

Министерство образования и науки Российской Федерации
Нижекамский химико-технологический институт (филиал)
федерального государственного бюджетного образовательного учреждения
высшего профессионального образования
«Казанский национальный исследовательский технологический университет»

Г.Б. Минигалиев, А.В. Долганов

ВЫБОР ДАТЧИКОВ УРОВНЯ

УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ

**Нижекамск
2015**

УДК 66.0

М62

Печатается по решению редакционно-издательского совета Нижнекамского химико-технологического института (филиала) ФГБОУ ВПО «КНИТУ».

Рецензенты:

Елизаров В.И., доктор технических наук;

Гусев С.Н., эксперт по усовершенствованному управлению
фирмы «Emerson».

Минигалиев, Г.Б.

М 62 Выбор датчиков уровня : учебное пособие / сост.: Г.Б. Минигалиев, А.В. Долганов - Нижнекамск: Нижнекамский химико-технологический институт (филиал) ФГБОУ ВПО «КНИТУ», 2015. – 58 с.

Представлены основные сведения по датчикам уровня. Приведены основные характеристики, принципы действия основных промышленно используемых приборов измерения уровня. Показан алгоритм выбора уровнемеров для конкретного применения по условиям поставленной задачи.

Предназначено для студентов специальностей «Автоматизированные системы обработки информации и управления» и «Автоматизация технологических процессов и производств» всех форм обучения, а также для студентов технологических и механических специальностей при выполнении курсового и дипломного проектирования раздела «Автоматизация технологических процессов»

Подготовлено на кафедре «Автоматизация технологических процессов и производств» Нижнекамского химико-технологического института (филиала) ФГБОУ ВПО «КНИТУ».

УДК 66.0

© Минигалиев Г.Б., Долганов А.В., 2015

© Нижнекамский химико-технологический институт (филиал) ФГБОУ ВПО «КНИТУ», 2015

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	4
1. Постановка задачи	6
2. Измерение уровня (краткая теория)	7
3. Алгоритм выбора датчиков	45
4. Пример выполнения поставленной задачи	49
Задания для самостоятельной работы	53
Заключение	61
Список литературы	62

ВВЕДЕНИЕ

Повышение производительности труда базируется на механизации и автоматизации производства. Рассмотрим подробнее эти понятия — «механизация» и «автоматизация». Что между ними общего и в чем различие?

Механизация — замена ручных средств труда машинами и механизмами. С их помощью человек может поднимать и перемещать тяжелые грузы, резать, ковать и штамповать металл при изготовлении деталей, добывать руду и топливо из недр земли. Но управление этими механизмами осуществляется человеком: он должен постоянно контролировать ход производственного процесса, анализировать его, принимать решения и воздействовать на этот процесс. Например, рабочий при обработке детали на станке должен измерять размеры детали, определять ее качество, т.е. получать информацию путем измерений. В зависимости от результатов измерений рабочий изменяет скорость резания, величину подачи инструмента, т.е. принимает и исполняет решение. Таким образом, при механизации требуется постоянное участие человека во всем ходе производственного процесса.

Автоматизация производственных процессов — применение технических средств и систем управления, освобождающих человека частично или полностью от непосредственного участия в этих процессах. Автоматизация облегчает умственный труд человека, освобождает его от сбора информации, ее обработки, исполнения принятого решения. В системах автоматики получение, передача, преобразование и использование информации осуществляются без непосредственного участия человека.

Для получения информации о ходе производственного процесса применяют датчики — элементы автоматики, преобразующие самые разные физические величины (размеры, температуру, давление, расход, скорость, уровень, влажность и т. д.) в некоторый сигнал, удобный для последующей обработки в автоматическом устройстве или ЭВМ. Затем этот сигнал обрабатывается: сравнивается с другими сигналами, анализируются его изменения.

