

В.Ю. Невиницын, А.Н. Лабутин

**СОВРЕМЕННЫЕ ПРИБОРЫ ИЗМЕРЕНИЯ
ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН.
ИЗМЕРЕНИЕ УРОВНЯ И РАСХОДА**

Учебное пособие

Иваново

2014

Министерство образования и науки Российской Федерации
Ивановский государственный химико-технологический университет

В.Ю. Невиницын, А.Н. Лабутин

**СОВРЕМЕННЫЕ ПРИБОРЫ ИЗМЕРЕНИЯ
ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН.
ИЗМЕРЕНИЕ УРОВНЯ И РАСХОДА**

Учебное пособие

Иваново

2014

УДК 681.12

Невиницын, В.Ю.

Современные приборы измерения теплоэнергетических величин. Измерение уровня и расхода: учеб. пособие / В.Ю. Невиницын, А.Н. Лабутин; Иван. гос. хим.-технол. ун-т. – Иваново, 2014. – 84 с.

В учебном пособии рассматриваются современные средства измерения уровня жидких и сыпучих веществ, а также средства измерения расхода жидкостей и газов. Изложены основные теоретические положения методов измерения уровня и расхода, физические явления и принципы измерений, положенные в основу работы того или иного измерительного прибора, приведены принципиальные схемы измерительных преобразователей. Рассматриваются области применения средств измерения, их характеристики и особенности.

Предназначено для студентов, изучающих дисциплину «Приборы и системы автоматизации» по направлениям подготовки бакалавров: «Управление в технических системах» и «Автоматизация технологических процессов и производств» очной и заочной форм обучения.

Печатается по решению редакционно-издательского совета Ивановского государственного химико-технологического университета.

Рецензенты:

кафедра автоматизации технологических процессов Ивановского государственного энергетического университета; доктор технических наук С.В. Федосов (Ивановский государственный политехнический университет).

© Невиницын В.Ю., Лабутин А.Н.,
© ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный
химико-технологический университет», 2014

Введение

В настоящее время измерительные приборы используются во многих областях деятельности человека. Прежде всего, широкое применение измерительная техника нашла в различных отраслях промышленности (нефтеперерабатывающая, химическая, пищевая и др.). Она используется при разработке, создании и эксплуатации многих технических объектов и систем.

Контроль многочисленных технологических параметров является, в первую очередь, задачей измерительной техники. Современные автоматизированные промышленные производства как правило функционируют только при сравнительно больших затратах на проведение контроля. При этом высокое качество продукции может быть достигнуто только там, где измерительная техника составляет неотъемлемую часть процесса производства. Кроме того, обеспечение высокого качества продукции предъявляет все большие требования к эффективности самой измерительной техники. Требования к качеству, точности, надежности и быстродействию средств измерения постоянно возрастают.

Измерения технически осуществляются при помощи измерительных преобразователей, использующих те или иные физические принципы. Для этого на объект измерения устанавливается датчик, который состоит из одного или нескольких измерительных преобразователей. Под датчиком подразумевают устройство, воспринимающее измеряемый параметр (давление, температура, расход, уровень и т.д.) и вырабатывающее соответствующий выходной сигнал (например, электрический), удобный для передачи, преобразования, хранения и регистрации информации о состоянии объекта.

Современный уровень развития энергетических и других промышленных установок характеризуется интенсификацией технологических процессов. Современное производство, состоящее из множества аппаратов различного назначения, характеризуется большим количеством технологических величин, подлежащих измерению. При этом надежность средств измерений и информационно-управляющих систем во многих случаях определяет надежность производства в целом. Без знания достоверных значений параметров технологического объекта нельзя управлять процессом или агрегатом. Таким образом, применение точных и надежных приборов позволяет снизить производственные издержки, обеспечить нужное качество управления рабочими процессами на предприятии.

За последние годы в измерительной технике благодаря достижениям микроэлектроники произошли значительные качественные изменения. Средства измерений стали включать в себя микропроцессоры, которые обеспечивают автоматическое управление процессом измерений и обработку данных, т.е. придают этим средствам интеллектуальные свойства. В микропроцессорных (интеллектуальных) средствах измерения коренным образом меняются функциональные возможности по обработке, преобразованию и методам представления результатов измерений. Эти приборы служат основой для построения промышленных управляющих микропроцессорных систем и информационно-управляющих систем научных исследований.

В современной технике для решения задач автоматического контроля все шире применяют полупроводники, лазеры, микропроцессорные контроллеры. Фирмы-производители измерительной техники постоянно находятся в поиске новых технологий, направленных на улучшение характеристик приборов и повышение показателей их надежности.

За последние годы существенно расширилась номенклатура используемых в промышленности средств измерений. В связи с разработкой различных датчиков в интегральном микроэлектронном исполнении у измерительной техники появились новые приложения и перспективы развития. Нашла широкое применение и цифровая измерительная техника.

На сегодняшний день промышленные измерительные приборы различного назначения выпускаются большим количеством отечественных и зарубежных фирм-производителей: ЗАО НПП «Автоматика» (Россия), ЗАО «Альбатрос» (Россия), ЗАО «Взлет» (Россия), ЗАО «Днепр» (Россия), ЗАО ПГ «Метран» (Россия), «Krohne» (Германия), «Siemens» (Германия), «Endress+Hauser» (Германия), «Ametek drexelbrook» (США), «Greyline instruments» (США), «Dwyer instruments» (США), «Nivelco» (Венгрия), «Abb» (Швейцария), «Riels instruments» (Италия), «Comer» (Италия), «Sure instrument» (Китай) и др.

В учебном пособии рассматриваются современные средства измерения уровня жидких и сыпучих веществ, а также средства измерения расхода жидкостей и газов. Изложены основные теоретические положения методов измерения уровня и расхода, физические явления и принципы измерений, положенные в основу работы того или иного измерительного прибора, приведены принципиальные схемы измерительных преобразователей. Рассматриваются области применения средств измерения, их характеристики и особенности.

1. Измерение уровня жидких и сыпучих веществ

Измерение уровня жидкостей и сыпучих веществ в производственных аппаратах осуществляется с помощью специальных устройств, называемых уровнемерами (или датчиками уровня). Измерение уровня играет большое значение при автоматизации технологических процессов, поскольку поддержание уровня на заданном значении (в заданном диапазоне) связано с безопасностью работы оборудования. Приборы измерения уровня широко применяются в различных отраслях промышленности: химическая, нефтеперерабатывающая, пищевая, строительная, фармацевтическая и др.

Датчики уровня можно подразделить на две большие категории: приборы для непрерывного измерения уровня заполнения и приборы для сигнализации предельных значений (максимального, минимального) уровня в аппаратах. Приборы первой категории называют датчиками уровня (уровнемерами), а второй – сигнализаторами уровня. В зависимости от способа взаимодействия чувствительного элемента датчика с измеряемой средой уровнемеры подразделяются на контактные и бесконтактные.

К приборам измерения уровня могут предъявляться различные требования в зависимости от отрасли промышленности. Так, при выборе уровнемера необходимо учитывать такие физические и химические свойства материала, как температура, вязкость, электрическая проводимость, радиоактивность, химическая агрессивность и т.д. Кроме того, следует принимать во внимание рабочие условия в резервуаре или около него (давление, вакуум, нагревание, охлаждение), способ заполнения или опорожнения резервуара, наличие перемешивающего устройства (мешалки), огнеопасность и взрывоопасность [1].

В основу работы датчиков уровня могут быть положены различные физические принципы действия. Так, приборы для непрерывного измерения уровня по принципу действия можно подразделить на категории [1-18]:

1. Визуальные уровнемеры (указательные стекла). Основаны на принципе сообщающихся сосудов. Указательное стекло соединяется с сосудом нижним концом (для открытых сосудов) или обоими концами (для сосудов с избыточным давлением или разряжением). Наблюдая за положением уровня жидкости в стеклянной трубке, можно судить об изменении уровня в сосуде.

2. Поплавковые уровнемеры. Для измерения уровня в них используется поплавок, находящийся на поверхности жидкости. Перемещение поплавка является мерой уровня в емкости.

3. Буйковые уровнемеры. В них для измерения уровня используется тело переменного погружения (бук), которое частично погружается в жидкость. Уровнемеры основаны на использовании закона Архимеда.

4. Гидростатические уровнемеры. Основаны на измерении гидростатического давления, создаваемого столбом жидкости.

5. Емкостные уровнемеры. Работа таких уровнемеров основана на различии диэлектрической проницаемости жидкостей и воздуха. Датчик представляет собой электрический конденсатор, емкость которого изменяется в зависимости от уровня жидкости.

6. Радиоизотопные уровнемеры. Основаны на измерении степени поглощения гамма-излучения при прохождении через слой вещества.

7. Ультразвуковые уровнемеры. Основаны на принципе отражения звуковых волн от поверхности измеряемой среды. Время прохождения звуковой волны от источника до приемника является мерой уровня.

8. Радарные датчики уровня. Основаны на принципе отражения от контролируемой поверхности электромагнитных колебаний сверхвысокочастотного (микроволнового) диапазона.

9. Волноводные (рефлексные) уровнемеры. Принцип действия схож с принципом работы радарных уровнемеров, но микроволновые сигналы распространяются по специальному элементу – волноводу, погруженному в измеряемую среду.

10. Лазерные датчики уровня. Основаны на измерении времени пролета светового луча от датчика до препятствия и обратно.

11. Магнитострикционные датчики уровня. В основе принципа действия датчиков лежит эффект магнитострикции, заключающийся в изменении формы и размеров тела при его намагничивании.

12. Лотовые уровнемеры. Имеют в своем составе чувствительный груз, который опускается с помощью троса до поверхности контролируемой среды, а затем возвращается обратно. Расстояние, пройденное тросом, является мерой уровня.

13. Индуктивные уровнемеры. Принцип действия индуктивных уровнемеров основан на зависимости индуктивности одиночной катушки или взаим-

ной индуктивности двух катушек от глубины их погружения в электропроводную жидкость.

14. Термокондуктометрические уровнемеры. Принцип действия таких уровнемеров основан на различии условий теплообмена в жидкостях и газах. Термокондуктометрическими называются уровнемеры, элементом электрической цепи которых является нагреваемый током резистор (с большим температурным коэффициентом электросопротивления), электрическое сопротивление которого зависит от уровня жидкости.

15. Потенциометрические датчики уровня. Для определения уровня в них применяются линейные или поворотные потенциометры. Принцип действия основывается на зависимости уровня измеряемой жидкости от сопротивления чувствительного элемента (потенциометра).

К сигнализаторам уровня относятся приборы [1-18]:

1. Поплавковые сигнализаторы уровня. Чувствительным элементом в них является поплавок, зафиксированный на определенной высоте резервуара. В процессе работы поплавков отклоняется от горизонтального положения, что приводит к замыканию (размыканию) соответствующих контактов.

2. Магнитные сигнализаторы уровня. Чувствительным элементом сигнализатора является поплавок с магнитом, перемещающийся по специальному стержню (зонду), в котором расположено несколько герконовых реле. Перемещение поплавка за счет изменения уровня жидкости приводит к срабатыванию соответствующих герконовых реле.

3. Кондуктометрические (омические) сигнализаторы уровня. Принцип действия омических сигнализаторов основан на замыкании электрической цепи (образованной источником питания и электродами) через контролируемую среду.

4. Вибрационные сигнализаторы уровня. Принцип действия основан на различии резонансных колебаний чувствительного элемента (колебательной вилки) в газовой среде и в жидкости (сыпучем веществе).

5. Ротационные (лопастные, флажковые) сигнализаторы уровня. Чувствительным элементом в них служит лопатка, приводимая в движение электродвигателем. При повышении уровня сыпучего вещества лопатка останавливается, и датчик формирует соответствующий выходной сигнал.

6. Оптические сигнализаторы уровня. Принцип работы оптических датчиков основан на различном преломлении света при прохождении через призму в воздушной и жидкой средах.

7. Волоконно-оптические сигнализаторы уровня. Чувствительным элементом в них является оптическое волокно, показатель преломления которого меняется при погружении его в жидкость.

8. Ультразвуковые сигнализаторы уровня. Ультразвуковые сигнализаторы реагируют на перекрытие продуктом линии распространения ультразвуковых колебаний.

В настоящий момент насчитывается огромное количество фирм-производителей датчиков уровня для различных сфер применения. Датчики могут иметь различное конструктивное исполнение и степень защиты. К производителям уровнемеров относятся: «Ametek drexelbrook» (США), «Greyline instruments» (США), «Krohne» (Германия), «Nivelco» (Венгрия), «Dwyer instruments» (США), «Siemens» (Германия), «Endress+Hauser» (Германия), «Abb» (Швейцария), «Turck» (Германия), «Vega» (Германия), ЗАО «Альбатрос» (Россия), «Emerson process management» (США), «Yokogawa» (Япония), ПНП «Сигнур» (Россия), ЗАО «Лимако» (Россия), ООО «Контакт-1» (Россия), «Riels instruments» (Италия) и множество других фирм-производителей.

1.1. Поплавковые сигнализаторы уровня

Поплавковые датчики уровня являются самым простым и экономичным решением для контроля и сигнализации предельного уровня жидкостей. Вместе с тем, они являются надежным решением и, при правильном выборе, могут использоваться для сигнализации уровня разных жидких сред от агрессивных жидкостей до обычной воды.

Чувствительным элементом датчика служит поплавок, непосредственно контактирующий с контролируемой средой. В качестве поплавков применяют преимущественно полые шаровидные или цилиндрические тела, выполненные из полипропилена, устойчивого к воздействию неконцентрированных кислот и щелочей, большинства растворителей, спирта, бензина, воды, консистентных смазок и масел.

Перемещение поплавка через механические связи (напрямую) или систему дистанционной (электрической или пневматической) передачи сообщается из-

мерительной системе прибора. Принцип действия поплавкового сигнализатора уровня пояснен на рис. 1.

Процесс переключения выходных контактов прибора запускается качанием поплавка датчика, когда он отклоняется от горизонтального положения в любом направлении, как это представлено на рис. 1. В качестве коммутационных устройств могут применяться как жидкометаллические микровыключатели (детекторы положения или гравитационные датчики), так и различные концевые выключатели.

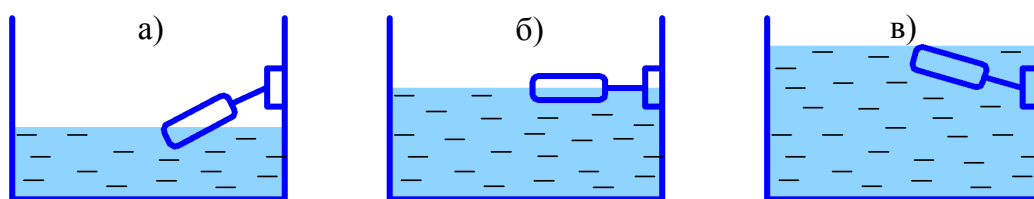


Рис. 1. Принцип действия поплавкового сигнализатора уровня: а – контакт разомкнут (минимальный уровень); б – контакт в произвольном положении (средний уровень); в – контакт замкнут (максимальный уровень)

Одним из самых старых, но до сих пор очень популярным детектором положения является ртутный переключатель (рис. 2), состоящий из непроводящей трубки (часто стеклянной), двух электрических контактов и капли ртути. Когда датчик наклонен относительно вектора гравитационной силы в одну сторону, капля ртути перемещается в противоположном от контактов направлении, переключатель размыкается. Изменение ориентации устройства приводит к тому, что ртуть скатывается в сторону контактов, что приводит к их замыканию [3].



Рис. 2. Гравитационный датчик: а – ртутный переключатель в разомкнутом состоянии; б – ртутный переключатель в замкнутом состоянии

В настоящее время в жидкометаллических микровыключателях вместо ртути используется жидкий металлический сплав галинстан, включающий галлий, индий и олово. Такой сплав сохраняет жидкое состояние при температурах выше $-19\text{ }^{\circ}\text{C}$.

На рис. 3 представлен пример комбинированного датчика уровня, позволяющего контролировать степень заполнения емкости по высоте (в трех точках). Прибор снабжен тремя поплавками и имеет возможность изменять уровни срабатывания выключателей. Для этого настраивается положение поплавков относительно несущей штанги посредством перемещения установочных фиксирующих колец.

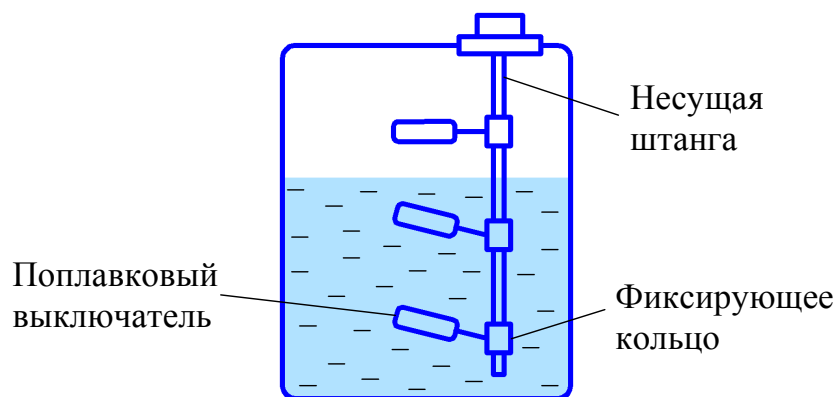


Рис. 3. Пример трехступенчатого поплавкового сигнализатора уровня

Преимущества поплавковых сигнализаторов уровня:

- простота;
- прочность;
- низкая стоимость;
- доступны разнообразные формы и размеры;
- показания уровня почти не зависят от изменений плотности жидкости;
- не требуется периодическая калибровка;
- минимум подвижных компонентов;
- пригодны для взрывоопасных и безопасных зон.

Недостатки поплавковых сигнализаторов уровня:

- непригодны для клейких жидкостей;
- проблемы с плещущимися жидкостями;
- плавучесть зависит от размеров поплавка;
- точка срабатывания зависит от изменения плотности вещества.

На рис. 4, 5 представлены промышленные поплавковые сигнализаторы уровня в различных вариантах конструктивного исполнения.

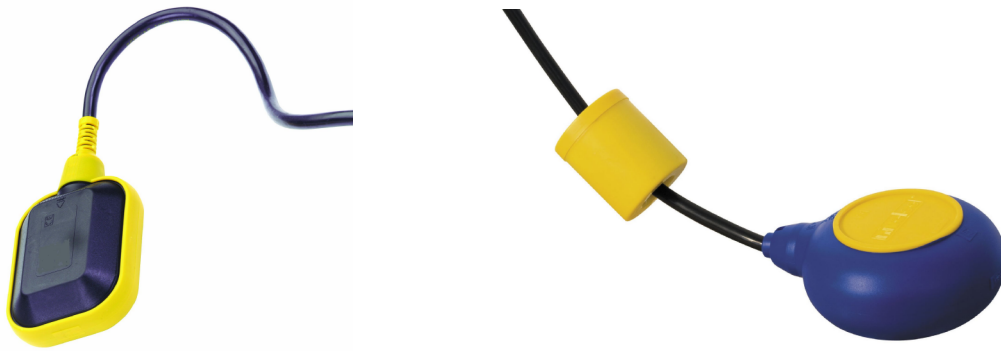


Рис. 4. Поплавковые сигнализаторы производства «Dwyer» и «Nivelco»

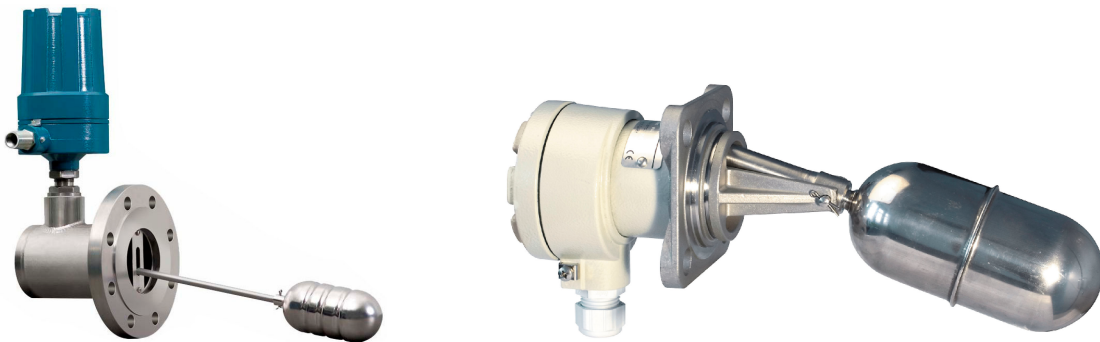


Рис. 5. Поплавковые сигнализаторы производства «Ddtop» и «Nivelco»

На рис. 6 представлен поплавковый датчик типа «broken finger» производства «Euroswitch». Он применяется для сигнализации уровня жидкости воды и водных растворов, а также различных химически агрессивных жидкостей. Датчик может применяться как на включение, так и на выключение нагрузки в зависимости от способа монтажа. Принцип действия прибора довольно прост. Когда магнитное поле постоянного магнита внутри «плавающего» поплавка действует на герконовое реле, его контакты замыкаются. Когда действие магнитного поля прекращается, контакты геркона размыкаются [12].

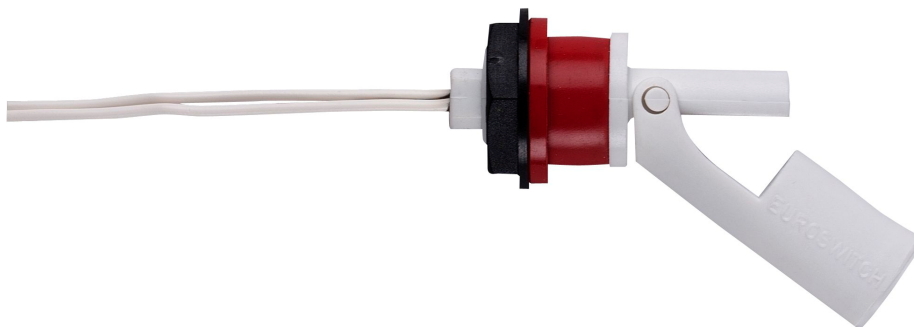


Рис. 6. Поплавковый сигнализатор типа «broken finger» производства «Euroswitch»

1.2. Магнитные сигнализаторы уровня

Магнитные (герконовые) сигнализаторы уровня (сигнализаторы уровня с плавающим магнитом и герконовыми реле) разработаны для использования в очищенных жидкостях, таких как вода, растворители, масла, различные виды топлива. Чувствительным элементом сигнализатора является поплавков с магнитом, перемещающийся по специальному стержню (зонду), в котором расположено несколько герконовых реле. Изменение уровня жидкости приводит к перемещению поплавка и срабатыванию соответствующих герконовых реле, формирующих выходной сигнал датчика.

