

УДК 665.7

**И. И. Билинский, д. т. н., проф.; К. В. Огородник, к. т. н., доц.; Н. А. Яремишена****АНАЛИЗ МЕТОДОВ И СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЯ ПЛОТНОСТИ  
НЕФТЕПРОДУКТОВ**

*Систематизированы и проанализированы существующие методы и средства измерения густоты нефтепродуктов, выявлены их преимущества и недостатки.*

*Разработана новая усовершенствованная классификация методов и средств измерения густоты нефтепродуктов, в основу которой положены четыре основные классификационные признаки, а именно: по методу; по разновидности реализации метода; по средствам, реализующим метод; по особенностям конструкции.*

*Обоснован выбор наиболее перспективного и точного метода для контроля качества нефтепродуктов в заданных условиях. Таким методом является ультразвуковой, который, несмотря на незначительные недостатки (необходимость перед измерением густоты выкачивания воздуха из пульп, поскольку воздушные пузырьки существенно влияют на поглощение ультразвука; ультразвуковые густомеры являются очень дорогостоящими), имеет большое количество преимуществ над другими, а именно: безинертность и безконтактность измерения; отсутствие подвижных частей в потоке, потерь давления в трубопроводах; возможность их применения для измерения густоты загрязнения и агрессивных сред.*

**Ключевые слова:** густота, нефтепродукты, методы измерения, густомер.

Плотность является основным из физико-химических параметров, определяющих свойства и характеризующие состав и структуру нефтепродуктов, нормы плотности регламентируются стандартом «Евро 5» [1, 2]. Определение плотности является одним из наиболее трудоемких измерительных процессов. Достаточно сложно определить этот параметр, контролируя нефтепродукты при их производстве, транспортировке и использовании, особенно в условиях быстрых технологических процессов. Приборы, предназначенные для измерения плотности, называют плотномерами.

Плотностью называют содержание массы вещества в единице занимаемого ею объема. Она сильно зависит от температуры, уменьшаясь при её росте [3 – 5]:

$$\rho_{t1} = \rho_{t2} [1 - \beta(t_1 - t_2)] = \rho_{t2} (1 - \beta \Delta t),$$

где  $\rho_{t1}$  и  $\rho_{t2}$  – плотность среды соответственно при рабочей температуре  $t_1$  и при температуре  $t_2$ , кг/м<sup>3</sup>;  $\beta$  – коэффициент объемного теплового расширения вещества в интервале температур  $\Delta t$ .

Роль и значение плотномеров возрастает с каждым годом [4]. Дальнейшее развитие технологий меняет и требования к плотномерам: на смену громоздким ненадежным приборам приходят плотномеры, совместимые с другими продуктами микроэлектроники. Основные требования к приборам, которые предназначены для измерения плотности: высокая точность, однозначность показаний, быстродействие, многофункциональность, низкая стоимость, работоспособность в экстремальных эксплуатационных условиях, надежность, долговечность.

Измерение плотности нефтепродуктов имеет важное значение на сегодняшний день, ведь по значению плотности нефтепродукта можно судить о его составе и качестве, о примеси в нем и т. п. Существующие методы и средства измерения плотности нефтепродуктов имеют ряд недостатков, поэтому есть необходимость проанализировать их и выбрать метод, который является наиболее актуальным и перспективным для дальнейшего исследования.

**Цель работы:** оценить преимущества и недостатки современных методов и средств

измерения плотности нефтепродуктов, а также обосновать выбор наиболее перспективного и точного метода для контроля качества нефтепродуктов в заданных условиях.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- осуществить обзор литературных источников по указанной тематике, систематизировать и проанализировать существующие методы и средства измерения плотности нефтепродуктов, выявить их преимущества и недостатки;
- разработать новую усовершенствованную классификацию методов и средств измерения плотности нефтепродуктов;
- обосновать выбор наиболее перспективного и точного метода для контроля качества нефтепродуктов в заданных условиях.

### **Анализ методов и средств**

В работе на основе проведенного анализа существующих методов и средств измерения плотности нефтепродуктов [3 – 19] и уже имеющейся классификации [20] разработана новая, усовершенствованная классификация (рис. 1), в основу которой положены четыре основные классификационные признаки, а именно: по методу; по разновидности реализации метода; по средствам, реализующим метод; по особенности конструкции.

Итак, по методу различают поплавково-весовой, объемно-весовой, гидростатический, гидродинамический, вибрационный, радиоизотопный, оптический, ёмкостный и акустический плотномеры.

По разновидности реализации метода выделяют пирометрический и гидростатический; объёмометрический, пьезометрический, адсорбционный, дилатометрический



и пикнометрический; струйный, скоростной, дифференциальный и пневмометрический; центробежный, турбинный, струйный и силовой; бета-, гамма- и альфа-метод; амплитудный и частотный; скоростной, импедансный и скоростно-импедансный; поляриметрический, калориметрический, нефелориметрический и рефрактометрический; конденсаторный способы измерения плотности нефтепродуктов.

Для реализации каждого из этих способов используют соответствующие средства измерения плотности. Рассмотрим подробнее каждый из этих методов.

