
Измерение плотности

Density measurement

Содержание

Предисловие	3
Предисловие ко второму изданию	5
Предисловие к первому изданию	5
1 Введение	6
2 Единицы измерения	6
2.1 Объем.....	6
2.2 Плотность.....	6
3 Возможные источники погрешности.....	7
3.1 Температура.....	7
3.2 Выбор средств и методов измерений	8
3.3 Эффект выталкивающей силы при измерении массы	8
3.4 Другие источники погрешности	10
3.4.1 Включение воздуха	10
3.4.2 Осаждение или расслоение компонентов	10
4. Методы измерения плотности и их применение	11
4.1 Методы	11
4.2 Применения	12
5 Процедуры измерения плотности	12
5.1 Пикнометр.....	12
5.2 Поршень (гамма-шар).....	16
5.3 Бутылка, маркированная по высоте	18
5.4 Емкость, наполненная водой до краев	21
5.5 Гидрометр	25
5.6 Портативный электронный ареометр.....	26
5.7 Электронный ареометр лабораторного типа	28
5.8 Гидростатические весы (весы Мора)	28
5.9 Метод поршня для шпатлевок	29
6 Таблица: Плотность воды, не содержащей воздуха, в зависимости от температуры.....	31

Предисловие

Международная организация законодательной метрологии (МОЗМ/OIML) – всемирная межправительственная организация, основная цель которой состоит в гармонизации требований и правил метрологического контроля, применяемых национальными метрологическими службами или соответствующими организациями ее государств-членов. Существуют следующие основные категории Публикаций МОЗМ:

- **Международные Рекомендации (OIML R)**, которые представляют собой типовые правила, устанавливающие метрологические характеристики, требуемые для определённых средств измерений, и определяющие методы и оборудование, необходимые для проверки их соответствия. Государства-члены МОЗМ должны обеспечивать максимально возможное внедрение этих Рекомендаций;
- **Международные Документы (OIML D)**, которые носят информативный характер и предназначены для гармонизации и улучшения работы в области законодательной метрологии;
- **Международные Руководства (OIML G)**, которые также носят информативный характер и предназначены давать руководящие указания по применению определенных требований в законодательной метрологии; и
- **Международные Базовые Публикации (OIML B)**, которые определяют правила работы различных структур и систем МОЗМ.

Проекты Рекомендаций, Документов и Руководств МОЗМ разрабатываются Техническими комитетами или Подкомитетами, которые формируются из представителей государств-членов МОЗМ. Определенные международные и региональные организации также принимают участие в разработке документов на консультационной основе. Во избежание наличия противоречивых требований между МОЗМ и некоторыми организациями, такими как ИСО и МЭК, установлены Соглашения о совместной деятельности. Следовательно, изготовители и пользователи средств измерений, испытательные лаборатории и т.д. могут применять наравне с публикациями МОЗМ и публикации других организаций.

Международные Рекомендации, Документы, Руководства и Базовые Публикации, издаются на английском языке (E), переводятся на французский (F) и подлежат регулярному пересмотру.

Кроме того, МОЗМ публикует или принимает участие в публикации **Словарей (OIML V)** и периодически поручает экспертам по законодательной метрологии написать **Экспертные Заключение (OIML E)**. Экспертные заключения предназначены для предоставления информации и рекомендаций; они выражают исключительно точку зрения их авторов без привлечения Технического комитета, Подкомитета или МКЗМ. Поэтому эти Заключение не всегда представляют взгляды МОЗМ.

Настоящая публикация, OIML G 14, издание 2011 (E), была разработана МБЗМ в сотрудничестве с внешними техническими экспертами. Она заменяет издание 1987 г.

Публикации МОЗМ можно скачать с веб-сайта МОЗМ в виде файлов PDF. Дополнительную информацию о публикациях МОЗМ можно получить в главном офисе организации:

Международное Бюро Законодательной Метрологии
д.11, ул. Тюрго – 75009 – Париж - Франция
Тел.: 33 (0)1 48 78 12 82
Факс: 33 (0)1 42 82 17 27
Эл. почта: biml@oiml.org
Интернет: www.oiml.org

Bureau International de Metrologie Legale
11, rue Turgot - 75009 Paris - France
Telephone: 33 (0)1 48 78 12 82
Fax: 33 (0)1 42 82 17 27
E-mail: biml@oiml.org
Internet: www.oiml.org

Предисловие ко второму изданию

Настоящее издание представляет собой переиздание первой редакции с улучшенным оформлением, некоторыми поправками в тексте и новым набором иллюстраций.

Выражаем благодарность г-ну *Джону Картеру* из Службы измерений и безопасности продукции Новой Зеландии (MAPSS) за пересмотр текста и предоставление рисунков.

МБЗМ (сентябрь 2011 г.)

Предисловие к первому изданию

Настоящая брошюра представляет собой адаптированный перевод документа, подготовленного отделом контроля фасованных товаров метрологической службы Нидерландов, авторы *Дж.А. Далм и П. Хогерворст*.

Несмотря на то, что данный документ прежде всего предназначен для использования в качестве руководства для инспекторов и технических специалистов, занимающихся контролем фасованных товаров, описанные методы и расчеты следуют таким жестким установкам, что брошюра может также быть полезна для других промышленных и лабораторных применений.

Выражаем благодарность метрологической службе Нидерландов за сотрудничество, а также г-ну *Дегавре* из метрологической службы Бельгии за помощь в переводе.

МБЗМ (март 1987 г.)

Измерение плотности

Руководство для инспекторов

1 Введение

Когда количество продукта в фасованном товаре выражается в единицах объема, но проверяется взвешиванием, необходимо также определять плотность продукта.

Создается впечатление, что на практике методы измерения плотности часто недостаточно хорошо понимаются, вследствие чего могут возникнуть значительные систематически погрешности.

В настоящей брошюре представлен (неисчерпывающий) обзор широко используемых методов измерения плотности и их применений.

2 Единицы измерения

2.1 Объем

Единицей Международной системы СИ для объема является *метр кубический*, обозначение: м³. В химических лабораториях и при розничных операциях широко используется такая единица, как литр, обозначение л или Л.

На 12-ой Генеральной конференции по мерам и весам в 1964 г. было решено отменить более раннее определение литра и установить литр равным точно 1 дм³.

Таким образом:

$$1 \text{ л} = 1 \text{ дм}^3$$

$$1000 \text{ л} = 1 \text{ м}^3$$

$$1 \text{ мл} = 1 \text{ см}^3$$

В ряде стран в качестве узаконенных единиц по традиции принимаются такие единицы, как *децилитр* (дл) и *сантимилитр* (сл). Однако во избежание путаницы с *кубическим дециметром* и *кубическим сантиметром* соответственно их использование в промышленности и науке не рекомендуется.

Вместе с тем миллилитр (обозначение: мл или mL) широко используется в лабораториях и для указания количества продукта на фасованных товарах. Эта единица также используется в расчетах в настоящей брошюре.

2.2 Плотность

Плотность определяется как отношение массы продукта (т.е. как если бы он был взвешен в вакууме) к его объему. Согласованной единицей СИ для плотности является кг/м³, как правило, она используется для указания значений плотности продуктов. Поскольку масса в настоящей брошюре измеряется в граммах (г), а объем – в миллилитрах (мл), в формулах и

расчетах в порядке исключения используется единица г/мл, которую не следует путать с единицей измерения концентрации.

$$1 \text{ г/мл} = 1 \text{ г/см}^3 = 1000 \text{ кг/м}^3$$

Во избежание ошибок единицы измерения следует повторять для каждой формулы, в которой представлены значения плотности.

