Вискозиметры

Вязкость - свойство жидкостей оказывать сопротивление перемещению одного слоя относительно другого. Количественно вязкость характеризуется значением динамической вязкости или коэффициентом внутреннего трения. Характерной особенностью этого вида трения является то, что оно наблюдается не на границе твердого тела и жидкости, а во всем объеме жидкости.

Кинематическая вязкость равна отношению динамической вязкости среды к ее плотности при той же температуре.

При измерениях часто пользуются также величиной относительной (условной) вязкости, характеризующейся отношением вязкости данной жидкости к вязкости воды при той же температуре.

Вискозиметр – прибор для измерения вязкости

Основные методы вискозиметрии

Капиллярный метод вискозиметрии

Метод капиллярной вискозиметрии опирается на закон Пуазейля о вязкой жидкости, описывающий закономерности движения жидкости в капилляре.

Приведем уравнение гидродинамики для стационарного течения жидкости, с вязкостью η через капилляр вискозиметра:

Q – количество жидкости, протекающей через капилляр капиллярного вискозиметра в единицу времени, м3/с,

R – радиус капилляра вискозиметра, м

L – длина капилляра капиллярного вискозиметра, м

η – вязкость жидкости, Па·с,

р - разность давлений на концах капилляра вискозиметра, Па.

Отметим, что формула Пуазейля справедлива только для ламинарного потока жидкости, то есть при отсутствии скольжения на границе жидкость – стенка капилляра вискозиметра. Приведенное уравнение используют для определения динамической вязкости. Ниже размещено схематическое изображение капиллярного вискозиметра.

В капиллярном вискозиметре жидкость из одного сосуда под влиянием разности давлений р истекает через капилляр сечения 2R и длины L в другой сосуд. Из рисунка видно, что сосуды имеют во много раз большее поперечное сечение, чем капилляр вискозиметра, и соответственно этому скорость движения жидкости в обоих сосудах в N раз меньше, чем в капилляре вискозиметра. Таким образом не все давление пойдет на преодоление вязкого сопротивления жидкости, очевидно, что часть его будет расходоваться на сообщение жидкости нопределённой кинетической энергии. Следовательно, в уравнение Пуазейля необходимо ввести некоторую поправку на кинетическую энергию, называемую поправкой Хагенбаха:

где h – коэффициент, стремящийся к единице, d –плотность иссдледуемой жидкости.

Вторую поправку условно назовём поправкой влияния начального участка капилляра вискозиметра на характер движения исследуемой жидкости. Она будет характеризовать возможное возникновение винтового движения и завихрения в месте сопряжения капилляра с резервуаром капиллярного вискозиметра (откуда вытекает жидкость). Суть поправки состоит в том, что вместо истинной длины капилляра вискозиметра L мы вводим кажущуюся длину L':

n – определяется экспериментально на основе изменений при разных значениях L и примерно равен единице.

Следует учитывать, что при измерении вязкости органических жидкостей с большой кинематической вязкостью поправка Хагенбаха незначительна и составляет доли процента. Если же говорить о высокотемпературных вискозиметрах, то вследствие малой кинематической вязкости жидких металлов поправка может достигать 15%.

Метод капиллярной вискозиметрии вполне можно отнести к высокоточному методу вискозиметрии в силу того, что относительная погрешность измерений составляет доли процента, в зависимости от подбора материалов вискозиметра и точности отсчёта времени, а также иных параметров, участвующих в методе капиллярного истечения.

Вибрационный метод вискозиметрии

Вибрационный метод вискозиметрии базируется на определении изменений параметров вынужденных колебаний тела правильной геометрической формы, называемого зондом вибрационного вискозиметра,при погружении его в исследуемую среду. Вязкость исследуемой среды определяется по значениям этих параметров, при этом обычно используется градуировочная кривая вискозиметра (для случая примитивного вибрационного вискозиметра; в целом, не теряя общности, этот принцип переносится и на более сложные приборы).

Введём несколько обозначений:

ω – частота колебаний, τ – время колебания тонкого упруго закрепленного зонда вибрационного вискозиметра, S - площадь пластины зонда вискозиметра; колебания происходят под действием гармонической силы . Вязкость и плотность исследуемой среды соответственно обозначим η и d.

Частотно-фазовый вариант вибрационного метода вискозиметрии используется для сильно-вязких жидкостей. В этом случае измеряется частота колебаний зонда вискозиметра, сначала не погруженного (ω0) и затем погруженного (ω) в жидкость при сдвиге фаз .

