ_s и η^* или в форме уравнения

Ньютона (2). В последнем случае характеристикой реологических свойств материала является переменная ньютоновская вязкость в формулах (13).

Псевдопластичные материалы

Отличительной способностью псевдопластичных материалов является то, что их прочность кажущаяся. На самом деле материал способен течь и при сколь угодно малых напряжениях, но при его увеличении до некоторой критической величины τ_c скорость течения начинает резко увеличиваться. Это напряжение называется ***динамическим предельным напряжением сдвига***. Псевдопластические (или разжижающиеся под действием напряжения сдвига) жидкости представляют собой обычно растворы больших полимерных молекул. В эксперименте не всегда легко определить характер предельного напряжения, т. е. является оно статическим (истинной прочностью) или динамическим (кажущейся прочностью). Естественным эталоном сравнения различных текучих материалов служат ньютоновские жидкости, поэтому в качестве сравниваемых величин следует однозначно предпочесть ньютоновские вязкости даже для «неньютоновских» материалов, т. е. отношение напряжения к скорости деформирования. Иногда это отношение называют ***эффективной вязкостью***.

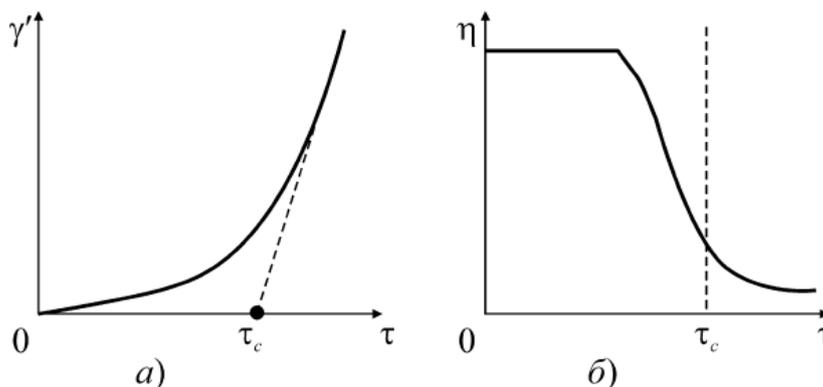


Рисунок 10 - Реологические кривые течения (а) и вязкости(б) псевдопластичного (ползучего) материала

Дилатные материалы

Материалы у которых с увеличением напряжения скорость деформирования увеличивается медленнее, чем по линейному закону называются дилатными. Дилатные материалы представляют собой суспензии с большим количеством твердой фазы.

Математически дилатные материалы можно приблизительно описать с помощью степенного закона (закон Оствальда – де Ваеля). Такие жидкости называют степенными. Степенная жидкость является разновидностью так

называемой обобщенной ньютоновской жидкости, для которой напряжение сдвига определяется, как:

$$\tau = K(\dot{\gamma})^n, \quad (14)$$

где: K – индекс консистенции, Па*сⁿ;

$\dot{\gamma}$ – скорость сдвига (или градиент скорости, перпендикулярный плоскости сдвига), с⁻¹;

n – индекс течения (безразмерный).

Значение:

$$\eta_{эф} = K(\dot{\gamma})^{n-1} \quad (15)$$

представляет собой кажущуюся или эффективную вязкость, как функцию скорости сдвига. Здесь K и n — эмпирические константы, отражающие свойства материала. На основании уравнений (14), (15) смысл этих констант может быть установлен формально, например K численно равно вязкости при скорости деформирования $du/dy=1$, но отличается от нее по размерности, причем размерность вязкости зависит от показателя n .

Степенной закон (закон Оствальда – де Ваеля) широко используется из-за своей простоты, но описывает поведение неньютоновских жидкостей только приблизительно. Например, если n меньше единицы, то степенной закон предсказывает, что эффективная вязкость будет понижаться с повышением скорости сдвига неограниченно. При этом жидкость будет обладать бесконечно большой вязкостью в покое и нулевой вязкостью при приближении напряжения сдвига к бесконечности, но реальные жидкости будут иметь минимальную и максимальную эффективную вязкость, зависящую от физикохимии и молекулярного уровня. Таким образом, степенной закон является хорошим описанием реологического поведения жидкости только в определенном диапазоне скоростей.

На основании значения коэффициента течения степенные жидкости могут быть разделены на три группы: при $n < 1$ – псевдопластичные и тиксотропные; при $n = 1$ – ньютоновские; при $n > 1$ – дилантные.

Тиксотропные и реопексные жидкости

Реопексными называются жидкости, для поддержания постоянной скорости течения которых необходимо постепенное повышение скорости сдвига. Жидкости для поддержания постоянной скорости течения которых, наоборот, требуется уменьшение скорости сдвига называются **тиксотропными**.