3 Возможные источники погрешности

Под термином "погрешность" мы подразумеваем разность между измеренным значением плотности и "истинным" значением плотности продукта. Такую погрешность не следует путать с неопределенностью измерения.

Как правило, погрешности возникают в следующих случаях:

- a) При разности температур, если плотность измеряют при температуре, отличной от 20 °С, и при этом к 20 °С не применяется поправка.
- b) При использовании неподходящих средств измерений.
- c) При воздействии выталкивающей силы при измерении массы.
- d) При ненадлежащем отборе проб.

3.1 Температура

Национальными положениями обычно предписывается, что фактическое содержимое фасованных товаров, указываемое в единицах объема, должно заявляться при температуре 20 °С, за исключением замороженных и глубокомороженных продуктов, для которых содержимое заявляется для температуры продажи, т.е., как правило, минус 5 °С и минус 18 °С соответственно. В некоторых странах требуется, чтобы продукты, в особенности молочные продукты, хранились и продавались при температуре ниже 20 °С. В таком случае содержимое заявляется при температуре, соответствующей температуре во время продажи. Измерение может выполняться при температуре, отличной от 20 °С, но для этого требуется знание коэффициента объемного расширения рассматриваемого продукта. В таком случае возможно преобразование по следующей формуле:

$$\rho = \rho_t [1 + \gamma(t - 20)] \quad (1)$$

где:

ρ – плотность продукта при 20 °С,

ρ_t – плотность продукта при t °С,

γ – коэффициент объемного расширения продукта.

Температура при измерении плотности в любом случае не должна сильно отличаться от 20 °С, так как коэффициент объемного расширения не может быть известен с достаточной точностью.

Как правило, поправка не применяется, если температура отличается от 20 °С не более чем на $\pm 0,5$ °С. Более низкая температура приводит к увеличению значения плотности продукта, что, в случае пренебрежения поправкой, является неблагоприятной ситуацией для лица, ответственного за наполнение (производителя фасованного товара).

3.2 Выбор средств и методов измерений

Средства и методы измерений могут быть неподходящими в следующих случаях:

а) Метод не подходит для данного вида продукта.

Пример: Применение метода с использованием "тела погружения" в продуктах с очень высокой вязкостью.

б) Средства измерений не подходят с технической точки зрения (не достаточно жесткие или имеют другие дефекты).

Пример: Неплотная пробка или крышка пикнометра, которая становится причиной плохой воспроизводимости.

в) Использование взвешивающих приборов, не достаточно точных по сравнению с другими средствами измерений.

Пример: Использование пикнометра объемом 50 мл с весами с ценой деления 1 г.

г) Недостаточно точная калибровка.

Пример: Использование номинального (маркированного) значения пикнометра (100 мл) при фактическом значении объема 99,89 мл.

3.3 Эффект выталкивающей силы воздуха при измерении массы

Если объем продукта определяют путем измерения массы и плотности, необходимо учесть эффект выталкивающей силы воздуха. Такой эффект основывается на законе Архимеда, который гласит, что на тело, погруженное в текучую среду (газ или жидкость), действует вертикальная выталкивающая сила, равная весу вытесненной текучей среды.

В соответствии с законом о равновесии сил показание взвешивающего прибора зависит от этой выталкивающей силы, а масса вследствие этого в большинстве случаев немного превышает показываемое значение, что является функцией объемов или средних плотностей продукта и гирь, используемых для взвешивания или для предварительной настройки взвешивающего прибора.

Нет необходимости учитывать такую разность в коммерческих операциях, для которых результат, показываемый взвешивающим прибором, условно считается точным (см. OIML D 28:2004 *Условное значение результата взвешивания в воздухе*).

Тем не менее, важно учитывать выталкивающую силу в воздухе при выполнении измерений плотности с высокой точностью.

На практике расчеты выполняют с использованием в качестве плотности для эталонных гирь значения $\rho_n = 8$ г/мл, а в качестве средней плотности воздуха – значения $\rho_l = 0,0012$ г/мл. Используя эти два значения, можно вывести следующее выражение:

$$\text{масса}^1 = \text{кажущаяся масса}^2 \times 0,99985 \frac{\text{плотность продукта}}{\text{плотность продукта} - 0,0012} \text{ г/мл} \quad (2)$$

Во все расчетах в методах измерений, описанных в приложениях³, учитывается эффект выталкивающей силы воздуха.

Примечание, касающееся разработки формул для выталкивающей силы воздуха

Предполагается, что взвешивающий прибор, как правило, электронные весы, настраивается на месте использования при помощи эталонных гирь (масса = m_n). Если плотность (ρ) взвешиваемого продукта (масса = m) отличается от плотности эталонной гири (ρ_n), получаем:

$$m \cdot g - \frac{m}{\rho} \cdot \rho_l \cdot g = m_n \cdot g^* - \frac{m_n}{\rho_n} \cdot \rho_l^* \cdot g^*$$

где g и g^* - ускорения свободного падения, обусловленные силой тяжести, которая действует на продукт и на эталонные гири соответственно.

Для электронных весов, настраиваемых на месте использования ($g = g^*$), также предполагается, что плотность воздуха будет такой же ($\rho_l = \rho_l^*$).

При значениях $\rho_l = 0,0012$ г/мл и $\rho_n = 8$ г/мл получаем:

$$m^4 = \frac{m_n \cdot 0,99985}{\rho} + 0,0012 \text{ г/мл}$$

Последнее выражение в настоящее время используется для измерений при помощи пикнометров.

Для очень точного расчета объема продукта по результату взвешиваний в воздухе и при известной плотности, в конечном итоге необходимо использовать следующую формулу:

$$V = \frac{M \cdot 0,99985}{\rho - 0,0012} \text{ мл}$$

где масса, показываемая весами (M), выражена в граммах, а ρ – в г/мл.

¹ Скорее всего в оригинале техническая опечатка (единица измерений "г/мл" приведена неверно) – в формуле масса должна быть указана в граммах (прим. переводчика).

² В английской версии OIML G14 используется понятие "apparent mass", которое здесь и далее переведено как "кажущаяся масса" - согласно англоязычным источникам оно соответствует понятию "conventional mass" (условная масса). Возможны также варианты перевода "видимая масса" или "зафиксированная масса" (прим. переводчика).

³ Скорее всего в оригинале техническая опечатка – данных приложений в документе нет. Методы изложены по тексту руководства (прим. переводчика).

⁴ Скорее всего в оригинале техническая опечатка – в формуле вместо массы m должна быть указана плотность ρ , так как формула предполагает получение значения в г/мл (прим. переводчика).

3.4 Другие источники погрешности

3.4.1 Попадание воздуха

Следует различать два случая:

а. Попадание воздуха в сам продукт и, таким образом, в пробу.

Для определенного ряда продуктов на различных стадиях производства сам по себе вводится воздух без возможности удаления; таким образом он уже присутствует в этих продуктах во время отбора проб.

б. Попадание воздуха в пробу во время процедуры отбора проб.

Воздух, попавший во время отбора проб, может в некоторых случаях быстро удалиться из продукта, а в других случаях может удаляться очень медленно. Может пройти несколько часов или дней до тех пор, пока из продукта полностью удалится весь воздух (например: шампуни). Бывают также случаи, когда воздух после попадания будет постоянно находиться в продукте, например, в шпатлевках.

Непрозрачные жидкости, в которых наличие воздуха неощутимо, в большей степени влияют на неопределенности измерений.

