

ОБЗОР

УДК 681.2.083

**АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР И ИССЛЕДОВАНИЕ УСТРОЙСТВ  
И МЕТОДОВ ИЗМЕРЕНИЯ ПЛОТНОСТИ ЖИДКОСТИ**

**Гашенко Ю.В., Астапов В.Н.**

*ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет», Самара,  
e-mail: juliasarbitova@gmail.com*

В настоящее время большое внимание уделяется разработке совершенно новых средств измерения, основой развития которых является последние достижения науки и техники и применение совершенно новых принципов измерения и преобразования. Среди большого перечня средств измерения и контроля одну из главнейших позиций занимают измерители плотности, так как плотность нефтепродуктов определяет такие важные показатели, как состав и свойства веществ. Соответственно, применение плотномеров на нефтеперерабатывающих предприятиях может послужить источником основной информации о протекании технологических процессов и их параметрах. В данной статье рассматриваются основные способы и методы измерения плотности жидкостей, такие как вибрационные, весовые, поплавковые, гидростатические, ультразвуковые, силовые, вихревые и радиоактивные. Наиболее распространенными лабораторными методами измерения плотности нефти и нефтепродуктов являются ареометрический, вибрационный и пикнометрический. Описаны некоторые методы измерения плотности, применяемые в ведущих мировых компаниях по производству плотномеров, а также запатентованные методы, разработанные в различных институтах Великобритании, США, Франции, России и других стран. Описаны принципы работы приборов, их основные метрологические характеристики, полученные вследствие исследований, а также достоинства, недостатки и области их применения.

**Ключевые слова:** ареометр, нефтесиметр, вибрационный плотномер, ультразвуковой плотномер, радиоактивный плотномер, поплавковый плотномер, плотность нефтепродуктов

**ANALYTICAL REVIEW AND RESEARCH OF DEVICES AND METHODS  
FOR MEASURING LIQUID DENSITY**

**Gashenko Yu.V., Astapov V.N.**

*Samara State Technical University, Samara, e-mail: juliasarbitova@gmail.com*

Currently, much attention is paid to the development of completely new measuring instruments, the development of which are the latest achievements of science and technology and the application of completely new principles of measurement and transformation. Among a large list of measuring and control instruments, one of the most important positions is occupied by density meters, since the density of oil products determines such important indicators as the composition and properties of substances. Accordingly, the use of densitometers at oil refineries can serve as a source of basic information about the flow of technological processes and their parameters. This article discusses the main methods and methods for measuring the density of liquids, such as vibrational, weight, float, hydrostatic, ultrasonic, power, vortex and radioactive. The most common laboratory methods for measuring the density of oil and oil products are areometric, vibrational and pycnometer methods. Some density measurement methods used in the world's leading density meter companies are described, as well as patented methods developed at various institutes in the UK, USA, France, Russia and other countries. The principles of operation of the devices, their basic metrological characteristics obtained because of research, as well as the advantages, disadvantages and areas of their application are described.

**Keywords:** hydrometer, oil densitometer, vibration densitometer, ultrasonic densitometer, radioactive densitometer, float densitometer, oil product density

В данный момент актуальной является задача измерения плотности пожароопасных жидкостей, а именно продуктов нефтедобычи и нефтепереработки с целью контроля качества сырья и готовой продукции [1]. Это позволяет сократить потери, а также повысить качество выпускаемой продукции в соответствии с международными стандартами. Соответственно, возникает проблема достижения высокой точности и достоверности процесса контроля, разработки принципиально новых первичных преобразователей (датчиков), с помощью которых осуществляется преобразование физических величин удобных для

обработки, передачи и отображения полученной информации.

Возможности современной элементной базы, достижений науки и техники, использующие качественно новые принципы преобразования, позволяют создавать измерительные устройства, обладающие широким спектром их применения, высокой точностью, помехозащищенностью и стабильностью полученных результатов.

Трудности создания методов и средств контроля плотности веществ во многом определяются особенностями этой области измерительной техники, основные из которых сводятся к большой номенклатуре

контролируемых веществ (жидкости, газы, многофазные потоки, сжиженные газы), широкому диапазону изменений параметров состояния (давление, температура) [2]. Следствием этого является большой объем научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, проводимых в рассматриваемой области.