Таким образом скорость течения для таких жидкостей является функцией времени. И тиксотропные и реопексные свойства могут проявляться в комбинации со свойствами пластических, псевдопластических и дилантных материалов.

Суть явления «тиксотропия» заключается в изменении свойств материала при прикосновении к нему, т. е. под влиянием слабых механических воздействий. Поскольку уменьшение вязкости обусловлено изменением (разрушением) структуры дисперсной системы, то в коллоидной химии тиксотропия определяется как способность системы к обратимым изотермическим разрушениям и восстановлению структуры. Другим видимым проявлением тиксотропности является зависимость вязкости от времени — после механического воздействия (например, встряхивания раствора) материал некоторое время сохраняет высокую текучесть (малую вязкость).

При применении различных скоростей сдвига реологическое поведение тиксотропных систем будет соответствовать реологическим кривым, представленным на рисунке 11.

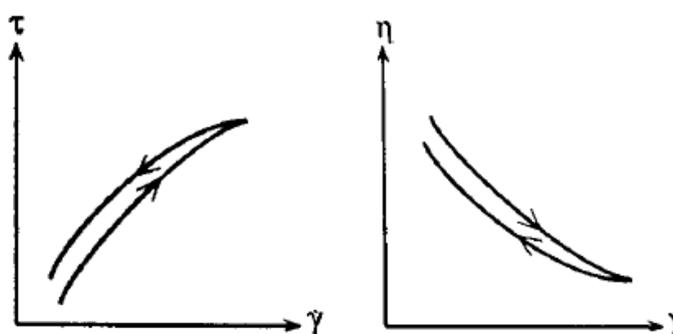


Рисунок 11 - Кривые тиксотропных систем

Неньютоновские жидкости

Так называемые реологические кривые — графики зависимости γ' от τ или η от τ — отражают поведение материала в установившемся (стационарном) режиме деформирования.

Для неньютоновских жидкостей зависимость напряжения сдвига τ и градиента скорости γ' выражается прямой, проходящей через начало координат с углом наклона определяемым вязкостью (рис. 12).

Неньютоновские жидкости разделяются на три группы. К первой группе относятся так называемые вязкие или стационарные неньютоновские жидкости. Для этих жидкостей функция $f(\tau) = dW/dn(\gamma')$ не зависит от времени.

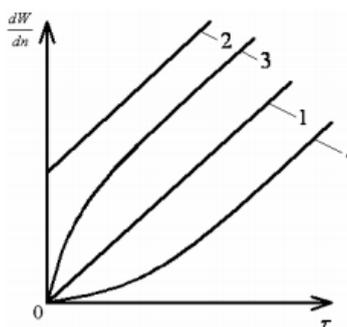


Рисунок 12 - Кривые течения для различных жидкостей:

1 – ньютоновские; 2 – бингамовские пластичные; 3 – псевдопластичные; 4 – дилатантные

По виду кривых течения различают следующие разновидности жидкостей этой группы:

– бингамовские пластичные жидкости, которые при малых напряжениях лишь несколько деформируются и начинают течь только при увеличении τ до некоторого значения τ_0 , называемого пределом текучести. При $\tau > \tau_0$ они ведут себя как ньютоновские.

– псевдопластичные жидкости, которые начинают течь, как и ньютоновские при очень малых значениях τ . Однако η_k (кажущаяся вязкость) зависит от величины τ . Значение η_k снижается с увеличением dW/dn (γ') и кривая течения переходит в прямую при большом сдвиге. Кривая течения имеет вид

$$\tau = \eta_k \left(\frac{dW}{dn} \right)^m, \quad (16)$$

где $m < 1$ коэффициент, чем меньше его величина, тем больше жидкость отличается от ньютоновской;

– дилатантные жидкости характеризуются возрастанием η_k с увеличением dW/dn (γ'), представляют собой суспензии с большим количеством твердой фазы. Кривая течения аналогична кривой (1) для псевдопластичных жидкостей. Отличие состоит в том, что коэффициент $m > 1$.

Ко второй подгруппе относятся неньютоновские жидкости, у которых зависимость dW/dn (γ') и τ изменяется во времени.

К третьей подгруппе относятся вязкоупругие или максвелловские жидкости, которые текут под воздействием напряжения τ , но после снятия напряжения τ частично восстанавливают свою форму, подобно упругим твердым телам.

Ньютоновские жидкости

Как уже было сказано ранее, если η_k не зависит от dW/dn (γ'), то жидкости называются ньютоновскими. К ньютоновским жидкостям относятся: вода, плазма крови, масла (при низких скоростях сдвига), кремнийорганические жидкости, глицерин и т.д.