### Поплавочной-весовой метод измерения плотности нефтепродуктов

Поплавочной-весовой метод основан на законе Архимеда. Согласно этому методу проводят измерения выталкивающей силы, действующей на погруженный в исследуемую жидкость поплавков, после чего рассчитывают плотность жидкости на основе соотношения [3 – 5]:

$$F(x) = \rho_0 g \int_{h-x}^h S(x) dx + \rho g \int_0^x S(x) dx,$$

где  $\rho_0$  – плотность среды над жидкостью;  $g$  – ускорение свободного падения;  $\rho$  – плотность жидкости, в которую погружена нижняя часть поплавка;  $S$  – площадь сечения поплавка.

Поплавково-весовые плотномеры изготавливают или с частично погруженным, или полностью погруженным поплавком [5, 7]. В приборах первого типа мерой плотности нефтепродуктов служит глубина погружения поплавка определенной формы и постоянной массы [4, 6]. В плотномерах второго типа глубина погружения поплавка практически постоянна, поэтому измеряют действующую на поплавков выталкивающую силу, которая пропорциональна плотности нефтепродуктов.

По разновидности реализации метода в поплавок-весовых плотномерах можно выделить пирометрические и гидростатические плотномеры. Средства, реализующие пирометрический метод называют пирометрами, к ним относят спиртометры, сахариметры, клейметры, гидрометры, нафтоденсиметры, лактоденсиметры, урометры и т. п. Для реализации поплавок-весового гидростатического метода используют: ареометрические весы (обычно, с тонкой иглой, из термостойкого материала), модифицированные весы (с использованием «макета» или двух одинаковых по массе и объему поплавков), гидростатические весы (коромысло с надрезом и без надреза, с двойной чашей, с равноплечевым коромыслом) и коромысловые весы (с цилиндрическим стеклянным поплавком, с поплавком в виде слоя, цилиндра, шара, упругие, флотационные, тензорезистивные, электромагнитные) [3, 5, 7].

Ареометрические весы представляют собой металлический или стеклянный ареометр постоянного объема, в корпус которого снизу прикреплена дополнительная тарелка (чашка). На средней части стержня нанесена шкала или одна кольцевая метка. Измерение плотности с помощью ареометрических весов описано в [5 – 7].

Погрешность измерений составляет примерно  $\pm 1$  кг/м<sup>3</sup>. Более высокую точность могут обеспечить усовершенствованные весы, стержень которых выполнен из тонкой иглы (диаметром 0,2 – 0,3 мм) [5, 8].

К преимуществам ареометричных плотномеров можно отнести [4 – 8]: возможность получения большей точности измерения за счет использования стержня, выполненного из тонкой иглы; возможность использования при высоких температурах.

Недостаток заключается в подборе нужной массы гирь при трехразовом взвешивании, необходимости использования дополнительного слоя масла.

Модифицированные весы оснащены простым дополнительным устройством [4, 7], а подставку под цилиндр изготавливают из любого материала и устанавливают так, чтобы чашка весов могла свободно передвигаться вверх и вниз. Более точные результаты могут быть получены на весах, установленных таким образом, чтобы жидкость находилась под весами [8]. Принцип действия модифицированных весов описан в работах [3 – 5].

Преимущества модифицированных весов: возможность получения лучших результатов измерения за счет размещения жидкости под весами; регулирование температуры ванны путем добавления небольшого количества горячей воды или льда, или термостата.

К незначительному недостатку можно отнести использование ванн с большим объемом воды.

Широкое использование для измерения плотности жидкостей и твердых тел находят коромысловые веса [6]. Они просты по конструкции и удобны в обслуживании приборами.

Существенное их преимущество заключается в том, что для измерения требуется сравнительно небольшое количество вещества. Погрешность измерения  $\pm (0,05 - 0,1)\%$ . Расчеты погрешностей и показаний коромысловых плотномеров приведены в [4, 6].

Среди производителей плотномеров, принцип работы которых основан на поплавочно-весовом методе, известные компании: ОАО «Геотрон» (Россия), группа компаний «АТОМ» (Россия), Chi-da-vin-chi Ventures (Нигерия), TOBIAS Associates (США).

### **Объемно-весовой метод измерения плотности нефтепродуктов**

Согласно объемно-весовому методу некоторый постоянный объем среды, который анализируют, непрерывно взвешивают, а затем рассчитывают плотность данной среды по соотношению [4]:

$$\Delta G = 0,25\pi d^2 (\pi R + 2L)(\rho - \rho_0)g,$$

где  $d$  – внутренний диаметр трубы;  $R$  – радиус изгиба трубы;  $\rho_0$  – начальное значение плотности вещества;  $\rho$  – текущее значение плотности вещества.

Причем изменение веса соответствует изменению плотности [6 – 9].

Для этого метода характерны независимость показаний от свойств среды (поверхностное натяжение, вязкость, наличие твердых частиц и т. д.) и параметров контролируемого потока (скорость движения через чувствительный элемент, давление, пульсация расхода и давления и т. д.).

Данный метод измерения плотности нефтепродуктов реализуется объемно-весовыми плотномерами, которые по разновидности реализации метода делятся на объёмометрические, пьезометрические, адсорбционные, пикнометрические и дилатометрические способы.