В современных измерительных системах применяется несколько способов измерения плотности жидкостных сред, которые приведены в данном исследовании. Целью исследования является изучение существующих принципов измерения плотности жидких веществ, особенностей конструкции плотномеров, а также их достоинств и недостатков для выявления перспектив улучшения характеристик систем измерения плотности, так как современная промышленность предъявляет повышенные требования к точности измерения, работоспособности в жестких условиях эксплуатации и обеспечению безопасности производства.

#### *Вибрационные плотномеры*

Преимуществами вибрационных приборов являются сравнительная простота, высокая точность и частотный выход сигнала.

В плотномере для жидкостей [3] чувствительный элемент представляет собой трубку, концы которой неподвижно закреплены и соединены при помощи эластичных переходных муфт с подводящей и отводящей магистралями. Под трубкой находятся три поляризованных электромагнита с П-образными сердечниками. Средняя катушка используется для возбуждения колебаний трубки. Крайние катушки соединены последовательно и подключены к входу усилителя. Усиленный сигнал подается на среднюю катушку, а также на частотомер, отградуированный в единицах плотности. Усилитель обеспечивает необходимый сдвиг по фазе второй гармоники напряженности поля средней катушки относительно полей двух других катушек. Для исключения удвоения частоты между полюсами сердечника катушки, возбуждающей колебания, помещена перемычка в виде постоянного магнита [4]. Такие перемычки имеются и у сердечников двух других катушек. Верхний предел измерения таких приборов  $3 \text{ г/см}^3$ . Плотномеры такого типа производятся фирмой Solarton Schlumberger (Франция). Согласно исследованиям в различных средах, данные плотномеры дают воспроизводимость показаний  $\pm 0,01\%$ , а влияние вязкости пренебрежимо мало.

Фирмой J. Agar (Великобритания) выпускается плотномер с вибратором в виде

пустотелого цилиндра, установленного в контролируемом потоке и совершающем колебания на резонансной частоте, которая зависит от плотности окружающей среды [5, 6]. Колебания возбуждаются с помощью цепи обратной связи, образованной приемной катушкой, усилителем и катушкой возбуждения. Диапазон измерения  $0\text{--}100 \text{ г/л}$ . Погрешность не превышает  $\pm 0,1\%$  диапазона. Во избежание турбулентных шумов поток должен быть ламинарным, имеющим скорость не более  $1 \text{ м/с}$  для жидкостей и  $3 \text{ м/с}$  для газов.

Плотномер, выпускаемый фирмой Barton (США), применяется для измерения плотности жидкостей, пульп, газов и паров в диапазоне температур от  $-254$  до  $+120^\circ\text{C}$  с погрешностью не более  $\pm 0,25\%$ . Прибор содержит в качестве вибратора тонкую прямоугольную пластину, закрепленную в узловых точках [7]. Пластина совершает незатухающие колебания на резонансной частоте, возбуждаемой соленоидной катушкой с помощью схемы положительной обратной связи с электронным усилителем. Частота или период колебания служат мерой плотности. В измерительной схеме осуществляется линеаризация выходного сигнала. Градуировка производится путем определения трех коэффициентов уравнения второго порядка на образцовых жидкостях (например, вода, керосин и газолин) или газах.

Другой плотномер этого же типа вводится на гибком держателе в горизонтальный трубопровод с контролируемой средой (жидкость, газ) через патрубок, выступающий из трубопровода сверху. Вибратором является прямоугольная металлическая пластинка, зажата между двумя полуцилиндрами, запрессованными в цилиндрический корпус [8]. К внешней поверхности последнего присоединена перпендикулярно к плоскости вибратора трубка из магнетострикционного материала.