В результате обработки информационных сигналов вырабатываются исполнительные сигналы, которые и воздействуют на технологический процесс. Эти сигналы в исполнительных элементах автоматики преобразуются в механическое воздействие, перемещающее деталь или инструмент, закрывающее или открывающее кран, включающее или отключающее нагревательную установку и т. п. Так как это воздействие требует значительной энергии, то обработка информационных сигналов предусматривает, как правило, их усиление.

Таким образом, системы автоматики состоят из датчиков, усилительно-преобразовательных и исполнительных элементов.

Наиболее универсальным и удобным для систем автоматики оказался электрический сигнал. По сравнению с другими (пневматическими или гидравлическими) электрический сигнал имеет следующие преимущества:

- 1) электрический сигнал можно передавать на большие расстояния;
- 2) энергию электрического сигнала можно преобразовывать в другие виды энергии, прежде всего, в механическую и тепловую, необходимые на любом производстве;
- 3) электрический сигнал можно обрабатывать, в том числе усиливать, с помощью простых технических средств.

Именно поэтому наибольшее распространение получили электрические системы автоматики, т.е. использующие именно электрический сигнал.

С применением электрических элементов автоматики мы постоянно сталкиваемся в быту: датчики температуры в холодильнике и утюге; переключатели и реле в электрофоне, магнитофоне; потенциометрические, индуктивные и емкостные датчики для настройки радиоприемника и телевизора. Насыщенность же современного производства элементами автоматики во много раз выше. Уже действуют цехи, где нет ни одного рабочего, а всеми механизмами управляют элементы автоматики.

В нашей стране создана Государственная система приборов и средств автоматизации (ГСП), в которую входят тысячи самых разнообразных элементов. С их помощью может быть построена практически любая система автоматики. Естественно, что элементы, входящие в ГСП, непрерывно совершенствуются, а состав системы расширяется.

Уровень является одним из основных параметров, который контролируется практически на каждом производстве, параметр является инерционным и быстроизменяющимся, что требует внимательного подбора средств измерения.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Целью данной работы является выбор датчиков уровня.

Исходными данными для работы являются: измеряемый уровень, место установки в аппарате, требуемая точность измерения, динамические характеристики объекта измерения, среда измерения и условия измерения (влияющие величины).

Например:

требуется измерить уровень жидкости со следующими параметрами.

Таблица 1

Параметры жидкости

Уровень, мм	Рабочая температура, °С	Абсолютная погрешность измерения, единицы измерения	Характеристики среды измерения: наименование, давление, Мпа, агрегатное состояние
1200	76	0,5	аммиак, 0,4 газ

Обычно при проектировании накладываются более жесткие ограничения на влияющие величины и параметры измерения, такие как минимальная и максимальная рабочие температуры измерения, минимальные и максимальные рабочие и предельные давления в аппарате, минимальные и максимальные запаздывания в измерительной системе и т.д.

В данной работе жестких ограничений нет, поэтому вариантов выбора прибора измерения уровня несколько больше, и возможен более гибкий подход к решению задачи.

Общая рекомендация: многовариантное решение задачи и анализ целесообразности применения того или иного решения.

2. ИЗМЕРЕНИЕ УРОВНЯ (КРАТКАЯ ТЕОРИЯ)

Измерение уровня жидкостей играет важную роль при автоматизации технологических процессов, особенно при поддержании уровня связано с уровнями безопасной работы оборудования. Уровнемеры могут использоваться либо для контроля отклонения уровня от номинального, и в этом случае они имеют двустороннюю шкалу, либо для определения количества жидкости (в сочетании с известными размерами емкости), и в этом случае они имеют одностороннюю шкалу. В зависимости от условий измерения, характера контролируемой среды используются различные методы измерения уровня. Если нет необходимости в дистанционной передаче показаний, уровень жидкости можно измерять уровнемерами с визуальным отсчетом (указательных стекол). При необходимости дистанционного измерения уровня используются более сложные уровнемеры: гидростатические (дифманометрические и барботажные), буйковые и поплавковые, емкостные, индуктивные, радиоизотопные, волновые, акустические, термокондуктометрические. Некоторые разновидности этих уровнемеров рассматриваются ниже.