Графики зависимости (Рис.13) dW/dn (γ') от τ или η от τ для ньютоновских материалов с большей (η_1) или меньшей (η_2) вязкостью представляют собой прямые, исходящие из начала координат (γ' , τ), или прямые, параллельные оси абсцисс в координатах (η , τ).

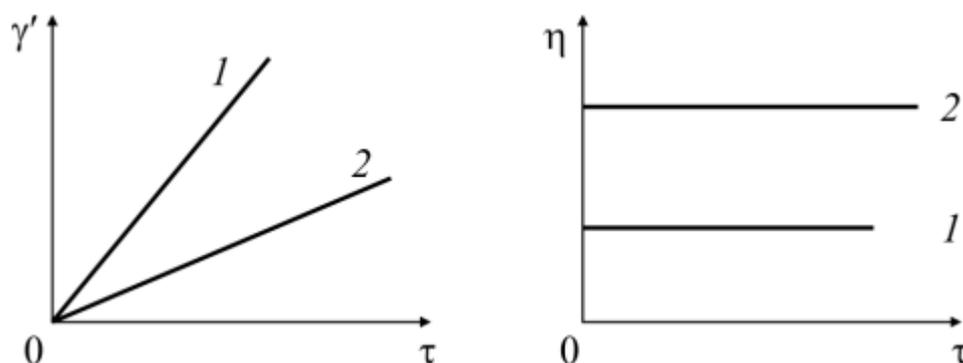


Рисунок 13 - Реологические кривые скорости сдвига (а) и вязкости (б) менее (1) и более (2) вязкой жидкости.

Зависимость вязкости жидкостей от температуры и давления

На значения измеряемых реологических характеристик влияет множество факторов, что необходимо учитывать при сравнении реологических свойств различных объектов. Основными факторами (помимо свойств и структуры самого объекта исследования) являются:

- температура (обычно при повышении температуры вязкость понижается);
- скорость сдвига (особенно важно для неньютоновских жидкостей);
- параметры измерений (модель вискозиметра, комбинация скорость вращения/ шпиндель, размер и форма контейнера, оборудование, используемое для пробоподготовки, гомогенность образца);
- продолжительность измерений (особенно для тиксотропных и реопексных систем, а так же для систем, в которых протекают химические реакции);
- условия хранения и приготовления образцов.

Вязкость жидкостей обычно убывает с повышением температуры. Это естественно, так как при этом облегчается взаимное перемещение молекул. У маловязких жидкостей, например у воды, это падение, хотя и заметно, но не очень значительно. В жидкости каждая молекула совершает колебания около

незакрепленного (в кристаллическом теле около закрепленного) положения равновесия. При перемещении одних слоев жидкости относительно других ориентировка молекул нарушается, что повышает сопротивляемость движению и тем больше, чем ниже температура. С повышением температуры сопротивляемость изменению ориентировки молекул в капельной жидкости и сопротивление ее молекул перемещению уменьшается, т.е. уменьшается сила трения. Существует большое количество зависимостей вязкости от температуры, однако ни одна из предложенных существующих зависимостей не может быть использована для выработки корректирующих или компенсирующих воздействий на получаемый в процессе измерения результат. При изменении температуры воды Пуазейль предложил определять коэффициент динамической вязкости по эмпирической формуле.

2. Основы вискозиметрии

Вискозиметрия (лат. *viscous* – клейкий + гр. *metre* – мерю) – раздел физики, занимающийся методами измерения вязкости (внутреннего трения). Несмотря на существование большого количества методов измерения вязкости, их развитие непрерывно продолжается, с целью увеличения точности и расширения пределов измерения, обеспечения непрерывной автоматической работы в реакционных аппаратах, повышения надежности при работе во взрыво- и пожароопасных условиях, при определении характеристик агрессивных, токсичных и коагулирующих жидкостей. Основными требованиями, предъявляемыми к современным методам измерения вязкости, являются:

- обоснование расчетных соотношений и указание границ применимости;
- достаточная простота конструкции, воплощающей метод, и доступность приборов, обеспечивающих реализацию метода;
- пригодность методов для измерения в широких интервалах температур и давлений;
- точность, чувствительность метода и воспроизводимость полученных результатов;
- наличие опытных данных по хорошо изученным веществам, позволяющим оценить возможности метода;
- пригодность метода для автоматизации и работы с ЭВМ.

Научные основы вискозиметрии основаны на законах гидродинамики вязкой жидкости, а методы измерения вязкости базируются на решенных задачах гидродинамики

Существует большое количество интегральных методов измерения вязкости, каждый из которых соответствует определенным контролируемым веществам и условиям измерения, в основу которых положены различные физические явления и процессы. К классическим интегральным методам измерения вязкости относятся капиллярный метод (метод истечения), ротационный метод и метод Стокса.