Для измерения вязкости менее вязких сред, например, металлических расплавов наиболее подходящим является амплитудно-резонансный вариант вибрационного метода вискозиметрии. В этом случае добиваются того, чтобы амплитуда А колебаний была максимальной (путём подбора частот колебаний). Поэтому измеряемым параметром, по которому определяется вязкость становится амплитуда колебаний зонда вискозиметра. В общем случае для малых значений вязкости имеем:

.

Учтем поправки С2(сторонние силы: трения, поверхностного натяжения, лобового сопротивления и т.п.). Имеем конечную формулу метода вибрационной вискозиметрии:

.

Градуировка вискозиметра производится по известным жидкостям (именно определяются постоянные С1,С2).

Метод падающего шарика вискозиметрии

Метод падающего шарика вискозиметрии основан на законе Стокса, согласно которому скорость свободного падения твердого шарика в вязкой неограниченной среде можно описать следующим уравнением:

,

где V – скорость поступательного равномерного движения шарика вискозиметра; r – радиус шарика; g – ускорение свободного падения; d – плотность материала шарика; ро - плотность жидкости.

Необходимо отметить, что уравнение справедливо только в том случае, если скорость падения шарика вискозиметра довольно мала и при этом соблюдается некое эмпирическое соотношение: .

Как и в капиллярном методе вискозиметрии, необходимо учитывать возникающие поправки на конечные размеры цилиндрического сосуда вискозиметра с падающим шариком (высотой L и радиусом R, при условии, если выполняется ). Такие действия приводят к уравнению для определения динамической вязкости жидкости методом падающего шарика вискозиметрии:

.

На основе метода создано множество моделей высокотемпературных вискозиметров, в которых измеряется вязкость расплавленных стекол и солей.

Ротационный метод вискозиметрии

Ротационный метод вискозиметрии заключается в том, что исследуемая жидкость помещается в малый зазор между двумя телами, необходимый для сдвига исследуемой среды. Одно из тел на протяжении всего опыта остаётся неподвижным, другое, называемое ротором ротационного вискозиметра, совершает вращение с постоянной скоростью. Очевидно, что вращательное движение ротора визкозиметра передается к другой поверхности (посредством движения вязкой среды; отсутствие проскальзывания среды у поверхностей тела предполагается, таким образом рассматриваются). Отсюда следует тезис: момент вращения ротора ротационного вискозиметра является мерой вязкости.

Для простоты мы рассмотрим инверсную модель ротационного вискозиметра: вращаться будет внешнее тело, внутренее тело останется неподвижным, ему и будет сообщаться момент вращения. Однако для краткости изложения будем называть внутреннее тело ротором ротационного вискозиметра.

Введём необходимые обозначения:

R1,L - радиус и длина ротора ротационного вискозиметра;

ω - постоянная угловая скорость вращения внешнего тела;

R2 - радиус вращающегося резервуара ротационного вискозиметра;

η - вязкость исследуемой cреды;

M1 - момент вращения, передаваемый через вязкую жидкость, равный

d,l - диаметр и длина упругой нити,

φ - угол, на который закручивается неподвижно закреплённая нить,

G - момент упругости материала нити

При этом крутящий момент M1 ротора ротационного вискозиметра уравновешивается моментом сил упругости нити М2:

.

Заметим вновь, что М1 = М2, откуда после нескольких преобразований относительно η имеем:

,

или ,

где k – постоянная ротационного вискозиметра.

Если рассматривать ту же задачу для ротационного вискозиметра с вращающимся внутренним (ротором висозиметра) и неподвижным внешним телами, имеем:

.

или

.

В этом случае G – момент, необходимый для поддержания постоянной частоты вращения, (один оборот ротора вискозиметра за τ с).

Заметим, что полученные отношения справедливы для цилиндра бесконечной длины, в реальных условиях учитывается поправка на размеры тел ротационного вискозиметра. Для этого производится вычисление так называемой эффективной высоты H ротационного вискозиметра:

1. проводится измерение момента для жидкостей с различным значением вязкости (η1 и η2) при двух различных высотах внутреннего цилиндра (L1 и L2);

2. экстраполяцией прямых М1 = f(L) и М2 = f(L) к нулевому значению М1 и М2 получают величину ∆L;

3. H=L+∆L.

Эффективную высоту ротационного вискозиметра H подставляют в уравнения.

Ультразвуковой метод вискозиметрии

Сущность метода ультразвуковой вискозиметрии заключается в том, что в исследуемую среду погружают пластинку из магнито-стрикционного материала, называемую зондом вискозиметра на которую намотана катушка, в которой возникают короткие импульсы тока длительностью порядка 20±10 мксек, приводящие к возникновению колебаний. В соответствии с законом сохранения, при колебаниях пластинки в катушке наводится ЭДС, которая убывает со скорростью, зависящей от вязкости среды. Затем, при падении ЭДС до определённого порогового значения, в катушку поступает новый импульс. Вискозиметр определяет вязкость среды по частоте следования импульсов.