Принципиальная схема магнитного сигнализатора уровня, поясняющая его принцип действия, представлена на рис. 7. Датчик состоит из чувствительного зонда с расположенными в нем герконовыми реле, поплавка с магнитом и электронного блока, в котором расположены клеммники [12].

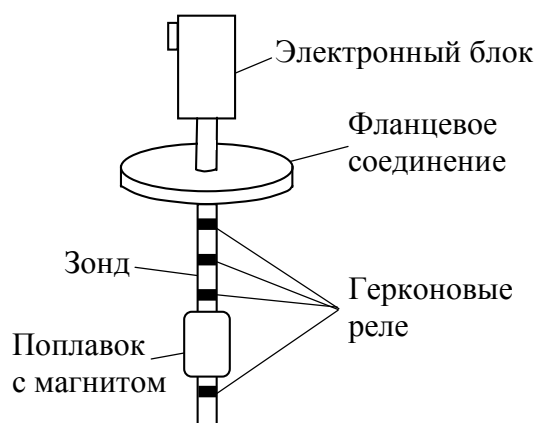


Рис. 7. Поплавковый герконовый датчик уровня жидкости

Одним из важных элементов конструкции сигнализатора уровня является герконовое реле. *Герконовое реле* – электромеханическое устройство, замыкающее контакты при поднесении к нему постоянного магнита. Принцип действия герконового реле пояснен на рис. 8.

Поплавок сигнализатора уровня, следя за уровнем жидкости в емкости, вызывает срабатывание герконовых переключателей, установленных в направляющей трубке (зонде). При прохождении через герконовые переключатели поплавок изменяет их состояние, и они блокируются (замыкаются). При изменении уровня жидкости поплавок снова проходит по зонду через герконовые реле и деблокирует их (размыкает). В сигнализаторе уровня данного типа могут

устанавливаться несколько герконовых выключателей, что дает возможность контролировать несколько положений уровня измеряемой среды в емкости.



Рис. 8. Принцип действия герконового реле

Сигнализатор уровня может иметь несколько поплавков с магнитами. Поочередное срабатывание герконовых реле при изменении уровня позволяет определять относительную степень заполненности резервуара. При срабатывании нижнего контакта определяется минимально допустимый уровень жидкости в резервуаре, при срабатывании верхнего – максимальный уровень.

Типичным применением поплавковых уровнемеров является измерение уровня топлива, масел, легких нефтепродуктов в относительно небольших емкостях и цистернах в процессе коммерческого учета. Метод явно неприменим только в вязких средах, образующих налипание, отложение осадка на поплавок, а также коррозию поплавка и других элементов конструкции [8].

В зависимости от вида контролируемой жидкости возможны различные исполнения зондов:

- пластиковые для агрессивных кислот и щелочей;
- из нержавеющей стали для воды, масел и т.п.;
- из нержавеющей стали во взрывозащищенном исполнении для горючих жидкостей, таких как топливо, растворители, спирты.

Достоинства магнитных сигнализаторов уровня [8]:

- простой принцип действия;
- возможность контроля нескольких положений уровня;
- метод может применяться в случае пенящихся жидкостей;
- несложный монтаж;
- несложное техническое обслуживание.

Недостатки магнитных сигнализаторов уровня [8]:

- плавучесть зависит от размера поплавка;
- точки переключения зависят от плотности среды;
- ограниченная длина зонда (около 6 м);
- минимальная плотность контролируемой среды равна $0,7 \text{ г/см}^3$;
- можно использовать только в очищенных жидкостях.

На рис. 9 представлены промышленные многоконтактные сигнализаторы уровня жидкости производства «Uteco» и «Standex meder electronics».

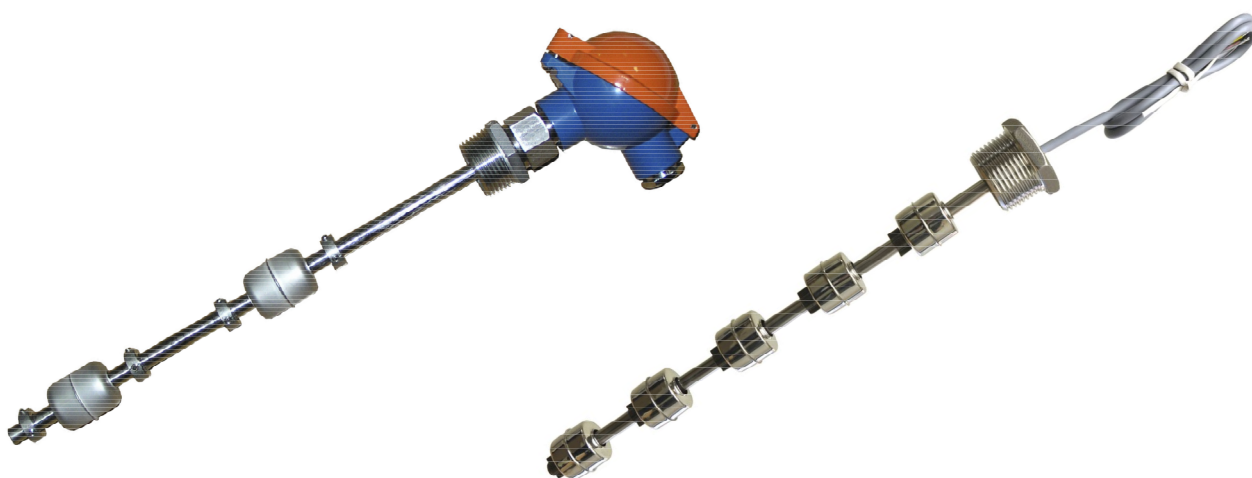


Рис. 9. Поплавковые многоконтактные сигнализаторы уровня производства «Uteco» и «Standex meder electronics»

1.3. Вибрационные сигнализаторы уровня

Вибрационные сигнализаторы (пьезоэлектрические вилочные датчики уровня) применяются для контроля уровня жидких и сыпучих веществ различной плотности и вязкости в широком диапазоне давлений и температур. Принцип действия вибрационных датчиков уровня основан на различии резонансных колебаний чувствительного элемента (камертонного резонатора) в газовой среде и в жидкости (сыпучем материале).

Принципиальная схема вибрационного сигнализатора уровня представлена на рис. 10. Чувствительным элементом датчика может быть как вибрационная вилка, так и вибрационный штырь. Конструкция приборов позволяет использовать их в емкостях, резервуарах и трубопроводах.

Принцип действия вибрационного сигнализатора уровня следующий. Датчик имеет пьезоэлектрический кристалл, под действием которого чувстви-

ный элемент (вилка) будет осуществлять колебания (вибрировать) с определенной частотой. Частота колебаний вилки обычно составляет от 1200 до 1300 Гц. Изменение частоты колебаний вилки непрерывно контролируется электронной схемой прибора. При погружении вилки в жидкость или сыпучий продукт частота колебаний вилки уменьшается, что приводит к переключению выходных контактов реле датчика. При снижении уровня жидкости или сыпучего вещества частота колебаний вилки увеличивается, что приводит к обратному переключению контактов. Сигнал об изменении состояния контактов подается в систему управления или на исполнительные механизмы (насосы, клапаны и т. п.) [8, 16].

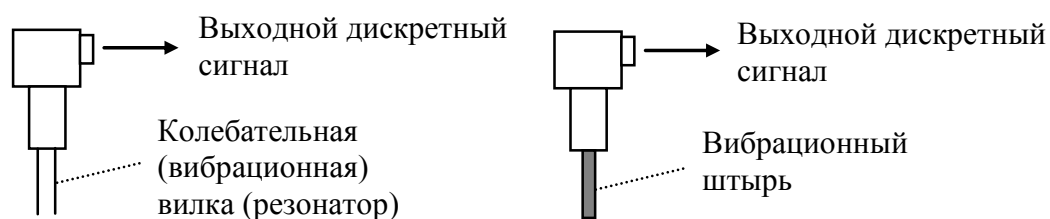


Рис. 10. Принципиальная схема вибрационного сигнализатора уровня

Собственная частота колебаний вилки (~ 1300 Гц) выбирается с таким расчетом, чтобы избежать помех от оборудования, которые могут вызвать ложное срабатывание. Кроме того, это дает возможность использовать вилку малой длины, что позволяет минимизировать объем, занимаемый устройством в сосуде или трубопроводе [16].

Достоинством вибрационных датчиков уровня является невосприимчивость к размерам частиц, плотности и влажности среды, к влиянию электрических и магнитных полей. Вибрационный датчик уровня сохраняет работоспособность даже при значительном налипании контролируемого материала на рабочую поверхность пластин резонатора. На показания вибрационных датчиков уровня не влияет наличие пены, пузырьков, взвешенных частиц в измеряемой среде.

Благодаря универсальной и простой измерительной системе, сигнализатор уровня практически не критичен к химическим и физическим свойствам жидкости. На работу вибрационных датчиков уровня практически не оказывает влияние изменение свойств жидкости (плотность, вязкость, химический состав), потоки жидкости, турбулентность, пузырьки газов, пена, вибрации, налипания или наличие твердых частиц [8, 16].

Вибрационные уровнемеры, как правило, компактны и могут работать без внешней обработки сигнала, имеют встроенный блок электроники, который обрабатывает сигнал уровня и преобразует его (в зависимости от типа встроенного генератора) в соответствующий выходной сигнал. При помощи этого выходного сигнала можно работать с подключенными дополнительными устройствами напрямую (например, системой предупреждающей сигнализации, контроллерами, насосами и т. д.) [8].

Области применения вибрационных сигнализаторов уровня:

- защита емкости от переполнения;
- сигнализация верхнего или нижнего уровня;
- защита насосов при установке на трубопровод (защита от «сухого хода»).

На рис. 11. приведены различные варианты установки вибрационных сигнализаторов уровня на объект в зависимости от решаемой задачи.

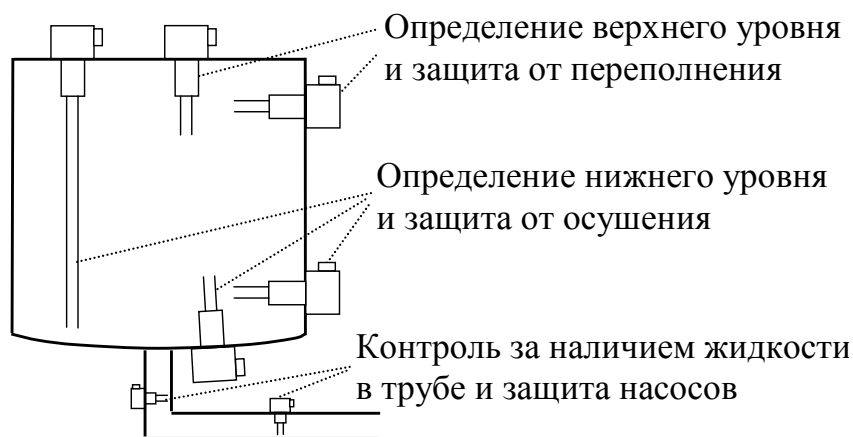


Рис. 11. Варианты расположения вибрационных сигнализаторов уровня

Преимущества вибрационных сигнализаторов уровня:

- не требуют калибровки и максимально просты в установке;
- характеризуются минимумом технического обслуживания благодаря отсутствию движущихся механических частей;
- имеют компактную конструкцию небольшого размера и веса;
- нечувствительны к турбулентности, образованию пены и внешней вибрации;
- допускают любую пространственную ориентацию;

- нечувствительны к большинству физических свойств измеряемого вещества (исключение – плотность);
- невосприимчивы к образованию конденсата.

Недостатки вибрационных сигнализаторов уровня:

- клейкие вещества и твердые частицы в жидкостях могут служить причиной отказов датчика;
- твердые частицы могут заклинивать колебательную вилку.

На рис. 12 представлен внешний вид промышленных вибрационных сигнализаторов уровня производства «Ema electronics ltd.» и «Emerson».

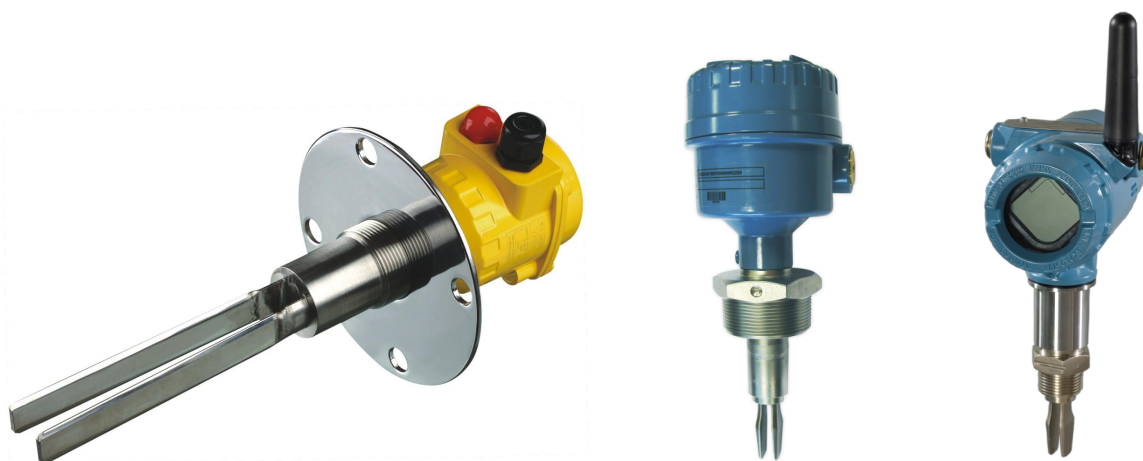


Рис. 12. Вибрационные сигнализаторы уровня производства «Ema electronics ltd.» и «Emerson»

1.4. Ротационные сигнализаторы уровня

Ротационные (флажковые, лопастные) датчики применяются в качестве сигнализаторов уровня сыпучих веществ в емкостях. Их можно использовать для сигнализации уровня заполнения, опустошения или сигнализации промежуточного уровня. Ротационный датчик имеет небольшую лопасть, вращаемую электромотором. Когда лопасть покрывается продуктом, она останавливается (блокируется), и происходит срабатывание выходного реле прибора. Как правило, ротационные датчики применяют для сигнализации уровня в емкостях с зерновыми, пищевыми, порошкообразными продуктами, сахаром, цементом, комбикормами и т.п.

Принципиальная схема сигнализатора представлена на рис. 13. Принцип действия ротационных сигнализаторов следующий. Чувствительный элемент (лопатка) роторного сигнализатора приводится во вращательное движение синхронным электродвигателем, который закреплен на шарнире внутри корпуса и

соединен с пружиной. Фиксация (блокировка) лопатки материалом рабочей среды приводит к появлению крутящего момента на корпусе синхронного двигателя, сжатию пружины и замыканию выходных контактов микропереключателя с одновременным размыканием цепи двигателя. При снижении уровня среды ниже контролируемого происходит освобождение лопатки датчика, и пружина возвращает контакты микропереключателя в разомкнутое положение и вновь замыкает цепь двигателя. Чувствительность переключения может регулироваться путем изменения натяжения пружины.

Ротационные сигнализаторы уровня (как и вибрационные сигнализаторы) могут быть установлены в различные точки объекта с контролируемой средой в зависимости от назначения. Так, для сигнализации наполнения датчик устанавливается сверху, а для сигнализации опустошения емкости – снизу. При необходимости возможен также промежуточный контроль уровня сыпучего вещества (при этом датчик располагают на заданной высоте).

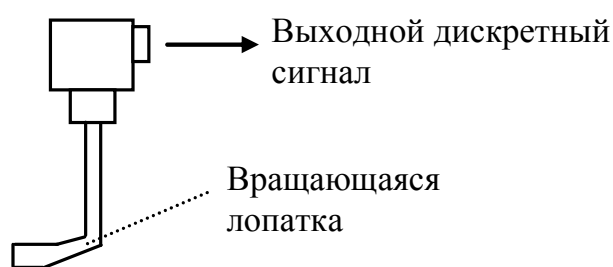


Рис. 13. Принципиальная схема ротационного сигнализатора уровня

Сигнализаторы уровня ротационного типа следует устанавливать в местах, где отсутствует прямое попадание продукта на лепесток (лопатку) во время заполнения бункера. Для защиты лепестка можно использовать навес (козырек). Желательно устанавливать прибор в месте с минимальной вибрацией.

Стандартные примеры применения ротационных сигнализаторов уровня:

- пластиковые порошки и гранулы;
- строительные материалы (цемент, сухие смеси, гипс);
- пищевые продукты (мука, сахар, крахмал);
- древесные сыпучие материалы (опилки);
- комбикорм;
- зерно.

На рис. 14 представлен внешний вид промышленных ротационных сигнализаторов уровня сыпучих веществ производства «Nivelco» и «Uwt gmbh level control».

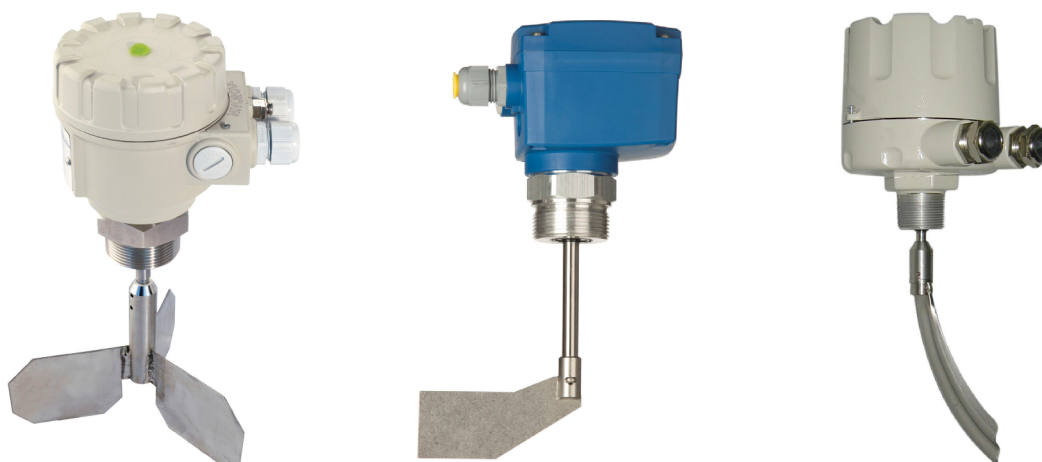


Рис. 14. Ротационные (флажковые) сигнализаторы уровня производства «Nivelco» и «Uwt gmbh level control»

Преимущества ротационных сигнализаторов уровня:

- простота конструкции;
- низкая стоимость;
- не требуют постоянного обслуживания;
- могут применяться в условиях высокой запыленности;
- могут применяться для крупных частиц.

Недостатки ротационных сигнализаторов уровня:

- непригодны для жидкостей или очень легких и очень плотных продуктов;
- подвержены образованию наростов, в редких случаях может потребоваться очистка лепестков датчика от налипания.

1.5. Оптические и волоконно-оптические сигнализаторы уровня

Оптические датчики применяются для сигнализации предельного уровня жидкости в резервуарах. Принцип работы оптических датчиков уровня жидкости основан на различном преломлении света при прохождении через призму (или полусферу) в воздушной и жидкой средах. Так, инфракрасный оптический луч полностью отражается на границе пластмассы и воздуха. Напротив, инфракрасный луч полностью проходит через границу пластмассы и жидкости. Оптический датчик уровня жидкости работает, измеряя различие индекса преломления между различными средами, который вызывает различную степень преломления и проникновения.

На рис. 15 представлена принципиальная схема датчика, поясняющая его принцип действия. Оптический сигнализатор уровня включает в себя корпус (пластиковый или металлический), призму (полусферу), выполненную из пластмассы, инфракрасный светодиод, фотоприемник и измерительную электронную схему, которая управляет замыканием и размыканием реле. В качестве фотоприемника может использоваться, например, фототранзистор.

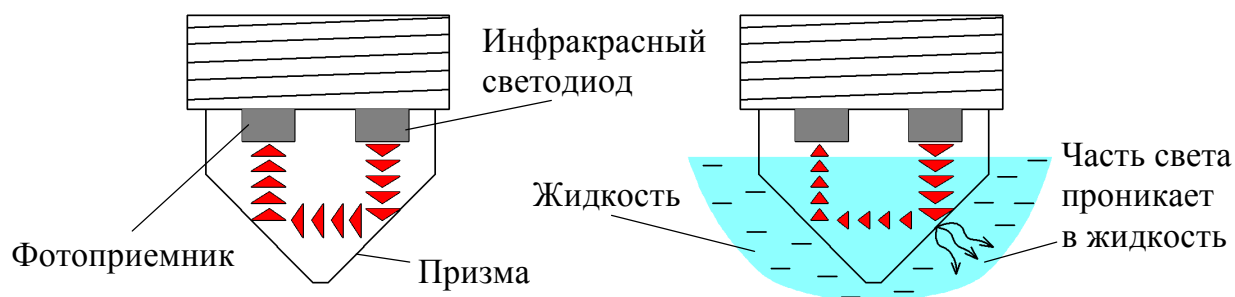


Рис. 15. Принцип работы оптического сигнализатора уровня

Когда чувствительная часть датчика не соприкасается с измеряемой жидкостью, инфракрасный луч, излучаемый светодиодом, полностью отражается от поверхности призмы и поступает на фотоприемник. Показания, снимаемые фотоприемником, поступают в электронную схему, которая управляет переключением реле. При отсутствии жидкости интенсивность излучения, принимаемая фотоприемником, будет максимальной, что приведет к коммутации реле. Как только датчик погружается в жидкость, на пограничном слое изменяется показатель преломления, и часть светового потока будет проходить через призму в жидкость (см. рис. 15). В этом случае на фотоприемник будет поступать меньшая часть светового луча (интенсивность излучения будет меньше), что приведет к снижению уровня сигнала на выходе фотоприемника и, следовательно, к срабатыванию реле.

Конструкция чувствительного элемента датчика может быть несколько другой. Например, возможен вариант, когда к призме подходят два отдельных оптоволоконных кабеля, к первому из которых подключен источник света, а ко второму – фотоприемник [7]. В остальном принцип действия датчика остается таким же.

Оптические датчики монтируются на стенке резервуара на необходимом уровне контроля жидкости. При размещении нескольких датчиков на различ-

ной высоте можно контролировать сразу несколько положений уровня в емкости.

Одним из преимуществ оптических датчиков является использование инфракрасного диапазона, который не чувствителен к прозрачности жидкости и ее однородности. Кроме того, в таких датчиках отсутствуют подвижные элементы, что повышает их надежность. Оптические датчики могут выпускаться для тяжелых условий работы, характеризующихся большими температурами, высокими давлениями и вибрациями. Датчики могут иметь различное конструктивное исполнение и степень защиты.