Приборы, на которых проводятся реологические измерения, называются вискозиметрами. Они могут иметь разные конструкции и принципы действия, но во всех случаях задается или скорость деформации исследуемого материала $\dot{\gamma}$ и измеряется соответствующая ей удельная сила сопротивления материала (напряжение) τ , или задается деформирующее усилие τ , а измеряется соответствующая ему скорость деформации.

Вязкость в таких вискозиметрах может измеряться как при помощи специально создаваемого внешнего давления, так и за счет гидростатического давления исследуемой жидкости (вискозиметры Оствальда, ВПЖ и др.). Существует группа вискозиметров, которые могут использоваться лишь при наличии устройства, создающего внешнее давление (вискозиметры Убеллоде).

Рассмотрим устройство и принцип работы **капиллярного вискозиметра ВПЖ-2** (рис. 14). Вискозиметр состоит из двух колен, в одно из которых впаяны капилляр *1* и полые шарики *2* с метками. Это колено впаяно в резервуар *3*, который соединен с другим коленом вискозиметра *4*, представляющим собой широкую трубку. Через колено *4* в резервуар *3* вводят определенный объем исследуемой жидкости, и при необходимости помещают вискозиметр в термостат на 10÷15 минут. Затем с помощью резиновой груши уровень жидкости поднимают так, чтобы верхний шарик был заполнен на одну треть объема. После этого измеряют время свободного истечения жидкости от верхней метки вискозиметра до нижней.

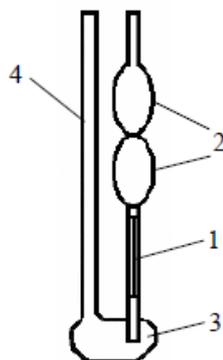


Рисунок 14 - Капиллярный вискозиметр ВПЖ-2

Вискозиметр Убеллоде (рис. 15) представляет собой U-образную трубку, каждое колено которой содержит расположенные на одном уровне и одинаковые по размеру шарики 2 и 3. В одно колено вискозиметра впаян капилляр 4, через который под давлением протекает жидкость. Исследуемую жидкость через воронку заливают в колено без капилляра. С помощью резиновой груши поднимают уровень жидкости так, чтобы оба шарика были заполнены до половины (линия АВ). Подъем жидкости следует осуществлять осторожно, чтобы избежать вспенивания жидкости и образования пузырей. Заполненный вискозиметр помещают в термостат и присоединяют колено без капилляра с помощью резинового шланга к системе вакуумирования. Это колено снабжено расширением 1, предотвращающим попадание жидкости в коммуникации вакуумной установки. Затем поднимают уровень жидкости в колене с капилляром 4 выше метки «а» и при заданном вакууме фиксируют время истечения жидкости от метки «а» до метки «б». Очевидно, что жидкость течет через капилляр под действием как внешнего давления, так и гидростатического давления, которое падает по мере протекания жидкости. В ряде случаев высокая скорость сдвига приводит к несоответствию экспериментально определенной вязкости системы ее истинному значению, что может быть связано с межмолекулярными взаимодействиями, т.е. с наличием структурной составляющей вязкости, а также с ориентацией и деформацией макромолекул. Поэтому возникает необходимость в применении вискозиметров, позволяющих измерять вязкость при малых скоростях сдвига. Для этих целей подходят ротационные вискозиметры, которые используются для измерения вязкости высоковязких жидкостей и дисперсных систем.

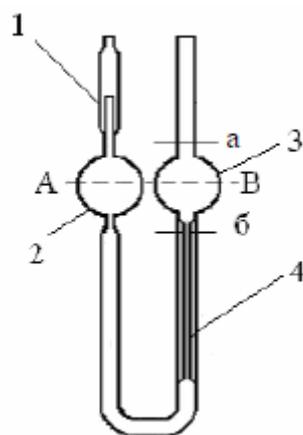


Рисунок 15 - Вискозиметр Убеллоде

В шариковых вискозиметрах вязкость определяется по скорости прохождения свободно падающего шарика или по скорости деформации жидкости при вдавливании в нее с заданной силой шарика (рис. 16). Шарик 1, укрепленный на штоке 4, вдавливают с заданной силой F в исследуемый раствор 3, помещенный в цилиндрический сосуд 2 со строго постоянным по высоте внутренним диаметром. Скорость деформации (вдавливания) измеряют по шкале 5, фиксируя время прохождения определенного числа делений шкалы. Прибор позволяет получать зависимости деформации от времени. Значения вязкости могут быть определены при калибровке вискозиметра по жидкости с известными реологическими свойствами.