В месте стыка вибратора с полуцилиндрами установлен пьезоэлемент. Его выводы проложены в пазах полуцилиндров и проведены через внутреннюю трубку к дифференциальному усилителю, который размещен в головке датчика, полностью защищены от наводок со стороны подводящих проводов. Выходной сигнал подается на задающую катушку в фазе с колебаниями вибратора и образует положительную обратную связь электромагнитного генератора, колеблющегося на резонансной частоте. Последняя зависит от плотности среды, окружающей вибратор. Линеаризатор вырабатывает напряжение, пропорциональное плотности. Оно изме-

ряется вольтметром, отградуированным в единицах плотности. Погрешность не превышает  $\pm 0,1\%$  в диапазоне измерения  $0,0014\text{--}1,4 \text{ г/см}^3$ .

Важное направление разработки вибрационных плотномеров связано с созданием бесконтактных приборов, в которых датчик размещается снаружи трубопровода. Получают дальнейшее развитие плотномеры с камертонным вибратором. Среди них наиболее чувствительны датчики в виде камертонных механических резонаторов [9]. Высокая добротность колебательной системы достигается за счет применения сдвоенного камертона, образованного двумя параллельными трубками, соединенными на концах. Сдвоенный камертон приводится в автоколебательный режим системой возбуждения, состоящей из электромагнитного возбуждителя, приемника колебаний и усилителя. Выходным сигналом является частота собственных колебаний камертона, определяемая плотностью измеряемой среды. Пределы измерения  $0,69\text{--}1,05 \text{ г/см}^3$ . Основная погрешность  $\pm 1,5 \text{ г/см}^3$ .

Аналогично выполнен плотномер фирмы Solartron Schlumberg (Франция). Частота на выходе сравнивается с частотой, задаваемой кварцевым генератором [10]. Сравнение осуществляется в цифровом виде электронной схемой на интегральных элементах. Прибор нечувствителен к внешним вибрациям и к колебаниям питающего напряжения. Погрешность определяется в основном первичной градуировкой и практически бывает менее  $0,1 \text{ мг/см}^3$  в диапазоне плотностей  $0,6\text{--}1,6 \text{ г/см}^3$ . Модификация электронной схемы позволяет приводить к стандартным условиям плотность нефтепродуктов вязкостью  $0,5\text{--}200 \text{ сСт}$ . В этом случае погрешность измерения в пределах  $0,64\text{--}0,94 \text{ г/см}^3$  (с учетом коррекции по температуре и давлению) не превышает  $\pm 0,5 \text{ мг/см}^3$  при  $5\text{--}25 \text{ }^\circ\text{C}$  и  $\pm 1 \text{ мг/см}^3$  при  $0\text{--}75 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Разновидностью плотномеров с наружным возбуждением является прибор, выполненный как U-образная труба из магнитного материала с концами, жестко закрепленными в неподвижном цоколе [10]. Вблизи трубы расположены два электромагнита, создающие крутящий момент, который стремится вызвать закручивание трубы относительно ее продольной оси. При подаче в обмотки электромагнитов переменного тока возникают крутильные колебания трубы. В цоколь встроены пьезоэлектрический или магнитострикционный датчики колебаний. Его выходной сигнал поступает на вход усилителя. Усиленный сигнал частоты переменного тока подается

в обмотки электромагнитов и на частотомер. При протекании жидкости труба колеблется с резонансной частотой, зависящей от плотности жидкости.

Усовершенствование схем вибрационных плотномеров позволило улучшить технологические и метрологические характеристики приборов. Следует указать на производимые изыскания новых видов чувствительных элементов вибрационных плотномеров.

Вибратором может быть тонкий диск из магнитного материала, закрепленный в трех точках, лежащих на узловой окружности диска [11]. Колебания возбуждаются сердечником соленоида, установленного под центром диска. Резонансная частота определяется при плавном изменении частоты генератора, питающего соленоид, по максимуму сигнала индуктивного датчика, расположенного у края диска. Конструкция плотномера обеспечивает работу его при высоких температурах, в частности в ядерных реакторах.

Возможно выполнение чувствительного элемента в виде лопатки, зафиксированной на конце упругого стержня, перпендикулярно которому крест-накрест прикреплены четыре стержня, используемые для возбуждения и приема колебаний в двух взаимно перпендикулярных направлениях при помощи индуктивных катушек. Колебания могут возбуждаться на резонансных частотах посредством генераторов с обратной связью или на постоянной частоте с изменением амплитуды колебаний [11].