Для реализации приведенных выше способов измерения плотности нефтепродуктов используют соответственно такие средства: объёмомеры (стеклянные, колбообразные, шаровидной формы, U-образные, цилиндрические), пьезометры (с меткой, пипетковидные, крановые, бескрановые, капиллярные), адсорбционные плотномеры (стеклянные, металлические), ареопикнометры (постоянного и переменного содержания) и микропикнометры (стеклянные, кварцевые, графитовые, металлические), дилатометры (цилиндробразные, колбообразные).

Существует много разновидностей пикнометров, и их применение определяется родом исследуемого вещества, ее количеством, а также необходимой точностью измерения [7, 8].

Уменьшение погрешности измерения до  $\pm 0,0001\%$  обеспечивается дифференциальным пикнометрическим методом, основанным на применении двух пикнометров с капиллярной шейкой, имеющих, по возможности, одинаковый объем. Принцип работы данного пикнометра описан в [7].

Ареопикнометры – это одна из разновидностей пикнометров. Их используют для измерения плотности жидкостей малых объемов (например, при анализе крови). В отличие от обычного ареометра, у ареопикнометра показания на шкале растут снизу вверх [4, 6].

Различные конструкции нестандартных пикнометров описаны в работах [3, 5, 7].

К преимуществам пикнометров относят возможность получения большей точности измерения за счет использования пикнометров малого объема. С ростом объема пикнометра для жидкостей и газов уменьшается относительная погрешность взвешивания, но одновременно увеличивается ошибка, связанная с неравномерностью температуры по всей массе жидкости (газа).

Дилатометры представляют собой калиброванную посуду цилиндрической или колбообразные формы с узкой горловиной, на которой есть кольцевая метка. Посуду заполняют исследуемой жидкостью с известной массой, а ее объем определяют путем измерения высоты уровня относительно отметки с помощью катетометра, а искомую плотность определяют по формуле, приведенной в работах [4, 6, 8].

Пьезометры предназначены для исследования зависимости плотности от давления и температуры. Существуют пьезометры постоянного и переменного объема. При работе с пьезометрами первого типа измеряют массу исследуемой жидкости, которая является переменной величиной, зависящей от давления и температуры, в то время как установленный объем пьезометра остается постоянным. В пьезометрах второго типа измеренная масса исследуемого вещества постоянна, а ее объем изменяется с изменением температуры и давления. Плотность при различных температурах определяют по соотношению, описанному в [9]. Пьезометры постоянного объема применяют для работы с газами и парами, которые при комнатных условиях находятся в жидком состоянии. Погрешность измерения таких приборов составляет  $\pm 0,2\%$  [8]. В пьезометрах переменного содержания измерения объема исследуемой жидкости, масса которой известна, можно фиксировать разными способами, описанными в [3 – 7]. Основным недостатком этого пьезометра связан с контактом ртути с жидкостью, ограничивающей его использование с точки зрения температурного диапазона.

К плотномерам, принцип работы которых основан на объемно-весовом методе, относят также адсорбционные приборы. Обычно эти плотномеры используют для измерения плотности пара. Схема данного плотномера и ее основные компоненты описаны в [7]. Погрешность адсорбционных плотномеров до  $\pm 0,1\%$ .

Объёмомеры бывают для твердых тел и газов. Наиболее простыми жидкостными объёмомерами являются измерительные цилиндры, бюретки, микробюретки, мензурки. Принцип их работы приведен в [9].

К числу преимуществ жидкостных объёмомеров относятся простота и скорость измерения плотности. В полевых условиях они незаменимы при исследовании пористых и тонкозернистых веществ. Но эти приборы значительно уступают по точности пикнометрам. Стоит отметить, что точность измерения тем выше, чем больше объем исследуемого тела [10].

Основные преимущества объемно-весового метода и плотномеров на его основе: возможность применения для пульп, суспензий, загрязненных, вязких и летучих веществ; независимость показаний от свойств и скорости протекания жидкости; возможность измерения при повышенном давлении ( $25 \text{ кг/см}^2 \approx 2,5 \text{ МПа}$ ); постоянное поперечное сечение измерительного участка устройства исключает осаждение твердых частиц, содержащихся в потоке; высокая чувствительность и малая погрешность (от 100 до 2000  $\text{кг/м}^3$ ). Ограничение области применения объемно-весовых плотномеров связано с недопустимостью газовых частиц в жидкости.

Производителями плотномеров, принцип работы которых основан на объемно-весовом

методе, являются такие компании «Spectro» (США), «Euro Sistem Srl» (Италия), «Dexter King Ventures Ltd» (Нигерия).

### Гидростатический метод измерения плотности нефтепродуктов

Гидростатический метод основан на измерении перепада давления столба жидкости на дроссельном элементе при постоянной высоте и определении плотности нефтепродукта [3, 8].

Принцип работы гидростатических плотномеров основан на том, что давление  $p$  в веществе на расстоянии  $H$  от ее поверхности определяют выражением, приведенным в [8].

В гидростатических плотномерах давление столба вещества обычно измеряют косвенным методом непрерывной продувки через вещество инертного газа (воздуха), давление которого пропорционально давлению столба вещества (пьезометрические плотномеры) [4, 8].

Различают следующие основные виды гидростатических плотномеров: дифференциальные и струйные (с непосредственным измерением давления столба жидкости), скоростные (с измерением столба жидкости косвенным путем), а также пневмометры (с непрерывной продувкой газа).