Указания:

- Измерения плотности стоит выполнять только после исключения воздуха из пробы. По этой причине наливание и перемешивание жидкостей следует производить плавно и с большой тщательностью.

- Для определенных продуктов воздух вводится в процессе изготовления и считается неотъемлемой частью продукта.

- Если имеются основания полагать, что воздух введен после процедуры заполнения и что это только временное явление (воздух не останется в конечном продукте), возможен отбор проб из баков или других емкостей до наполнения.

3.4.2 Осаждение или расслоение компонентов

Продукты, состоящие из нескольких компонентов различной плотности, могут иметь тенденцию к неравномерному оседанию. Следующие случаи служат примерами причин погрешности при отборе проб:

а. Проба отобрана из неоднородной фазы.

В таком случае плотность пробы отличается от средней плотности и возможно снижение плотности при непрерывном наполнении фасованных товаров. Это необходимо учитывать во время отбора проб и

- либо выбирать пробу в другой части производственной линии

-либо отбирать большее количество проб.

б. Расслоение происходит в самой пробе.

Решение: Медленно размешать или перемешать части продукта непосредственно перед измерением без включения воздуха.

4. Методы измерения плотности и их применение

4.1 Методы

Основные методы, используемые в производственных условиях

Пикнометр (См. 5.1)

Метод с использованием "тела погружения" (См. 5.2)

Метод с использованием потребительской упаковки продукта (бутылка, маркированная по высоте) (См. 5.3)

Метод с использованием потребительской упаковки продукта (емкость, наполненная до краев) (См. 5.4)

Ареометр (См. 5.5)

Электронный (портативный) плотномер (См. 5.6)

Основные методы, используемые в лаборатории

Электронный плотномер лабораторного типа (См. 5.7)

Весы Мора (См. 5.8)

Метод погружения для шпатлевок (См. 5.9)



Рисунок 1: Набор для определения плотности твердых, жидких, пористых и вязких веществ

4.2 Применения

Продукт	Метод
a. Жидкости, не содержащие CO ₂ или другой газ	- метод с использованием "тела погружения" - металлический пикнометр - ареометр - электронный плотномер
b. Продукты, содержащие или не содержащие CO ₂ в прозрачной, но недеформируемой емкости	- бутылка, маркированная по высоте
c. Продукт, содержащий CO ₂ , в непрозрачной емкости	С трудом поддается измерению. В случае полупрозрачной емкости по возможности используют бутылку, маркированную по высоте. В противном случае дают выйти CO ₂ , затем руководствуются пунктом а.
d. Вязкие жидкости	- металлический пикнометр - электронный плотномер лабораторного типа
e. Шпатлевки	- метод погружения для шпатлевок - пикнометр с нерастворяющей жидкостью
f. Аэрозоли	- электронный плотномер лабораторного типа - специальный пикнометр высокого давления
g. Продукты в нескольких фазах в недеформируемой и непрозрачной емкости	- емкость, используемая в качестве пикнометра и заполненная водой
h. Продукты в нескольких фазах в деформируемой емкости	- переместить продукт в коническую колбу (колба Эрленмайера), используемую в качестве пикнометра (см. g.)

5 Процедуры измерения плотности

5.1 Пикнометр

Описание

Пикнометры представляют собой изготовленные из стекла или металла меры определенного объема.

Пикнометр закрывается пробкой или крышкой с небольшим отверстием, которое позволяет удалить воздух и излишки продукта, так чтобы количество содержимого в пикнометре было постоянным после завершения операции наполнения.

Вместимость пикнометров может быть различной, но часто используется 50 или 100 мл. Последнее значение или еще большее значение предпочтительнее для получения максимальной точности.

Не рекомендуется использование пикнометров вместимостью менее 25 мл.

Важно: Фактический объем, содержащийся в пикнометре, может, в отношении максимальной точности, отличаться от номинальной (отмеченной) вместимости.

Области применения

Стеклянные пикнометры	- прозрачные жидкости, не содержащие CO ₂ или другие растворенные вещества под давлением
- наполненные нерастворяющимися жидкостями:	- пастообразные продукты: шпатлевки, клеи, продукты в деформируемых тубах
Металлические пикнометры:	- вязкие и слегка пастообразные продукты (продукты для очистки, лаки и т.п.)



Рисунок 2: Пикнометры

Необходимое оборудование

- Калиброванный пикнометр согласно описанию выше (должен быть известен метод калибровки).
- Взвешивающий прибор с действительной ценой деления 10 мг (0,01 г) или менее (для пикнометра вместимостью 100 мл) и 1 мг (0,001 г) или менее (для пикнометра вместимостью 25 мл).
- Гири класса точности M_1 .
- Термометр, градуированный с интервалами 0,1 °C или 0,2 °C.
- Термостат.

Подготовка и измерения

А. Метод без использования нерастворяющей вспомогательной жидкости

- Пикнометр очистить водой и спиртом.
- На верхний край пикнометра нанести тонкий слой вазелина, чтобы обеспечить герметичность крышки.
- Поместить пикнометр с крышкой на взвешивающий прибор и зафиксировать результат взвешивания (M_0).
- Очень осторожно наполнить пикнометр. Избегать включения пузырьков воздуха. Насколько это возможно, также избегать попадания продукта на стенки вблизи крышки. Уровень наполнения должен быть таким, чтобы после окончательной регулировки пробки или крышки (см. ниже) через отверстие могло выйти небольшое количество продукта.
- Пробку или крышку свободно расположить на пикнометре и поместить все вместе в термостат, в котором поддерживается температура $20\text{ °C} \pm 0,2\text{ °C}$.
- Через 20-30 минут вынуть и высушить пикнометр, достаточно быстро, чтобы избежать температурного дрейфа.
- После этого пробку или крышку плотно вставить или закрутить, а излишки продукта вытереть подходящей бумажной салфеткой, которую располагают вокруг пробки или вокруг отверстия в крышке.
- Затем пикнометр взвесить (M_v), опорожнить, очистить, высушить и снова взвесить с использованием эталонных гирь, приблизительно соответствующих значению $M_v - M_0$, т.е. массе содержимого пикнометра.
- Зафиксировать показание I_0 взвешивающего прибора. Эта последняя операция позволяет определить поправку, которую следует применять, чтобы компенсировать систематические погрешности взвешивающего прибора.

Примечание: Могут потребоваться дополнительные меры предосторожности, чтобы избежать включения пузырьков воздуха во время манипуляций с непрозрачными вязкими и пастообразными продуктами с использованием металлических пикнометров.

В. Метод с наполнением нерастворяющей вспомогательной жидкостью.

При наполнении пикнометра продуктом из тубы или емкости, включения воздуха можно избежать, сначала наполнив пикнометр нерастворяющей жидкостью известной плотности, которая не смешивается с продуктом (как правило, подходит вода).

В данном случае взвешивают пустой пикнометр (см. пункт А), а затем наполняют его небольшим количеством (например, на 1/3) нерастворяющей жидкости, после чего снова взвешивают.

Затем вводят продукт, подлежащий измерению, так чтобы был достигнут уровень крышки пикнометра, и все вместе взвешивают в третий раз.

Завершают наполнение пикнометра нерастворяющей жидкостью с последующим четвертым взвешиванием.

Для оставшейся части операции см. пункт А.