Датчик во взрывобезопасном исполнении представляет собой две вертикальные трубы, верхние концы которых включают в разрыв трубопровода, а нижние соединены друг с другом горизонтальным участком, в который вводится термодатчик схемы температурной компенсации [12]. Верхние и нижние концы труб закреплены, а в средней части они охвачены полем постоянного магнита. Одна из труб помещена в сердечник трансформатора и является как бы его вторичной обмоткой. Когда на первичную обмотку подан ток с выхода усилителя, через трубы тоже протекает переменный ток и они отклоняются в магнитном поле, начиная вибрировать. Частотный сигнал с выхода усилителя смешивается с частотным сигналом стандартного генератора, и частота биений преобразуется в напряжение постоянного тока  $0\text{--}10 \text{ мВ}$ . Пределы измерения  $0,5\text{--}1,5 \text{ г/см}^3$ , чувствительность  $0,05\text{--}0,20 \text{ г/см}^3$ , воспроизводимость  $\pm 1\%$  по всей шкале, нелинейность  $\pm 0,5\%$ , влияние температуры жидкости  $\pm 0,5\%$  на  $10 \text{ }^\circ\text{C}$ .

### *Весовые плотномеры*

Весовой плотномер для жидкостей состоит из подвижного патрубка, жестко связанного с уравнивающим рычагом элементами, соединенными с входным и выходным неподвижными патрубками дифференциально-трансформаторного датчика перемещения усилителя счетчика импульсов, дешифратора, цепи электромагнитов, показывающего и регистрирующего приборов [13]. Выходной конец входного неподвижного и выходной конец подвижного патрубков снабжены соплами, а уравнивающий рычаг – калиброванными грузами, замыкающими цепь электромагнитов. Выход генератора импульсов соединен со входом счетчика ключом, управляемая цепь которого через пороговый элемент связана с выходом фазочувствительного усилителя.

Плотномер для пульп выполнен в виде уравнивающего механизма, пневмоусилителя, входного и выходного участков трубопровода [13]. В разрыв последнего вставлены две прямые трубы, расположенные на одной линии и гибко соединенные между собой и с выходными частками трубопровода. Уравнивающий механизм содержит коромысло с грузом, цилиндр с поршнем, сопло с заслонкой и демпфер. Коромысло шарнирно связано с заслонкой и тягой, прикрепленной к трубам. Пневмоусилитель соединен с соплом, цилиндром и типовым пневморегистратором. Часть массы прямых труб и поршень измерительного цилиндра действует на одно плечо коромысла, на противоположное плечо которого оказывает действие груз. Выходное давление пневмоусилителя пропорционально плотности жидкости.

Аналогичный плотномер в другой модификации имеет шарнирно подведенную трубу, закрытую с одного конца; другой ее конец шарнирной опоры соединен с патрубком для подвода жидкости. Входной и выходной потоки образуются посредством разделительной лопасти, расположенной внутри трубы в осевой плоскости. Закрытый конец трубы подвешен при помощи упругих металлических пластин к короткому плечу рычага весов. Перемещающая по рычагу противовес, производят грубое взвешивание. Точное взвешивание выполняется пневматическим датчиком с клапаном, шток которого связан с закрытым концом трубы, и устройством для уравнивания трубы в месте, близком к шарнирной подвеске. Мерай плотности служит давление в датчике.

### *Поплавковые плотномеры*

Поплавковый плотномер состоит из проточной части с кюветой, наполненной

эталонной жидкостью, и чувствительной системы. Последняя представляет собой два утопленных поплавка одинаковой массы и объема, которые соединены с рычагом измерительной пневматической схемы, основанной на принципе силовой компенсации [14]. Погрешность не превышает  $\pm 2\%$ .