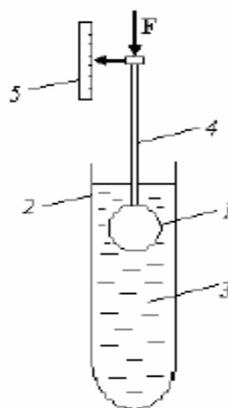


Рисунок 16 - Шариковый вискозиметр

У каждого из типов прибора есть свои достоинства и недостатки, но в наибольшей мере к идеальному прибору приближаются **вискозиметры ротационного типа**. В них испытуемый материал находится в зазоре между двумя коаксиальными цилиндрами (рис. 17). Один из них (ротор) вращается, а другой (статор) неподвижен. При этом силоизмерительным элементом мо-

жет быть или ротор, или статор. Измеряется крутящий момент N , действующий на этот элемент, и угловая скорость вращения ротора ω .

При условии, что зазор h между ротором и статором много меньше радиуса R ротора (или статора), скорость сдвига вычисляется по формуле (17), а напряжение — по формуле (18):

$$\gamma' = \omega R / h, \quad (17)$$

$$\tau = N / 2\pi R 2H \quad (18)$$

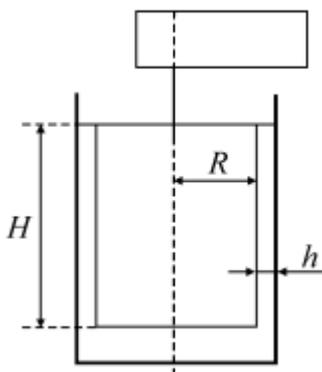


Рисунок 17 - Схема ротационного вискозиметра: R — радиус внутреннего цилиндра; h — зазор между внутренним и внешним цилиндром; H — глубина погружения цилиндра в исследуемый состав

Здесь H — глубина погружения силоизмерительного элемента прибора в исследуемый раствор.

На рис. 18 представлена схема **магнитного ротационного вискозиметра**. Вискозиметр представляет собой цилиндрический резервуар 1, заполненный исследуемой жидкостью 2, в которой свободно плавает ротор 3. Ротор 3 заполнен эталонной жидкостью 4, в которую погружен поплавок 5 с постоянным магнитом 6. Вискозиметр снабжен источником вращающегося магнитного поля 7, в качестве которого используется магнитная мешалка. Датчик 8 и указатель 9 представляют собой систему измерения угловой скорости вращения ротора ω_p . При работе вискозиметра поплавок 5 за счет взаимодействия магнита 6 с вращающимся с угловой скоростью ω_m магнитным полем (от источника 7) приходит в режим синхронного вращения и увлекает за собой эталонную жидкость 4 и цилиндрический ротор 3. Вращение ротора тормозится силами вязкости, возникающими в исследуемой жидкости 2, поэтому ротор вращается с угловой скоростью $\omega_p < \omega_m$. Тогда:

$$\frac{\eta_1}{\eta_2} = \kappa \left[\frac{\omega_p}{\omega_m} - 1 \right], \quad (19)$$

где η_1 – вязкость эталонной жидкости; η_2 – вязкость исследуемой системы; k – конструктивный коэффициент вискозиметра, значение которого находится из соотношения ω_p/ω_m при $\eta_1 = \eta_2$. В качестве эталонной жидкости используется жидкость, вязкость которой известна с высокой точностью.

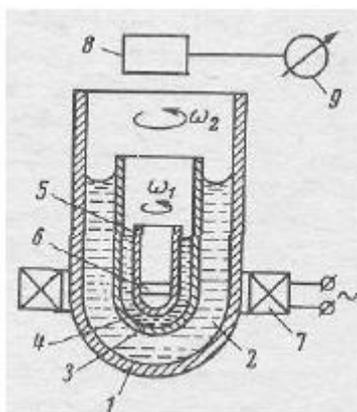


Рисунок 18 - Магнитный ротационный вискозиметр

Конструктивно проще приборы, у которых вращается внутренний цилиндр (вискозиметр с внутренним ротором). Он же обычно служит и датчиком величины крутящего момента. Его величина измеряется по деформации (углу закручивания) упругого элемента (спиральной пружины или торсиона), через который на ротор передается вращательное движение. Эти приборы имеют два недостатка. Первый состоит в том, что под действием центробежной силы возникает движение материала и в радиальном направлении, причем оно имеет ячеистую структуру (зоны движения от ротора к статору и в обратном направлении чередуются). Это нарушает однородность сдвиговой деформации и искажает результаты измерений. Приборы с вращающимся внешним цилиндром (внешним ротором) лишены этого недостатка. При этом упрощается и измерение величины крутящего момента, действующего на внутренний цилиндр, поскольку он неподвижен, но сложнее организовать термостатирование вращающегося стакана (внешнего цилиндра) с исследуемым препаратом.