Расчеты

Метод А

$$\rho = 0,999\ 85 \cdot \frac{M_p}{V} + 0,0012\ \text{г/мл} \quad (3)$$

где:

ρ – плотность продукта при температуре 20 °С

M_p – кажущаяся масса продукта: $M_p = M_v - M_0 + C$

где

$C = M_0 +$ дополнительные эталонные гири $- I_0$

V – объем пикнометра при температуре измерения

Метод В

$$\rho = 0,99985 \cdot \frac{m_2 - M_1}{V - 0,999\ 85 \cdot \frac{(m_1 - m_0) - (m_2 - m_3)}{\rho_v - 0,0012}} + 0,0012\ \text{г/мл} \quad (4)$$

где:

m_0 – результат взвешивания (кажущаяся масса) пустого пикнометра;

m_1 – пикнометр + частичное наполнение вспомогательной жидкостью;

m_2 – пикнометр + частичное наполнение вспомогательной жидкостью + продукт;

m_3 – пикнометр + полное наполнение вспомогательной жидкостью + продукт;

ρ_v – плотность вспомогательной жидкости при температуре измерения.

Пример расчета по методу А:

Пустой пикнометр:	$M_0 = 733,95\ \text{г}$
Полностью наполненный пикнометр:	$M_v = 859,94\ \text{г}$
Пустой пикнометр + 130 г эталонных гирь:	$I_0 = 863,97\ \text{г}$
Поправка для взвешивающего прибора	$C = -0,02\ \text{г}$
$(M_0 + 130\ \text{г} - I_0)$:	
Фактическая вместимость пикнометра:	$V = 99,75\ \text{мл}$

$$\rho = 0,99985 \cdot \frac{(859,94 - 733,95 - 0,02)}{99,75} + 0,0012 = 1,264\ \text{г/мл} \quad (5)$$

Калибровка пикнометра:

Фактический объем пикнометра составляет:

$$V = 0,99985 \cdot \frac{M_n}{\rho_w - 0,0012}\ \text{мл} \quad (6)$$

где:

V – объем пикнометра при температуре измерения;

M_n – результат взвешивания (кажущаяся масса воды, содержащаяся в пикнометре);

ρ_w – плотность воды (например, при температуре 20 °С: 0,998201 г/мл).

Предполагается, что плотность воздуха во время взвешивания составляет 0,0012 г/мл.

5.2 Метод с использованием "тела погружения" (гамма-шар)



Рисунок 3: Сферическое "тело погружения"

Описание

"Тело погружения" представляет собой шар, как правило, изготовленный из хромированной латуни и прикрепленный к стержню, длину которого можно регулировать вращением.

Изготавливается с двумя значениями объема: 100 и 10 мл.

На стержне модели объемом 100 мл имеются разделительные линии, которые указывают глубину погружения.

Не рекомендуется использовать модель объемом 10 мл по причине достаточно высокой относительной погрешности в результате поверхностного натяжения контролируемых жидкостей.

Тем не менее, приблизительное значение поверхностного натяжения этих жидкостей должно быть также известно в случае использования "тела погружения" объемом 100 мл.

Области применения

Прозрачные и слегка вязкие жидкости, содержащие или не содержащие CO₂ или другие растворенные вещества. Благодаря простоте очистки шарообразное "тело погружения" рекомендуется использовать, в первую очередь, с лаками, красками и аналогичными продуктами средней вязкости.

Необходимое оборудование

- Калиброванное (имеющее сертификат) "тело погружения".
- Взвешивающий прибор с действительной ценой деления ≤ 10 мг (0,01 г) и нагрузкой 800 г или более для испытаний с использованием "тела погружения" объемом 100 мл.
- Комплект гирь класса *M1*.
- Термометр с ценой деления 0,1 °C или 0,2 °C.
- Лабораторный стакан объемом 500 или 600 мл.
- Штатив для удержания "тела погружения".
- Термостат.

Подготовка и измерения

- Для начала "тело погружения" и лабораторный стакан очистить. Затем стакан наполнять продуктом до тех пор, пока не станет возможным полное погружение "тела погружения" на предусмотренную глубину (например, 300 мл). Во время данной операции избегать включения воздуха.
- Стакан и "тело погружения" поместить в водяной термостат, с предустановленной температурой $20\text{ °C} \pm 0,2\text{ °C}$ на 20-30 минут, затем высушить их снаружи.
- Стакан поместить на весы и взвесить (M_0) или тарировать, если это возможно.
- "Тело погружения" аккуратно вводить в жидкость до тех пор, пока не будет достигнута отмеченная линия на стержне (например, до 5 мм вниз от уровня жидкости).
- Нижнюю часть стержня повернуть, поддерживая верхнюю часть, и установить отмеченную линию на уровне немного ниже уровня жидкости.
- Снова слегка повернуть стержень, чтобы поднять его вверх и таким образом сформировать надлежащий мениск. Мениск должен быть сформирован полностью с тем, чтобы можно было узнать и правильно рассчитать влияние поверхностного натяжения на измерение плотности. В этот момент снять показания весов и зафиксировать значение (M_v).
- В заключение, в целях устранения возможных систематических погрешностей весов стакан с жидкостью, но без "тела погружения" поместить на весы и добавить количество эталонных гирь, соответствующих приблизительному значению разности $M_v - M_0$, и зафиксировать показание I_0 .

Расчеты

$$\rho = 0,99985 \cdot \frac{M_p}{V} + \frac{\pi \cdot d}{g \cdot V} \cdot \sigma + 0,0012 \text{ г/мл} \quad (7)$$

где:

ρ – плотность продукта при 20 °C в мг/л;

M_p – кажущаяся масса продукта, вытесненного "телом погружения":

$$M_p = M_v - M_0 + C, \text{ где}$$

C – поправка на систематические погрешности весов:

$$C = M_0 + \text{дополнительные эталонные гири} - I_0;$$

V – объем "тела погружения" в мл при температуре измерения;

g – местное ускорение свободного падения (например: $9,81 \text{ м/с}^2$);

d - диаметр стержня "тела погружения" в мм;

γ – поверхностное натяжение продукта в Н/м;

$\pi = 3,1416$

Примечания:

1. Желательно как можно точнее знать значение поверхностного натяжения, в противном случае, как правило, могут возникнуть погрешности порядка $0,0007 \text{ г/мл}$ при использовании "тела погружения" объемом 100 мл.

2. Для плотности воздуха в формуле используется среднее значение $0,0012 \text{ г/мл}$, а для эталонных гирь – $8,0 \text{ г/мл}$.

Пример расчета с использованием "тела погружения" объемом 100 мл:

Измерение плотности краски.

Взвешивание:

лабораторный стакан с краской	$M_0 = 534,96$ г
с "телом погружения"	$M_v = 638,58$ г
без "тела погружения", но со 100 г эталонных гирь	$I_0 = 634,91$ г
поправка $M_0 + 100 - I_0$	$C = 0,05$ г
Объем "тела погружения" (из сертификата)	$V = 100,04$ мл
Поверхностное натяжение	$\sigma = 0,04$ Н/м
Диаметр стержня "тела погружения"	$d = 3$ мм

$$\rho = 0,9985 \cdot \frac{638,58 - 534,96 + 0,05}{100,04} + \frac{3,1416 \cdot 3}{9,81 \cdot 100,04} \cdot 0,04 + 0,0012 = 1,0377 \text{ г/мл} \quad (8)$$

Калибровка "тела погружения":

Объем "тела погружения" калибруют путем погружения в жидкость известной плотности. Фактический объем "тела погружения" получают по следующей формуле:

$$V = \frac{0,99985 \cdot M + \frac{\pi \cdot d \cdot \sigma_c}{g}}{[\rho_c - 0,0012] \cdot [1 + (t - 20) \cdot \alpha_v]} \text{ мл} \quad (9)$$

где

V – объем "тела погружения" при 20 °С в мл;

M – кажущаяся масса жидкости, вытесненной "телом погружения" (результат взвешивания с поправкой на систематические погрешности весов) в г;

t^5 – температура во время измерения в °С;

d – диаметр стержня "тела погружения" в мм;

g – местное ускорение свободного падения в м/с²;

α_v – коэффициент объемного расширения материала "тела погружения" в К⁻¹;

σ_c – коэффициент поверхностного натяжения жидкости, используемой для калибровки в Н/м;

ρ_c – плотность калибровочной жидкости при температуре t в г/мл;

(наиболее часто используемой жидкостью является дистиллированная воды, для которой: $\sigma_c = 0,072$ Н/м и $\rho_c = 0,998201$ г/мл при 20 °С).