Производителями оптических сигнализаторов уровня жидкости являются: «Gems sensors & controls», «Dwyer», «Imb industrielle messtechnik», «The comus group», «Besta ltd.», «Finetek», «Ghm-messtechnik», «Honeywell sensing and control» и др. На рис. 16. представлен внешний вид сигнализаторов производства «Comus» и «Imb».

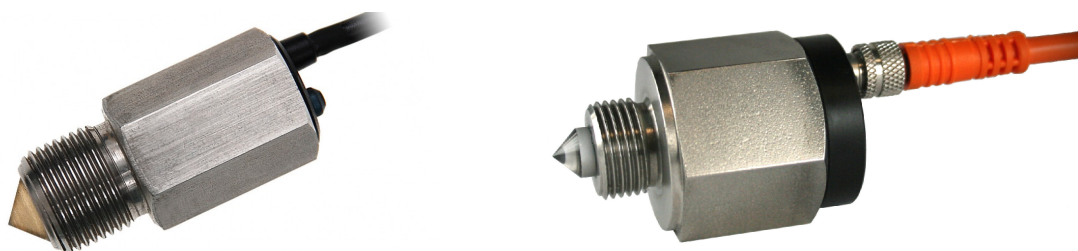


Рис. 16. Оптические сигнализаторы уровня жидкости производства «Comus» (США) и «Imb industrielle messtechnik» (Германия)

В волоконно-оптических уровнемерах используется оптическое волокно, которое погружается в жидкость (рис. 17). Световой поток, создаваемый источником излучения (например, светодиодом) поступает на вход оптоволоконного кабеля. При отсутствии жидкости в резервуаре весь световой поток будет возвращен за счет полного внутреннего отражения оптоволоконного кабеля, при этом интенсивность светового потока на выходе оптоволоконного кабеля будет такой же, как и у исходного потока. При увеличении уровня в емкости волокно будет погружаться в жидкость, что приведет к изменению показателя преломления. При этом часть света будет выходить в жидкость, что приведет к снижению интенсивности светового потока на выходе [5, 6]. На рис. 17 также представлен внешний вид блока обработки сигнала производства «Takenaka electronic» (модель F70A), работающего с оптоволоконным кабелем.

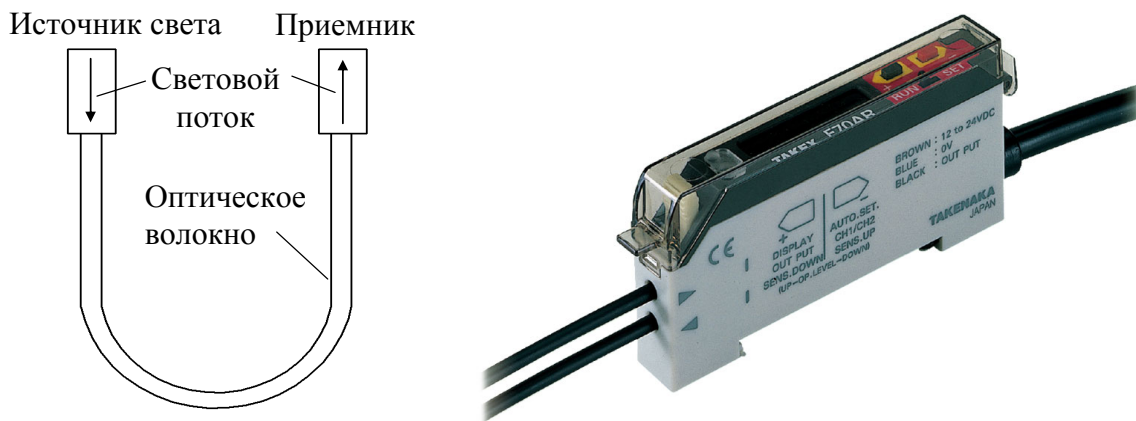


Рис. 17. Чувствительный элемент волоконно-оптического уровнемера и блок обработки сигнала F70A («Takenaka electronic»)

1.6. Магнестрикционные датчики уровня

Магнестрикционные датчики уровня могут применяться как для непрерывного измерения уровня жидкости, так и контроля границы раздела фаз различных жидкостей. Отличительной особенностью магнестрикционных датчиков является обеспечение очень высокой точности измерения уровня.

Работа датчиков уровня данного типа основывается на определении положения магнитного поплавка, скользящего вдоль волновода, по магнестрикционному принципу. Принципиальная схема магнестрикционного датчика для непрерывного измерения уровня жидкости представлена на рис. 18.

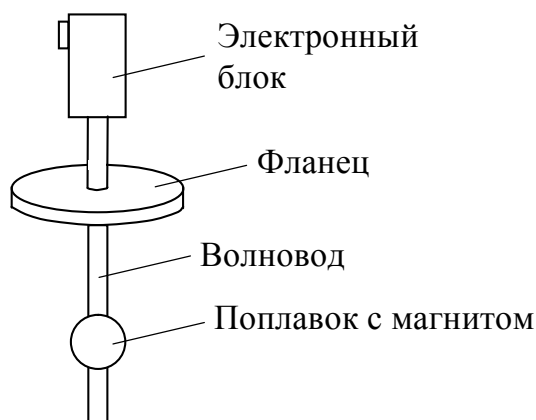


Рис. 18. Принципиальная схема магнестрикционного уровнемера

Для определения положения поплавка в данном измерительном приборе используется магнестрикционный преобразователь (детектор). Один из вариантов конструкции магнестрикционного преобразователя представлен на рис. 19 [3].

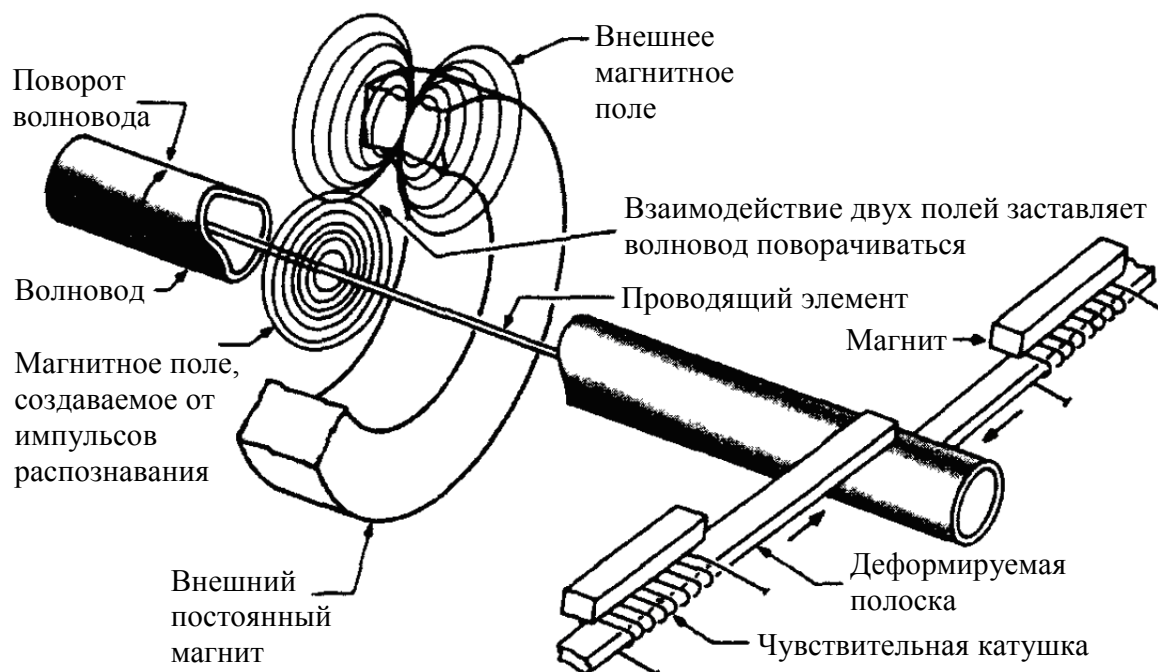


Рис. 19. Магнитострикционный преобразователь

Устройство и принцип действия магнитострикционного детектора следующие [3]. Магнитострикционный преобразователь состоит из двух основных частей: длинного волновода (до 7 м) и постоянного кольцевого магнита (см. рис. 19). Магнит может свободно перемещаться вдоль волновода, не касаясь его. Положение магнита над той или иной точкой волновода и является измеряемым сигналом, который датчик преобразует в электрический сигнал. Внутри волновода проходит проводник, который при подаче на него электрических импульсов создает магнитное поле вдоль всей его длины. Другое магнитное поле, образованное постоянным магнитом, существует только вблизи него. Поэтому два поля складываются только там, где находится постоянный магнит. Результирующее поле находится в виде векторной суммы напряженностей двух полей. Это поле создает крутящий момент, заставляющий волновод поворачиваться в месте расположения магнита. Это явление известно под названием *эффекта Вайдемана*.

Таким образом, электрические импульсы, подаваемые в коаксиальный проводник волновода, приводят к появлению механических импульсов кручения, распространяющихся вдоль волновода со скоростью звука, соответствующей его материалу. Момент прихода импульсов в электронный блок датчика необходимо точно определять. Один из способов детектирования импульсов заключается в преобразовании ультразвуковых импульсов в выходные электри-

ческие сигналы. Это можно выполнить при помощи пьезоэлектрических датчиков или при помощи датчика магнитного сопротивления (см. рис. 19), который состоит из двух катушек, расположенных рядом с небольшими постоянными магнитами. Катушки механически связаны с волноводом, поэтому и реагируют на импульсы, возникающие в нем, в такт с которыми они вырабатывают короткие электрические импульсы. Временная задержка между этими импульсами и соответствующими импульсами возбуждения, подаваемыми на проводник волновода, является точной мерой положения кольцевого магнита. Эта временная задержка при помощи соответствующей электронной схемы преобразуется в цифровой код.

Типичным применением поплавковых магнитострикционных уровнемеров является измерение уровня топлива, масел, легких нефтепродуктов в относительно небольших емкостях и цистернах в процессе коммерческого учета. Использование коррозионностойких материалов дает возможность применения их в любой отрасли промышленности: химической, нефтехимической, газовой, фармацевтической, энергетической, машиностроительной, в водоочистительных установках и в пищевой промышленности [13].

Благодаря отсутствию трущихся частей, магнитострикционные датчики совершенно не подвержены механическому износу, чем гарантируется очень надежная и стабильная их работа на протяжении очень длительного времени. Особенностью магнитострикционных датчиков уровня является то, что в качестве волновода, по которому перемещается поплавок, может быть использован гибкий трос. Тем самым измеряемая длина может составлять 12 и более метров, сохраняя при этом точность измерений [15].

Достоинства магнитострикционных датчиков уровня [3, 12, 13]:

- простой монтаж и ввод в эксплуатацию;
- высокая точность измерения;
- высокая разрешающая способность;
- надежная и стабильная работа;
- хорошая воспроизводимость и долговременная стабильность;
- может применяться для измерения границы раздела фаз;
- датчик может работать в агрессивных средах, при высоких давлениях и температурах, а также при сильной радиации;
- может применяться в случае пенящихся жидкостей;
- низкая температурная чувствительность;

- может применяться в высоких и узких резервуарах.

Метод неприменим только в средах, образующих налипание, отложение осадка на поплавков, а также коррозию поплавка и конструкции чувствительного элемента. [13].

На рис. 20 представлены промышленные магнитострикционные уровнемеры производства «Ametek drexelbrook», «Fafnir» и «Soway» в различном исполнении.



Рис. 20. Промышленные магнитострикционные уровнемеры
Производства «Ametek drexelbrook», «Fafnir» и «Soway»

1.7. Ультразвуковые датчики уровня

Ультразвуковые (акустические) уровнемеры представляют собой бесконтактные датчики, которые могут применяться как для измерения уровня жидкостей, так и сыпучих веществ. По принципу действия ультразвуковые уровнемеры можно подразделить на локационные, поглощения и резонансные [2].

В локационных уровнемерах используется эффект отражения ультразвуковых колебаний от границы раздела жидкость – газ (твердое вещество – газ). Текущее значение уровня определяется по времени прохождения ультразвуковых колебаний от источника до приемника после отражения их от поверхности раздела. В уровнемерах поглощения положение уровня определяется по ослаблению интенсивности ультразвука при прохождении через слои жидкости и газа. В резонансных уровнемерах измерение уровня производится посредством из-

мерения частоты собственных колебаний столба газа над уровнем жидкости, которая зависит от высоты уровня [2].

Наибольшее распространение получили локационные уровнемеры. Локация уровня может производиться либо через газовую среду над жидкостью, либо снизу через слой жидкости (рис. 21). Расположение источника и приемника ультразвуковых колебаний над поверхностью среды можно использовать для измерения уровня жидкостей и сыпучих веществ. Расположение источника и приемника снизу применяется только для измерения уровня жидкостей.

При расположении датчика уровня сверху (над измеряемой средой) имеет место погрешность, связанная с зависимостью скорости звука от давления и температуры газа, а также связанная с поглощением ультразвука газом, что требует большей мощности источника, чем при локации через жидкость. Однако на показания таких уровнемеров не оказывает влияние изменение характеристик жидкости, поэтому они могут быть использованы для измерения уровня жидкостей неоднородных, содержащих пузырьки газа или кристаллизующихся. Уровеньмеры с локацией через жидкость могут быть использованы для сред под высоким давлением, для них требуется небольшая мощность источника, однако они чувствительны к включениям в жидкость, например к пузырькам газа при вскипании. Поэтому эти уровнемеры применимы только для однородных жидкостей. Кроме того, они также чувствительны к изменению температуры и давления среды из-за зависимости от них скорости распространения ультразвука [2].

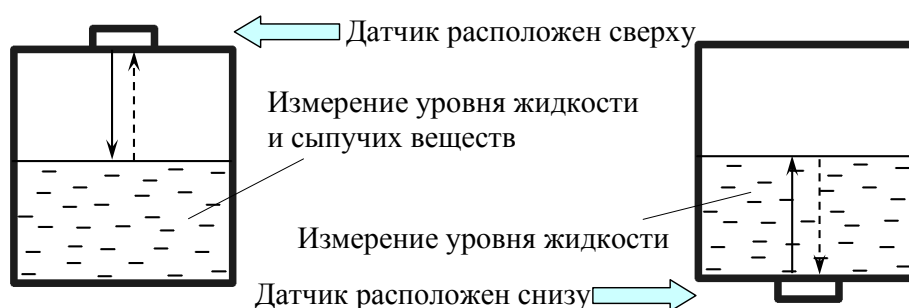


Рис. 21. Варианты расположения ультразвукового датчика уровня

Типовой ультразвуковой локационный уровнемер состоит из пьезоэлемента, генератора ультразвуковых импульсов, усилителя сигнала, схемы измерения времени и нормирующего преобразователя. Генератор формирует электрические сигналы, которые поступают на пьезоэлемент и преобразуются в ультразвуковые импульсы. Обычно частота звуковых колебаний составляет от 18 до

70 кГц. Пьезоэлемент в данном случае работает в качестве излучателя. Ультразвуковые волны после отражения от поверхности измеряемой среды возвращаются назад в пьезоэлемент, который работает уже как приемник. Пьезоэлемент преобразует отраженный ультразвуковой импульс в электрический сигнал, который усиливается усилителем. Схема измерения времени определяет время полета ультразвукового сигнала, которое будет пропорционально уровню в аппарате. Нормирующий преобразователь преобразует значение времени в унифицированный выходной сигнал.

При локации через слой жидкости время запаздывания отраженного сигнала относительно посланного определяется по формуле:

$$\tau = 2h/a,$$

где h – высота уровня жидкости; a – скорость распространения звука в жидкости.

При локации через газовую среду время распространения ультразвуковых колебаний определяется:

$$\tau = 2(H - h)/a,$$

где H – полная высота емкости; h – высота уровня жидкости; a – скорость распространения звука в газовой среде.

Преимуществом ультразвуковых датчиков уровня является отсутствие контакта с продуктом, поэтому на уровнемере не образуются отложения. Приборы очень компактны, имеют надежную конструкцию, не имеют подвижных частей и практически не нуждаются в обслуживании.

При выборе ультразвуковых уровнемеров следует руководствоваться тем, что максимальные диапазоны измерения приборов приводятся для нормальных условий и при работе с жидкостью без пены. Неровная поверхность сыпучих веществ, пыль, перепады температур, туман и т.п. сильно сокращают диапазон работы ультразвуковых датчиков, поэтому рекомендуется подбирать уровнемер с запасом по диапазону.

На рис. 22 представлен внешний вид ультразвуковых датчиков уровня Vegason 62 и Vegason 63 фирмы «Vega» для жидкостей и сыпучих веществ.

В настоящее время появились ультразвуковые уровнемеры, позволяющие не только определять объем материала в резервуаре, но и поверхность распределения материала. Производителями таких приборов являются «Apm automation solutions ltd» (модель 3DLevelScanner MV), «Magnetrol international» (мо-

дель Contour), «Binmaster» (модель BinMaster RL). Так, на рис. 23. представлен внешний вид 3D сканера уровня. Устройство снабжается специальным программным обеспечением, позволяющим представить текущее заполнение емкости сыпучим материалом в виде трехмерной поверхности.



Рис. 22. Внешний вид ультразвуковых уровнемеров для жидкостей и сыпучих веществ фирмы «Vega» (модели Vegason 62 и Vegason 63)

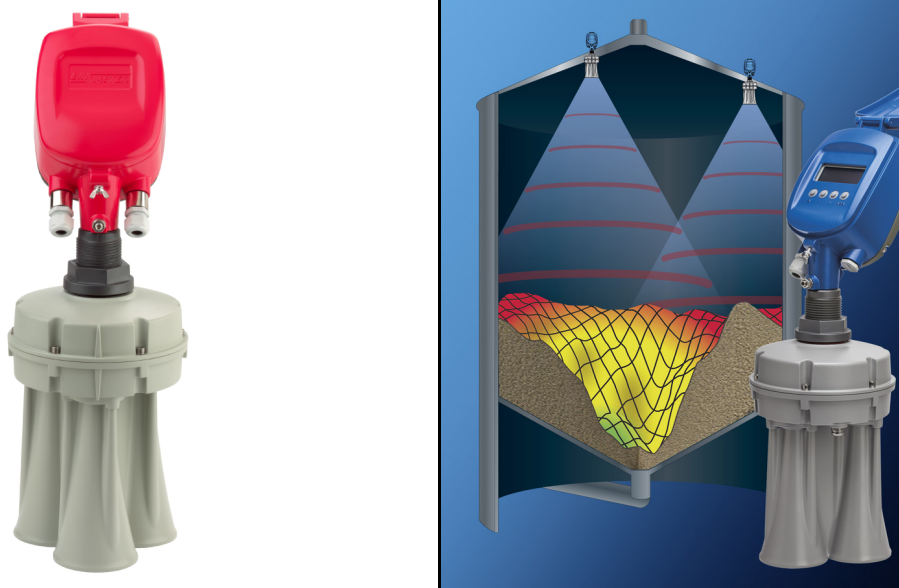


Рис. 23. Внешний вид ультразвукового уровнемера производства «Binmaster» с возможностью 3D-сканирования поверхности

1.8. Микроволновые радарные датчики уровня

Радарные уровнемеры для определения уровня измеряемой среды используют явление отражения электромагнитных колебаний от границы раздела сред (аналогично радарам). Микроволновые радарные уровнемеры – наиболее сложные и высокотехнологичные средства измерения уровня жидкостей и реже сы-

пучих веществ. Для определения расстояния до контролируемой среды в них используется сверхвысокочастотное (СВЧ) электромагнитное излучение (микроволновое излучение) [13, 14].

Радарные датчики уровня не имеют контакта с продуктом, что позволяет использовать их с агрессивными продуктами и в тяжелых условиях эксплуатации (высокое давление, высокие температуры, пары и газы над поверхностью). По сравнению с ультразвуковыми уровнемерами, радарные датчики способны обеспечить большую точность измерения, обладают меньшей зоной нечувствительности, способны работать при больших давлениях в резервуаре [13].

Радарные уровнемеры, как правило, используются для бесконтактного измерения уровня различных продуктов в резервуарах и емкостях различного типа и размера, не препятствующих распространению волн высокой частоты [14].

Микроволновые радарные уровнемеры подразделяются на приборы с *импульсным излучением* сигнала и приборы с *непрерывным частотно-модулированным излучением* сигнала (FMCW – frequency modulated continuous wave). Импульсные радарные датчики испускают кратковременные импульсы, и расстояние измеряется на основе времени их распространения и возврата. Приборы на основе технологии FMCW испускают постоянный линейно частотно модулированный сигнал. Разница между частотами прямого и отраженного сигналов, вызванная задержкой во времени, позволяет определить расстояние, а значит и уровень жидкости.

Принцип действия радарного уровнемера пояснен на рис. 24. Излученный СВЧ-сигнал отражается от поверхности контролируемой среды, принимается обратно и соответствующим образом обрабатывается. Результатом обработки сигнала является значение уровня измеряемой среды (H).

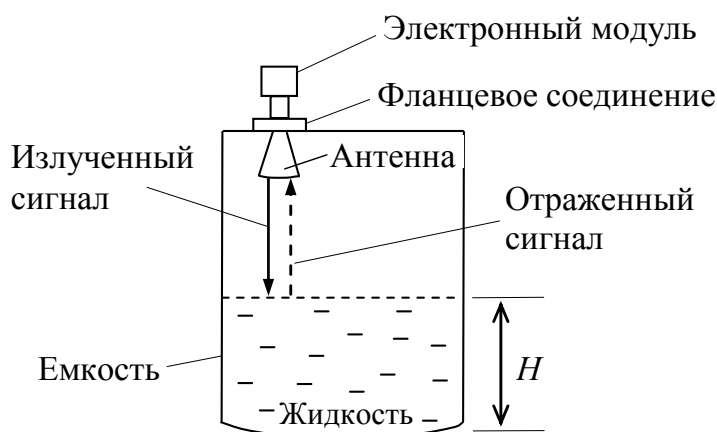


Рис. 24. Принцип действия микроволнового радарного уровнемера

Рабочая частота радарных уровнемеров независимо от их типа обычно варьируется от 5,8 до 26 ГГц (стандартная частота равна 10 ГГц). Чем выше частота сигнала, тем более узок луч и тем выше энергия излучения, а следовательно, сильнее отражение. Поэтому высокочастотные уровнемеры позволяют производить измерения уровня сред с низкой диэлектрической проницаемостью и, следовательно, слабой отражательной способностью. Они также удобны в емкостях, где присутствует различное оборудование, сокращающее свободную зону для работы радара. Вместе с тем, высокочастотные уровнемеры более чувствительны к таким явлениям, как запыленность, испарения, волнение поверхности рабочей среды, налипание частиц среды на поверхность антенны, вследствие более интенсивного рассеивания сигнала. В подобных условиях лучше работают уровнемеры с частотой от 5,8 до 10 ГГц [14].