Второй недостаток присущ всем ротационным вискозиметрам с массивным внутренним цилиндром, выполняющим функцию или ротора, или статора. Он заключается в том, что исследуемый материал заполняет также и донную часть прибора — промежуток между дном сосуда (внешнего цилиндра) и нижним торцом внутреннего цилиндра. Эта часть материала вносит свой вклад в общую силу сопротивления деформированию, причем в ряде случаев неизвестную, поскольку скорость деформации здесь непостоянна. Ротационные приборы разных конструкций и фирм, в сущности, отличаются именно способом решения этой проблемы.

В частности, этой проблемы фактически не существует в приборах с тонкостенным ротором, у которого площадь нижнего торца ротора, а следовательно, и его вклад в силу трения, практически равны нулю. Прибор такой конструкции, как и прибор с массивным внутренним ротором, пригоден для исследования при низких и умеренных скоростях вращения ротора, так как при высоких скоростях в одном из зазоров (во внешнем, если ротором является тонкостенный цилиндр, и во внутреннем в обратном случае) возникает ячеистое радиальное течение суспензии под действием центробежных сил.

Нижнему торцу внутреннего массивного цилиндра можно придать коническую форму. Тогда зазор между торцом и дном стакана и линейная скорость вращения увеличиваются с увеличением расстояния от оси вращения. Поэтому скорость сдвига не зависит от расстояния от оси вращения. Значение угла наклона образующей конуса следует выбрать так, чтобы скорости сдвига в коаксиальном рабочем зазоре вискозиметра и в его придонной части были одинаковы.

Применяются и приборы типа конус-пластина, в которых вместо внутреннего цилиндра остается тонкая шайба с конической формой ее нижней стороны. В ряде случаев можно ограничиться измерением только величины предельного напряжения сдвига τ_s . Для этого имеются простые приборы Ребиндера — Вейлера.

3 Ротационный вискозиметр Brookfield RVDV-II+ Pro

3.1 Общее описание

Вискозиметры Brookfield – это ротационные вискозиметры, принцип работы которых основан на измерении закручивания калиброванной пружины при вращении шпинделя (цилиндра и др.) в тестируемой жидкости с постоянной скоростью. Шпиндель (1) (рис. 4) вращается в жидкости, помещенной в контейнер (2) с помощью мотора (3), помещенного в корпус (4) через калиброванную пружину (5). Вязкое трение жидкости о шпиндель определяется по закручиванию калиброванной пружины, которое измеряется датчиком угла вращения. Закручивание пружины отражается на дисплее (6), либо выводится на печать.

Вискозиметр DV-II+ Pro компании (Brookfield) предназначен для измерения вязкости жидкости при заданных скоростях сдвига. Благодаря возможности использования различных скоростей и шпинделей возможно измерение вязкости в различных диапазонах.

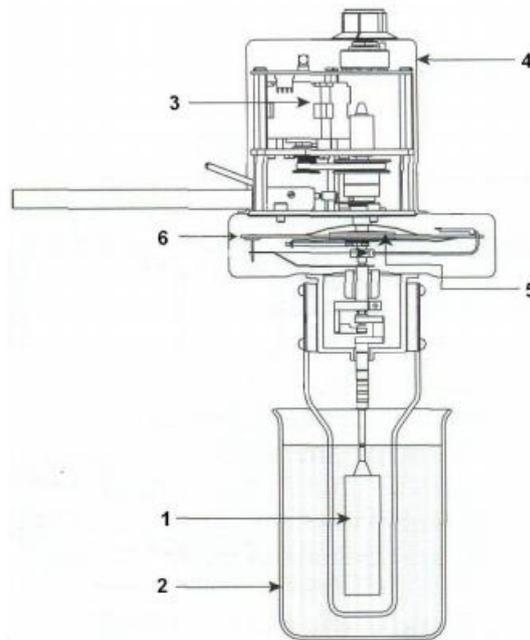


Рисунок 19 – Схема ротационного вискозиметра Brookfield

Диапазон измерения вязкости жидкости зависит от скорости вращения шпинделя, его размеров и формы, а также от размеров и формы контейнера с жидкостью, в которой вращается шпиндель, и линейного диапазона момента кручения калиброванной пружины. Момент кручения для калиброванной пружины в модели – LVDV-II+ Pro составляет 0,0673 мН·м (или 673,7 Дин·см).

Вискозиметр DV-II+ Pro предлагает различные режимы контроля, включая традиционное автономное управление, автоматическое управление через программу, загружаемую в прибор с компьютера, или полное управление через ПК с использованием программы Brookfield Rheocalc32.