К пневмометрам относятся приборы, принцип действия которых основан на измерении давления, необходимого для отрыва пузырька газа от края трубки, вертикально погруженной в испытываемую жидкость [9, 10].

В дифференциальных плотномерах используют две  $U$ -образные трубки с одинаковым диаметром, в одну из которых наливают исследуемую жидкость плотностью  $\rho$ , а во вторую – жидкость (контрольная) с известной плотностью  $\rho_k$ , одновременно создают некоторую разницу давлений. Погрешность плотномеров примерно  $\pm 0,2\%$  [9].

При измерении плотности газов широко используют струйные плотномеры, принцип действия которых основан на зависимости между плотностью газа и скоростью его вытекания из отверстия [10]. Погрешность измерения струйных плотномеров определяется его конструкцией и составляет около  $\pm 1\%$ . Принцип работы струйных плотномеров приведен в [11].

Более надежные результаты обеспечивает двухколокольный плотномер, представляющий собой два одноколокольных устройства в одном корпусе [9, 11]. Один колокол предназначен для работы с воздухом, второй – с исследуемым газом. Форма, вес и объем колоколов одинаковы. Благодаря равенству размеров колоколов и времени утечки газа определение относительной плотности сводится к измерению перемещения звонка [4, 8].

Преимущества двоколокольного плотномера заключаются в упрощении и ускорении измерения, ненужности измерять время и делать перерасчет на сухое состояние, облегчаются поверка и настройка устройства [5 – 10]. При измерении плотности достаточно малых проб жидкости используют капельный метод, основанный на том, что скорость падения капли жидкости в другую, не смешанную с ней жидкость меньшей плотности, увеличивается с ростом плотности исследуемой жидкости [9 – 11].

Особое внимание стоит уделить строго вертикальной установке цилиндра. При падении капли измеряют секундомером с погрешностью  $\pm(0,1 - 0,2)$  с. Измерения проводят 5 – 6 раз и определяют среднее значение. Капельный метод может обеспечивать измерение плотности с погрешностью  $\pm(0,001 - 0,05)\%$  [5 – 7].

Применение данного гидростатического скоростного плотномера имеет ряд ограничений [3 – 9]:

- диапазон измерения в одной жидкости невелик – разность плотностей капли и вещества не должна превышать  $0,05 \text{ г/см}^3$ , поэтому для исследования группы различных жидкостей нужно приготовить и испытать много контрольных жидкостей;
- могут встретиться трудности при поиске вещества, которое удовлетворяло б

приведенные выше требования и было бы достаточно близким по плотности к исследуемому веществу;

– для уменьшения конвекционных токов необходимо суровое постоянство температуры.

Скоростной плотномер довольно удобный для быстрых систематических определений небольших измерений плотности (например, в медицине при контроле параметров крови).

Производители гидростатических плотномеров: компания «Markbiz Nigeria» (Нигерия), фирма «Cole Mills Limited» (США), группа компаний «Motormonitor s. c. Jaroslaw Labich, Piotr Jukaszewski» (Польша).

### **Вибрационный метод измерения плотности нефтепродуктов**

Вибрационный метод заключается в измерении частоты собственных колебаний резонатора в автоколебательном режиме и в последующем расчете плотности вещества, зависит от колебаний резонатора по следующему выражению [3, 9]:

$$f = \frac{\lambda^2}{2\pi} \sqrt{\frac{EI}{ml^3}},$$

где  $\lambda$  – постоянная, зависящая от условий закрепления трубки;  $E$  – модуль упругости материала трубки;  $I$  – момент инерции поперечного сечения трубки;  $m$  и  $l$  – масса и длина трубки.

К вибрационным плотномерам относят приборы, принцип работы которых основан на зависимости между параметрами гибких колебаний, поступающих в трубы (сосуды) с исследуемым веществом или тела, заключенные в ней, с одной стороны, и плотностью вещества – с другой.

Вибрационные плотномеры можно разделить на следующие средства, реализующие этот метод [12, 13]:

1) амплитудные плотномеры, в которых степень плотности является амплитуда колебаний резонатора при постоянной его резонансной частоте. Изменение плотности вызывает отклонения от резонанса и изменения амплитуды. Так как амплитуда колебаний резонатора определяется не только его параметрами, но и рядом других факторов (мощностью импульса, скоростью потока жидкости), точность измерения этой группы ограничена [12].

2) частотные плотномеры, в которых измеряют функционально связанную с плотностью вещества частоту собственных колебаний резонатора, что создает вместе с приводом (системой возбуждения) и системой обратной связи электромеханический генератор. В связи с тем, что измерение частоты зависит только от параметров резонатора (формы, размеров, модуля упругости, массы резонатора и вещества в нем) и не зависит от амплитуды, частотные плотномеры обладают по сравнению с амплитудными более высокими метрологическими характеристиками, а также превосходят их в удобстве обработки выходного сигнала, то есть по конструктивно-эксплуатационным показателям.

Равенство, приведенное в работе [13], является градуировочной характеристикой вибрационных плотномеров с трубчатыми резонаторами. Как правило, градуировочная характеристика линейризуется в измеряемом интервале плотностей; при этом погрешность линейности определяют шириной шкалы и способом линейризации. В некоторых случаях вибрационные плотномеры поставляют специализированной электронной приставкой, которая линейризует градуировочную характеристику [6, 8].