2.1. Уровнемеры с визуальным отсчетом

Такие уровнемеры основаны на визуальном измерении высоты уровня жидкости. При невысоких давлениях среды высота уровня измеряется в стеклянной трубке (указательном стекле), сообщающейся с жидкостным и газовым пространствами контролируемого резервуара (рис. 1). При повышенных давлениях применяются плоские стекла, на поверхности которых со стороны жидкости нанесены вертикальные граненые канавки. Из условий прочности не рекомендуется применять указательные стекла длиной более 0,5 м, поэтому при большом диапазоне изменения уровня устанавливается несколько стекол в шахматном порядке таким образом, чтобы их диапазоны измерения перекрывались.

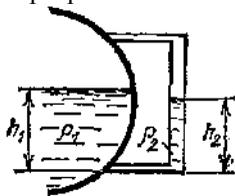


Рис. 1. Схема уровнемера с визуальным отсчетом

Основным источником дополнительной погрешности таких уровнемеров является разница плотностей жидкости в контролируемом резервуаре и в стекле, вызываемая различием температур (особенно, если жидкость в резер-

вуаре находится при высокой температуре, а указательное стекло находится на значительном удалении). Различие плотностей приводит к различию уровней в резервуаре и указательном стекле (уровень в стекле иногда называют «весовым» уровнем); при этом абсолютная погрешность измерения может быть вычислена по формуле

$$\Delta h = h_2 - h_1 = h_2 \cdot \left(1 - \frac{\rho_2}{\rho_1} \right),$$

где ρ_1 и ρ_2 — плотности жидкости в резервуаре и указательном стекле.

Погрешность может достигать существенных значений, поэтому с целью ее уменьшения необходима либо тепловая изоляция уровнемера, либо продувка его жидкостью из резервуара перед отсчетом.

2.2. Гидростатические уровнемеры

В этих уровнемерах измерение уровня H жидкости постоянной плотности ρ сводится к измерению гидростатического давления p , создаваемого жидкостью, причем

$$p = H \cdot \rho \cdot g \tag{1}$$

Гидростатический уровнемер, в котором гидростатическое давление жидкости измеряется дифманометром, называется дифманометрическим.

Гидростатический уровнемер, в котором гидростатическое давление жидкости преобразуется в давление воздуха, называется пневмоуровнемером. Разновидностью пневмоуровнемера является барботажный уровнемер, в котором воздух, подаваемый от постороннего источника, барботирует через слой жидкости.

Дифманометрические уровнемеры. Схема подключения дифманометра к открытому резервуару, находящемуся под атмосферным давлением, изображена на рис. 2. Обе импульсные трубки дифманометра заполняются контролируемой жидкостью (если она не агрессивна). Дифманометр измеряет разность давлений p_1 и p_2 , действующих на его чувствительный элемент. В соответствии с (1) можно записать выражения для этих давлений; $p_1 = (H + h_1) \cdot \rho_1 \cdot g$; $p_2 = h_2 \cdot \rho_2 \cdot g$. Таким образом, дифманометр будет измерять перепад давлений, выражающийся через контролируемый уровень H

$$\Delta p = p_1 - p_2 = (H + h_1) \cdot \rho_1 \cdot g - h_2 \cdot \rho_2 \cdot g \tag{2}$$

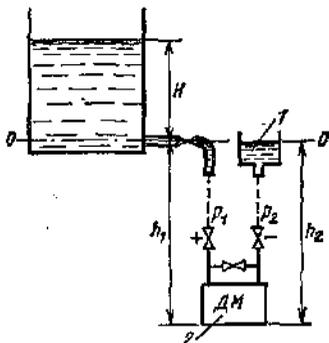


Рис. 2. Схема подключения дифманометра при измерении уровня в открытом резервуаре

Если плотности ρ_1 и ρ_2 жидкости в обеих импульсных трубках одинаковы, и если $h_1 = h_2$, то:

$$\Delta p = H \cdot \rho \cdot g \quad (3)$$

где $\rho = \rho_1 = \rho_2$

Из (2) и (3) видно, что дифманометрический уровнемер измеряет «весовой» уровень, т.е. его показания будут изменяться при изменении плотности контролируемой среды. Погрешность в показаниях появится также, если имеется разность плотностей ρ_1 и ρ_2 в импульсных трубках (для исключения этой погрешности импульсные трубки прокладываются рядом). Наконец, формула (3) справедлива только в том случае, если уровень жидкости в «минусовой» импульсной трубке (обозначенной знаком «—») будет неизменным при изменении контролируемого уровня H .