Данные измерений, выводимые на дисплей:

1. Вязкость отображается в миллиПаскаль-секундах (мПа·с, индикация «mPa·s») или сантиПуазах (сПз, индикация «cP»).

2. Напряжение сдвига отображается в ньютонах на квадратный метр (Н/м², индикация «N/m²») или в динах на квадратный сантиметр (Дин/см², индикация «D/sm²»).

3. Скорость сдвига отображается в обратных секундах (1/с, индикация «1/SEC»).

4. Процент закручивания калиброванной пружины отображается в процентах от полного диапазона (индикация «%»).

3.2 Измерение вязкости

Процедура измерения динамической вязкости

Измерение вязкости проводится по следующей общей процедуре. С измерительными шпинделями LV в качестве контейнера для жидкости рекомендуется использовать широкие химические стаканы Гриффина емкостью 600 мл. 35

1. Смонтируйте на вискозиметре DV-II+ Pro защитную рамку.

2. Погрузите шпиндель в жидкость по центру контейнера до тех пор, пока уровень жидкости не достигнет канавки на валу шпинделя. Дисковые шпиндели следует погружать в жидкость под небольшим углом во избежание захвата пузырьков воздуха под нижней поверхностью диска. Подсоедините шпиндель к нижнему валу вискозиметра: слегка поднимите вал и, крепко удерживая вал одной рукой, другой рукой наворачните на него шпиндель (левая резьба!). Избегайте приложения боковых усилий к валу вискозиметра. Проверьте уровень погружения шпинделя и горизонтальность установки вискозиметра.

3. Для выполнения измерения вязкости выберите измерительный шпиндель и задайте скорость вращения на панели прибора. Выбор шпинделя и скорости вращения для жидкости с неизвестными свойствами осуществляется путем проб и ошибок. Необходимо выбирать такие шпиндели и скорости вращения, при которых отсчет момента лежит в диапазоне от 10 до 90 % от максимального значения. Существует два основных правила для такого выбора:

- значение вязкости обратно пропорционально размеру шпинделя;
- значение вязкости обратно пропорционально скорости вращения шпинделя.

При работе с вязкими веществами выбирайте маленькие шпиндели и/или низкие скорости вращения. Если выбранный шпиндель/скорость вращения приводит к перегрузке, уменьшите скорость или выберите меньший шпиндель.

В ходе выбора может обнаружиться, что существует несколько различных комбинаций шпиндель/скорость вращения, которые отвечают требованию попадания в диапазон отсчетов момента 10 – 90 %. В этом случае может быть использована любая из приемлемых комбинаций.

Некоторые жидкости могут проявлять неньютоновский характер зависимости вязкости от скорости вращения. Это выражается в том, что результаты измерения реологических параметров зависят от скорости вращения шпинделя.

4. Включите двигатель. Дождитесь стабилизации показаний (время стабилизации зависит от скорости вращения и характеристик тестируемой жидкости, обычно после осуществления 5 оборотов шпинделя). Для достижения максимальной точности старайтесь получить отсчет момента выше 10 %.

5. При смене шпинделя и/или пробы выключайте двигатель вискозиметра нажатием кнопки MOTOR ON/OFF I ESCAPE. Для очистки шпинделя обязательно отсоединяйте его.

4. Лабораторная работа №1

«Определение динамической вязкости водно-солевых растворов полимеров»

Цель работы: Изучение принципа действия ротационного вискозиметра, ознакомление с методикой измерения динамической вязкости исследуемых жидкостей.

4.1. Средства измерений, вспомогательное оборудование, реактивы, материалы:

- Ротационный вискозиметр Брукфильда, модель DV II+ Pro, тип LV
- Шпиндель №1, диапазон измерений (15 - 20000) мПа*с;
- Шпиндель №2, диапазон измерений (50 - 100000) мПа*с.
- Весы электронные аналитические, высокого класса точности, пределы погрешности нагруженных весов: $\pm 0,2$ мг при нагрузке до 50 г/
- Электродвигатель RW 20 digital (!KA, Германия) с регулятором частоты вращения в диапазоне от 1,7 до 10 с⁻¹ (от 100 до 600 мин⁻¹).
- Мешалка из нержавеющей стали.
- Измеритель температуры, предел допускаемой погрешности $\pm 0,2$ °С.
- Термостат или термостатирующее устройство по технической документации, утвержденной в установленном порядке, обеспечива-

ющие поддержание температуры ($20 \pm 0,5$) °С.

- Часы сигнальные ПЧ-3 по ТУ 9452-012-34711238 -2006.
- стакан стеклянный Н-1-500 по ГОСТ 25336.
- Вода дистиллированная по ГОСТ 6709.
- Натрий хлористый по ГОСТ 4233, ч.
- Секундомер механический СОПр-2а-3-000 по ТУ 25-1894.003-90, класс точности - третий, шкала деления 0,2 с.