В уровнемерах с технологией FMCW происходит постоянное непрерывное излучение частотно модулированного сигнала, линейно изменяющегося в диапазоне от f_{\min} до f_{\max} (см. рис. 25). Прием отраженного сигнала осуществляется с помощью той же антенны и также в непрерывном режиме. В результате на выходе получается смесь сигналов, которая анализируется с применением специального программного обеспечения для выделения и максимально точного определения частоты полезного эхо-сигнала. Для каждого момента времени (t_1 на рис. 25) разность частот прямого и обратного сигналов (Δf) прямопропорциональна расстоянию до контролируемой среды [14].

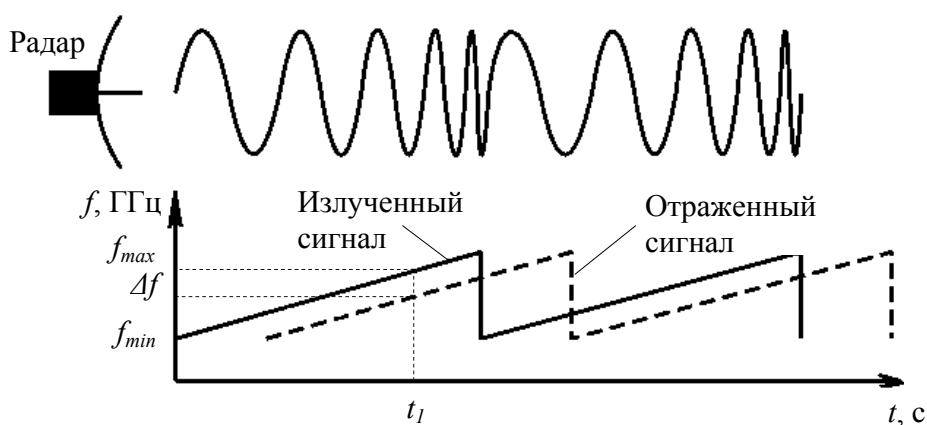


Рис. 25. Принцип действия технологии FMCW

Для метода FMCW характерны следующие недостатки [9]:

1. Сложность обеспечения линейности изменения частоты излучаемого сигнала и его температурной стабильности (поскольку уровнемеры, как прави-

ло, предназначены для эксплуатации в очень широком температурном диапазоне).

2. Идеальными для уровнемера FMCW являются условия, когда поверхность контролируемой среды имеет достаточно большую площадь, на ней отсутствуют какие-либо возмущения, а сам резервуар полностью свободен от каких-либо внутренних конструктивных элементов. Однако реальные условия существенно отличаются от идеальных и приносят дополнительные проблемы, связанные с образованием большого числа паразитных эхо-сигналов от элементов конструкции, неровностей поверхности (особенно при контроле сыпучих материалов) и т.п. (см. рис. 26).

3. Поскольку прием и передача сигнала осуществляются одновременно, то в результате на входе приемника уровнемера присутствует сложная смесь сигналов с очень большим разбросом по амплитуде. Для выделения частот эхо-сигналов применяются специальные алгоритмы, требующие значительных вычислительных ресурсов и относительно продолжительное время. Выделять полезный эхо-сигнал и игнорировать остальные позволяет специальное программное обеспечение, установленное на сервисном компьютере или встроенное в уровнемер.

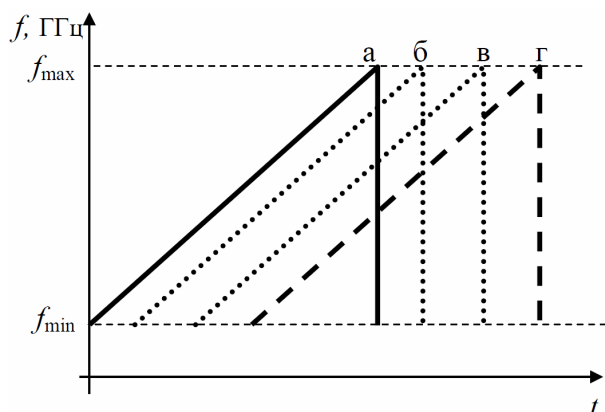


Рис. 26. Паразитные отражения при использовании технологии FMCW:
а – излученный сигнал; б, в – паразитные эхо-сигналы;
г – полезный отраженный сигнал

Импульсные микроволновые уровнемеры излучают сигнал в импульсном режиме, при этом прием отраженного сигнала происходит в промежутках между импульсами исходного излучения. Прибор вычисляет время прохождения прямого и обратного сигналов и определяет значение расстояния до контролируемой поверхности. Поскольку время прохождения сигналом дистанции в несколько метров составляет всего единицы наносекунд, то для обеспечения из-

мерения столь малых значений с требуемой точностью требуется применение специальных методов обработки сигнала. Для этого обычно используется преобразование СВЧ-сигнала в сигнал промежуточной частоты ультразвукового диапазона. После такого преобразования к обработке сигналов радарного уровнемера могут быть легко применимы методы и алгоритмы, используемые в ультразвуковых приборах контроля уровня [9, 14].

Радарные датчики уровня импульсного типа обладают рядом преимуществ перед приборами, использующими технологию FMCW. Во-первых, принимаемые эхо-сигналы вне зависимости от природы их источника разнесены во времени, что обеспечивает их более простое разделение. Во-вторых, среднее энергопотребление импульсных уровнемеров составляет единицы мкВт (пиковая мощность при излучении СВЧ-импульса составляет около 1 мВт), что позволяет использовать для их подключения двухпроводную схему с питанием от измерительной цепи со стандартным токовым сигналом 4-20 мА. В приборах, работающих по технологии FMCW, энергопотребление существенно выше из-за непрерывного характера излучения, а также постоянно выполняемой математической обработки эхо-сигнала. И в-третьих, в импульсных уровнемерах электроника для выполнения первичной обработки сигнала проще, а сама обработка выполняется исключительно аппаратными средствами. В результате, благодаря меньшему числу комплектующих, надежность прибора получается потенциально выше [9].

Важной характеристикой радарных уровнемеров, влияющей на формирование сигнала, является размер и тип антенны. Различают следующие типы антенн: рупорная (коническая), стержневая, трубчатая, параболическая, планарная. Чем больше размер антенны, тем более сильный и узконаправленный сигнал она излучает и, в то же время, тем лучше прием отраженного сигнала [14].

Наиболее универсальной является *рупорная антенна*. Она применяется, как правило, в больших емкостях, позволяет работать с широким спектром сред по диэлектрической проницаемости, применима в сложных условиях и обеспечивает диапазон измерения до 35–40 м (в условиях спокойной поверхности).

Стержневая антенна применяется в небольших емкостях с химически агрессивными средами или гигиеническими продуктами, а также в случае, когда доступ в емкость ограничен малыми размерами патрубка. Диапазон измерения составляет до 20 м. Поверхность стержневой антенны покрыта слоем защитной изоляции.

Трубчатая антенна представляет собой надстроенный удлиненный волновод. Она позволяет формировать наиболее сильный сигнал за счет снижения рассеивания и используется в особо сложных случаях при наличии сильного волнения поверхности среды или большого слоя густой пены либо для случая сред с низкой диэлектрической проницаемостью. Трубчатая антенна применима для небольшого диапазона измерения уровня.

Планарный и параболический типы антенн обеспечивают особо высокую точность (до ± 1 мм) и применяются в системах коммерческого учета.

На рис. 27 представлены различные конструкции антенн, применяемых в радарных уровнемерах.

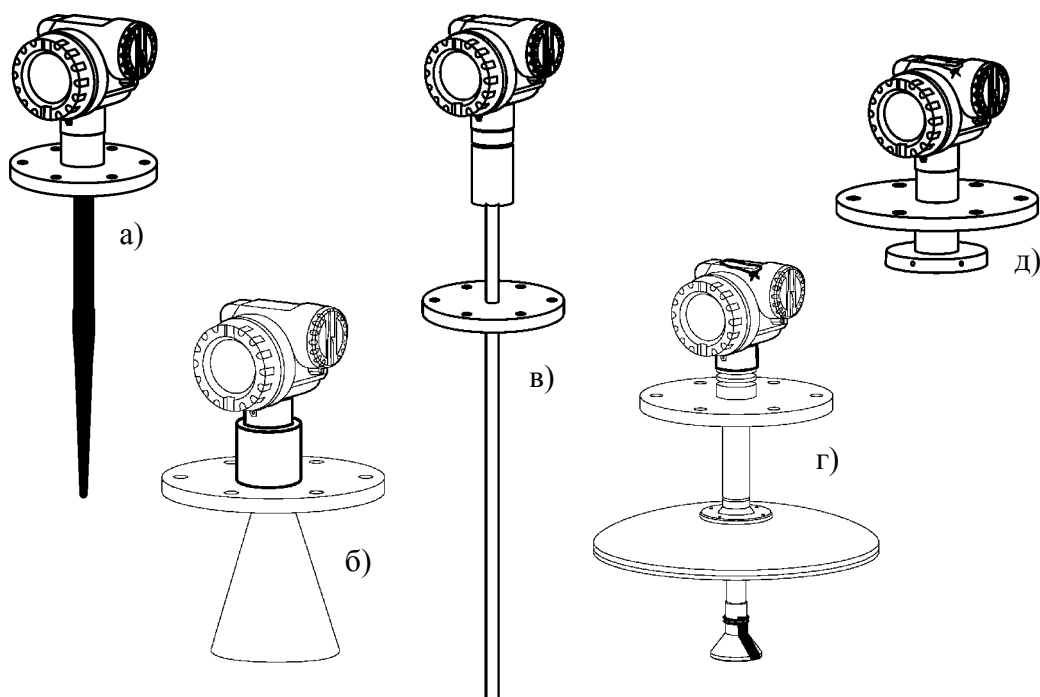


Рис. 27. Типы антенн радарных уровнемеров:

а – стержневая; б – рупорная; в – трубчатая; г – параболическая; д – планарная

Таким образом, радарные уровнемеры являются наиболее универсальными средствами измерения уровня. Не имея непосредственного контакта с контролируемой средой, они могут применяться для агрессивных, вязких, неоднородных жидких и сыпучих материалов. От ультразвуковых бесконтактных уровнемеров их отличает гораздо меньшая чувствительность к изменению температуры и давления в рабочей емкости, а также большая устойчивость к таким явлениям, как запыленность, испарения с контролируемой поверхности, пенообразование. Радарные уровнемеры обеспечивают высокую точность (до ± 1 мм),

что позволяет использовать их в системах коммерческого учета. Вместе с тем существенным лимитирующим фактором применения радарных уровнемеров остается относительно высокая стоимость данных приборов [14].

На рис. 28 представлены промышленные микроволновые радарные уровнемеры различных конструкций производства «Rosemount» и «Endress+Hauser».



Рис. 28. Промышленные микроволновые радарные уровнемеры различных конструкций производства «Rosemount» и «Endress+Hauser»

1.9. Волноводные датчики уровня

Волноводные (рефлексные) микроволновые уровнемеры, также как и радарные датчики, для определения уровня среды используют микроволновые импульсы, но распространяются они не в газовой среде, а по специальному зонду (волноводу), который погружается в измеряемую среду. В качестве зондов могут выступать: труба, стержень, трос, группа тросов, коаксиальный кабель. Излучение распространяется по наружной поверхности волновода, являющегося, по сути, проводником электромагнитных импульсов. Волноводные уровнемеры могут применяться для измерения уровня жидких и сыпучих сред, а также уровня границы раздела жидкостей.

Волноводные уровнемеры могут применяться в малых и узких резервуарах, поскольку радиоимпульсы направляются по зонду, а не свободно распространяются в пространстве резервуара (как у радарных). Рефлексные уровнемеры способны работать в жестких условиях: высокие температуры, высокое давление, сильное бурление жидкости, резервуары с работающей мешалкой, пары и газы над поверхностью жидкости, сильное запыление (например, угольная

пыль, цемент). Эта технология особенно хорошо подходит для определения границы между средами, так как отличается слабым затуханием сигнала и небольшой зависимостью от формы резервуара.

Принцип действия волноводных уровнемеров основан на *технологии рефлектометрии с временным разрешением* (TDR – time domain reflectometry) [16]. Микроволновые наносекундные радарные импульсы малой мощности направляются вниз по зонду, погруженному в технологическую среду (рис. 29). Когда радарный импульс достигает среды с другим коэффициентом диэлектрической проницаемости, часть энергии импульса отражается в обратном направлении. Разница во времени между моментом передачи радарного импульса и моментом приема эхо-сигнала пропорциональна расстоянию, согласно которому рассчитывается уровень жидкости или уровень границы раздела двух сред. Интенсивность отраженного эхо-сигнала зависит от диэлектрической проницаемости среды. Чем выше коэффициент диэлектрической проницаемости, тем выше интенсивность отраженного сигнала.

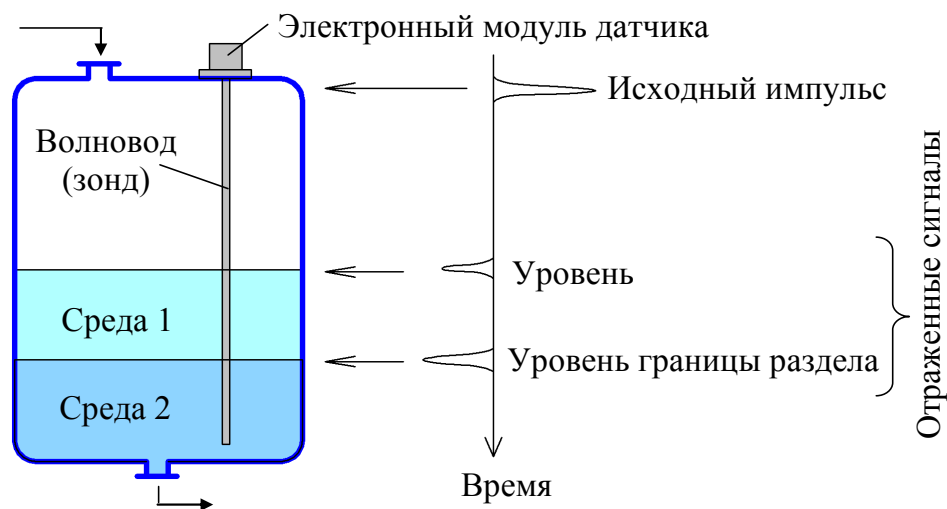


Рис. 29. Принцип действия волноводного уровнемера

Волноводная технология имеет ряд преимуществ по сравнению с другими методами измерений уровня, поскольку радарные импульсы практически невосприимчивы к составу среды, атмосфере резервуара, температуре и давлению. Поскольку радарные импульсы направляются по зонду, а не свободно распространяются в пространстве резервуара, то волноводная технология может с успехом применяться в малых и узких резервуарах, а также в резервуарах с узкими патрубками [16].

Волноводные уровнемеры могут снабжаться различными типами чувствительных зондов в зависимости от условий технологического процесса. Так, в микроволновых уровнемерах производства «Emerson rosemount» могут применяться следующие виды зондов: коаксиальный, двойной жесткий, одинарный жесткий, двойной гибкий и одинарный гибкий [16]. Выбор зонда обуславливается свойствами среды (плотность, вязкость, агрессивность) и диапазоном измерений. На рис. 30 приведены различные типы зондов.

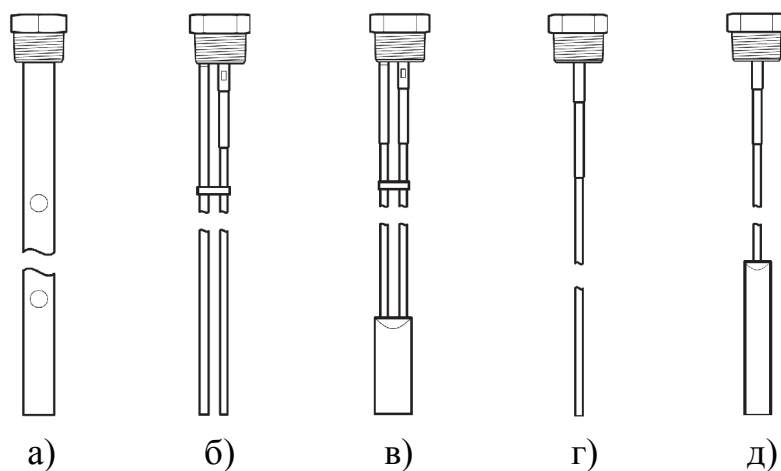


Рис. 30. Виды зондов волноводных уровнемеров:
 а – коаксиальный; б – двойной жесткий; в – двойной гибкий;
 г – одинарный жесткий; д – одинарный гибкий

Ниже дается характеристика различных типов зондов, используемых в уровнемерах производства «Emerson rosemount», и приводятся рекомендации по их выбору [16].

Коаксиальный зонд. Оптимальное решение для измерения уровня среды и уровня границы раздела двух жидкостей, например, растворителей, спиртов, водных растворов, сжиженных газов и жидкого аммиака. Коаксиальный зонд обеспечивает самое высокое отношение сигнал/шум. Рекомендуется для измерения уровня жидкостей с низкой диэлектрической проницаемостью, а также для измерений в условиях турбулентности, в присутствии пены или потоков жидкости или пара вблизи зонда. Может использоваться в условиях электромагнитных помех, допускается контакт зонда с металлическими конструкциями. Не рекомендуется для сред, склонных к кристаллизации или налипанию, а также для порошков. Максимальный диапазон измерений при использовании коаксиального зонда составляет 6 м.

Двойной жесткий или гибкий зонды. Рекомендуются при измерении уровня жидкостей (нефтепродукты, растворители, водные растворы и т.п.). Возможно применение для измерения уровня и уровня границы раздела жидких сред. Могут применяться с более вязкими жидкостями, чем рекомендованные для коаксиального зонда, однако не следует применять этот зонд для липких продуктов, когда существует вероятность налипания и образования перемычек между двумя стержнями или проводами зонда. Двойной жесткий зонд подходит для измерений в диапазоне до 3 м. Для двойного гибкого зонда диапазон измерений составляет до 50 м.

Одинарный жесткий или гибкий зонды. Менее восприимчивы к налипанию среды и образованию наростов. Одинарный жесткий зонд рекомендуется для измерений в диапазоне до 4,5 м, а одинарный гибкий – до 50 м. Могут применяться для вязких жидкостей, взвесей, водных растворов и алкогольных напитков, а также использоваться в гигиенических применениях в пищевой и фармацевтической промышленности, для измерения уровня твердых частиц, гранул и порошков, например, зерна, песка, сажи и т.п. Применяются для измерения уровня вязких жидкостей, например, сиропа, меда и т.п., а также водных растворов.

На рис. 31 представлены различные типы волноводных уровнемеров производства «Emerson», отличающихся конструкцией чувствительного зонда.



Рис. 31. Волноводные уровнемеры производства «Emerson» различных типов

Преимущества волноводных уровнемеров [16]:

- подходят для измерения уровня как жидких, так и сыпучих сред, а также уровня границы раздела жидкостей;
- точность измерений не зависит от диэлектрической проницаемости, плотности, температуры, давления и величины pH;
- различные типы зондов позволяют применять уровнемеры в резервуарах разной геометрии и с внутренними конструкциями;
- надежность измерений в условиях высокой турбулентности или вибраций, запыленности и парообразования;
- диапазон измерений от 0,1 до 50 м;
- отсутствие подвижных частей минимизирует затраты на обслуживание.

Недостатком волноводных уровнемеров является их высокая стоимость.

На рис. 32 представлен внешний вид волноводных уровнемеров производства «Ametek drexelbrook», «Nivelco» и «Binmaster».



Рис. 32. Волноводные уровнемеры производства «Ametek drexelbrook», «Nivelco» и «Binmaster»

1.10. Лазерные датчики уровня

Лазерные датчики могут применяться для измерения уровня сыпучих (зернистых) веществ, суспензий, пульп, непрозрачных жидкостей, расплавленных металлов. Принцип действия лазерных уровнемеров схож с принципом действия ультразвуковых датчиков уровня.

Для измерения уровня среды с помощью лазера могут использоваться две технологии: импульсная и частотно-модулированная [5]. Импульсные лазерные уровнемеры основаны на измерении времени пролета светового луча от датчика до препятствия и обратно. На рис. 33 изображена принципиальная схема измерения уровня сыпучего материала с помощью лазерного уровнемера.

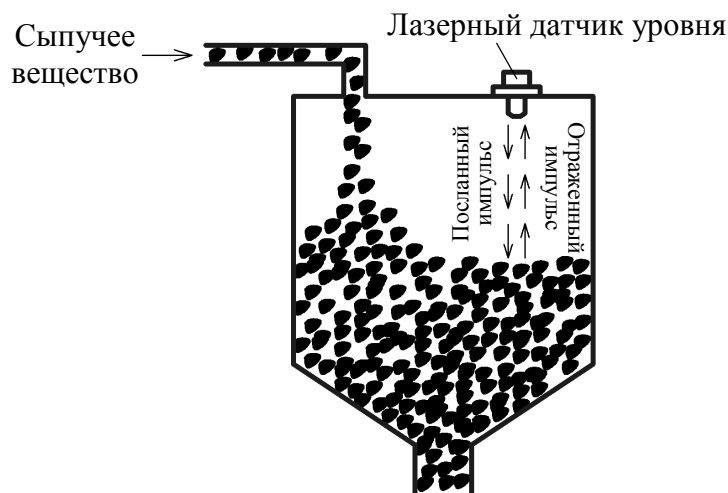


Рис. 33. Измерение уровня с помощью лазерного датчика

Датчик, располагаемый над уровнем измеряемой среды, посылает короткий импульс света вниз на поверхность материала (технологической жидкости), которая отражает его обратно в детектор, находящийся в датчике (см. рис. 33). Так как скорость света является постоянной величиной, то по времени прохождения светового луча можно рассчитать расстояние до объекта измерения. Измерительная схема (схема синхронизации) вычисляет время полета импульса согласно формуле:

$$L = \frac{c \cdot t}{2},$$

где $c = 3 \cdot 10^8$ м/с – скорость света; t – время полета лазерного импульса, с; L – расстояние до измеряемой среды, м.

Импульсная технология, основанная на измерении времени полета лазерного луча, используется в большинстве случаев промышленного измерения уровня. Современные лазерные датчики позволяют измерять уровень даже в тяжелых условиях и могут проникать через пыль, пар и пену без ущерба для точности.

При *частотно-модулированной технологии* лазер работает в непрерывном режиме. Лазерный луч после отражения от поверхности контролируемой среды

будет иметь фазовый сдвиг по отношению к исходному сигналу. Отраженный лазерный луч направляется в приемник. Посланный и отраженный сигналы сравниваются и определяется фазовый сдвиг. Измерительная схема на основании фазового сдвига, частоты излучения и длины волны определяет расстояние до среды.