Вискозиметры, действие которых основано на ультразвуковом методе вискозиметрии, нельзя отнести к классу вискозиметров с широким диапазоном измерений. К классу высокотемпературных вискозиметров их также нельзя отнести в силу величины относительной погрешности, возникающей при высокотемпературной вискозиметрии и свойств материалов прибора.

Классификация вискозиметров

- по температуре исследуемой среды различают высокотемпературные вискозиметры и вискозиметры, изготовленные из нетермостойких материалов;

- по свойствам исследуемой вязкой среды различают универсальные вискозиметры и специальные (т.е. предназначенные для измерения вязкости сред с определёнными заранее известными свойствами, например ньютоновских жидкостей);

- по методу вискозиметрии различают капиллярные, вибрационные, ультразвуковые, ротационные, пузырьковые, вискозиметры с падающим шариком;

- по точности измерений различают высокоточные вискозиметры и даже т.н. образцовые вискозиметры;

- по области применения различают промышленные, лабораторные, медицинские вискозиметры;

- есть и такой вид вискозиметра, как полевой вискозиметр, - вискозиметр примитивной конструкции.

Вискозиметр вибрационный

Вибрационный вискозиметр в самом простом случае представляет из себя резервуар с вязкой жидкостью и некоторое тело (пластина, шар, цидлиндр), называемое зондом вискозиметра, которое производит вынужденные колебания в вязкой среде.

Сущность эксперимента заключается в определении изменений параметров вынужденных колебаний зонда вискозиметра при погружении его в вязкую среду. Руководствуясь теорией метода вибрационной вискозиметрии, по значением этих параметров определяют вязкость среды.

Вибрационый вискозиметр имеет значительно большую по сравнению с ротационными вискозиметрами чувствительность и также может быть применён для сред температурой до 2000 °C в инертной атмосфере или вакууме при наличии как больших, так и сравнительно малых масс расплавов.

В настоящее время для измерения динамической вязкости широко применяют электронные вибрационные вискозиметры, в которых зонд совершает вынужденные колебания под воздействием импульсов электромагнитного вибратора со встроенным датчиком амплитуды.

Вибрационные высокотемпературные вискозиметры с электронным дистанционным управлением могут использоваться в условиях агрессивных средств.

Относительная погрешность измерений при использовании вибрационного вискозиметра составляет ±0,5-1%. При работе расплавами в интервале 700—1900 °C общая погрешность вискозиметра увеличивается и может составить ±3-5%.

Вискозиметр Гепплера

Вискозиметр Гепплера относится к вискозиметрам с движущимся в исследуемой среде шариком. Действие вискозиметра Гепплера основано на законе Стокса о шарике, падающем в неограниченной вязкой среде.

Вискозиметр представляет собою трубку, выполненную из прозрачного (или непрозрачного) материала, в которую помещается вязкая среда. Вязкость определяется по скорости прохождения падающим шариком промежутков между метками на трубке вискозиметра, исходя из формул метода падающего шарика вискозиметрии.

При использовании вискозиметра Гепплера возникают трудности, связанные с непрозрачностью вязкой среды либо трубки вискозиметра. В этом случае сложно определить местонахождение шарика; с целью преодоления такого характера трудностей были сделаны попытки внедрения в шарик вискозиметра материалов, излучающих рентгеновские лучи. В настоящее время в вискозиметрах типа вискозиметров с падающим шариком применяется способ регистрации магнитных полей.

Вискозиметр Гепплера и подобные ему вискозиметры используются для измерения вязкости различных сред и позволяют вести измерения с погрешностью в пределах 1-3%.

Вискозиметр Гепплера, снабжённый термостатирующей баней, часто характеризуется как универсальный высокотемпературный вискозиметр

Вискозиметр Брукфильда

Вискозиметр Брукфильда - высокоточный прибор для поточного измерения вязкости сред. Поточные промышленные вискозиметры Брукфильд (Brookfield) используют в своём устройстве ротационный метод вискозиметрии и широко применяются на нефтяных и газовых скважинах, где необходим непрерывный контроль вязкости сред.

Вискозиметр капиллярный

Капиллярный вискозиметр представляет собою один или несколько резервуаров данного объёма с отходящими трубками малого круглого сечения, или капиллярами. Принцип действия капиллярного вискозиметра заключается в медленном истечении жидкости из резервуара через капилляр определенного сечения и длины под влиянием разности давлений. В автоматических капиллярных вискозиметрах жидкость поступает в капилляр от насоса постоянной производительности.