4.2 Ход работы

Приготовление основного раствора с массовой долей флокулянта 1 %

Пробу флокулянта взвешивают в лотке из алюминиевой фольги в количестве $4,50 \text{ г} \pm 0,01 \text{ г}$. В стакане взвешивают дистиллированную или обессоленную воду в количестве $400,5 \pm 0,1 \text{ г}$. В стакан с водой добавляют навеску флокулянта таким образом, чтобы порошок распределился в воде без комков. Перемешивание раствора осуществляют не более 1 мин с частотой вращения мешалки $(5,0-8,3) \text{ с}^{-1}$ ($300-500 \text{ мин}^{-1}$). Затем водный раствор полимера перемешивают в течение 60 мин с частотой вращения мешалки $3,3 \text{ с}^{-1}$ (200 мин^{-1}). Температура воды должна быть в пределах $(22 \pm 3) \text{ °С}$.

Приготовление рабочего раствора

В водный раствор полимера добавляют $(45,0 \pm 0,1) \text{ г}$ хлорида натрия, соль распределяют в течение 1 мин путем перемешивания с частотой вращения мешалки $(5,0-8,3) \text{ с}^{-1}$ ($300-500 \text{ мин}^{-1}$). Затем осуществляют перемешивание водно-солевого раствора полимера в течение 15 мин с частотой вращения мешалки $3,30 \text{ с}^{-1}$ (200 мин^{-1}). Стакан с полученным водно-солевым раствором полимера помещают в термостат и темперируют раствор при температуре $(20 \pm 1) \text{ °С}$ в течение 15 мин. Раствор повторно перемешивают в течение 1 мин с частотой вращения мешалки $3,30 \text{ с}^{-1}$ (200 мин^{-1}).

Проведение измерений

Измерение динамической вязкости водно-солевого раствора полимера проводят при скорости вращения шпинделя $0,17 \text{ с}^{-1}$ (10 мин^{-1}). В раствор медленно опускают шпиндель вискозиметра, так чтобы максимально избежать захвата пузырьков воздуха. Значение вязкости в мПа*с записывают непосредственно с дисплея вискозиметра по истечении 120 с. Номер шпинделя выбирают в зависимости от динамической вязкости раствора. Шпиндель №1 применяют для диапазона значений вязкости от 100 до 950 мПа*с. Если значение вязкости превышает 950 мПа*с, применяют шпиндель №2 при той же скорости вращения.

Обработка результатов измерений

За результат измерения динамической вязкости водно-солевого раствора полимера принимают результат единичного измерения. Результат измерений округляют до целого числа, кратного пяти.

Контрольные вопросы

1. Дайте определение понятию вязкость.
2. Какому закону подчиняется движение капельных жидкостей и газов? Объясните физический смысл динамического коэффициента вязкости.
3. Как зависит вязкость жидкостей и газов от температуры и давления? Чем можно объяснить эту зависимость?
4. В чем состоит отличие ньютоновских жидкостей от аномальных жидкостей?
5. Изобразите графически зависимость касательного напряжения от градиента скорости бингамовских пластичных жидкостей, псевдопластичных, дилатантных и ньютоновских жидкостей. Объясните эту зависимость.
6. Какие приборы используются для измерения вязкости жидкостей? Объясните принцип их действия.

Список литературы

1. Новый справочник химика и технолога. Электродные процессы. Химическая кинетика и диффузия. Коллоидная химия – СПб.: НПО «Профессионал», 2007. – 838 с.
2. Косой В.Д., Дунченко Н.И., Егоров А.В. Инженерная реология в производстве мороженого. – М.: ДеЛи принт, 2008.– 196 с.
3. Овчинников П.Ф., Круглицкий Н.Н., Михайлов Н.В. Реология тиксотропных систем. – Киев: «Наукова думка», 1972.– 120 с.
4. <http://www.brookfieldengineering.com/support/documentation/astmsarticleprints.asp#foods>

ПРИЛОЖЕНИЕ

Коды измерительных шпинделей и диапазоны вязкости

| Адаптер | Шпиндель | Диапазон вязкости, мПа·с | Код | SMC | SRC |
|--------------------------------|----------|--------------------------|-----|-----|-----|
| - (базовая комплектация) | LV1 | 15-20000 | 61 | 6,4 | 0 |
| | LV2 | 50-100000 | 62 | 32 | 0 |
| | LV3 | 200-400000 | 63 | 128 | 0 |
| | LV4 | 1000-2000000 | 64 | 640 | 0 |