В двухпоплавковом плотномере жидкости, содержащем поплавки в виде цилиндрических секторов (укрепленных с помощью подшипников на оси вращения) и компенсационные грузы (установленные в торцевой части поплавков и смещенные относительно точек приложения выталкивающей силы), узел регистрации перемещения поплавков собран из двух постоянных магнитов (укрепленных на поплавках) и двух индукционных катушек с якорями из магнитного материала, расположенными на оси вращения [14].

В ряде конструкций поплавковых плотномеров используются магнитные поплавки. Фиксацию положения поплавка можно осуществить посредством ферритового стержня, закрепленного на поплавке и расположенного в поле катушки высокочастотного генератора. Подъемная сила поплавка уравнивается воздействием магнитного поля соленоида. При определенном положении поплавка сила тока в соленоиде служит мерой плотности жидкости.

Плотномер для жидкостей под давлением представляет собой вертикально расположенный герметичный корпус, состоящий из двух соосных цилиндров: более широкого верхнего и суженного нижнего [15]. В верхнем цилиндре размещен цилиндрический поплавок из немагнитной нержавеющей стали, в нижней – прикрепленный к нему стержень с сердечником дифференциального индуктивного датчика, сердечника соленоида и сменными грузами, определяющими диапазон измерения. Внутри верхней части имеются кольцеобразные выступы, поддерживающие вертикальное положение поплавка и горизонтальное направление вектора скорости потока благодаря чему на поплавков практически не действуют вертикальные силы. Вокруг нижней части корпуса расположены катушки индуктивного датчика соленоида. Сила тока в соленоиде является мерой плотности. Плотномер жидкостей, обеспечивающий повышенную точность (погрешность  $\pm 0,1\%$  в пределах  $0,65-1 \text{ г/см}^3$ ), характеризуется тем, что жидкость проходит через камеру, гарантирующую постоянное полное погружение поплавка и минимальное возмущающее действие движения жидкости на поплавок.

В настоящее время применяются поплавковые плотномеры с плавающим по-

плавком, представляющим собой ареометр постоянной массы, и с полностью погруженным поплавком, который является ареометром постоянного объема. Поплавковые плотномеры применяются для контроля плотности однородных довольно чистых капельных жидкостей.

Следует отметить группу приборов для измерения плотности жидкости, использующих принцип плавающего поплавка – денсиметры или ареометры постоянной массы. Денсиметры подразделяются на денсиметры общего назначения (для измерения плотности различных жидкостей, водных растворов кислот, щелочей, солей и т.д.), нефтденсиметры для измерения плотности нефтепродуктов, лактоденсиметры, денсиметры морской воды и аккумуляторные денсиметры для измерения плотности раствора электролита.

Ареометры постоянной массы по их метрологическому назначению делятся на рабочие, образцовые и эталонные [16]. В настоящее время имеется много разновидностей конструкций автоматических плотномеров с плавающим поплавком, отличающихся типом (механические, электрические, пневматические) и устройством (индуктивные, потенциометрические) преобразователей для дистанционной передачи показаний. Такие плотномеры можно применять при работе с агрессивными жидкостями при изготовлении его из стойких к коррозии материалов.

#### *Гидростатические плотномеры*

Гидростатический плотномер включает в себя датчик, выполненный в виде цилиндра с мембранами, расположенными в его верхней и нижней частях [17, 18]. Внутри датчика находятся дифференциальный трансформатор и два соленоида. Сердечники последних кинематически связаны с нижней мембраной. Изменение плотности жидкости обуславливает изменение перепада давления между мембранами и соответствующее перемещение нижней мембраны. Дифференциальный трансформатор преобразует перемещение в электрический сигнал, поступающий на усилитель и преобразуемый затем в соответствующее изменение тока компенсационного соленоида. Изменение усилия, создаваемое соленоидом, компенсирует возникшее изменение давления на нижнюю мембрану. Измеряемая плотность оценивается по току в компенсационном соленоиде.

#### *Ультразвуковые плотномеры*

Ультразвуковые плотномеры относятся к приборам, обеспечивающим бесконтакт-

ное измерение плотности любых жидкостей. Показания прибора не зависят ни от свойств, ни от состава жидкости. Приборы характеризуются высокой чувствительностью и безынерционностью.