Суть опыта при определении вязкости состоит в измерении времени протекания известного количества жидкости при известном перепаде давлений на концах капилляра. Дальнейшие расчёты ведутся на основании закона Пуазейля.

Капиллярный вискозиметр за счёт простоты устройства и возможности получения точных значений вязкости нашёл широкое распространение в вискозиметрии жидкостей (масел, расплавов). Несмотря на кажущуюся хрупкость тонких капилляров, многие капиллярные вискозиметры являются высокотемпературными вискозиметрами. Однако в случае, если температура вязкой жидкости достаточна высока, возникает трудность в подборе материала вискозиметра, который может как изменить форму (изменение диаметра капилляра вискозиметра недопустимо, см. Капиллярный метод вискозиметрии), так и вступить во взаимодействие с вязкой жидкостью, что плохо отразится на точности данных измерения вязкости.

Относительная погрешность измерений при использовании капиллярного вискозиметра составляет 0,1-2,5%

Вискозиметр ротационный

В вискозиметре ротационном исследуемая вязкая среда помещается в зазор между двумя соосными телами правильной геометрической формы (цилиндры, конусы, сферы или их сочетания). Одно из тел, называемое ротором, приводится во вращение с постоянной скоростью, другое остаётся неподвижным. Принцип действия вискозиметра ротационного основывается на нескольких положениях. Вращательное движение от одного тела (ротора) передается жидкостью к другому телу. Теория ротационного метода вискозиметрии предполагает отсутствие проскальзывания жидкости у поверхностей тел. Следовательно, момент вращения, передаваемый от одной поверхности к другой, является мерой вязкости жидкости.

Суть опыта при определении вязкости состоит в измерении крутящего момента при заданной угловой скорости или по угловой скорости при заданном крутящем моменте. Для этих целей вискозиметр ротационный снабжён динамометрическим устройством. Устройства, применяемые в вискозиметрах ротационных для измерения моментов и угловых скоростей, подразделяются на механические и электрические. Дальнейшие расчёты ведутся на основании теории метода ротационной вискозиметрии.

В настоящее время наиболее распространены вискозиметры электро-ротационные: внутренний цилиндр, погруженный в вязкую среду, приводится во вращение электролвигателем. Вращающийся с постоянной скоростью ротор вискозиметра при погружении в жидкость или расплав встречает сопротивление равномерному вращательному движению, на валу двигателя возникает тормозящий момент, прямопропорциональный вязкости среды, что вызывает соответствующее изменение электрических регистрируемых характеристик двигателя.

Следует отметить важную особенность вискозиметров ротационных: выполненный из термостойких материалов вискозиметр ротационный может представлять из себя высокотемпературный вискозиметр.

Вискозиметры ротационные используются для измерения вязкости сред при температурах от -60°C (масла) до +2000°C (расплавы металлов и силикатов) и позволяют вести измерения с погрешностью в пределах ±3-5%.

Чашечные вискозиметры

Чашечные вискозиметры - приборы для измерения вязкости жидких сред, выполненные в форме воронки (или чашечки) и использующие в своём устройстве капиллярный метод вискозиметрии

Применение вискозиметров

Области применения вискозиметров чрезвычайно разнообразны.

В медицине используются капиллярные вискозиметры (вискозиметр ВПЖ, ВНЖ, ВК-4). Так, например, острую актуальность имеет измерение вязкости человеческой крови. При тяжелой физической работе увеличивается вязкость крови. Многие инфекционные заболевания увеличивают вязкость, другие, например, брюшной тиф и туберкулез - значительно уменьшают. Любое изменение вязкости крови сказывается на РОЭ. Определение вязкости крови во взаимосвязи с рядом других анализов позволяет объективно оценить состояние человеческого организма. Вязкость крови в лабораторных условиях может быть определена и при помощи метода падающего шарика вискозметрии.

В фармацевтических лабораториях вискозиметры используются при изготовлении лекарственных препаратов, патоки, мазей, линиментов.

В нефтянной промышленности используются как ротационные вискозиметры системы Brookfield, так и полевые чашечные капиллярные вискозиметры, позволяющие с достаточной степенью точности определить вязкие свойства нефти.

В химической промышленности и металлургии широко распространены универсальные, высокотемпературные вискозиметры, позволяющие оперировать со средами в широком диапазоне температур от -60 °C до 2600 °C

Тема вискозиметрии и её методов мало распространена и фактически не упоминается в повседневной жизни, но, по истине, прибор вискозиметр занимает достойное место в списке гениальных изобретений человечества. Отдельной статьи заслуживают высокотемпературные промышленные вискозиметры и высокоточные вискозиметры