Для обеспечения этого на этой импульсной трубке устанавливается уравнивательный сосуд. Сосуд и импульсная трубка заливаются жидкостью до уровня 00, принятого за начальную отметку шкалы уровнемера. Необходимость установки уравнивательного сосуда легко пояснить по рис. 3, на котором изображена схема уровнемера без уравнивательного сосуда. Предположим, что при нулевом значении измеряемого уровня H уровень жидкости в минусовой импульсной трубке соответствует линии 00 (очевидно, что убрать минусовую импульсную трубку и просто соединить минусовую камеру дифманометра с атмосферой нецелесообразно, так как в этом случае при $H=0$ на дифманометр будет действовать перепад $\Delta p = h_1 \cdot \rho \cdot g$, т.е. диапазон измерения дифманометра будет использован неполностью).

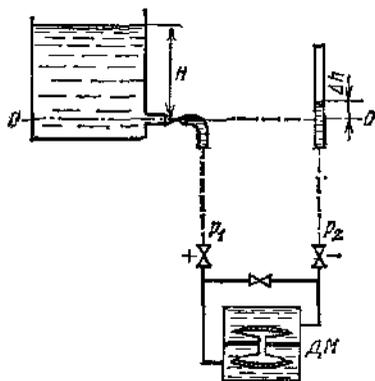


Рис. 3. Схема образования погрешности при отсутствии уравнивающего сосуда

При увеличении H будет увеличиваться давление p_1 в плюсовой (нижней) камере дифманометра, что вызовет сжатие плюсовой (нижней на рис. 3) мембранной коробки. В соответствии с принципом действия дифманометра, это приведет к расширению и увеличению объема мембранной коробки в минусовой (верхней на рис. 3) камере (изменение объема коробок на рис. 3 заштриховано). Очевидно, что такой же объем жидкости будет вытолкнут из верхней камеры в импульсную линию, что приведет к увеличению уровня в ней на Δh .

При этом перепад, действующий на дифманометр,

$$\Delta p' = (H - \Delta h) \cdot \rho \cdot g$$

Поскольку $\Delta p' = \Delta p$ (3), показания уровнемера будут заниженными, причем абсолютная погрешность измерения увеличивается с увеличением контролируемого уровня H .

Установкой уравнивающего сосуда большого диаметра можно уменьшить Δh , так как один и тот же объем жидкости, вытолкнутой из минусовой камеры дифманометра, в широком сосуде вызовет меньшее изменение уровня, чем в тонкой импульсной трубке.

В случае измерения уровня агрессивной жидкости на импульсных линиях устанавливаются разделительные устройства. При этом дифманометр и импульсные трубки ниже разделительных устройств заполняются неагрессивной жидкостью.

Простейшей схемой измерения уровня жидкости в резервуаре под давлением является представленная на рис. 4 схема измерения уровня в барабане котла с использованием однокамерного уравнивающего сосуда.