Чувствительными элементами вибрационных плотномеров служат трубки, цилиндры или пластины, закрепленные в неподвижных основаниях, которые приводятся в автоколебательный режим движения системой возбуждения [9].

Среди основных преимуществ, которые обуславливают растущее распространение

частотных плотномеров, необходимо отметить высокую точность, чувствительность и надежность, непосредственное преобразование искомой плотности в частотный выходной сигнал, возможность применения при высоких давлениях для широкой номенклатуры контролируемых сред (газов, веществ).

Вместе с тем частотные плотномеры обладают и недостатками, к которым относятся ограничение допустимых расходов жидкости, определяемой площадью сечения проточного канала, нелинейность шкалы, необходимость специальных средств для компенсации влияния температуры и давления на параметры резонатора [5, 7, 13].

Компаниями, которые занимаются производством вибрационных плотномеров, являются: ОАО «Геотрон» (Россия), группа компаний «АТОМ» (Россия), «Chi-da-vin-chi Ventures» (Нигерия), TOBIAS Associates (США).

### **Радиоизотопный метод измерения плотности нефтепродуктов**

Радиоизотопный метод заключается в измерении ослабления проникающей радиации при прохождении через исследуемое вещество и в дальнейшем расчете плотности вещества [12]. При фотопоглощении и комптоновском рассеянии рассматриваются лучи с энергией менее 1 МэВ.

Радиоизотопный метод измерения плотности и приборы на его основе применяют для непрерывных измерений. Радиоизотопные плотномеры относятся к бесконтактным приборам (чувствительный элемент не вводят в движимую измерительную среду), и их целесообразно применять для измерения плотности агрессивных или очень вязких веществ, пульп и веществ, находящихся под высоким давлением, или тех, что имеют высокую температуру в трубопроводах большого диаметра, но только в тех случаях, когда другие, рассмотренные выше плотномеры, не применяются [3 – 5, 9 – 11].

В радиоизотопных плотномерах используют три вида ядерного излучения: альфа, бета и гамма. Альфа-излучение обладает малой длиной пробега частиц, и поэтому используется только в плотномерах для газов [13]. Бета- и гамма-излучения применяют в плотномерах для жидкостей и твердых тел. Бета-излучение представляет собой поток электронов или позитронов, выпускаемых ядрами атомов и движущимися со скоростью, близкой к скорости света. Гамма-излучение – это электромагнитные колебания с очень малой длиной волны до  $4 \cdot 10^{-11}$  м. Гамма-лучи характеризуются значительно большей проникающей способностью по сравнению с бета-частицами.

Прохождение гамма-лучей через вещество сопровождается ослаблением их интенсивности (энергия излучения переходит в другие формы энергии). Измерение плотности вещества в трубопроводах и резервуарах с помощью гамма-излучения возможно двумя способами, описанными в работах [9 – 12].

Важным преимуществом этих плотномеров является возможность контроля плотности вещества в труднодоступных местах. Недостатком радиоизотопных плотномеров является зависимость показаний от физических свойств исследуемого вещества, что требует индивидуальной градуировки устройства для определения вида вещества.

Производители радиоизотопных плотномеров: компаний «АТОМ» (Россия), «Spectro» (США), «Euro Sistem Srl» (Италия), группа компаний «Motormonitor s. c. Jaroslaw Labich, Piotr Jukaszewski» (Польша).

### **Оптический метод измерения плотности нефтепродуктов**

Оптический метод измерения плотности нефтепродуктов заключается в захвате света движущейся средой (эффект Физо – Фринели) или в рассеянии света движущимися

частицами (эффект Доплера) [13].

По разновидности реализации метода выделяют поляриметрический, калориметрический, нефелометрический и рефрактометрический плотномеры.

Средства, реализующие данный метод, делят на поляриметры, калориметры, нефелометры и рефрактометры [12, 14].

Поляриметр – прибор, предназначенный для измерения угла вращения плоскости поляризации, вызванной оптической активностью прозрачных сред, растворов и жидкостей [13, 14]. В широком смысле поляриметр – это прибор, измеряющий параметры поляризации частично поляризованного излучения (в этом смысле могут измеряться параметры вектора Стокса, степень поляризации, параметры эллипса поляризации частично поляризованного излучения); применяется для изучения структуры и свойств вещества; имеет прикладное применение в лабораториях пищевой, химической и других отраслях науки и производства для определения концентрации растворов оптически активных веществ, таких как: сахар, глюкоза, белок – по углу вращения плоскости поляризации [8, 10, 13]. Также он позволяет наблюдать и измерять остаточные напряжения в стекле. По особенностям конструкции различают следующие поляриметры: призма Аренса, призма Волластона, призма Глана – Фуко, призма Тейлора и призма Николя.

Калориметр – прибор для измерения количества теплоты, выделяемого или поглощаемого в любом физическом, химическом или биологическом процессе [10 – 12]. Современные калориметры работают в диапазоне температур от 0,1 до 3500 °С и позволяют измерять количество теплоты с точностью до 0,01 – 10%. Устройство калориметра очень разнообразно и определяется характером и продолжительностью изучаемого процесса, областью температур, при которых проводят измерения, количеством измеряемой теплоты и требуемой точностью. Калориметры по особенностям конструкции различают [11, 13] жидкостные, массивные, одинарные, двойные (дифференциальные).