Метод для летучих продуктов:

Летучие жидкости могут испаряться слишком быстро для применения обычного описанного метода. Тем не менее, измерения в этом случае можно выполнять, положив опору "тела погружения" на весы.

Внимание: В данном случае знак "плюс" компонента формулы "поверхностное натяжение" должен быть изменен на знак "минус".

5.3 Бутылка, маркированная по высоте

Описание

В данном методе используется потребительская упаковка самого продукта (далее – емкость). Принцип в сущности совпадает с принципом для пикнометра, с той разницей, что объем емкости или бутылки (до линии маркировки) изначально неизвестен.

Емкость должна:

а. быть недеформируемой;

⁵ Скорее всего в оригинале техническая опечатка ("Т") – в формуле используется "t" (прим. переводчика).

- b. быть прозрачной в месте отмеченной метки в виде черты;
 - c. иметь небольшой диаметр (не более 35 мм) в месте линии метки (горлышка).
- Нанесение метки (маркировку линии) и установление уровня жидкости выполняют аккуратно во избежание серьезных погрешностей.



Рисунок 4: нанесение метки (маркировка уровня)

Области применения

- напитки, содержащие CO₂;
- неоднородные продукты;
- летучие продукты.

Необходимое оборудование

- Недеформируемая и прозрачная бутылка, наполненная продуктом, подлежащим измерению.
- Взвешивающий прибор подходящей нагрузки, с действительной ценой деления 10 мг (для емкостей до 500 мл) и 100 мг (для других емкостей).
- Термостат.
- Черный водостойкий маркер.

Подготовка и измерения

- Наполненную бутылку выбрать с производственной линии, по возможности с высоким уровнем жидкости, и поместить ее в термостат при температуре 20 °C ± 0,2 °C на 20-30 минут.

- Поставить бутылку на горизонтальную поверхность и провести маркером толстую вертикальную линию, пересекающую уровень жидкости, а также провести (или нацарапать) горизонтальную линию шариковой ручкой поперек вертикальной линии в месте мениска, отмечая нижнюю линию мениска по прозрачности.
- Затем взвесить бутылку и зафиксировать результат (M_V).
- Опорожнить и соответствующим образом очистить бутылку, затем наполнить ее дистиллированной водой до уровня, немного ниже горизонтальной линии. Измерить температуру воды в бутылке (t).
- Затем поставить бутылку на горизонтальную поверхность и наполнить ее до уровня, отмеченного горизонтальной линией. Закрыть бутылку и взвесить ее (M_W).
- Снова опорожнить бутылку и полностью ее высушить, затем взвесить ее с колпачком или крышкой (M_t).
- При необходимости можно определить и учесть систематическую погрешность взвешивающего прибора, выполнив отдельные измерения с использованием эталонных гирь, близких к значениям M_V , M_W и M_t , к которым применяются поправки, обозначаемые как C_V , C_W и C_t , см пример расчета ниже.

Расчеты

Общей формулой для бутылки, маркированной по высоте, является:

$$\rho = (\rho_w - 0,0012 \cdot \frac{M_p}{M_n} + 0,0012 \text{ г/мл}) \quad (10)$$

где:

ρ – плотность продукта при 20 °С в г/мл;

ρ_w – плотность воды при t °С в г/мл;

M_p – кажущаяся масса продукта в г

$$M_p = (M_V + C_V) - (M_t + C_t)$$

M_n – кажущаяся масса воды в бутылке в г

$$M_n = (M_W + C_W) - (M_t + C_t)$$

Пример для бутылки, содержащей газированный напиток:

Бутылка + продукт + колпачок/крышка:	$M_V = 1\,971,23 \text{ г}$
Бутылка + вода + колпачок/крышка:	$M_W = 1\,927,11 \text{ г}$
Пустая бутылка + колпачок/крышка:	$M_t = 928,25 \text{ г}$
Показание весов для 1970 г эталонных гирь:	1 969,83 г
Поправка (1970 г – 1969,83 г):	$C_V = +0,17 \text{ г}$
Показание весов для 1930 г эталонных гирь:	1 929,84 г
Поправка (930 г – 929,93 г):	$C_t = +0,07 \text{ г}$
Температура воды:	$t = 17,4 \text{ °С}$
Плотность воды согласно таблице X ⁶ при 17,4 °С:	$\rho_w = 0,998\,7 \text{ г/мл}$

$$\rho = 0,987 - 0,0012 \cdot \frac{(1\,971,23 + 0,17) - (928,25 + 0,07)}{(1\,927,11 + 0,16) - (928,25 + 0,07)} + 0,012 = 1,0428 \text{ г/мл} \quad (11)$$

⁶ Скорее всего в оригинале техническая опечатка – следует читать как "таблица из раздела 6" (прим. переводчика).

5.4 Емкость, наполненная водой до краев

Описание

В данном методе, как и в методе "бутылка, маркированная по высоте, в качестве пикнометра", используется потребительская упаковка самого продукта (далее – емкость), и покровная пластина из метилметакрилата ("плексиглас" или "перспекс"), в которой небольшое отверстие регулирует уровень наполнения.

Емкость должна:

- a. быть недеформируемой;
- b. иметь плоский край;
- c. иметь такую конструкцию, чтобы не допустить случайного захвата воздуха после полного наполнения.

Данный метод намного менее точный по сравнению с предыдущими, но все же подходит для определенных применений.



Рисунок 5: Емкость, используемая в качестве пикнометра

Области применения

Полностью наполненные емкости, содержащие воду, неоднородные продукты, например, супы, напитки, содержащие фрукты, краски в нескольких фазах и т.п.

Важно: Вода не должна менять молекулярную структуру самого продукта.

Требуемое оборудование

- Емкость или недеформируемая бутылка с плоским краем, форма которой не допускает случайного захвата воздуха во время наполнения водой.
- Взвешивающий прибор с действительной ценой деления, равной или менее 10 мг для емкостей вместимостью менее 500 мл и 100 мг (0,1 г) для емкостей вместимостью 500 мл или более.

- Покровная пластина из стекла или метилметакрилата ("плексиглас" или "перспекс") с отверстием по центру.
- Термометр с ценой деления шкалы 0,1 °С или 0,2 °С.
- Термостат.