Ультразвуковой плотномер для жидкостей основан на измерении кинетического импеданса преобразователя, помещенного в жидкость [19, 20]. Изменения импеданса при небольших изменениях плотности носят линейный характер. Для измерения импеданса служит дифференциальный измерительный мост, одно плечо которого образовано магнитострикционным преобразователем, являющимся измерительным элементом, скомпенсированным емкостью. В другое плечо моста включен переменный резистор. Сигнал с выходного трансформатора моста через полосовой фильтр поступает на вход транзисторного милливольтметра. Излучающая поверхность преобразователя погружена в измеряемую жидкость.

Постоянство заданной частоты и уровня сигнала, питающего мост, обеспечивается акустической обратной связью. С этой целью на тыльной стороне преобразователя прикреплен датчик из титаната бария, сигнал с которого поступает на резонансный усилитель – ограничитель напряжения, питающий мост. С помощью переменного резистора устанавливается начало шкалы, а коэффициент усиления милливольтметра определяет пределы измерения. Диапазон измерения 1,3–1,7 г/см<sup>3</sup>, погрешность не более ±0,005 г/см<sup>3</sup>. Путем отказа от измерения скорости звука в среде достигнуто значительное упрощение электронной и акустической схем прибора [21].

Фирма Ronald Trist Controls (Великобритания) выпускает ультразвуковой плотномер для измерения плотности шлама при осаждении сточных вод. Пьезоэлектрический преобразователь, акустически контактирующий с измеряемой средой, возбуждают на резонансной частоте и получают выходной сигнал, являющийся функцией акустического сопротивления, а следовательно, и мерой плотности [22].

#### *Силовые плотномеры*

Силовой датчик плотности жидкости представляет собой тонкий диск, установленный в трубопроводе с контролируемым потоком. Плоскость диска параллельна направлению потока. Диск в центре привинчен к торцу тонкого стержня, расположенного перпендикулярно потоку и через боковой патрубок выходящего наружу, на преобразователь, присоединяемый к патрубку на фланце. Преобразователь отделен

мембраной, сквозь которую проходит стержень. Полость преобразователя вплоть до мембраны заполнена рабочей жидкостью, компенсирующей влияние статического давления.

Датчик воспринимает статическое усилие, зависящее от давления и плотности, и динамическое усилие, определяемое скоростью потока и твердыми включениями. Для повышения точности измерений доля второго усилия сведена к минимуму, благодаря малой площади лобового сечения датчика, поэтому изменения скорости потока почти не влияют на результат измерения. В то же время гидростатическое давление, пропорциональное плотности, воспринимается всей поверхностью датчика, т.е. зависит в основном от площади диска, но так как последняя достаточно велика, то даже для малых плотностей выходной сигнал тоже достаточно велик. Путем насаживания на тот же стержень с некоторым интервалом двух и более параллельных потоку дисков можно во много раз увеличить чувствительность датчика. Дисковая форма датчика обеспечивает простоту и точность его крепления центральным винтом, а также удобство замены.

#### *Вихревые плотномеры*

Датчик вихревого плотномера жидкостей имеет форму вертикально установленного прямоугольного параллелепипеда. Внутри датчик разделен вертикальными герметичными стенками и симметрично расположенными полуцилиндрами с горизонтальной продольной осью на три камеры: две внешние и внутреннюю. Стенки полуцилиндров пористые. Две жидкости различной плотности поступают во внешние камеры через штуцеры, перпендикулярные оси, проходят через стенки полуцилиндров во внутреннюю камеру, смешиваются в ней и выходят через осевой штуцер. Ввиду различия плотностей под действием силы тяжести образуется вихрь; угол наклона вихря, зависящий от геометрических размеров датчика, расхода и плотностей жидкостей, измеряется чувствительным элементом обтекаемой формы в виде крыла. При известной плотности жидкости выходной сигнал является мерой плотности другой жидкости. Чувствительность прибора ограничена шумами электронной измерительной схемы и составляет (по плотности) несколько миллионов долей грамма на кубический сантиметр.