Непрерывные лазеры находят применение в чистых условиях (над поверхностью измеряемой среды должен быть чистый воздух) для измерения небольших расстояний с очень высокой точностью. Они обычно применяются в лабораторных условиях. В промышленности их используют для измерения перемещения объектов (позиционирование) и редко используют для контроля уровня.

При использовании лазерного уровнемера необходимо учитывать как его сильные, так и слабые стороны. Сильными сторонами лазера являются: узкий луч, отсутствие расхождения луча и ложных отраженных эхо-сигналов. Отмеченные свойства лазерного луча позволяют проводить измерения там, где невозможно использовать ультразвуковые и радарные уровнемеры, которые, например, не позволяют надежно измерять уровень в длинных и узких резервуарах из-за возникновения ложного отражения сигнала от стенок.

Уникальные свойства лазера позволяют его использовать для измерения сыпучих веществ, имеющих большой угол откоса (конусность). При использовании обычных радарных или ультразвуковых уровнемеров наличие конусности вызывает возникновение ложных отраженных сигналов, с которыми они плохо справляются. Для лазера таких проблем не существует.

К числу недостатков лазерного уровнемера следует отнести его более высокую чувствительность к пыли. Для борьбы с пылью применяются пылегазосборные трубы – для создания статической зоны вблизи оптической системы. Разработаны специальные алгоритмы, позволяющие отсекающие ложные сигналы от пыли, падающих камней и т.д.

Особенности лазерных уровнемеров:

- измерение уровня в сложных условиях (пыль, камни, большой угол откоса сыпучего материала и т.п.);
- измерение в длинных и высоких емкостях с внутренними конструкциями;
- измерение через падающие камни;
- безопасен для глаз;
- отсутствие ложных отраженных сигналов;

Недостатки лазерных уровнемеров:

- ограничения по измеряемой среде;
- чувствительность к пыли.

Диапазон измерения лазерных датчиков уровня составляет от 0,2 до 250 м, а погрешность измерения ± 5 мм [5].

Производителями лазерных уровнемеров являются: «Sick», «Eclipse», «Dropsa spa», «Dimetix ag», «Idec», «Lmi technologies», «Optech», «Loke engineering», «Interin gmbh», «Trafag», «Ifm electronic» и др. фирмы.

На рис. 34, 35 представлен внешний вид промышленных лазерных уровнемеров производства «Loke engineering» (модель LMC-F-0050-1) и «Dimetix ag» (модель EDS-C).



Рис. 34. Модель LMC-F-0050-1 со степенью защиты IP66 производства «Loke engineering»



Рис. 35. Модель EDS-C производства «Dimetix ag»

1.11. Лотовые датчики уровня

Лотовые уровнемеры – это электромеханические измерительные приборы для непрерывного измерения уровня или объема заполнения в емкостях, силосах и цистернах. Лотовые уровнемеры являются экономичным решением для непрерывного измерения уровня сыпучих веществ в сельском хозяйстве, пищевой промышленности, промышленности строительных материалов, деревообработке, химической промышленности и других областях [12].

Принцип действия лотового уровнемера следующий. Сам прибор, как правило, устанавливается на крыше силоса или крышке бункера. Чувствительный груз, закрепленный на конце ленты (троса), которая намотана на катушку с электромеханическим приводом, опускается в емкость. Как только чувстви-

тельный груз касается поверхности измеряемого материала, направление вращения катушки меняется на противоположное, и груз возвращается в свое исходное положение. Во время движения чувствительного груза вниз, пройденное расстояние измеряется электронно благодаря вращению катушки с лентой (тросом). Микропроцессор переводит измеренную дистанцию в аналоговый выходной сигнал, который учитывает особенности объема и геометрии силосной конструкции. Выходной сигнал обновляется после прикосновения чувствительного груза к измеряемому материалу [17].

На рис. 36 представлено несколько вариантов установки лотовых уровнемеров на технологический объект [17]. В первых двух случаях уровнемер измеряет уровень заполнения емкости. В последнем случае уровнемер используется для определения границы раздела сред (в этом случае частицы твердого вещества содержатся в жидкости, например, в воде).

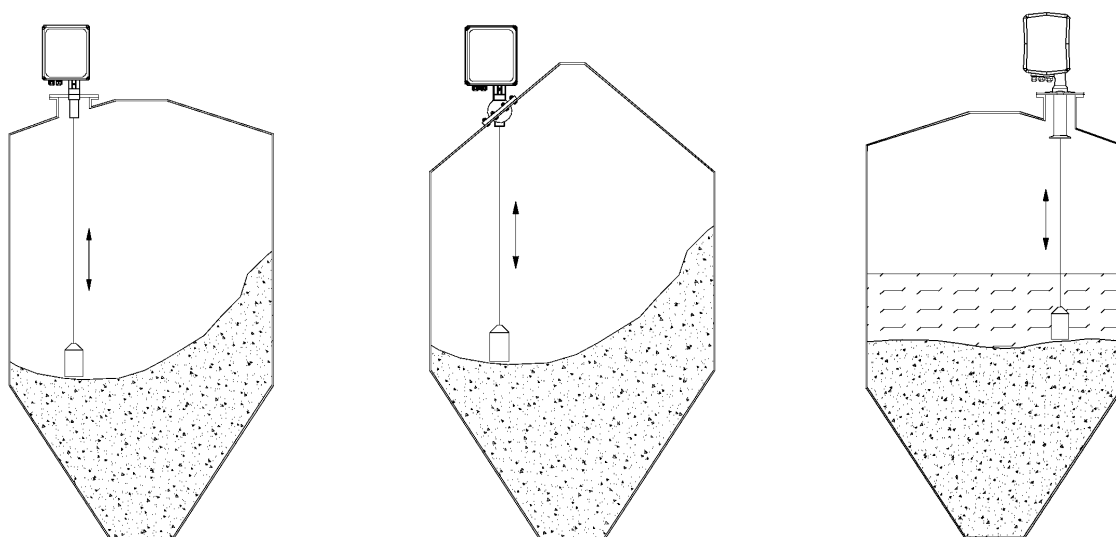


Рис. 36. Варианты установки и применения лотовых уровнемеров

Особенности и преимущества лотовых уровнемеров [12, 17]:

- подходят для измерения уровня практически всех сыпучих материалов;
- простая установка и введение в эксплуатацию;
- возможен непосредственный монтаж на наклонную поверхность;
- показания не зависят от свойств сыпучих веществ (диэлектрическая проницаемость, электропроводность материала);
- непрерывное измерение уровня заполнения (до 30 м);
- запыленность в бункере не влияет на работу прибора;
- высокая точность измерения;

- малая потребность в техническом обслуживании.

На рис. 37 представлены промышленные электромеханические лотовые уровнемеры производства «Uwt», предназначенные для непрерывного измерения уровня сыпучих веществ.



Рис. 37. Электромеханические лотовые уровнемеры производства «Uwt»

1.12. Емкостные датчики уровня

Емкостные уровнемеры строятся на основе конденсаторных преобразователей, изменяющих электрическую емкость в зависимости от степени погружения измерительного преобразователя в жидкость. Емкостные датчики могут применяться для непрерывного измерения уровня как электропроводных, так и неэлектропроводных жидкостей.

Конденсаторные преобразователи могут иметь различное конструктивное исполнение. Измерительный преобразователь емкостного уровнемера представляет собой конденсатор, образованный несколькими электродами. Электроды могут быть стержневыми, цилиндрическими и пластинчатыми. В качестве одного из электродов может выступать металлическая стенка резервуара.

Конструкция конденсаторных преобразователей различна для электропроводных и неэлектропроводных жидкостей. В уровнемерах для электропроводных жидкостей электроды покрываются изоляционным слоем (тонкими пленками, обладающими высокими изолирующими свойствами). Электроды конденсаторных преобразователей для неэлектропроводных жидкостей не изолирова-

ны. При измерении уровня агрессивных, но неэлектропроводных жидкостей обкладки преобразователя выполняют из химически стойких сплавов или покрывают тонкой антикоррозионной пленкой (винипластом или фторопластом), диэлектрические свойства которой учитывают при расчете. Чаще всего применяются цилиндрические электроды, обладающие по сравнению с другими формами электродов хорошей технологичностью, лучшей помехоустойчивостью и обеспечивающие большую жесткость конструкции [2, 10].

На рис. 38. представлена принципиальная схема, поясняющая метод измерения уровня неэлектропроводной жидкости с помощью конденсаторного преобразователя цилиндрического типа [2]. Измерительный преобразователь состоит из двух коаксиально (концентрично) расположенных электродов (труб), помещенных в резервуар. Взаимное расположение электродов зафиксировано проходным изолятором. Измерительные электроды образуют цилиндрический конденсатор, при этом часть межэлектродного пространства высотой h заполнена контролируемой жидкостью, а оставшаяся часть высотой $H - h$ заполнена ее парами (газовой средой). При изменении уровня жидкости в резервуаре емкость конденсаторного преобразователя также будет изменяться.

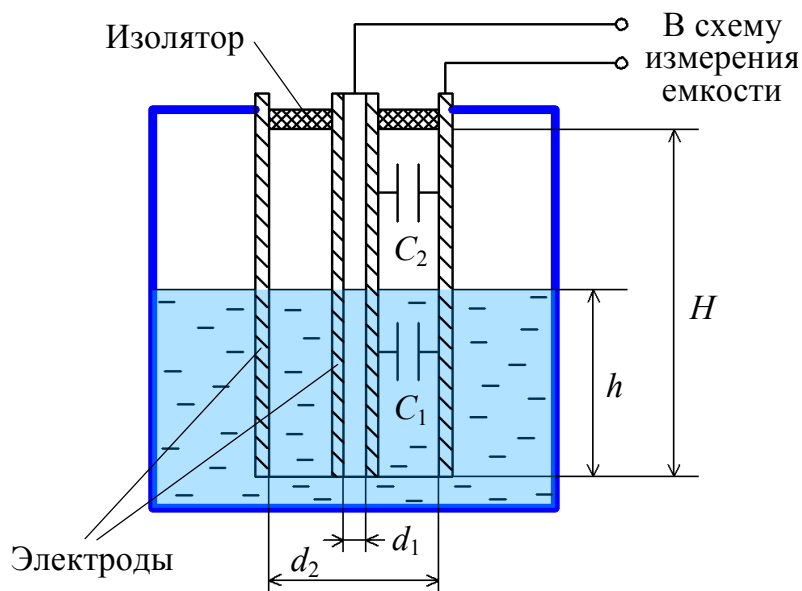


Рис. 38. Принцип действия емкостного датчика уровня

В конденсаторных преобразователях для электропроводных жидкостей один электрод выполняется изолированным. Если резервуар металлический, то его стенки могут быть использованы в качестве второго электрода [2].

Емкость цилиндрического конденсатора в общем виде определяется по формуле:

$$C = \frac{2\pi\varepsilon\varepsilon_0 H}{\ln(d_2/d_1)}, \quad (1)$$

где ε – относительная диэлектрическая проницаемость вещества, заполняющего межэлектродное пространство; ε_0 – диэлектрическая проницаемость вакуума ($8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м); H – высота электродов; d_1, d_2 – диаметры внутреннего и наружного электродов.

Емкость измерительного преобразователя, изображенного на рис. 38, будет равна сумме емкостей двух участков – погруженного в жидкость с диэлектрической проницаемостью $\varepsilon_{ж}$ (емкость C_1) и находящегося в газовой среде с диэлектрической проницаемостью ε_2 (емкость C_2). Так, в соответствии с формулой (1), емкости цилиндрического конденсаторного преобразователя запишутся:

$$C_1 = \frac{2\pi\varepsilon_0\varepsilon_{ж}h}{\ln(d_2/d_1)}, \quad C_2 = \frac{2\pi\varepsilon_0\varepsilon_2(H-h)}{\ln(d_2/d_1)}.$$

На суммарную емкость конденсаторного преобразователя также будет оказывать влияние емкость проходного изолятора C_{II} , образуемая электродами конденсатора в месте установки изолятора. Таким образом, суммарная емкость преобразователя запишется $C_{ПП} = C_1 + C_2 + C_{II}$. Учитывая, что диэлектрическая проницаемость газа (воздуха) $\varepsilon_2 \approx 1$ и тот факт, что емкость C_{II} не зависит от величины уровня, суммарная емкость преобразователя запишется:

$$C_{ПП} = C_{II} + \frac{2\pi\varepsilon_0}{\ln(d_2/d_1)} [H + h(\varepsilon_{ж} - 1)]. \quad (2)$$

Из (2) следует, что при постоянной диэлектрической проницаемости жидкости ($\varepsilon_{ж} = const$) емкость конденсаторного преобразователя однозначно зависит от уровня измеряемой среды h .

Поскольку в реальных условиях диэлектрическая проницаемость жидкости может изменяться (например, при изменении температуры жидкости или ее состава), то необходимо предусмотреть компенсацию влияния $\varepsilon_{ж}$ на показания уровнемера. Для этой цели в конструкцию уровнемера добавляют компенсационный конденсатор, который будет постоянно погружен в жидкость, и следовательно, его емкость будет зависеть только от величины $\varepsilon_{ж}$. Емкость компенсационного конденсатора используется в электронной схеме в качестве корректи-

рующего сигнала. Недостатком такой схемы введения поправки является увеличение неизмеряемого уровня, обусловленного высотой электродов компенсационного конденсатора [2].

Отрицательное влияние на работу емкостных уровнемеров оказывает активное сопротивление преобразователя. Оно складывается из активного сопротивления проходного изолятора и активного сопротивления контролируемой жидкости в межэлектродном пространстве (обычно значение последнего пренебрежимо мало). Для уменьшения влияния активного сопротивления преобразователя в схему уровнемера включается фазовый детектор [2].

Электрическая емкость конденсаторного преобразователя может быть измерена с помощью резонансных или мостовых схем. При резонансном методе первичный преобразователь (конденсаторный датчик) включен в схему колебательного контура, параметры которого изменяются с изменением контролируемого уровня. При этом либо измеряется амплитуда напряжения на контуре (при неизменной амплитуде и частоте питающего напряжения), либо резонансная частота контура. Этот метод используют в большей части емкостных сигнализаторов уровня [2, 10].

На рис. 39 представлена принципиальная схема мостовой измерительной схемы [2]. Мост состоит из запитывающего генератора, трансформатора Tr с двумя вторичными обмотками (1 и 2), емкости измерительного преобразователя $C_{пр}$ и подстроечного конденсатора C . Мост уравновешен при нулевом уровне жидкости, при этом сигнал на входе и выходе усилителя равен нулю. При увеличении уровня емкость $C_{пр}$ растет, разбаланс моста увеличивается и напряжение на входе усилителя возрастает. С помощью усилителя этот сигнал усиливается, преобразуется в унифицированный и измеряется вторичным прибором (ВП).

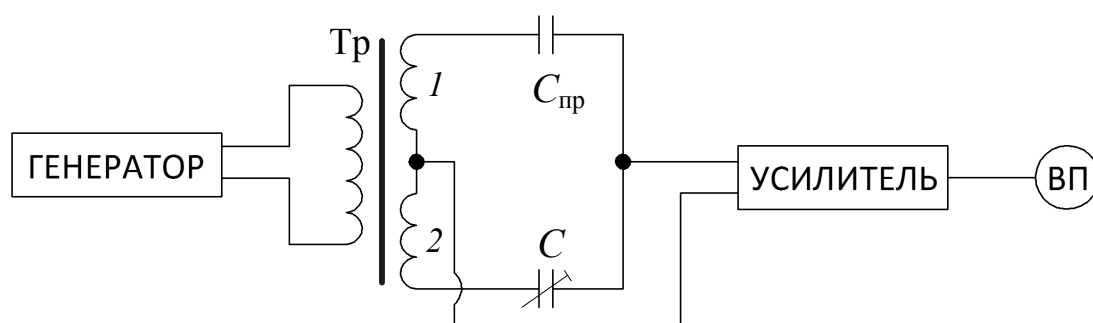


Рис. 39. Принципиальная схема мостовой измерительной схемы

Емкостные уровнемеры получили широкое распространение особенно в качестве сигнализаторов из-за дешевизны, простоты обслуживания, удобства монтажа первичного преобразователя, отсутствия подвижных элементов, возможности использования в широком интервале температур и давлений. Большим достоинством таких приборов является нечувствительность к сильным магнитным полям, возможность использования в широком интервале температур (от криогенных до 500 °С) и давлений. К числу недостатков следует отнести непригодность для измерения уровня вязких (динамическая вязкость более 1 Па·с), пленкообразующих, кристаллизующихся жидкостей и содержащих примеси (выпадающие в осадок), высокую чувствительность к изменению электрических свойств жидкости и изменению емкости кабеля, соединяющего первичный преобразователь с измерительным прибором. Последний недостаток устраняется при размещении электронной части в головке преобразователя [2].

На рис. 40 представлен внешний вид промышленных емкостных уровнемеров с различной конструкцией измерительных электродов.



Рис. 40. Промышленные емкостные уровнемеры производства «Ege», «Imb» и «Nivelco»

2. Измерение расхода жидкостей и газов

В настоящее время в связи с развитием промышленности все большее значение приобретают приборы для измерения расхода жидкости, газа, пара и сыпучих веществ. Расходомеры необходимы прежде всего для управления производством. Без них нельзя обеспечить оптимальный режим технологических процессов во всех отраслях народного хозяйства. Эти приборы требуются также для автоматизации производства и достижения при этом максимальной его эффективности.

Расходом называется количество вещества (масса или объем), протекающего через данное сечение трубопровода в единицу времени. Прибор, измеряющий расход вещества, называется *расходомером*, а массу или объем вещества – *счетчиком количества* или просто *счетчиком*. Прибор, который одновременно измеряет расход и количество вещества, называется *расходомером со счетчиком*. К этим терминам следует добавлять название измеряемого вещества, например: расходомер газа, счетчик воды, расходомер пара со счетчиком. Устройство, непосредственно воспринимающее измеряемый расход (например, диафрагма, сопло, напорная трубка) и преобразующее его в другую величину (например, в перепад давления), которая удобна для измерения, называется *преобразователем расхода* [4].

Количество вещества может измеряться в единицах массы (килограммах, тоннах, граммах) или в единицах объема (кубических метрах, кубических сантиметрах, литрах). Соответственно, расход измеряют в единицах массы, деленных на единицу времени (килограммах в секунду, килограммах в час и т. д.), или в единицах объема, также деленных на единицу времени (кубических метрах в секунду, кубических метрах в час и т. д.). В первом случае имеем массовый расход $Q_M = m/t$, во втором – объемный $Q_V = V/t$. Соотношение указанных расходов определяется зависимостью $Q_M = \rho Q_V$, где ρ – плотность вещества. Объемный расход определяется по показаниям объемных счетчиков (дифференцируемых по времени) или как произведение средней скорости потока и площади поперечного сечения [1, 4].

Существует большое количество различных методов измерения расхода жидкостей и газов. Так, в зависимости от принципа действия существуют следующие разновидности расходомеров [1-18]:

1. Расходомеры переменного перепада давления. Метод основан на зависимости расхода измеряемой среды от перепада давления в сужающем устройстве, устанавливаемом в трубопроводе.

2. Расходомеры скоростного напора. Измеряют расход по динамическому напору потока с помощью пневмометрических трубок.

3. Расходомеры постоянного перепада давления. Основаны на зависимости от расхода вещества вертикального перемещения поплавка, изменяющего при этом площадь сечения проходного отверстия прибора таким образом, что перепад давлений по обе стороны поплавка остается постоянным.

4. Расходомеры переменного уровня. Основаны на зависимости от расхода высоты уровня жидкости в сосуде при свободном истечении ее через отверстие в дне или боковой стенке сосуда.

5. Электромагнитные (индукционные) расходомеры. Принцип действия электромагнитных расходомеров основан на законе электромагнитной индукции, в соответствии с которым в электропроводной жидкости, пересекающей магнитное поле, индуцируется ЭДС, пропорциональная скорости движения жидкости.

6. Ультразвуковые расходомеры. Принцип действия ультразвуковых расходомеров основан на измерении зависящего от расхода того или иного акустического эффекта, возникающего при прохождении ультразвуковых колебаний через контролируемый поток жидкости или газа.

7. Тепловые расходомеры. Основаны на измерении зависящего от расхода эффекта теплового воздействия на поток газа или жидкости.

8. Расходомеры Кориолиса (Кориолисовые расходомеры). Принцип действия основан на использовании эффекта Кориолиса, который заключается в том, что жидкость, протекая через вибрирующую трубку, вызывает сдвиг фаз колебаний трубки, пропорциональный массовому расходу.

9. Вихревые и вихреакустические расходомеры. Величина расхода определяется по частоте образования вихрей в потоке жидкости или газа, возникающих при введении в поток неподвижного твердого тела обтекания.

10. Расходомеры с мишенями. Основаны на измерении силы, действующей на твердое тело (мишень) в потоке жидкой (газовой) среды.

11. Оптические расходомеры. Основаны на зависимости от расхода вещества того или иного оптического эффекта в потоке.

12. Турбинные расходомеры. Принцип действия основан на измерении скорости вращения введенной в поток лопастной турбины, пропорциональной расходу измеряемой среды.

При выборе того или иного типа прибора следует исходить из сравнительной важности тех или других требований, предъявляемых к измерению расхода или количества в каждом конкретном случае.

К датчикам расхода предъявляются следующие требования [4]:

- высокая точность измерения;
- высокая надежность;
- малая зависимость точности измерения от изменения плотности вещества;
- высокое быстродействие прибора;
- большой диапазон расходов, подлежащих измерению;
- необходимость измерения расхода не только в обычных, но и в экстремальных условиях (при очень низкой или очень высокой температуре и давлении);
- широкая номенклатура измеряемых веществ.

В настоящий момент расходомеры для жидкостей и газов различного назначения производятся такими фирмами, как «Greyline instruments» (США), «Krohne» (Германия), «Nivelco» (Венгрия), «Hydac» (Германия), «Omega engineering» (США), «Dwyer instruments» (США), «Hedland» (США), «Sierra» (США), «McCrometer» (США), «Cdimeters» (США), «Sure instrument» (Китай), «Comer» (Италия), «Spirax sarco» (США), «Seametrics» (США), «Siemens» (Германия), «Blancett» (США), «Endress+Hauser» (Германия), «Abb» (Швейцария), «Turck» (Германия), «Gems sensors & controls» (США), «Sensirion» (Швейцария), «Riels instruments» (Италия) и многими другими.

2.1. Расходомеры с мишенями

Расходомеры с мишенями обычно используются при работе с турбулентными потоками. Они могут применяться для измерения расхода жидкостей, газов и паров. Чувствительным элементом таких расходомеров является твердое тело, называемое мишенью, которое вводится в поток. При этом измеряется сила, действующая на тело в потоке контролируемой среды. Полученное значение силы преобразуется в величину скорости потока.