Подготовка и измерения

- Закрытую емкость взять с производственной линии и поместить ее в термостат при температуре $20\text{ °C} \pm 0,2\text{ °C}$ на 20-30 минут.
- Открыть емкость и смазать край вазелином, чтобы поспособствовать сцеплению с покровной пластиной.
- Емкость, а также покровную пластину (отдельно) положить на весы и все вместе взвесить (M_p). (см. рисунок 6).
- Добавить воду температурой 20 °С в емкость до 5 мм от края, установить покровную пластину на емкость таким образом, чтобы отверстие располагалось по центру емкости и все вместе поместить на весы.
- Аккуратно добавить воду до установленного уровня, не допуская появления воздуха под пластиной. При наличии таковых слегка постучать по пластине и завершить наполнение (см. рисунок 7).
- Зафиксировать новое показание весов (M_s).
- Емкость аккуратно опорожнить, очистить, высушить и слегка смазать край. Взвесить пустую емкость вместе с покровной пластиной (M_t). (см. рисунок 8).
- Емкость наполнить дистиллированной водой примерно до 10 мм от края и измерить температуру воды (t).
- На емкость установить покровную пластину, все вместе поместить на весы, завершить наполнение водой и зафиксировать показание весов (M_w) (см. рисунок 9).
- При необходимости определить поправки для взвешивающего прибора при помощи эталонных гирь примерно с такими же значениями массы, как показатели M_p , M_s , M_t и M_w ; соответствующие поправки обозначаются как C_p , C_s , C_t и C_w .

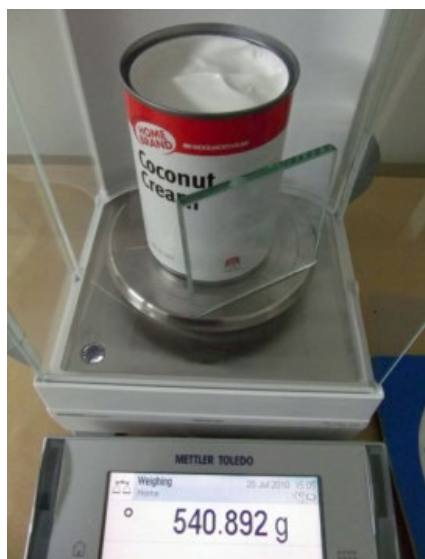


Рисунок 6: Взвешивание емкости, продукта и покровной пластины



Рисунок 7: Регулировка уровня воды и взвешивание



Рисунок 8: Взвешивание пустой емкости и покровной пластины



Рисунок 9: Наполнение водой и взвешивание

Расчеты:

В данном случае общей формулой для плотности будет:

$$\rho (\rho_w - 0,0012) \cdot \frac{M_p^* - M_t^*}{M_p^* - M_t^* + M_w^* - M_s^*} + 0,0012 \text{ г/мл} \quad (12)$$

где:

ρ – плотность продукта при 20 °С в г/мл

ρ_w – плотность воды при t °С в г/мл

$$M_p^* = M_p + C_p$$

$$M_s^* = M_s + C_s$$

$$M_t^* = M_t + C_t$$

$$M_w^* = M_w + C_w$$

Пример: томатный суп в емкости 1 л:

Открытая емкость с продуктом и специальной крышкой:	$M_p = 938,15 \text{ г}$
Емкость с крышкой, продуктом и дополнительной водой:	$M_s = 1005,21 \text{ г}$
Емкость с крышкой, полностью наполненная водой:	$M_w = 968,89 \text{ г}$
Пустая емкость с крышкой:	$M_t = 94,49$
Показание весов для 950 г эталонных гирь:	949,92 г
Поправка (950 г – 949,92 г):	C_p и $C_w = 0,08 \text{ г}$
Показание весов для 1000 г эталонных гирь:	995,95 г
Поправка (1000 г – 999,95 г):	$C_s = 0,05 \text{ г}$
Показание весов для 95 г эталонных гирь:	95,01 г
Поправка (95 ⁷ г – 95,01 г):	$C_t = -0,01 \text{ г}$
$M_p^* = 938,15 \text{ г} + 0,08 \text{ г} =$	938,23 г
$M_s^* = 1005,21 \text{ г} + 0,08 \text{ г} =$	1005,29 г
$M_w^* = 968,89 \text{ г} + 0,05 \text{ г} =$	968,94 г
$M_t^* = 94,49 \text{ г} - 0,01 \text{ г} =$	94,48 г
Температура воды:	$t = 17,8 \text{ °С}$
Плотность воды при t = 17,8 °С согласно таблице X ⁸ :	$\rho_w = 0,998 63 \text{ г/мл}$

$$\rho (0,998 63 - 0,001 2) \cdot \frac{938,23 - 94,48}{938,23 - 94,48 + 968,94 - 1 005,29} + 0,001 2 = 1,044 \text{ г/мл} \quad (13)$$

⁷ Скорее всего в оригинале техническая опечатка (указано "950") (прим. переводчика).

⁸ Скорее всего в оригинале техническая опечатка – следует читать как "таблица из раздела 6" (прим. переводчика).

5.5 Ареометр

Ареометр имеет цилиндрический корпус из стекла. Его нижняя часть, которую при использовании погружают, наполнена балластным материалом, а верхняя часть, частично погружаемая при использовании, имеет форму узкой градуированной трубки. Метод работы основан на законе Архимеда, при этом глубина погружения зависит от равновесия между весом ареометра и выталкивающей силой, определяемой весом вытесненной жидкости.

Существуют различные виды ареометров:

- со встроенным термометром или без него,
- различной точности: от 0,02 до 0,0001 г/мл,
- с различными диапазонами (в зависимости от точности).

Наиболее широко используемым видом для измерения плотности в области контроля фасованных товаров в Европе (со знаком "е") является ареометр без встроенного термометра и с точностью 0,0005 г/мл.

Из-за узкого диапазона каждого ареометра (0,05 г/мл) требуется девять ареометров, чтобы покрыть диапазон от 0,7500 до 1,2000 г/мл.

Правильное использование или регулировка также зависят от типа продукта, подлежащего измерению: в случае прозрачной жидкости показание можно снимать по линии, определяемой нижней частью мениска; в противном случае показание необходимо снимать по верхней части мениска (см. рисунок 11).

Необходимо также учесть поверхностное натяжение жидкости, подлежащей измерению, которое должно быть известно относительно жидкости, используемой для калибровки ареометра. Взвешивающий прибор не требуется.

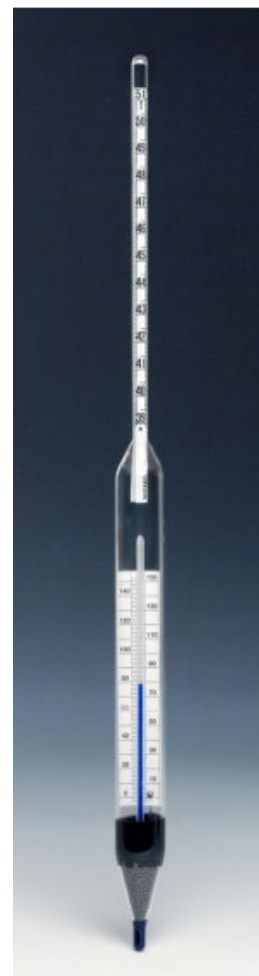


Рисунок 10:
Ареометр

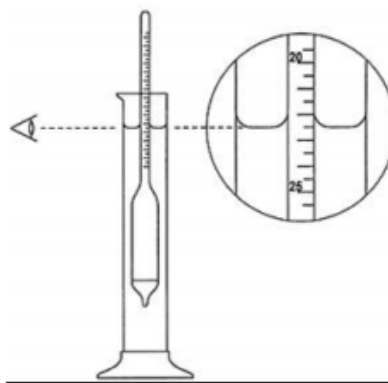


Рисунок 11: Снятие показания мениска для прозрачных жидкостей

Области применения

Негазированные жидкости, жидкие гомогенные продукты с низкой вязкостью.