#### *Радиоактивные плотномеры*

Радиоактивный метод измерения относится к бесконтактным методам измерения,

так как чувствительный элемент прибора не вводится внутрь измеряемой среды. В связи с этим радиоактивные плотномеры целесообразно применять в тех случаях, когда измеряется плотность агрессивных или весьма вязких жидкостей, пульп и жидкостей, находящихся под высоким давлением или имеющих высокую температуру, и когда другие приборы практически неприменимы [23].

Существенным недостатком таких приборов является зависимость показаний от природы жидкости, что требует индивидуальной градуировки прибора для определенной жидкости.

В радиоактивных плотномерах, использующих источник с гамма-излучением, измерение плотности измеряемой среды возможно по поглощению излучения измеряемой средой. Определяется изменение интенсивности прямого пучка гамма-лучей после прохождения через исследуемую жидкость [24]. Радиоактивный источник и приемник излучения располагаются так, что прямой пучок гамма-лучей, пройдя через стенки трубопровода и исследуемую среду, попадает в приемник излучения или по рассеянию излучения исследуемой средой. Источник и приемник излучения размещают по одну сторону трубопровода и экранируют так, что в приемник поступают лишь те гамма-лучи, которые претерпели рассеяние в жидкости; прямой пучок гамма-лучей улавливается свинцовым экраном [25].

В настоящее время в промышленных приборах используется первый способ, т.е. измерение падения интенсивности прямого пучка гамма-излучения. В качестве источника последнего применяют радиокобальт (кобальт-60) и радиоцезий (цезий-137).

Гамма-лучи от радиоактивного источника проходят через контролируемую среду и воспринимаются приемником – сцинтилляционным счетчиком. Одновременно с этим от второго источника (контролируемого) гамма-лучи попадают на счетчик, минуя контролируемую среду. Усиленные сигналы счетчиков сравниваются между собой, и по их разности определяется степень поглощения гамма-лучей и, соответственно, плотность контролируемой среды [26, 27].

Величина измерительного диапазона может быть выбрана в пределах 0,3–2,5 г/см<sup>3</sup>; точность  $\pm 2\%$  от диапазона измерения; быстродействие не превышает 1,5 мин.

#### **Выводы**

В распоряжении разработчиков имеется широкая номенклатура промышленных плотномеров, позволяющих успешно решать, пусть и не всегда на желаемом или требуемом уровне, значительное число воз-

никающих задач. Тем не менее массовому промышленному применению плотномеров препятствуют их недостатки, которые заключаются в особенностях метрологических характеристик, сложности монтажа и обслуживания, больших габаритах, недостаточной надежности и высокой стоимости. Сложно выделить хотя бы один серийно выпускаемый плотномер, способный обеспечить высокую точность измерений при успешной эксплуатации в промышленных условиях.

Достаточно высокие требования, предъявляемые к плотномерам, ставят перед исследователями задачи по разработке новых и совершенствованию существующих методов и средств измерения плотности. Однако существующие образцы плотномеров или сложны в обслуживании и эксплуатации, или имеют высокую стоимость, в особенности образцы зарубежного производства. Поэтому задача разработки новых методов и средств измерения плотности остается достаточно актуальной.