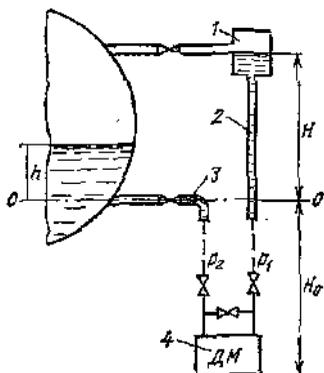


Рис. 4. Схема уровнемера с однокамерным уравнительным сосудом

Уравнительный сосуд 1 подсоединяется к паровому пространству, причем и сосуд и труба 2 тепловой изоляцией не покрываются. Трубка 3 непосредственно подключается к водяному пространству барабана. Выражение для разности давлений Δp , измеряемой дифманометром 4, может быть легко получено через давления, создаваемые в плюсовой p_1 и минусовой p_2 камерах дифманометра:

$$p_1 = (H + H_0) \cdot \rho_v \cdot g,$$

где ρ_v — плотность воды в уравнительном сосуде и импульсной трубке 2.

Давление p_2 представляет собой сумму гидростатических давлений столба жидкости h в барабане, имеющего плотность ρ' , столба жидкости H_0 в импульсной трубке 3 плотностью ρ_v и столба пара в барабане высотой $H - h$ и плотностью ρ'' :

$$p_2 = H_0 \cdot \rho_v \cdot g + h \cdot \rho' \cdot g + (H - h) \cdot \rho'' \cdot g$$

Таким образом, перепад Δp , действующий на дифманометр, будет определяться выражением

$$\begin{aligned} \Delta p &= p_1 - p_2 = [H \cdot \rho_v - h \cdot \rho' - (H - h) \cdot \rho''] = \\ &= [H \cdot (\rho_v - \rho'') - h \cdot (\rho' - \rho'')] \cdot g \end{aligned} \quad (4)$$

Из (4) легко заметить, что показания уровнемера зависят не только от текущего значения H , но и от плотностей воды ρ' и пара ρ'' , которые, в свою очередь, зависят от температуры и давления среды в барабане. Поэтому расчет шкалы дифманометров-уровнемеров производят на рабочее (номинальное) давление в барабане. Кроме того, на результат измерения будет ока-

зывать влияние изменения плотности воды ρ_v в импульсной трубке, так как при этом изменяется гидростатическое давление столба высотой H в импульсной трубке 2, в то время как давление p_1 должно оставаться постоянным. Это может происходить при изменении температуры окружающей среды или температуры среды в барабане.

На рис. 5 представлены графики, иллюстрирующие изменение показаний уровнемера при отклонении давления пара в барабане от расчетного значения 16 МПа при температуре воды в трубке 2 (рис. 4) равной 20° С.

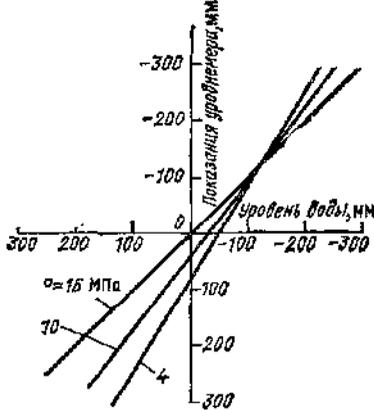


Рис. 5. Изменение показаний уровнемера с однокамерным уравнительным сосудом при изменении давления в барабане

Уровнемер измеряет отклонение уровня в барабане от номинального в интервале ± 315 мм, следовательно, номинальный уровень на рис. 5 соответствует отметке 0. Из графика видно, что изменение параметров среды в барабане существенно искажает показания уровнемера, причем эта погрешность зависит от текущего значения уровня. Минимальное влияние отклонения параметров уровнемер будет испытывать при уровне, соответствующем точке пересечения линий, но этот уровень ниже номинального. Очевидно, что отклонение температуры окружающей среды от расчетной (20° С) вызывает изменение ρ_v и показаний уровнемера. Уменьшение влияния изменения ρ_v на показания уровнемера может быть достигнуто использованием двухкамерного уравнительного сосуда (рис. 6). Внешняя поверхность уравнительного сосуда 1 покрыта тепловой изоляцией, для того чтобы плотность воды в нем и во внутренней трубке 2, соединенной с водяным пространством барабана, была равна плотности воды в барабане, что обусловит равенство уровня воды h в трубке 2 и действительного уровня воды в барабане h_d . Для такой

схемы выражение для перепада давления, действующего на дифманометр 3, имеет вид:

$$\begin{aligned} \Delta p &= H \cdot \rho' \cdot g - [h \cdot \rho' \cdot g + (H - h) \cdot \rho'' \cdot g] = \\ &= (H - h) \cdot (\rho' - \rho'') \cdot g \end{aligned} \quad (5)$$

где ρ' и ρ'' — плотности воды и пара в барабане.