Нефелометр – оптический прибор, предназначенный для измерения степени мутности жидкостей и газов по интенсивности рассеяния ими света [14, 16]. Действие нефелометра основано на сопоставлении интенсивности двух световых потоков: одного – от рассеяния суспензии, другого – от эталона (например, мутное стекло). Нефелометры делят на мутномеры, дымомеры. Они применяются при исследовании дисперсных систем [17].

Рефрактометр – прибор, измеряющий показатель преломления света в среде [17, 18]. Существует большое количество типов рефрактометров, имеющих различную конструкцию и технические данные. Они предназначены для решения различных научно-исследовательских и производственно-технологических задач. Рефрактометры бывают портативные, лабораторные, промышленные.

Производителями плотномеров, принцип работы которых основан на оптическом методе, являются такие компании: «Spectro» (США), «Euro Sistem Srl» (Италия), «Dexter King Ventures Ltd» (Нигерия).

### **Емкостный метод измерения плотности нефтепродуктов**

Емкостный метод основан на измерении емкости конденсатора, образованного погруженным в среду электродом и средой, непосредственно контролируемой [8, 10, 13].

Параметр материала, характеризующий способность материала образовывать емкость, называется диэлектрической проницаемостью и показывает, во сколько раз увеличивается емкость конденсатора, когда между пластинами конденсатора внести данный материал, не меняя габаритов конденсатора, по сравнению с вакуумом [13, 17]. Записав выражения, определяющие сопротивление и емкость участка изоляции, и умножив правые и левые части, получим [18]:

$$R = \frac{\rho}{l}, \quad C = \varepsilon_0 \varepsilon l,$$

откуда

$$CR = \varepsilon_0 \varepsilon \rho.$$

где  $C$  и  $R$  – сопротивление и ёмкость участков изоляции;  $\varepsilon_0$  – электрическая постоянная;  $\varepsilon$  – диэлектрическая проницаемость;  $l$  – приведенная длина конденсатора;  $\rho$  – плотность среды.

По выражению видно, что емкость конденсатора не зависит от габаритов и формы конденсатора, а зависит исключительно от  $\varepsilon$  и  $\rho$ .

Плотномеры такого типа могут применяться для измерения как неэлектропроводных, так и электропроводных жидкостей. Они пригодны для измерения плотности в широком диапазоне давлений и температур агрессивных и неагрессивных сред. Их показания зависят от диэлектрической проницаемости среды, которая может меняться с температурой. Применение компенсационных ёмкостей позволяет существенно уменьшить это влияние, но не исключает его полностью [11, 13]. Электронная схема емкостных плотномеров достаточно сложная, что ограничивает их широкое распространение.

Для жидких электропроводящих сред применяют первичные преобразователи с одним электродом, покрытым изоляционным слоем. Роль второго электрода играет контролируемая среда.

Для измерения уровня неэлектропроводных сред используют первичный преобразователь с двумя неизолированными электродами [10, 12, 16].

Преимущества емкостных плотномеров: простота, удобство монтажа и обслуживания, надежность и потенциально высокая точность (известны ёмкостные плотномеры, основная погрешность которых не превышает 0,1 – 0,2%). Ёмкостные плотномеры находят широкое применение в промышленности. К недостаткам ёмкостных плотномеров относят: высокую чувствительность к изменению электрических свойств жидкостей, обусловленную изменением их состава, температуры и т. д., появление на элементах датчика электропроводящей пленки вследствие химической активности жидкости, конденсации ее паров, налипания самой жидкости на контактные элементы.

Среди производителей плотномеров, принцип работы которых основан на емкостном методе, известные компании: ОАО «Геотрон» (Россия), группа компаний «АТОМ» (Россия), Chi-da-vin-chi Ventures (Нигерия), TOBIAS Associates (США).

### **Ультразвуковой (акустический) метод измерения плотности нефтепродуктов**

Ультразвуковой (акустический) метод основан на измерении скорости потока вещества или газа с использованием ультразвука [6, 8, 13].

Звуковые колебания высокой частоты (20 кГц и выше), создаваемые электроакустическим вибратором (излучателем), проходят через среду и регистрируются приемником, который расположен от излучателя на расстоянии  $D$ .

Применение ультразвука для измерения плотности вещества является новым и перспективным направлением развития плотномеров.

Ультразвуковой (акустический) метод измерения плотности вещества и приборы на его основе используют обычно для непрерывных измерений. Акустические плотномеры по разновидности реализации метода делят на импедансные, скоростные и импедансно-скоростные плотномеры. Принцип работы данных приборов описан в работах [8, 10, 14].

Акустические плотномеры представляют собой средства измерения, в которых выходной сигнал измерительной информации зависит от акустических свойств анализируемого вещества.

Скорость распространения продольных акустических колебаний в веществе определяют [15]:

$$C = \sqrt{K / \rho} = \sqrt{1 / \chi \rho},$$

где  $K$  – модуль всестороннего сжатия, Па;  $\chi$  – коэффициент сжатия, м<sup>2</sup>/Н.

По выражению видно, что по скорости звука можно судить о плотности исследуемого вещества [13, 14].