Необходимое оборудование

- Сертифицированный ареометр, с точностью до 0,0005 г/мл для рассматриваемых продуктов.
- Термометр с ценой деления шкалы 0,1 °С или 0,2 °С.
- Цилиндр достаточной высоты и не слишком узкий.
- Термостат.

Подготовка и измерения

- Стеклоанный цилиндр и ареометр сначала аккуратно очистить.
- Стеклоанный цилиндр наполнить жидкостью, подлежащей измерению, без включения пузырьков воздуха. Цилиндр и ареометр поместить в термостат для получения равномерной температуры 20 °С.
- Ареометр поднять и осторожно опустить, так чтобы он свободно вертикально плавал в продукте. Показания снять по нижней или по верхней линии мениска в зависимости от вида жидкости и калибровки.

Расчеты

Плотность продукта:

$$\rho = \text{показание} + \text{поправочный коэффициент, г/мл} \quad (14)$$

Поправочный коэффициент указывается отдельно в свидетельстве о калибровке каждого ареометра.

5.6 Портативный электронный плотномер

Описание

Электронные плотномеры являются коммерчески доступными приборами с дискретностью 0,001 г/мл для плотности и 0,1 °С для температуры, которые могут быть пригодны для измерения плотности фасованных товаров. Принцип их работы основан на измерении собственной частоты U-образной стеклянной трубки, имеющей при заданной температуре постоянный объем. Такая частота связана с массой трубки и, следовательно, с плотностью содержащегося в ней продукта. Плотность на экране указывается сразу в г/мл.

Данный вид измерения может не включать в себя температурный контроль, но может позволить учесть температуру при расчете.

Встроенный термометр может обеспечивать точность до 0,5 °С, а показание плотности может быть точным до 0,001 г/мл.

Как правило, необходимо использовать прибор в рамках следующих рабочих диапазонов:

- плотность продукта должна находиться в диапазоне от 0,7 до 1,2 г/мл,
- рабочая температура должна находиться в диапазоне от +10 °С до +30 °С.



Рисунок 12: Портативный электронный плотномер

Прибор можно использовать двумя способами:

- со встроенной резиновой всасывающей колбой,
- с внешними пластмассовыми шприцами.

Первый метод не рекомендуется применять из-за возможности легкого включения пузырьков воздуха, что приводит к погрешностям в измеренных значениях плотности.

Требуемый небольшой объем пробы характеризуется низкой теплоемкостью, поэтому ее температура быстро приспособляется к температуре окружающей среды согласно показаниям прибора.

Поскольку коэффициент объемного расширения продуктов, как правило, неизвестен, желательно работать при температуре 20 °С.

Важно: Ввиду хрупкости стекла необходимо избегать давления в U-образной трубке, а также использования твердых и вязких продуктов.

Области применения

Согласно спецификациям изготовителя. Обычно: невязкие жидкости, не содержащие ни воздуха, ни двуокиси углерода, плотность которых находится в диапазоне от 0,7 до 1,2 г/мл.

Необходимое оборудование

- Портативный электронный плотномер, калиброванный (сертифицированный) и отрегулированный перед измерениями.
- Дистиллированная вода для регулировки.
- Пластмассовые шприцы вместимостью 2 мл.
- Всасывающая колба или насос.
- Термометр с ценой деления шкалы 0,1 °С или 0,2 °С.
- Установка в соответствии с инструкциями изготовителя.

Подготовка

- Калибровку плотномера проверять каждый раз перед использованием или как минимум один раз в начале каждого дня использования.
- Для введения дистиллированной воды после удаления пузырьков использовать шприц в соответствии с инструкциями изготовителя.
- Выждать время, указанное изготовителем. Зафиксировать показание плотности и соответствующей температуры. Если плотность отличается от указанной в таблице 1 более чем на 0,001 г/мл, прибор отрегулировать при помощи предусмотренного для этой цели устройства.
- Затем измерительную ячейку опорожнить, промыть спиртом и высушить. Нулевое показание без продукта должно быть равным 0,000; 0,001 или 0,002 г/мл. В противном случае калибровку начать сначала.

Измерения

- Два или три шприца наполнить пробой продукта. Воздух удалить постукиванием, направляя при этом иглу шприца вверх.
- Отдельным термометром измерить температуру окружающей среды. Желательно, чтобы температура окружающей среды находилась в диапазоне от 19,5 °С до 20,5 °С; однако в противном случае измерения плотности можно все равно выполнить.

- Различают три ситуации:
 - А. Температура окружающей среды составляет от 19,5 °С до 20,5 °С;
 - В. Температура окружающей среды ниже 19,5 °С;
 - С. Температура окружающей среды выше 20,5 °С.

Случай А: Продукт можно ввести при помощи шприца непосредственно в трубку/ячейку. Подождать, пока температура, показываемая прибором, не перестанет изменяться. Зафиксировать показание плотности с точностью до 0,001 г/мл. Операцию повторить с использованием второго шприца. В случае сомнений для подтверждения результата использовать третий шприц.

Случай В: Та же процедура, что и в пункте А, только сначала поместить шприц под струю воды температурой, например, 25 °С, ввести продукт и позволить температуре опуститься до 20 °С согласно показанию термометра прибора.

Случай С: Та же процедура, что и в пункте В, только сначала охладить пробу под струей воды температурой, например, 15 °С.
- В этих трех случаях измерение плотности выполняется на основании непосредственного показания прибора и действительно для температуры 20 °С.
- После каждого измерения очистить измерительную ячейку плотномера водой и спиртом и высушить с использованием приспособления для отбора лишней жидкости (например, шарика из резины/ПВХ, насоса и др.)

5.7 Электронный плотномер лабораторного типа

Плотномеры этого типа, характеризующиеся более высокой точностью по сравнению с портативными плотномерами, также используют собственную частоту трубки, наполненной подлежащим измерению продуктом. Они могут предусматривать регулировку температуры или требовать применения внешнего термостата.

Некоторые виды могут выдерживать более высокое давление, вплоть до 10 бар, таким образом позволяя выполнять измерения плотности аэрозольных продуктов.

Области применения

Эти приборы позволяют выполнять измерения на всех продуктах, жидких или пастообразных, которые не содержат пузырьков воздуха или CO₂.

Для правильного использования приборов необходимо следовать инструкциям изготовителя.

5.8 Гидростатические весы (весы Мора)

(только для применения в лаборатории).

Описание

Работа этих весов основана на законе Архимеда.

Весы взвешивают "тело погружения", которое висит на тонкой металлической проволоке.

"Тело погружения", как правило, представляет собой цилиндр объемом от 1 до 10 мл. Разность между результатом взвешивания в воздухе и результатом взвешивания в жидкости позволяет определить плотность жидкости.

В так называемых весах Мора "тело погружения" предварительно уравнивают в воздухе, так чтобы количество гирь, добавляемых для восстановления равновесия в жидкости непосредственно представляло значения плотности в г/мл.

Коммерческие весы Мора данного типа, дающие непосредственное показание, обычно характеризуются невысокой точностью (в лучшем случае около 0,001 г/мл), хотя принцип их работы, если они отлажены с помощью аналитических весов, может, в зависимости от проблем с поверхностным натяжением, позволить выполнение измерений с точностью до 0,0001 г/мл на терморегулируемых жидкостях.

При применении и эксплуатации прибора необходимо следовать инструкциям изготовителя.



Рисунок 13: Весы Мора

5.9 Метод погружения для шпатлевок

Описание

Принцип: Пробу продукта погружают в жидкость известной плотности. Разность между взвешиванием в воздухе и в жидкости позволяет рассчитать плотность.