Один из вариантов чувствительного элемента расходомера с мишенью представлен на рис. 41 [3]. Принцип действия расходомера основан на измерении механического напряжения эластичного резинового троса, вызванного силой, действующей на мишень. Важным достоинством таких датчиков является возможность проведения измерений расхода и скорости потока в двух, а то и в трех направлениях. Для проведения многомерных исследований необходимо обеспечить симметричность мишени во всех направлениях измерений.

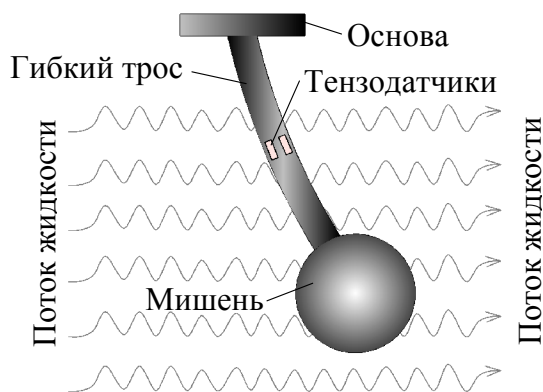


Рис. 41. Принцип измерения расхода с помощью мишени

Идеальной мишенью является плоский диск, поскольку величина расхода не влияет на его коэффициент уноса. Для сферической симметричной мишени коэффициент уноса зависит от скорости потока, поэтому при использовании такой мишени датчик необходимо калибровать и оптимизировать для каждого конкретного случая применения. Величину механического напряжения, действующего на трос, можно измерять при помощи тензодатчиков, но при этом им надо обеспечить физическую защиту от влияния жидкой среды [3].

Типовая конструкция расходомера с мишенью, применяемая в промышленности, представлена на рис. 42. Расходомер имеет чувствительный элемент (плоский диск), на который действует сила от движущегося потока среды. Величина усилия посредством рычага передается в блок обработки сигнала. В простейшем случае рычаг с помощью механизма непосредственно подключен к показывающей стрелке прибора. Измерение силы, действующей на мишень, возможно с помощью тензодатчиков, которые подключают к рычагу. При изменении положения рычага сопротивление тензодатчиков будет изменяться и после соответствующей обработки будет являться мерой расхода.

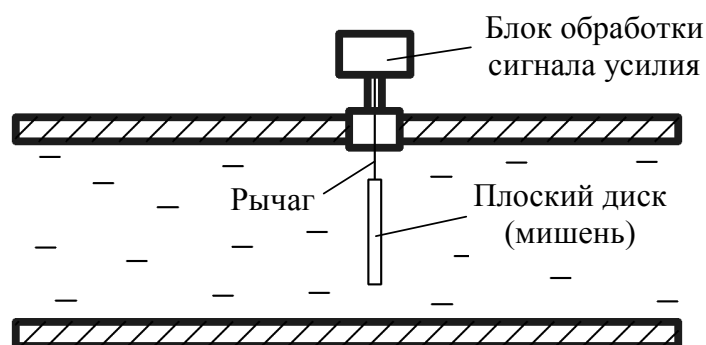


Рис. 42. Принципиальная схема расходомера с мишенью

На рис. 43 приведен внешний вид и устройство чувствительного элемента расходомера с мишенью производства «Niagara meters» (модель ForceMeter). В качестве чувствительных элементов для измерения силы, действующей на плоский диск, здесь используются четыре тензодатчика. Для получения полезного сигнала тензодатчики включаются в мостовую измерительную схему.

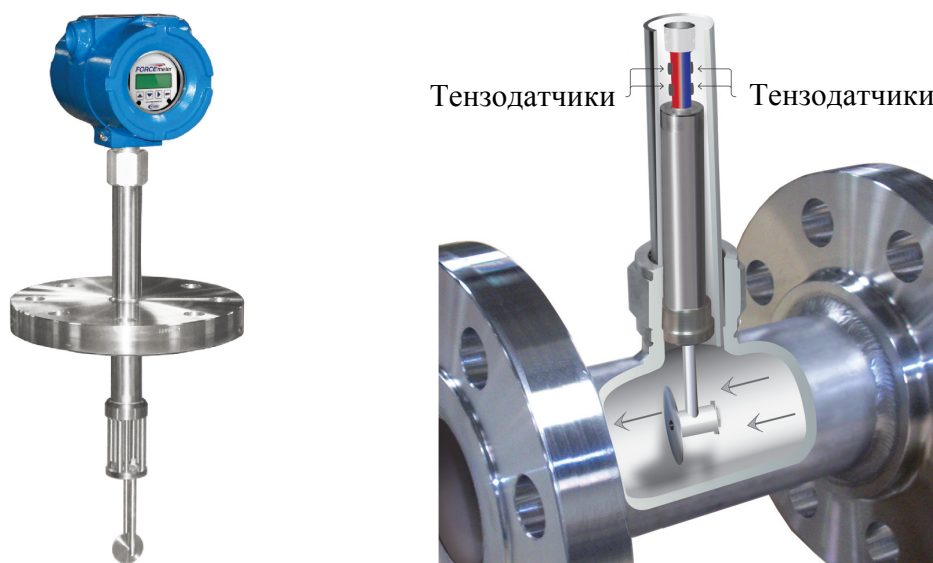


Рис. 43. Расходомер с мишенью производства «Niagara meters» и его устройство

Преимущества расходомеров с мишенью [6]:

- могут применяться в тяжелых условиях эксплуатации (очень вязкие жидкости, высокие температуры);
- применяются для измерения расхода жидкости, газа и пара;
- возможность измерения больших расходов.

Недостатки расходомеров с мишенью:

- требуется индивидуальная калибровка прибора в зависимости от области применения и от типа измеряемой среды (вещества).

На рис. 44 представлены еще две модели промышленных расходомеров с мишенью производства «Dalian zero instrument» (Китай) и «Tecfluid» (Испания). Первая из моделей преобразует величину расхода в унифицированный выходной сигнал, а вторая передает показания непосредственно на показывающую стрелку прибора.



Рис. 44. Внешний вид расходомеров с мишенью производства «Dalian zero instrument» (Китай) и «Tecfluid» (Испания)

2.2. Кориолисовые расходомеры

Расходомеры Кориолиса применяются для измерения массового расхода жидкостей и газов. Расходомеры данного типа названы в честь французского ученого Гюстава Гаспара Кориолиса. Кориолисовые расходомеры не зависят ни от давления жидкости, ни от ее температуры, ни от ее вязкости и плотности. Поэтому такие датчики не требуют проведения повторных калибровок и подстройки под каждый конкретный тип жидкой среды [3].

Принцип действия таких расходомеров основан на использовании эффекта Кориолиса, который заключается в том, что жидкость, протекая через вибрирующую трубку, вызывает сдвиг фаз колебаний трубки, пропорциональный массовому расходу.

Расходомеры Кориолиса могут быть как с одной, так и с двумя вибрирующими трубками, которые обычно изготавливаются из нержавеющей стали. Для получения точных результатов измерений важно защищать трубки и места их креплений от механического и химического воздействия потока жидкости. Чаще всего трубки имеют U-образную форму. Для газов применяются более тон-

кие трубки, чем для жидкостей. Трубки начинают вибрировать от воздействия на них внешнего электромеханического задающего устройства [3].

На рис. 45 представлена принципиальная схема расходомера Кориолиса с одной вибрирующей трубкой.

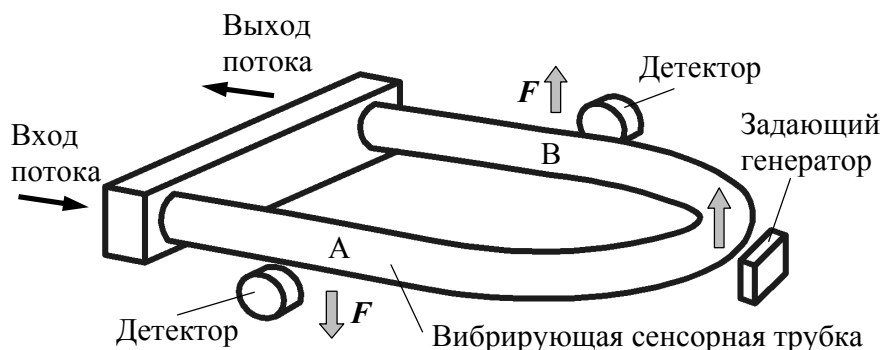


Рис. 45. Принципиальная схема расходомера Кориолиса с одной вибрирующей трубкой

Основными элементами датчика расхода являются: измерительная (сенсорная) трубка, задающий генератор (задающая катушка возбуждения) и входной и выходной детекторы.

Принцип действия расходомера заключается в следующем. Работа задающего генератора приводит к тому, что трубка начинает вибрировать, т.е. колебаться вверх-вниз (см. рис. 46). Жидкость (или газ) поступают в измеритель через впускное отверстие. Расход массы определяется по действию жидкости на вибрирующие трубки. При движении жидкости от входа к выходу, на нее действует вибрационное ускорение, все время меняющее свое направление. Поскольку потоки жидкости в двух ветвях трубки имеют противоположные направления, то и возникающие там силы Кориолиса также будут направлены в разные стороны. В результате чего под действием результирующей силы две части трубки (точки А и В на рис. 45) смещаются друг относительно друга в соответствии с циклом вибраций [3].

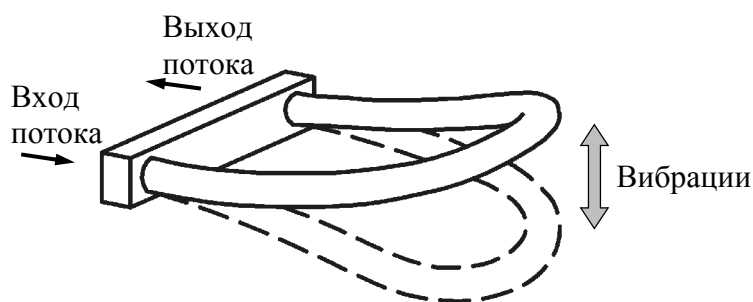


Рис. 46. Вибрирование сенсорной трубки под действием генератора

Так, при движении сенсорной трубки вверх (см. рис. 45) в точке А сила Кориолиса F будет действовать вниз, а в точке В – вверх. Это приводит к тому, что сенсорная трубка начинает изгибаться. При движении трубки вниз процесс повторяется, но силы Кориолиса будут действовать в других направлениях. Таким образом, сенсорная трубка будет попеременно изгибаться то в одном, то в другом направлении (рис. 47). Величина изгиба трубки в точках А и В (рис. 45) фиксируется детекторами.

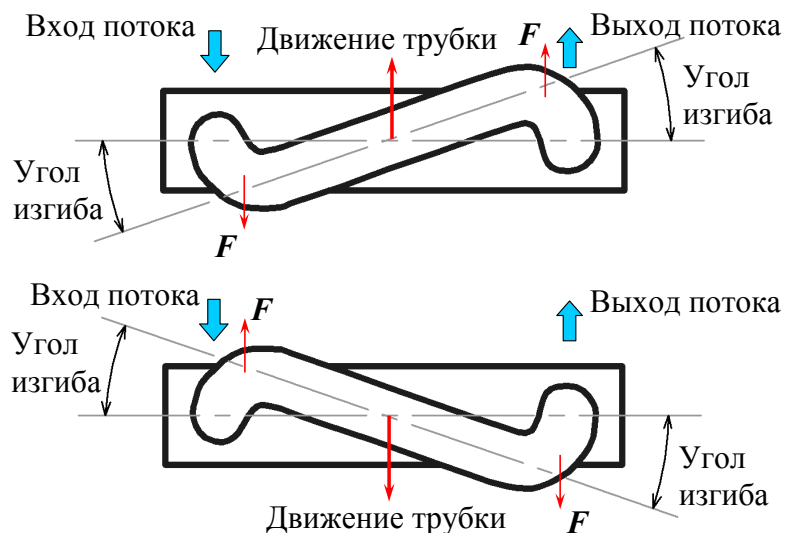


Рис. 47. Изгиб измерительной трубки под действием силы Кориолиса

Величина силы Кориолиса, индуцированная потоком, определяется следующим выражением:

$$F = 2m\omega v,$$

где m – масса; ω – круговая частота вибраций; v – вектор средней скорости жидкости.

Следовательно, величина изгиба трубки прямо пропорциональна массовому расходу через трубку [3].

При отсутствии в трубке потока ее вибрации на входе и выходе совпадают, т.е. между ними нет никакого сдвига фаз. При появлении потока трубка изгибается пропорционально величине массового расхода, поэтому между вибрациями ее входной и выходной ветвей (точки А и В на рис. 45) появляется фазовый сдвиг (рис. 48) [3].

Принцип действия Кориолисовых расходомеров с двумя сенсорными трубками аналогичен. Измеряемая среда, поступающая в расходомер, разделяется на равные части, протекающие через каждую из сенсорных трубок. Датчик

также включает в себя задающую катушку и детекторы. Движение задающей катушки приводит к тому, что сенсорные трубки колеблются вверх-вниз в противоположном направлении друг к другу. Каждый детектор состоит из магнита и катушки. Катушки смонтированы на одной трубке, магниты на другой. Каждая катушка движется внутри однородного магнитного поля постоянного магнита. Сгенерированное напряжение от каждой катушки детектора имеет форму синусоидальной волны. Эти сигналы представляют собой движение одной трубки относительно другой [16].

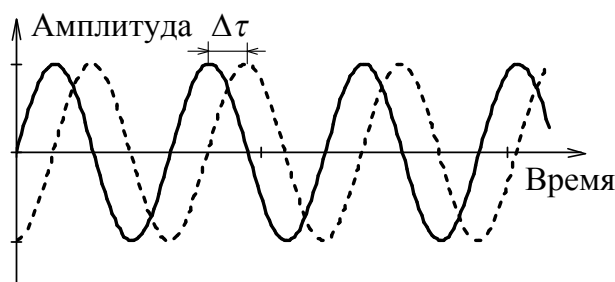


Рис. 48. Сдвиг фазы колебаний, вызванный силами Кориолиса

Когда расход отсутствует, синусоидальные сигналы, поступающие с детекторов, находятся в одной фазе. При движении измеряемой среды через расходомер, на измерительные трубки будет действовать сила Кориолиса, приводящая к изгибу трубок. В результате изгиба сенсорных трубок на детекторах генерируются сигналы, не совпадающие по фазе, так как сигнал с входного детектора запаздывает по отношению к сигналу с выходного детектора. Разница во времени между сигналами ($\Delta\tau$) измеряется в микросекундах и прямо пропорциональна массовому расходу. Чем больше $\Delta\tau$, тем больше массовый расход [16].

Достоинства расходомеров Кориолиса:

- высокая точность измерения расхода;
- работоспособность не зависит от направления потока;
- не требуются прямолинейные участки трубопровода до и после расходомера;
- надежная работа при наличии вибрации трубопровода, при изменении температуры и давления рабочей среды (только если расходомер установлен на резиновые подставки-прокладки);

- результаты измерения не зависят от давления измеряемой жидкости, ее температуры, вязкости и плотности;
- длительный срок службы и простота обслуживания благодаря отсутствию движущихся и изнашивающихся частей;
- нет необходимости в периодической перекалибровке и регулярном техническом обслуживании;
- измеряют расход сред с высокой вязкостью;
- разрешено использование в пищевой, химической и фармацевтической промышленности.

Основным недостатком расходомеров Кориолиса является их сравнительно высокая стоимость. Однако их универсальность при работе с разными типами сред позволяет применять их на заводах, где требуется измерять расходы самых разнообразных жидкостей и газов [3].

На рис. 49. представлен внешний вид промышленных расходомеров, основанных на эффекте Кориолиса.



Рис. 49. Внешний вид промышленных расходомеров производства «Endress+Hauser»

2.3. Вихревые и вихреакустические расходомеры

В вихревых расходомерах величина расхода определяется по частоте образования вихрей Кармана в потоке жидкости или газа, возникающих при введении в поток неподвижного твердого тела обтекания либо при специальном закручивании потока [2].

Наибольшее распространение получили вихревые расходомеры с телом обтекания, которое находится на пути потока и изменяет направление движе-

ния омывающих его струй. Характер движения потока при обтекании цилиндра и образование вихрей представлены на рис. 50.



Рис. 50. Образование вихрей Кармана в потоке

Частота образования вихрей за телом пропорциональна скорости потока. Детектирование вихрей и определение частоты их образования позволяет определить скорость и объемный расход среды. При этом следует учитывать, что на процесс вихреобразования влияет вибрация трубопровода, создаваемая насосами, компрессорами, акустические колебания, возникающие из-за местных сопротивлений и внешних шумов. Наиболее распространенной формой тела обтекания, создающей устойчивые вихри, является призма с треугольным или трапециевидальным сечением, обращенная основанием навстречу потока [2].

Для измерения частоты возникающих в потоке вихрей могут применяться различные детекторы, строящиеся на основе электромагнитных, пьезоэлектрических, тензорезистивных и др. преобразователей. Так, в зависимости от способа детектирования частоты вихрей различают вихревые и вихреакустические расходомеры.

В вихревых расходомерах определение частоты вихреобразования может осуществляться, например, при помощи пьезодатчиков, фиксирующих пульсации давления в зоне вихреобразования. Другим способом детектирования является применение чувствительного элемента в виде гибкой пластинки, которая устанавливается за телом обтекания и воспринимает колебания давления, создаваемые вихрями Кармана. Колебания пластинки с помощью коромысла воздействуют на тензопреобразователь, находящийся вне потока.

В вихреакустических датчиках расхода частота образования вихрей измеряется ультразвуковым преобразователем, состоящим из пьезоизлучателя и пьезоприемника (однолучевой преобразователь). Телом обтекания служит призма, введенная в проточную часть расходомера. Датчик также имеет в своем составе электронный блок, включающий генератор ультразвуковых колебаний,

фазовый детектор и микропроцессор с блоком формирования выходных сигналов. Принципиальная схема устройства представлена на рис. 51.

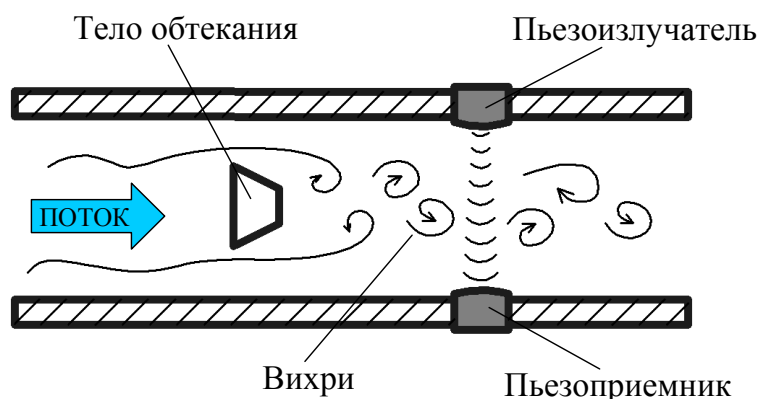


Рис. 51. Принципиальная схема вихреакустического расходомера

Пьезоизлучатель и пьезоприемник располагаются в корпусе проточной части за телом обтекания противоположно друг другу. На пьезоизлучатель подается переменное напряжение от генератора, которое преобразуется в ультразвуковые колебания, которые после прохождения через измеряемую среду детектируются пьезоприемником. Наличие вихрей на пути ультразвукового сигнала вызывает модуляцию ультразвуковых колебаний по фазе, которые измеряются фазовым детектором.

Вихреакустические датчики расхода также могут иметь два пьезоизлучателя и два пьезоприемника, расположенных в одном сечении диаметрально противоположно друг другу. Такой ультразвуковой преобразователь называется двухлучевым. Использование двухлучевых преобразователей снижает влияние таких отрицательных факторов, как вибрации трубопровода и пульсации давления.

Для автоматического введения поправки на температуру среды в вихревые и вихреакустические расходомеры устанавливают датчик температуры. Наличие термопреобразователя и введение его сигнала в микропроцессор датчика обеспечивает расширение динамического диапазона прибора.

Вихревые и вихреакустические расходомеры применяются преимущественно для измерения расхода чистых жидкостей с низкой вязкостью без завихрений, которые движутся со средней или высокой скоростью. В потоке не должно быть завихрений, поскольку они могут повлиять на точность измерений.

Преимущества вихревых и вихреакустических расходомеров [2]:

- возможность измерения расхода жидких и газовых сред;
- отсутствие движущихся элементов в потоке и простота устройства;
- широкий динамический диапазон;
- широкий диапазон давлений и температур измеряемых сред;
- высокая точность.

Недостатки вихреакустических расходомеров [2]:

- ограничения по диаметру трубопровода ($D=20-150$ мм);
- ограничения по вязкости жидкой среды;
- для обеспечения устойчивого вихреобразования скорость потока должна быть не менее $0,2$ м/с;
- наличие потери давления, достигающей 30 кПа;
- воздействие на преобразователь акустических и вибрационных помех, создаваемых насосами, компрессорами, местными сопротивлениями.

На рис. 52 представлен внешний вид промышленных вихревых расходомеров фирмы «Krohne».



Рис. 52. Внешний вид вихревых расходомеров производства «Krohne»

2.4. Ультразвуковые расходомеры

Принцип действия ультразвуковых расходомеров основан на измерении зависящего от расхода того или иного акустического эффекта, возникающего при прохождении ультразвуковых колебаний через контролируемый поток жидкости или газа [2].

Ультразвуковые расходомеры подразделяются на две группы в зависимости от принципа действия. В первой группе определение величины расхода реализуется путем измерения скорости прохождения ультразвука по направлению потока и против него. Вторая группа ультразвуковых расходомеров основывается на использовании эффекта Доплера.

В расходомерах первого типа ультразвуковые колебания, создаваемые пьезоэлементами, направляются по потоку жидкости и против него. Скорость распространения ультразвукового сигнала по направлению потока и против него будет разной, при этом скорость распространения звуковой волны вдоль потока будет больше, чем скорость против потока. Разность между временем прохождения ультразвуковыми импульсами расстояния между излучателем и приемником по потоку и временем прохождения против потока пропорциональна скорости вещества.

Основные трудности использования ультразвукового метода связаны с тем, что скорость ультразвука в среде зависит от ее физико-химических свойств: температуры, давления, и она значительно больше скорости среды, так что действительная скорость ультразвука в движущейся среде мало отличается от скорости в неподвижной среде. Эти обстоятельства обуславливают необходимость применения сложных электронных схем в сочетании с микропроцессорной техникой, обеспечивающих компенсацию влияния перечисленных факторов [2].

По конструктивному исполнению ультразвуковые расходомеры подразделяются на одноканальные и двухканальные. На рис. 53, а представлен одноканальный вариант расходомера с двумя пьезоэлементами, расположенными на двух противоположных сторонах трубы, по которой течет поток жидкой среды. Каждый пьезоэлемент работает попеременно в режиме излучателя и приемника, что обеспечивается системой переключателей. В двухканальной схеме (рис. 53, б) каждый пьезоэлемент работает только в одном режиме – излучателя или приемника. Двухканальные схемы проще одноканальных (нет сложных схем переключения), но точность их меньше, вследствие возможной акустической асимметрии обоих каналов [2].