#### Список литературы

1. Авдеева Л.Г., Хилиязев Р.Г., Шадрин А.В. Применение инновационных технологий в промышленной безопасности // Экспертиза промышленной безопасности и диагностика опасных производственных объектов. 2015. № 4. С. 10–13.
2. Мубаракшин М.Р., Сладовский А.Г., Фишман И.И. Новые нормативные документы по приведению плотности нефти и нефтепродуктов по температуре и давлению // Мир измерений. 2015. № 2. С. 18–19.
3. Ю. П. Жуков. Вибрационные плотномеры. М.: Энергоатомиздат, 1991. 141 с.
4. Костин В.И. Сравнительная оценка интенсивности вибрации с переменной во времени амплитудой эквивалентным значениям виброскорости гармонических колебаний // Проблемы прочности. 1974. № 9. С. 103–109.
5. А.с. 360591 СССР, МКИ G 01 N 9/32. Проточный вибрационный плотномер / В.И. Рукавишников, В.И. Младенцев, А.Г. Вуколов, Н.Н. Федосеев. Открытия. Изобретения. 1972. № 36.
6. Catherall R. Improvements in apparatus for determining the density of fluid // Патент Англии № 143216.1976.
7. Miller C.E. Densitometer // Патент США № 3878710.1973.
8. Богущ М.В., Зацеркляный О.В. Вибрационные плотномеры для вязких жидкостей // Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности. 2013. № 3. С. 36–39.
9. Васильев С.И., Лапушова Л.А. Датчики систем автоматизации технологических процессов бурения нефтяных и газовых скважин. М.: Издательский дом Академии Естествознания, 2016. 138 с.
10. Калининченко А.В., Уваров Н.В., Дойников В.В. Справочник инженера по контрольно-измерительным приборам и автоматике. М.: Инфра-Инженерия, 2017. 564 с.
11. Иориш Ю.И. Виброметрия. Измерение вибрации и ударов. Общая теория. Методы и приборы. М.: Государственное научно-техническое издательство машиностроительной литературы, 1963. 773 с.
12. Старикова Г.В., Хайруллина Л.Б. Пожаровзрывозащита. Тюмень: Тюменский индустриальный университет, 2017. 130 с.
13. Федюкин В.К. Квалиметрия. Измерение качества промышленной продукции. М.: Кнорус, 2017. 316 с.
14. Латышенко К.П. Технические измерения и приборы. М.: Юрайт, 2017. 259 с.
15. Еромолаев А.Н., Мельничук О.В. Современные средства измерения плотности жидких дисперсных сред // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2017. № 4. С. 92–97.
16. ГОСТ ISO 3675–2014 Нефть сырая и нефтепродукты жидкие. Лабораторный метод определения плотности с использованием ареометра. М.: Стандартинформ, 2014. 12 с.
17. Билинский И.И., Огородник К.В., Яремисена Н.А. Анализ методов и средств измерения плотности нефтепродуктов // Научные труды Винницкого национального технического университета. 2016. № 2. С. 10–23.
18. Немченко В.И., Епифанова Г.Н., Панкратова А.Г. Проектирование установки датчиков и средств автоматизации на технологическом оборудовании. Самара: Самарский государственный технический университет, 2017. 58 с.
19. Крылов А.О. Коррекции по плотности ультразвуковых измерителях расхода. Самара: Самарский государственный технический университет, 2012. 156 с.
20. Chen Y., Huang Y., Chen X. Acoustic propagation in viscous fluid with uniform flow and a novel design methodology for ultrasonic flow meter. Ultrasonics. 2013. No. 53 (2). P. 595–606.
21. Han J., Liu H., Zhou Y., Zhang R., Li C. Studies on the transducers of clamp-on transit-time ultrasonic flow meter. Information Science and Technology (ICIST) 4<sup>th</sup> IEEE. 2014. P. 180–183.
22. Mahadeva D.V., Baker R.C., Woodhouse J. Further studies of the accuracy of clamp-on transit-time ultrasonic flowmeters for liquids. Instrum. Meas. IEEE Trans. 2009. No. 58 (5). P. 1602–1609.
23. Чудаков В.А., Аншаков О.М. Радиоизотопное измерение плотности легких сред. Минск: БГУ, 2011. 141 с.
24. Khabaz R., Yaghobi F. Design and employment of a non-intrusive  $\gamma$ -ray densitometer for salt solutions. Radiat. Phys. Chem. 2015. No. 108. P. 18–23.
25. Khorsandi M., Fegghi S.A.H. Design and construction of a prototype gamma-ray densitometer for petroleum products monitoring applications. Measurement. 2011. No. 44 (9). P. 1512–1515.
26. Haugh M.J., Charest M.R., Ross P.W. Calibration of X-ray imaging devices for accurate intensity measurement. Powder Diffr. 2012. No. 27 (2). P. 79–86.
27. Гашенко Ю.В., Сорокина Л.В., Яговкин Г.Н. Методологические основы обеспечения безопасности производства // Академический вестник ЕЛПИТ. 2018. № 2. С. 23–28.