Необходимое оборудование

- Лабораторный стакан вместимостью 600 мл.
- Дистиллированная вода температурой 20 °С.
- Тонкие латунные или медные полоски.
- Нейлоновая или металлическая проволока (например, рыболовная леска толщиной 0,18 мм).
- Весы, оборудованные для гидростатического взвешивания, с действительной ценой деления 1 мг (0,001 г) или меньше.
- Штатив для весов, который позволит выполнять взвешивание ниже чаши.
- Небольшая поддерживающая платформа, регулируемая по высоте, для лабораторного стакана.

Подготовка и измерения

- Прикрепить металлическую полоску к проволоке и подвесить ее под весами. Зафиксировать показание весов для полоски в воздухе (M_1).
- Разместить лабораторный стакан, наполовину наполненный водой температурой

20 °С, под весами таким образом, чтобы металлическая полоска была полностью погружена в воду. Зафиксировать показание весов для полоски в воде (M_2).

- Металлическую полоску извлечь из лабораторного стакана, высушить и аккуратно покрыть шпатлевкой по всей длине. Убрать лабораторный стакан и взвесить продукт и полоску в воздухе (M_3).
- Лабораторный стакан поставить под весами и взвесить продукт и полоску, полностью погруженными в воду (M_4).
- При необходимости, в показания $M_1 - M_4$ внести поправки на систематические погрешности весов.

Расчеты

$$\rho = \frac{M_3 - M_1}{(M_3 - M_1) - (M_4 - M_2)} \cdot (\rho_w - 0,001\ 2) + 0,001\ 2\ \text{г/мл} \quad (15)$$

где

ρ – плотность продукта при температуре измерения

ρ_w – плотность воды при температуре измерения (из таблицы)

Примечание: Если продукт, подлежащий испытанию, растворяется в воде, используют другую стандартизированную жидкость (метанол или метил-этил-кетон (МЕК) для силиконовых шпатлевок).

б Таблица: Плотность воды, не содержащей воздуха, в зависимости от температуры
(из статьи Х. Вагенбрета и В. Бланке, опубликованной в РТВ-Mitteilungen, № 6, 1971, с. 412-415)

Значения указаны в кг/м³. Для получения значений в г/мл их необходимо разделить на 1000.

t (°C)	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
0	999,8396	999,8463	999,8528	999,8591	999,8653	999,8713	999,8771	999,8827	999,8882	999,8934
1	999,8985	999,9035	999,9082	999,9128	999,9172	999,9214	999,9254	999,9293	999,9330	999,9365
2	999,9399	999,9431	999,9461	999,9489	999,9516	999,9541	999,9565	999,9587	999,9607	999,9625
3	999,9642	999,9657	999,9670	999,9682	999,9692	999,9701	999,9708	999,9713	999,9717	999,9717
4	999,9720	999,9718	999,9716	999,9711	999,9705	999,9698	999,9689	999,9678	999,9666	999,9652
5	999,9637	999,9620	999,9602	999,9582	999,9560	999,9537	999,9513	999,9487	999,9459	999,9430
6	999,9399	999,9367	999,9334	999,9299	999,9262	999,9224	999,9184	999,9143	999,9101	999,9057
7	999,9011	999,8964	999,8916	999,8866	999,8815	999,8762	999,8708	999,8652	999,8595	999,8537
8	999,8477	999,8416	999,8353	999,8289	999,8223	999,8157	999,8088	999,8019	999,7947	999,7875
9	999,7801	999,7726	999,7649	999,7571	999,7492	999,7411	999,7329	999,7246	999,7161	999,7075
10	999,6987	999,6898	999,6808	999,6717	999,6624	999,6530	999,6434	999,6337	999,6239	999,6140
11	999,6039	999,5937	999,5834	999,5729	999,5623	999,5516	999,5408	999,5298	999,5187	999,5074
12	999,4961	999,4846	999,4730	999,4612	999,4494	999,4374	999,4253	999,4130	999,4007	999,3882
13	999,3756	999,3628	999,3500	999,3370	999,3239	999,3106	999,2973	999,2838	999,2702	999,2565
14	999,2427	999,2287	999,2146	999,2004	999,1861	999,1717	999,1571	999,1424	999,1276	999,1127
15	999,0977	999,0826	999,0673	999,0519	999,0364	999,0208	999,0051	998,9892	998,9733	998,9572
16	998,9410	998,9247	998,9083	998,8917	998,8751	998,8583	998,8414	998,8244	998,8073	998,7901
17	998,7728	998,7553	998,7378	998,7201	998,7023	998,6845	998,6665	998,6483	998,6301	998,6118
18	998,5934	998,5748	998,5562	998,5374	998,5185	998,4995	998,4804	998,4612	998,4419	998,4225
19	998,4030	998,3833	998,3636	998,3438	998,3238	998,3037	998,2836	998,2633	998,2429	998,2224
20	998,2019	998,1812	998,1604	998,1395	998,1185	998,0973	998,0761	998,0548	998,0334	998,0119
21	997,9902	997,9685	997,9467	997,9247	997,9027	997,8805	997,8583	997,8360	997,8135	997,7910
22	997,7683	997,7456	997,7227	997,6998	997,6767	997,6536	997,6303	997,6070	997,5838	997,5600
23	997,5363	997,5126	997,4887	997,4648	997,4408	997,4166	997,3924	997,3680	997,3436	997,3191
24	997,2944	997,2697	997,2449	997,2200	997,1950	997,1699	997,1446	997,1193	997,0939	997,0685
25	997,0429	997,0172	996,9914	996,9655	996,9396	996,9135	996,8873	996,8611	996,8347	996,8083
26	996,7818	996,7551	996,7284	996,7016	996,6747	996,6477	996,6206	996,5935	996,5661	996,5388
27	996,5113	996,4837	996,4561	996,4284	996,4003	996,3726	996,3446	996,3165	996,2883	996,2600
28	996,2316	996,2032	996,1746	996,1460	996,1172	996,0884	996,0595	996,0305	996,0014	995,9722
29	995,9430	995,9136	995,8842	995,8546	995,8250	995,7953	995,7655	995,7356	995,7056	995,6756
30	995,6465	995,6152	995,5848	995,5544	995,5239	995,4934	995,4627	995,4319	995,4011	995,3701
31	995,3391	995,3080	995,2768	995,2456	995,2142	995,1828	995,1512	995,1196	995,0879	995,0561
32	995,0243	994,9923	994,9603	994,9282	994,8960	994,8637	994,8313	994,7988	994,7663	994,7337
33	994,7010	994,6682	994,6353	994,6024	994,5693	994,5362	994,5030	994,4697	994,4364	994,4029
34	994,3694	994,3358	994,3021	994,2683	994,2345	994,2005	994,1665	994,1324	994,0982	994,0640
35	994,0296	993,9952	993,9607	993,9261	993,8915	993,8567	993,8219	993,7870	993,7521	993,7170
36	993,6819	993,6467	993,6114	993,5760	993,5406	993,5050	993,4694	993,4338	993,3980	993,3622
37	993,3263	993,2903	993,2542	993,2181	993,1818	993,1455	993,1092	993,0727	993,0362	992,9996
38	992,9629	992,9261	992,8893	992,8524	992,8154	992,7784	992,7412	992,7040	992,6668	992,6294
39	992,5920	992,5545	992,5169	992,4792	992,4415	992,4037	992,3658	992,3279	992,2899	992,2518
40	992,3126									