Распространение ультразвуковых волн в любой среде также сопровождается поглощением звуковой энергии, которая характеризуется коэффициентом поглощения  $\alpha$ . Интенсивность ультразвука при прохождении расстояния уменьшается по показательному закону:

$$I = I_0 e^{-2\alpha d},$$

где  $I_0$  – начальная интенсивность ультразвука, Вт/м<sup>2</sup>.

Скоростные УЗ-плотномеры предназначены в основном для однородных веществ, бинарных растворов, смесей веществ и газов [14, 16]. Среди этих плотномеров можно отметить следующие разновидности. Временно-импульсный плотномер основан на измерении изменения времени распространения УЗ-колебаний в контролируемой среде в зависимости от изменения его плотности. Принцип работы фазового плотномера заключается в измерении фазы УЗ-колебаний (непрерывных или амплитудомодулированных), прошедших через среду [15, 17]. Интерферометрический плотномер построен на измерении длины волны УЗ-колебаний по акустическому резонансу столбу среды заданной высоты, когда в нем укладывается целое число полуволн. Резонансный плотномер характеризуется тем, что в слое среды между двумя плоскопараллельными поверхностями, одна из которых граничит с излучателем, связанным с широкополосным электрическим генератором, а другая является отражателем, создается стоячая волна [18]. В плотномере с акустическим фильтром использован эффект изменения спектра УЗ-импульса при распространении его в контролируемой жидкости через расположенный в ней твердый слой. В автоциркуляционном плотномере определяют величину, обратную времени распространения УЗ-колебаний в среде. Этой величиной является частота автоциркуляции в электроакустической замкнутой системе [17, 19]. Плотномер со скоростной реакцией волновода основан на использовании эффекта изменения скорости распространения УЗ-колебаний вдоль твердого слоя от плотности жидкости, которая сталкивается с этим слоем. Твердым слоем обычно служит стенка трубопровода или резервуара с контролируемой средой. Принцип работы скоростных УЗ-плотномеров подробнее описан в работах [6, 8, 10, 14].

Импедансными плотномерами измеряют плотность однородных твердых и газообразных веществ, бинарных растворов и смесей жидкостей или газов [17, 20]. Применение этих плотномеров предусматривает, что известна (или предварительно определена) зависимость между сопротивлением и плотностью вещества. Одна из схем импедансного плотномера [19] основана на определении эквивалентного сопротивления излучения пьезоэлемента с известной площадью. Если контакт со средой не допускается [17], приемник располагают на промежуточном звукопроводе, через который УЗ-колебания излучателя передаются среде и приемнику.

Одной из разновидностей импедансных плотномеров является дифференциальный плотномер, в котором измеряется разность акустических давлений, образующихся идентичными излучателями в контролируемой среде и вспомогательной среде с известным сопротивлением [19 – 20]. Плотномер с импедансной реакцией волновода основан на экспоненциальном угасании УЗ-волны Лэмба в твердом слое (волноводе), контактирующей с контролируемой средой. Значительное развитие получили УЗ-плотномеры, основанные на

поглощении звуковой энергии и на скорости распространения звука. Принцип действия импедансных плотномеров подробнее рассматривают в [5 – 8, 11 – 18].

Из рассмотренных импедансных плотномеров наибольшей чувствительностью обладают приборы с промежуточным слоем и импедансной реакцией волновода.

Импедансно-скоростные плотномеры, в которых сочетаются описанные выше виды импедансных и скоростных способов измерения, являются перспективными благодаря возможности применения для широкой номенклатуры различных веществ и бесконтактности измерения [17, 19].

Другие схемы УЗ-плотномеров и их элементы приведены в работах [6 – 8, 18 – 20]. В зависимости от схемы и конструкции УЗ-плотномеров их приведенная погрешность колеблется от  $\pm 1,5$  до  $\pm 3\%$ .

Широкому распространению акустических (ультразвуковых) плотномеров способствуют такие преимущества [17 – 20]: высокая чувствительность; возможность их применения для измерения плотности загрязненных и агрессивных сред; безинертность и бесконтактность измерения; отсутствие подвижных частей в потоке; отсутствие потерь давления в трубопроводах и др.

Ультразвуковой метод измерения плотности имеет незначительные недостатки, связанные с необходимостью перед измерением плотности скачивания воздуха с пульп, поскольку воздушные пузырьки значительно влияют на поглощение ультразвука; со стоимостью УЗ-плотномеров.

Среди производителей плотномеров, принцип работы которых основан на ультразвуковом методе, известные компании: «Markbiz Nigeria» (Нигерия), «Cole Mills Limited» (США), ОАО «Геотрон» (Россия), «TOBIAS Associates» (США).

### Вывод

Систематизированы и проанализированы существующие методы и средства измерения плотности нефтепродуктов, выявлены их преимущества и недостатки.

Разработана новая усовершенствованная классификация методов и средств измерения плотности нефтепродуктов, в основу которой положены четыре основные классификационные признаки, а именно: по методу; по разновидности реализации метода; по средствам, реализующим метод; по особенностям конструкции.