Ультразвуковые пьезоэлектрические преобразователи изготавливаются в виде небольших керамических дисков, встроенных в корпус расходомера. Поверхность кристалла покрывается защитным материалом (например, силиконовой резиной) [3].

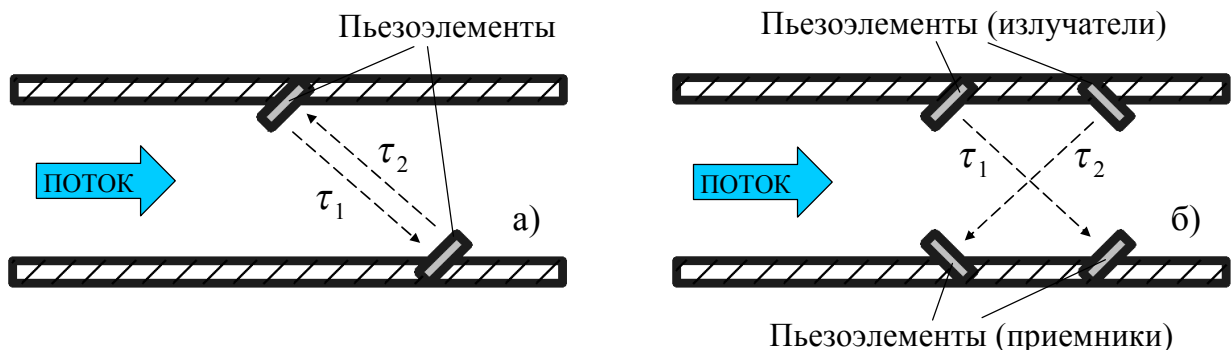


Рис. 53. Принципиальные схемы ультразвуковых расходомеров:
 а – одноканальный; б – двухканальный

Если обозначить τ_1 – время прохождения ультразвукового сигнала от излучателя до приемника по направлению потока, τ_2 – против направления потока, то разность $\Delta\tau = \tau_2 - \tau_1$ будет определять скорость потока. По методу определения $\Delta\tau$ ультразвуковые расходомеры подразделяются на времяимпульсные, частотные и фазовые.

Во *времяимпульсных* расходомерах периодически производится измерение $\Delta\tau$ коротких импульсов длительностью 0,1 ... 0,2 мкс, по которым затем определяется объемный расход.

В *частотных* расходомерах каждый последующий импульс посылается излучателем только после достижения предыдущим импульсом приемного пьезоэлемента. Разность частот следования импульсов по потоку и против него связана со скоростью и объемным расходом. Показания частотных расходомеров не зависят от скорости распространения ультразвука в неподвижной среде, а следовательно, и от физико-химических свойств и параметров среды.

В *фазовых* расходомерах измеряется разность фаз $\Delta\phi$ ультразвуковых колебаний частотой f , распространяющихся по потоку и против него. Недостаток этих расходомеров – зависимость показаний от изменения скорости звука.

В *доплеровских* ультразвуковых расходомерах используется эффект отражения ультразвуковых колебаний движущимися частицами потока [2]. Принцип их действия заключается в следующем. Датчик расходомера, устанавливаемый на наружную часть трубы, излучает ультразвуковой сигнал, направленный через ее стенку в поток жидкости. Этот сигнал отражается присутствующими в жидкости твердыми частицами или газовыми пузырьками (рис. 54). Частота отраженного сигнала отличается от исходной из-за движения жидкости

(эффект Доплера). Контроллер расходомера измеряет сдвиг частоты и определяет значение скорости жидкости, которое используется для расчета расхода [18].

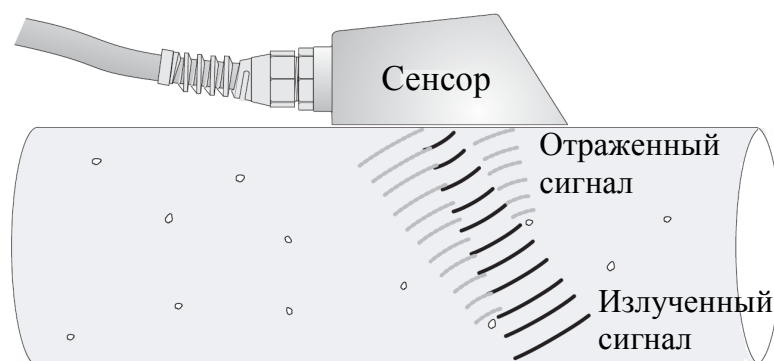


Рис. 54. Принцип действия доплеровского ультразвукового расходомера

На практике всегда требуется калибровать ультразвуковые датчики расхода во всем температурном диапазоне для каждой конкретной среды и также требуется учитывать вязкость исследуемой жидкости.

Преимущества ультразвуковых расходомеров [2]:

- значительный динамический диапазон, достигающий 25–30;
- высокая точность измерения, составляющая 1–2 %;
- возможность измерения расхода неэлектропроводных сред (нефтепродукты), загрязненных сред, суспензий;
- широкий диапазон диаметров трубопроводов (от 10 мм и выше без ограничений);
- малая инерционность;
- отсутствие потерь давления;
- широкий диапазон рабочих температур (от -220 до 600 °С) и давлений;

Недостатки ультразвуковых расходомеров [2]:

- необходимость значительных длин линейных участков до и после преобразователя;
- влияние на показания пузырьков воздуха в потоке;
- необходимость контроля отложений в трубопроводе на его рабочем участке;
- сложность и высокая стоимость приборов, которая при прочих равных условиях в 3-4 раза превышает стоимость тахометрических (турбинных) и электромагнитных расходомеров;

- ограничения по минимальной скорости потока.

На рис. 55 представлены промышленные ультразвуковые расходомеры производства «Endress+Hauser» и «Krohne».



Рис. 55. Промышленные ультразвуковые расходомеры производства «Endress+Hauser» и «Krohne»

На рис. 56 представлен внешний вид доплеровского ультразвукового бесконтактного расходомера DFM-5.0 производства «Greyline instruments» (США) и приведен пример размещения чувствительного элемента прибора на трубопроводе.



Рис. 56. Доплеровский ультразвуковой расходомер производства «Greyline instruments» (модель DFM-5.0)

2.5. Электромагнитные расходомеры

Электромагнитные расходомеры применяются для измерения расхода проводящих жидкостей. Принцип действия таких датчиков расхода основан на законе электромагнитной индукции, в соответствии с которым в электропроводной жидкости, пересекающей магнитное поле, индуцируется ЭДС, пропорциональная скорости движения жидкости. Промышленные электромагнитные датчики расхода предназначены только для жидкостей с электропроводностью не ниже $10^{-3} - 10^{-5}$ См/м.

В настоящее время электромагнитные расходомеры являются самыми распространенными приборами для измерения расхода воды в трубопроводах диаметром менее 250 мм [2].

Электромагнитные датчики расхода в зависимости от способа создания магнитного поля могут быть двух типов [2, 10]:

- с постоянным магнитным полем (создается постоянными магнитами);
- переменным магнитным полем (создается электромагнитом).

Расходомеры обоих типов имеют как преимущества, так и недостатки.

Принципиальная схема электромагнитного расходомера с постоянным магнитным полем показана на рис. 57. Рабочий участок трубы преобразователя, изготовленный из немагнитного материала и покрытый изнутри электрической изоляцией (резиной, эмалью, фторопластом и т.п.), расположен между полюсами магнита. Через стенку трубы изолированно от нее по диаметру введены электроды, находящиеся в электрическом контакте с жидкостью. При этом силовые линии магнитного поля, создаваемые постоянными магнитами, будут направлены перпендикулярно плоскости, проходящей через ось трубы и линию электродов. Под действием магнитного поля ионы, находящиеся в жидкости, перемещаются и отдают свои заряды измерительным электродам, создавая в них ЭДС, пропорциональную скорости течения жидкости. Сигнал, снимаемый с электродов, поступает в измерительный прибор.

В соответствии с законом электромагнитной индукции (при постоянном магнитном поле) между электродами будет наводиться ЭДС (E)

$$E = Bdv, \quad (3)$$

где B – индукция магнитного поля; d – внутренний диаметр трубопровода; v – средняя скорость жидкости.

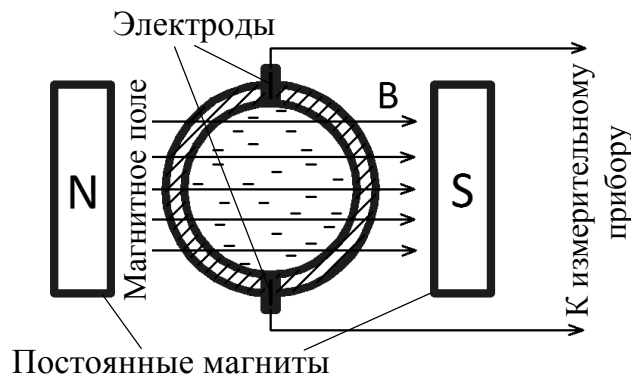


Рис. 57. Принципиальная схема электромагнитного расходомера с постоянным магнитным полем

Для трубопровода круглого сечения средняя скорость жидкости выражается через объемный расход (Q) по формуле $v = 4Q/(\pi d^2)$. Следовательно, формула (3) запишется:

$$E = \frac{4BQ}{\pi d}. \quad (4)$$

Из (4) следует, что ЭДС прямо пропорциональна объемному расходу.

Применение постоянных магнитов в датчиках расхода позволяет облегчить борьбу с помехами от внешних электромагнитных полей, увеличить быстродействие прибора [2]. Основным недостатком расходомеров с постоянным магнитным полем является поляризация электродов, т.е. концентрация у положительного электрода отрицательных ионов, а у отрицательного положительных. Вследствие этого на поверхности электродов создаются потенциалы, образующие ЭДС поляризации, направленную против основной измеряемой ЭДС, что изменяет градуировочную характеристику прибора и делает невозможной его стабильную работу. Поэтому электромагнитные расходомеры с постоянным магнитным полем не применяются для жидкостей с ионной проводимостью. Широкое распространение такие расходомеры получили для измерения расхода расплавленных металлов, в которых отсутствует явление поляризации, а также для измерения расхода пульсирующих потоков.

Для измерения расхода сред с ионной проводимостью применяются расходомеры с переменным магнитным полем, создаваемым электромагнитом. При синусоидально изменяющейся магнитной индукции величина ЭДС определяется формулой (для трубопровода круглого сечения):

$$E = \frac{4B_M Q}{\pi d} \sin(2\pi f \tau),$$

где B_M – амплитудное значение индукции; Q – объемный расход жидкости; f – частота изменения магнитной индукции; d – внутренний диаметр трубопровода; τ – время.

При достаточно высокой частоте f поляризация электродов практически отсутствует [2].

При использовании переменного магнитного поля на результат измерения расхода оказывают влияние следующие факторы [2, 10]:

- паразитные наводки от внешних цепей;
- наводки от переменного тока, запитывающего электромагнит;
- возникновение трансформаторной ЭДС от магнитного поля преобразователя.

Первые два фактора можно устранить путем экранирования датчика.

Для устранения трансформаторной ЭДС могут применяться различные методы [2, 10]. Так, для ослабления влияния трансформаторной ЭДС может применяться схема, представленная на рис. 58. В этой схеме от одного из электродов отходят два провода, симметрично охватывающих трубопровод с обеих сторон и замыкающихся на переменный резистор R . Измерительный прибор подключается к движку этого резистора и второму электроду. При нулевом расходе перемещением движка переменного резистора добиваются минимального сигнала на входе измерительного прибора.

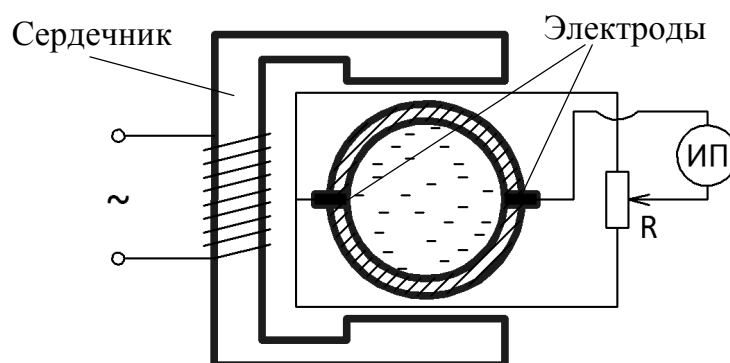


Рис. 58. Принципиальная схема электромагнитного расходомера с переменным магнитным полем

Другим вариантом устранения трансформаторной ЭДС в расходомерах с переменным магнитным полем является использование двух индукционных преобразователей, один из которых предназначен для измерения полезного сигнала, а второй для компенсации трансформаторной ЭДС.

Преимущества электромагнитных расходомеров [2, 10]:

- безынерционность (данное качество является очень важным при измерении быстроменяющихся расходов);
- показания прибора не зависят от вязкости и плотности измеряемой среды, а также от характера потока (ламинарный или турбулентный);
- динамический диапазон таких расходомеров достигает 100 и более;
- электромагнитные расходомеры не создают потери давления, поскольку в их конструкции отсутствуют части, выступающие внутрь трубопровода;
- электромагнитные расходомеры могут применяться для измерения расхода в трубопроводах диаметром от 2 до 4000 мм;
- электромагнитные расходомеры могут быть использованы в ряде случаев, когда применение расходомеров других типов затруднено или невозможно (например, измерение расхода агрессивных, абразивных и вязких жидкостей, пульпы, жидких металлов).

Недостатки электромагнитных расходомеров:

- применимы только для электропроводных жидкостей;
- низкий уровень сигнала на выходе индукционного преобразователя (мкВ) и необходимость тщательной защиты преобразователя и линий связи от внешних помех.

Большинство современных электромагнитных датчиков расхода имеют внешнее магнитное поле. Они выпускаются на диаметры условного прохода 2,5; 5; 10; 15; 25; 32; 40; 50; 80; 100; 150; 200; 300 мм для жидкостей с температурой от -40 до 180 °С и давлением до 4 МПа. Расходомеры работают в диапазоне скоростей потока от 0,1 до 10 м/с, некоторые из расходомеров являются двунаправленными, т.е. могут измерять расход реверсных потоков. Предел основной относительной погрешности электромагнитных расходомеров лежит в диапазоне 0,5–1 % [2].

На рис. 59 приведен внешний вид промышленных расходомеров производства «Sgm lectra» и «Badger».

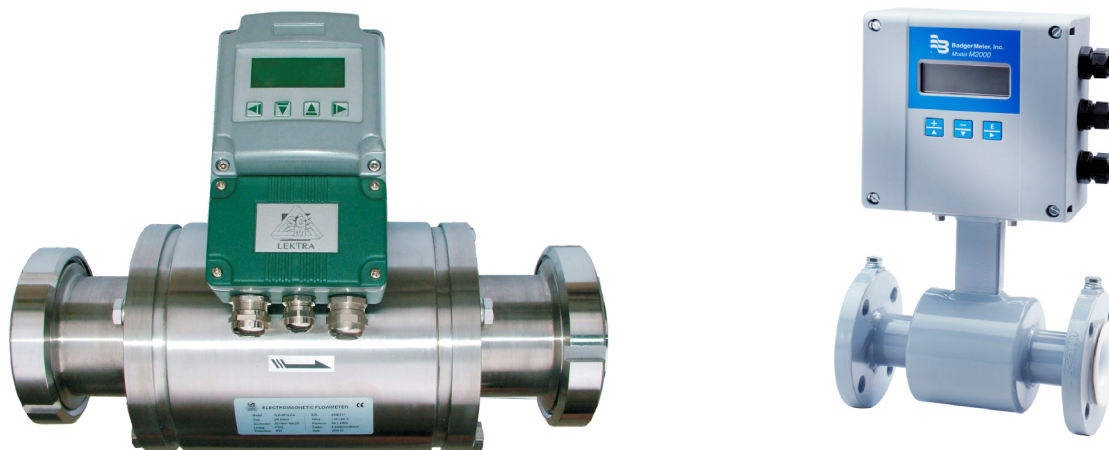


Рис. 59. Промышленные электромагнитные расходомеры производства «Sgm lectra» и «Badger»

2.6. Тепловые расходомеры

Тепловыми называются расходомеры, основанные на измерении зависящего от расхода эффекта теплового воздействия на поток. Расходомеры данного типа применяются преимущественно для измерения расхода газа и реже для измерения расхода жидкости.

Существует много разновидностей тепловых расходомеров, различающихся способом нагрева потока, расположением нагревателя (снаружи или внутри трубопровода) и характером функциональной зависимости между расходом и измеряемым сигналом [4].

Различают следующие способы нагрева потока: омический нагрев с помощью электронагревательного элемента, нагрев с помощью электромагнитного поля, нагрев с помощью жидкостного теплоносителя. Наибольшее распространение получил первый способ (используя электронагревательный элемент).

По характеру теплового взаимодействия с потоком тепловые расходомеры подразделяются на калориметрические и термоконвективные. В калориметрических датчиках расхода нагревательный элемент расположен внутри трубопровода, а у термоконвективных он находится снаружи трубы.

Принцип действия калориметрических и термоконвективных расходомеров основан на нагреве потока газа или жидкости нагревательным элементом и измерении разности температур ΔT до и после нагревателя при постоянной мощности нагрева. Другим вариантом является измерение мощности, потребляемой нагревателем и обеспечивающей постоянную разность температур

$\Delta T = \text{const}$. Различают также термоанемометрические расходомеры, в которых измеряется сопротивление R нагреваемого тела (при постоянной силе тока I) или же сила тока I (при $R = \text{const}$). Преимущественно применяются расходомеры, основанные на измерении разности температур.

На рис. 60, а приведена принципиальная схема теплового расходомера калориметрического типа с внутренним расположением нагревательного элемента и датчиков температуры. Калориметрический расходомер состоит из нагревательного элемента, находящегося внутри трубопровода, и двух датчиков температуры, расположенных до и после нагревателя. Обычно термосенсоры располагаются на равных расстояниях от нагревателя. При отсутствии расхода в трубопроводе ($Q_M=0$) температуры, фиксируемые обоими датчиками, будут равны, т.е. $T_1 = T_2$. При появлении расхода это равенство соблюдаться не будет. При малых скоростях потока T_1 падает вследствие притока холодного вещества сильнее, чем температура T_2 , которая при малых скоростях может даже возрастать. В результате вначале с ростом расхода растет разность температур $\Delta T = T_2 - T_1$ (рис. 60, б). Но при достаточном увеличении расхода Q_M температура T_1 станет постоянной, равной температуре притекающего вещества, в то время как T_2 будет падать. При этом разность температур ΔT будет уменьшаться с увеличением расхода (см. рис. 60, б). Таким образом, рост ΔT при малых значениях Q_M почти пропорционален расходу. Затем этот рост замедляется и после достижения максимума начинается падение ΔT по гиперболическому закону.

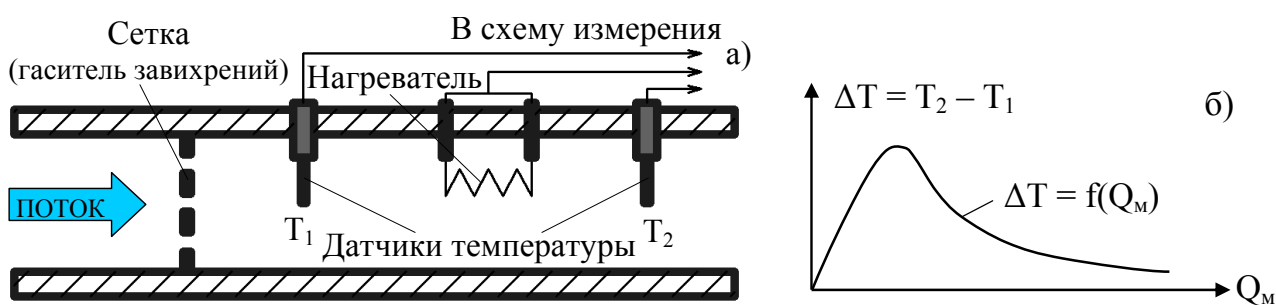


Рис. 60. Принципиальная схема теплового расходомера калориметрического типа (а) и зависимость разности температур ΔT от расхода Q_M при неизменной мощности, подводимой к нагревателю (б)

Следует отметить, что тепловые расходомеры могут работать только с ламинарными потоками при отсутствии каких-либо завихрений. Поэтому в конструкцию таких датчиков часто входят гасители завихрений или сетки [3] (см. рис. 60, а).

Поскольку малые скорости потока встречаются преимущественно в трубах малого диаметра, внутри которых трудно расположить нагревательный элемент, то калориметрические расходомеры с внутренним нагревом работают обычно на нисходящей ветви кривой (см. рис. 60, б). Зависимость между мощностью нагрева и массовым расходом жидкости или газа определяется уравнением теплового баланса [4]:

$$W = kc_p \Delta T Q_m, \quad (5)$$

где W – мощность нагрева; k – поправочный коэффициент, учитывающий потери тепла в окружающую среду и неравномерность распределения температур по сечению трубопровода; Q_m – массовый расход жидкости или газа; c_p – теплоемкость (для газа при постоянном давлении) при температуре $T = (T_1 + T_2)/2$; $\Delta T = T_2 - T_1$ – разница температур.

Из (5) массовый расход запишется $Q_m = W / (kc_p \Delta T)$. Отсюда следует, что при $W = const$ расход Q_m обратно пропорционален ΔT . При этом чувствительность прибора падает с ростом расхода. Если же автоматически поддерживать $\Delta T = const$ путем изменения мощности нагрева W , то между Q_m и W будет прямая пропорциональность, за исключением области малых скоростей. Пропорциональная зависимость между Q_m и W является достоинством данного метода, но устройство расходомера оказывается более сложным. Калориметрические расходомеры подлежат индивидуальной градуировке.

Для измерения температуры потока могут использоваться резистивные, термоэлектрические, полупроводниковые, оптические и др. виды детекторов. Наибольшее распространение получили резистивные датчики, поскольку они обладают хорошей линейностью, воспроизводимостью и долговременной стабильностью в широком температурном диапазоне. При использовании термисторов их рекомендуется подключать по четырехпроводной схеме, что особенно важно при удаленном расположении измерительной схемы. Такой способ подключения позволяет решать проблемы, связанные с дополнительными сопротивлениями соединительных проводов, которые могут быть источниками существенных погрешностей [3].

В термоконвективных расходомерах ни нагреватель, ни термопреобразователи не вводятся внутрь трубопровода, а располагаются снаружи. Это существенно повышает эксплуатационную надежность расходомеров и делает их

удобными для применения. Передача тепла от нагревателя к измеряемому веществу осуществляется через стенку трубы за счет конвекции [4].

Тепловые расходомеры с нагревом электромагнитным полем или жидкостным теплоносителем применяются значительно реже. Достоинство первых – сравнительно малая инерционность. Электромагнитное поле создается у них с помощью излучателей энергии высокой частоты, сверхвысокой частоты или инфракрасного диапазона. Они предназначены в основном для электролитов и диэлектриков, а также агрессивных жидкостей. Расходомеры с жидкостным теплоносителем нашли применение в промышленности при измерении расхода пульпы, их иногда применяют и при измерении расхода газожидкостных потоков [4].

На рис. 61 изображен внешний вид тепловых расходомеров для газа производства «Vögtlin instruments», «Mass flow online bv» и «Teledyne hastings instruments».



Рис. 61. Тепловые газовые расходомеры производства «Vögtlin instruments», «Mass flow online bv» и «Teledyne hastings instruments»

Температурный предел применения тепловых расходомеров обычно не превосходит 150–200 °С и в редких случаях достигает 250 °С. При нагреве электромагнитным полем или жидкостным теплоносителем этот предел повышается до 450 °С. Приведенная погрешность термоконвективных расходомеров обычно лежит в пределах 1,5–3 %. У калориметрических расходомеров она меньше и равна 0,3–1 % [4].

Преимущества тепловых расходомеров:

- высокая точность измерения;
- отсутствие контакта с измеряемым веществом (для термоконвективных расходомеров);
- возможность измерения малых расходов.

Недостатки тепловых расходомеров:

- большая инерционность;
- ограничение по максимальной температуре потока.

2.7. Турбинные расходомеры

В турбинных расходомерах чувствительным элементом является турбина с лопастями («гребное колесо»), вращающаяся за счет контролируемого потока. Принцип действия таких расходомеров основан на измерении скорости вращения турбины, пропорциональной расходу измеряемой среды.

Турбинные расходомеры предназначены для измерения расхода маловязких и средневязких жидкостей (вода, бензин, керосин, дизель, спирты, агрессивные жидкости и т.д.), а также для измерения расхода газа.

Измерение скорости вращения турбины (или числа ее оборотов, что также пропорционально расходу) может осуществляться контактным и бесконтактным методами. При контактном способе турбина непосредственно соединяется со счетчиком оборотов. Бесконтактный способ основан на использовании детекторов, основанных, например, на эффекте Холла. Контактный метод измерения скорости вращения турбины характеризуется энергетическими потерями, что приводит к значительным погрешностям измерения. Бесконтактное измерение скорости снижает энергетические потери [1].

На рис. 62 представлена принципиальная схема расходомера с турбинным ротором [6]. Расходомер включает в себя турбинный ротор, чувствительный элемент для измерения скорости вращения турбины (числа оборотов) и выпрямители потока. Для бесперебойной работы расходомера необходимо отсутствие завихрений в поступающем на турбину потоке. Это обеспечивается наличием специальных элементов – выпрямителей потока (струевыпрямителей).

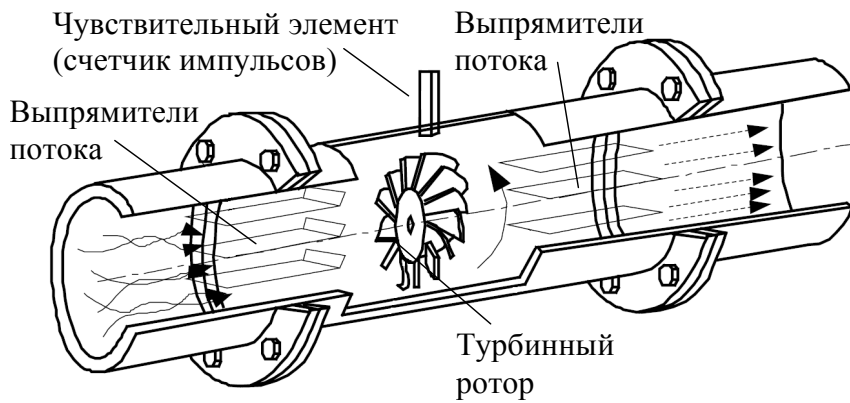


Рис. 62. Принципиальная схема турбинного расходомера

На рис. 63, 64 приведены варианты конструкции расходомеров с гребным колесом. Принцип действия таких устройств следующий. На каждой лопатке колеса располагаются постоянные магниты. При прохождении лопатки с магнитом вблизи датчика Холла он генерирует выходной сигнал (импульс напряжения). Таким образом, частота появления импульсов будет пропорциональна расходу. Сигнал с датчика Холла обрабатывается электронной схемой и может быть приведен к какому-либо стандартному выходному сигналу.

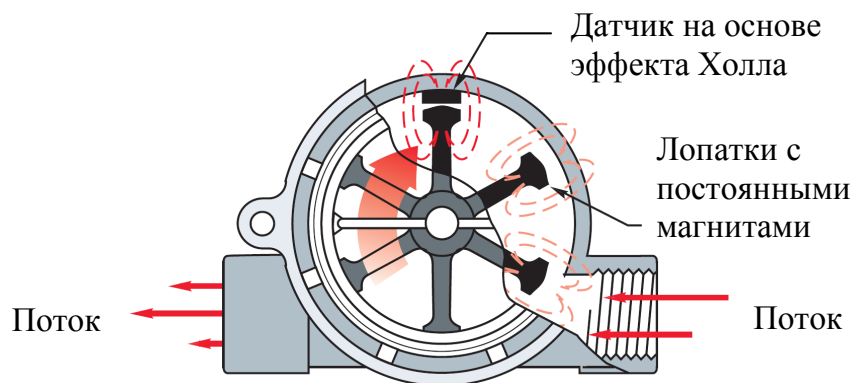


Рис. 63. Принципиальная схема расходомера с гребным колесом

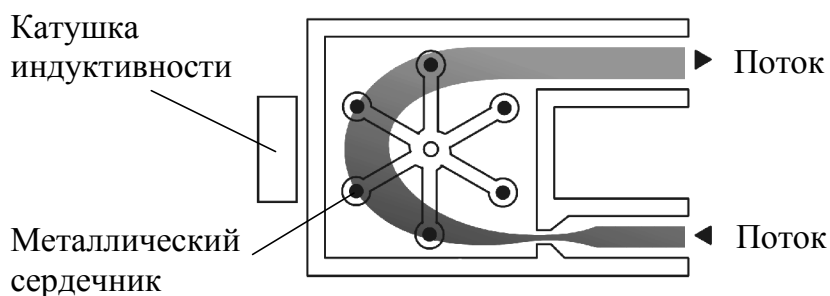


Рис. 64. Еще один вариант конструкции расходомера с гребным колесом

Характеристика таких приборов примерно линейна только в ограниченном диапазоне измерения вследствие наличия трения в подшипниках, нелинейности влияния профиля потока, его завихрений, вязкости среды [1].

На рис. 65 приведен внешний вид турбинного расходомера производства «Faure herman» и расходомера с гребным колесом фирмы «Gems».



Рис. 65. Турбинные расходомеры производства «Faure herman» и «Gems»

Преимущества турбинных расходомеров:

- простота конструкции;
- широкий диапазон измерения;
- малая инерционность;
- практически линейная градуировочная характеристика;
- возможность измерения расхода жидкостей и газов.

Недостатки турбинных расходомеров:

- ограниченный срок службы из-за быстрого изнашивания механических движущихся деталей;
 - существенная зависимость показаний от вязкости измеряемой среды;
 - износ вращающихся деталей датчика может привести к ухудшению метрологических характеристик и снижению срока службы;
 - жесткие условия эксплуатации (загрязненность потока, наличие возмущений в потоке, вибрации) могут стать причиной выхода турбинных датчиков из строя;
 - не применяются для измерения расхода очень вязких веществ.

3. Вопросы для самостоятельной работы

Вопросы к теме «Измерение уровня жидких и сыпучих веществ»

1. Классифицируйте приборы измерения уровня по назначению и способу взаимодействия с технологической средой.
2. Какие факторы следует принимать во внимание при выборе уровнемера?
3. Классифицируйте приборы для непрерывного измерения уровня по принципу действия.
4. Какие приборы относят к сигнализаторам уровня?
5. Поясните принцип действия поплавковых сигнализаторов уровня. Как устроен гравитационный датчик прибора?
6. Назовите область применения, преимущества и недостатки поплавковых сигнализаторов уровня.
7. Поясните устройство и принцип действия магнитных (герконовых) сигнализаторов уровня.
8. Укажите область применения магнитных сигнализаторов уровня.
9. На чем основан принцип действия вибрационных сигнализаторов уровня? Из каких соображений выбирается собственная частота колебаний вибрационной вилки прибора?
10. Для сигнализации предельного уровня каких сред могут применяться вибрационные датчики?
11. Приведите возможные варианты установки вибрационных сигнализаторов уровня на технологический объект.
12. Какими преимуществами обладают вибрационные сигнализаторы уровня? Какие факторы могут служить причиной отказов таких датчиков?
13. Поясните принцип действия и устройство ротационных сигнализаторов уровня. Назовите область применения таких приборов.
14. Для каких сред применимы ротационные сигнализаторы уровня? Какими недостатками обладают такие приборы?
15. Поясните устройство и принцип действия оптического сигнализатора уровня. Для каких сред применимы такие сигнализаторы?
16. Какими преимуществами обладают оптические сигнализаторы? В каких условиях они могут работать?
17. На чем основан принцип действия волоконно-оптических уровнемеров?
18. Поясните принцип действия магнитострикционного датчика уровня. Как устроен магнитострикционный преобразователь прибора?
19. Приведите примеры применения магнитострикционных уровнемеров. Могут ли они применяться для измерения границы раздела фаз? В каких случаях их нельзя применять?
20. На чем основан принцип действия ультразвуковых уровнемеров?
21. Классифицируйте ультразвуковые уровнемеры по принципу действия.
22. Какими способами может осуществляться локация уровня в ультразвуковых уровнемерах?

23. На каком эффекте основан принцип действия микроволновых радарных датчиков уровня? Назовите области применения приборов.
24. Какие технологии измерения уровня применяются в радарных датчиках? Дайте сравнительную характеристику этим технологиям.
25. На какой частоте работают радарные уровнемеры? На какие характеристики прибора влияет используемая частота?
26. Поясните принцип действия радарного уровнемера с технологией FMCW. Какими недостатками он обладает?
27. В каких условиях нежелательно применять радарные уровнемеры с технологией FMCW?
28. Чем вызвано возникновение паразитных эхо-сигналов при применении радарных уровнемеров? Какие существуют способы их устранения?
29. Поясните принцип действия импульсного микроволнового уровнемера. Какими преимуществами он обладает?
30. Какие типы антенн применяются в радарных уровнемерах. Как влияет конструкция и размер антенны на характеристики датчика?
31. Дайте сравнительную характеристику стержневой, рупорной, трубчатой, параболической и планарной антенн.
32. На чем основан принцип действия волноводных (рефлексных) микроволновых уровнемеров? В чем заключается их отличие от радарных датчиков?
33. Приведите примеры применения волноводных микроволновых уровнемеров. Для каких сред они предназначены? Можно ли с их помощью измерять границу раздела жидкостей?
34. В чем заключается технология рефлектометрии с временным разрешением (TDR), применяемая в волноводных микроволновых уровнемерах?
35. Какими преимуществами обладают волноводные микроволновые уровнемеры по сравнению с радарными?
36. Какими типами чувствительных зондов могут снабжаться волноводные микроволновые уровнемеры? Чем руководствуются при выборе подходящего типа зонда?
37. Дайте характеристику существующим чувствительным зондам, применяемым в волноводных микроволновых уровнемерах.
38. Поясните принцип действия и устройство лазерного датчика уровня. Какие технологии измерения уровня в них применяются?
39. Для каких сред применяют лазерные датчики уровня? В каких условиях они могут работать?
40. Назовите области применения непрерывных лазерных датчиков, использующих частотно-модулированную технологию.
41. Каким преимуществом обладают лазерные датчики уровня по сравнению с микроволновыми радарными?
42. Какими недостатками обладают лазерные датчики уровня? Какие существуют способы их устранения?
43. Поясните принцип действия и устройство лотового уровнемера. Для измерения уровня каких сред они применяются?

44. Дайте характеристику лотовым уровнемерам. Какими преимуществами они обладают?
45. На чем основан принцип действия емкостных уровнемеров?
46. Для измерения уровня каких жидкостей могут применяться емкостные датчики?
47. Какие существуют конструкции конденсаторных преобразователей?
48. Какие электроды конденсаторных преобразователей в емкостных уровнемерах используют для неэлектропроводных жидкостей? Как изменится конструкция электродов в случае электропроводных жидкостей?
49. Как устроен емкостный датчик уровня с конденсаторным преобразователем цилиндрического типа?
50. Из каких составляющих складывается емкость конденсаторного датчика?
51. По какой формуле вычисляется суммарная емкость конденсаторного преобразователя цилиндрического типа?
52. Обоснуйте применение в конструкции емкостного уровнемера компенсационного конденсатора.
53. Какие факторы оказывают негативное влияние на работу емкостных уровнемеров? Какие существуют способы их устранения?
54. Какие существуют методы измерения электрической емкости, снимаемой с конденсаторного преобразователя?
55. Поясните принцип работы мостовой схемы для измерения электрической емкости.
56. Приведите преимущества и недостатки емкостных уровнемеров.

Вопросы к теме «Измерение расхода жидкостей и газов»

1. Что понимают под расходом вещества?
2. В каких единицах измеряется расход? Какой бывает расход в зависимости от единиц измерения?
3. Какой прибор называют расходомером?
4. В чем заключается назначение счетчика расхода?
5. Что называют преобразователем расхода?
6. Как выразить объемный расход через массовый?
7. Классифицируйте приборы измерения расхода в зависимости от принципа действия.
8. Какие требования предъявляются к современным датчикам расхода?
9. На чем основан принцип измерения расхода с помощью мишени?
10. Приведите пример устройства расходомера с мишенью. Объясните его принцип действия.
11. Назовите область применения расходомеров с мишенью. В каких условиях они могут применяться?
12. Как осуществляется калибровка расходомеров с мишенью?
13. Поясните принцип действия Кориолисовых расходомеров. На использовании какого эффекта они основаны?
14. Какой расход измеряют расходомеры Кориолиса?

15. Какие различают варианты конструктивного оформления Кориолисовых расходомеров? В чем состоит их отличие?
16. Как устроен расходомер Кориолиса с одной вибрирующей трубкой? Поясните его принцип действия.
17. По какой формуле определяется величина силы Кориолиса?
18. Поясните устройство и принцип действия Кориолисовых расходомеров с двумя сенсорными трубками.
19. Перечислите преимущества расходомеров Кориолиса.
20. На чем основан принцип действия вихревых и вихреакустических расходомеров?
21. Тело обтекания какой формы чаще всего применяют для создания вихрей в вихревых и вихреакустических расходомерах?
22. Какие существуют способы детектирования частоты возникающих в потоке вихрей?
23. В чем заключается отличие вихревых расходомеров от вихреакустических?
24. Как устроен вихреакустический расходомер? Поясните его принцип действия.
25. Поясните устройство двухлучевого преобразователя, применяемого в вихреакустических датчиках расхода. В чем состоит его преимущество по сравнению с однолучевым преобразователем?
26. Для измерения расхода каких сред применимы вихревые и вихреакустические расходомеры?
27. Какие факторы могут повлиять на точность показаний вихревых и вихреакустических расходомеров?
28. На чем основан принцип действия ультразвуковых расходомеров?
29. Классифицируйте ультразвуковые расходомеры в зависимости положенного в их основу эффекта.
30. Какие трудности возникают при изменении расхода ультразвуковым методом?
31. Поясните устройство и принцип действия одноканальных и двухканальных ультразвуковых расходомеров. Дайте им сравнительную характеристику.
32. Поясните принцип работы времяимпульсных, частотных и фазовых ультразвуковых расходомеров.
33. На использовании какого эффекта основана работа доплеровских ультразвуковых расходомеров? В чем он заключается?
34. Как осуществляется калибровка ультразвуковых расходомеров?
35. Назовите преимущества ультразвуковых расходомеров. Какие существуют ограничения их применения?
36. На чем основан принцип действия электромагнитных расходомеров?
37. Для измерения расхода каких сред применяются электромагнитные расходомеры?
38. Какие различают электромагнитные датчики расхода в зависимости от способа создания магнитного поля?
39. Поясните устройство и принцип действия электромагнитного расходомера с постоянным магнитным полем.

40. По какой формуле определяется величина ЭДС электромагнитного расходомера, возникающей в трубопроводе круглого сечения?
41. Какими недостатками обладают расходомеры с постоянным магнитным полем? Где применяются такие расходомеры?
42. Как устроен электромагнитный датчик расхода с переменным магнитным полем? По какой формуле определяется величина возникающей ЭДС для такого прибора?
43. Какие факторы оказывают влияние на результат измерения расходомеров с переменным магнитным полем? Какие существуют способы их устранения?
44. Дайте характеристику электромагнитным расходомерам, перечислите их преимущества и недостатки.
45. На чем основан принцип действия тепловых расходомеров?
46. Для каких сред применимы тепловые датчики расхода?
47. Какие различают тепловые расходомеры в зависимости от характера теплового взаимодействия с потоком?
48. Назовите способы нагрева потока, применяемые в тепловых расходомерах.
49. Поясните устройство и принцип действия теплового расходомера калориметрического типа с внутренним расположением нагревательного элемента.
50. Какой вид имеет зависимость разности температур от расхода в калориметрических расходомерах? По какой формуле определяется зависимость между мощностью нагрева и массовым расходом жидкости?
51. Какие датчики измерения температуры применяются в тепловых расходомерах?
52. Как устроены термоконвективные тепловые расходомеры?
53. В каких случаях применяются тепловые расходомеры с нагревом электромагнитным полем?
54. Какими недостатками обладают тепловые расходомеры?
55. На чем основан принцип действия турбинных расходомеров? Для каких сред они предназначены?
56. Какими способами может осуществляться измерение скорости вращения турбины в турбинных расходомерах?
57. Обоснуйте наличие выпрямителей потока в конструкции турбинных расходомеров.
58. Поясните устройство и принцип действия расходомеров с гребным колесом.
59. Какой градуировочной характеристикой обладают турбинные расходомеры?
60. Назовите факторы, которые могут привести к ухудшению метрологических характеристик турбинных расходомеров?

Библиографический список

1. Шишмарев, В.Ю. Технические измерения и приборы: учебник для вузов / В.Ю. Шишмарев. – М.: Академия, 2010. – 420 с.
2. Иванова, Г.М. Теплотехнические измерения и приборы: учебник для вузов / Г.М. Иванова, Н.Д. Кузнецов, В.С. Чистяков. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Издательство МЭИ, 2005. – 460 с.
3. Фрайден, Дж. Современные датчики: справочник / Дж. Фрайден. – М.: Техносфера, 2005. – 592 с.
4. Кремлевский, П.П. Расходомеры и счетчики количества веществ: справочник в 2 кн. / под общ. ред. Е.А. Шорникова. – 5-е изд., перераб. и доп. – СПб.: Политехника, 2004. – 412 с.
5. Béla G. Lipták. Instrument engineers' handbook. Volume 1. Process measurement and analysis. Fourth edition. – London: CRC Press, 2003. – 1920 p.
6. Modern sensors handbook / Edited by Pavel Ripka, Alois Tipek. – Great Britain: ISTE Ltd, 2007. – 518 p.
7. Sabrie, Soloman. Sensors handbook. Second edition. – USA: McGraw-Hill Pub., 2010. – 1385 p.
8. Вильнина, А.В. Современные методы и средства измерения уровня в химической промышленности: учебное пособие / А.В. Вильнина, А.Д. Вильнин, Е.В. Ефремов; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2011. – 84 с.
9. Чистофорова, Н.В. Технические измерения и приборы: в 2 ч. / Н.В. Чистофорова, А.Г. Колмогоров. – Ангарск, АГТА, 2008. Ч. 1. Измерение теплоэнергетических параметров: учебное пособие для студентов дневной и заочной форм обучения специальности 220301 «Автоматизация технологических процессов и производств». – 2008. – 200 с.
10. Кулаков, М.В. Технологические измерения и приборы для химических производств: учебник для вузов по специальности «Автоматизация и комплексная механизация химико-технологических процессов» / М.В. Кулаков. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1983. – 424с.
11. Преображенский, В.П. Теплотехнические измерения и приборы: учебник для вузов по специальности «Автоматизация теплоэнергетических процес-

сов» / В.П. Преображенский. – 3-е изд., перераб. – М.: Энергия, 1978. – 704 с.

12. <http://rusautomation.ru>
13. <http://www.rospribor.com>
14. <http://росприбор.рф>
15. <http://sensor.ru>
16. <http://www.metran.ru>
17. <http://www.uwt.de>
18. <http://www.greyline.com>

Оглавление

Введение	3
1. Измерение уровня жидких и сыпучих веществ	5
1.1. Поплавковые сигнализаторы уровня	8
1.2. Магнитные сигнализаторы уровня	12
1.3. Вибрационные сигнализаторы уровня	14
1.4. Ротационные сигнализаторы уровня	17
1.5. Оптические и волоконно-оптические сигнализаторы уровня	19
1.6. Магнитострикционные датчики уровня	22
1.7. Ультразвуковые датчики уровня	25
1.8. Микроволновые радарные датчики уровня	28
1.9. Волноводные датчики уровня	34
1.10. Лазерные датчики уровня	38
1.11. Лотовые датчики уровня	41
1.12. Емкостные датчики уровня	43
2. Измерение расхода жидкостей и газов	48
2.1. Расходомеры с мишенями	50
2.2. Кориолисовые расходомеры	53
2.3. Вихревые и вихреакустические расходомеры	57
2.4. Ультразвуковые расходомеры	60
2.5. Электромагнитные расходомеры	65
2.6. Тепловые расходомеры	69
2.7. Турбинные расходомеры	73
3. Вопросы для самостоятельной работы	76
Библиографический список	81

Учебное издание

Невиницын Владимир Юрьевич
Лабутин Александр Николаевич

**СОВРЕМЕННЫЕ ПРИБОРЫ ИЗМЕРЕНИЯ
ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН.
ИЗМЕРЕНИЕ УРОВНЯ И РАСХОДА**

Учебное пособие

Редактор О.А. Соловьева

Подписано в печать 1.09.2014. Формат 60×84 1/16. Бумага писчая.

Усл. печ. л. 4,88. Уч.-изд. л. 5,42. Тираж 50 экз. Заказ _____

ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный
химико-технологический университет»

Отпечатано на полиграфическом оборудовании
кафедры экономики и финансов ФГБОУ ВПО «ИГХТУ»

153000, г. Иваново, Шереметевский пр., 7