Обоснован выбор наиболее перспективного и точного метода для контроля качества нефтепродуктов в заданных условиях. Таким методом является ультразвуковой, который несмотря на незначительные недостатки (необходимость перед измерением плотности скачивания воздуха с пульп, поскольку воздушные пузырьки значительно влияют на поглощение ультразвука; ультразвуковые плотномеры достаточно ценные), имеет множество преимуществ перед другими, а именно: безинертность и бесконтактность измерения; отсутствие подвижных частей в потоке, отсутствие потерь давления в трубопроводах; возможность их применения для измерения плотности загрязненных и агрессивных сред.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бензини автомобілі підвищеної якості. Технічні умови : ДСТУ 4839: 2007. – [Чинний з 2008-01-01]. – К. : Держспоживстандарт України, 2007. – 14 с.
2. Євро-5 — екологічний стандарт, що регулює вміст шкідливих речовин в вихлопних газах [Електронний ресурс] / Режим доступу : <https://ru.wikipedia.org/wiki/Евро-5>. – Назва з екрану.
3. Энергопроматоматика. – Каталог статей. Научные статьи и публикации [Електронний ресурс] / Режим доступу : <http://kipia.ru/catalog/izmeritelnye-pribory/izmerenie-urovnya/poplavkovye-urovnamery/pdu-poplavkovye-datchiki/> – Назва з екрану.
4. Зайцев Г. В. Теория автоматического управления и регулирования [2-е изд., перераб. и доп.] / В. Г. Зайцев. – К. : Вища шк. Головное изд-во, 1989. – 431 с.
5. ТОВ «Слот». Каталог продукції. Новини [Електронний ресурс] / Режим доступу :

<http://www.slot.if.ua/news/5/> – Назва з екрану.

6. Подлесный Н. И. Элементы и системы автоматического управления и контроля : учебник [3-е изд., перераб. и доп.] / Н. И. Подлесный, В. Г. Рубанов, – К. : Выща шк., 1991. – 461 с.

7. Группа компаний «АПЛИСЕНС». – Каталог продукції. Виробництво [Електронний ресурс] / Режим доступу : <http://aplisens.com.ua/prod/42> – Назва з екрану.

8. Белов А. В. Самоучитель по микропроцессорной технике / А. В. Белов. – СПб. : Наука и Техника, 2003. – 224 с.

9. Emerson. Process Management. – Каталог продукції. Новини [Електронний ресурс]. Режим доступу : [http://www.vsp.com.ua/mobrey/systems\\_2/7812/](http://www.vsp.com.ua/mobrey/systems_2/7812/) – Назва з екрану.

10. Цюцюра В. Д. Метрологія та основи вимірювання. Навч. посібник / В. Д. Цюцюра, С. В. Цюцюра, – К. : Знання. – Прес, 2003. – 180 с.

11. Белов А. В. Создаем устройства на микроконтроллерах / А. В. Белов. – СПб. : Наука и Техника, 2007. – 304 с.

12. Клепач М. М. Математичне та програмне забезпечення для визначення якісних показників нафтопродуктів за їх фізико-механічними параметрами / М. М. Клепач // Матеріали I міжнародної науково-практичної конференції молодих учених, аспірантів і студентів «АКІТ-2014». – Київ, НТУУ «КПІ», 2014. – С. 113 – 115.

13. Коновалов Г. Ф. Радио-автоматика / Г. Ф. Коновалов. – М. : Вища школа, 1990. – 355 с.

14. КСК – Автоматизація. – Каталог продукції. Виробництво [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://kck2011.tb.ua/ua/goods/view/11246/all/ultrazvukoviy-3-promeneviy-vitratomir-ufm-3030/> – Назва з екрану.

15. Д. Сю Современная теория автоматического управления и ее применение / Д. Сю, А. Мейер ; пер. с англ. под ред. д-ра техн. наук проф. Ю. И. Топчиева. – М. : Машиностроение, 1972. – 544 с.

16. Пат. 2227320 Российская Федерация, МПК G 06 F 17/12, G 01 N 33/22. Способ измерений показателей качества нефтепродуктов / Скворцов Б. В., Жиганов И. Ю., Синников С. Г., Васильев И. Р.; заявитель и патентообладатель Самарский государственный аэрокосмический университет им. акад. С. П. Королева. – № 2002100538/09 ; заявл. 08.01.2002 ; опубл. 27.03.2004, Бюл. № 11.

17. Самофалов К. Г. Микропроцессоры / К. Г. Самофалов, О. В. Виктор, А. К. Кузьяк. – К. : Техніка, 1986. – 278 с.

18. Локазюк В. М. Мікропроцесори та мікро ЕОМ у виробничих системах : посібник / В. М. Локазюк. – К. : Видавничий центр «Академія», 2002. – 368 с.

19. Папушин Ю. Л. Основи автоматизації гірничого виробництва. / Ю. Л. Папушин, В. С. Білецький. – Донецьк : Східний видавничий дім, 2007. – 168 с. – ISBN 978-966-317-004-6.

20. Дорф Р. Современные системы управления / Р. Дорф, Р. Бишоп, – М. : Лаборатория базовых знаний, 2002. – 822 с.

**Билинский Иосиф Иосифович** – д. т. н., профессор кафедры электроники и наносистем.

**Огородник Константин Владимирович** – к. т. н., доцент кафедры электроники и наносистем.

**Яремисена Наталия Андреевна** – аспірантка кафедри електроніки і наносистем.

Винницький національний технічний університет.