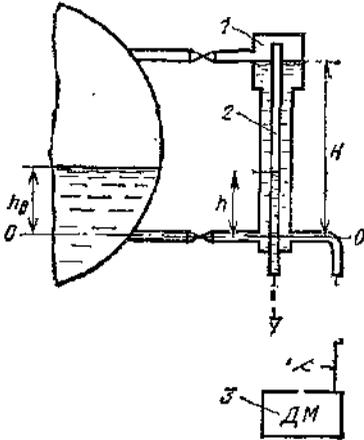


Рис. 6. Схема уровнемера с двухкамерным уравнительным сосудом

Таким образом, и при использовании такой схемы показания уровнемера зависят от разности плотностей воды и пара $\rho' - \rho''$, которая определяется режимом работы установки.

На рис. 7 представлены графики, характеризующие изменение показаний такого уровнемера при отклонении давления в барабане от расчетного давления 10 МПа. Погрешность уровнемера с двухкамерным уравнительным сосудом, как и с однокамерным, зависит от текущего значения уровня. При определенном его значении, соответствующем точке пересечения линий на рис. 7, изменения давления не сказываются на показаниях уровнемера. Это — значение уровня выше номинального (для схемы рис. 4 оно было ниже номинального). В эксплуатации удобно использовать уровнемер, имеющий минимальную погрешность от изменения давления при номинальном уровне в барабане (т.е. уровне, соответствующем точке 0 на рис. 5, 7). Для такого уровнемера линии, характеризующие зависимость показаний от уровня при различных давлениях (линии на рис. 5; 7), должны пересекаться в начале координат.

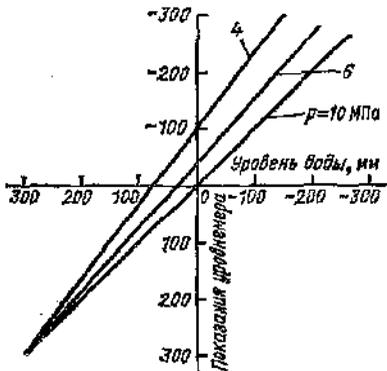


Рис. 7. Изменение показаний уровнера с двухкамерным уравнительным сосудом при изменении давления в барабане

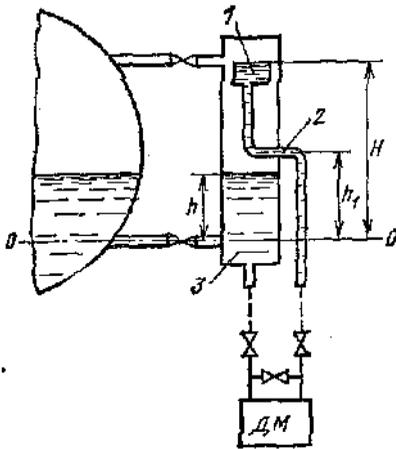


Рис. 8. Схема уровнера с комбинированным уравнительным сосудом

Такие характеристики имеют уровнеры с комбинированными уравнительными сосудами (рис. 8).

Этот сосуд отличается от двухкамерного сосуда тем, что импульсная трубка 2 от уравнительного сосуда 1 проходит не через весь сосуд 3, а выведена сбоку; таким образом, столб воды высотой h_1 находится в холодном состоянии, так как трубка 2 не изолируется. Внешняя поверхность самого сосуда покрыта тепловой изоляцией. В этом случае перепад давления Δp , действующий на дифманометр, определяется выражением:

$$\begin{aligned} \Delta p &= [(H - h_1) \cdot \rho' + h_1 \cdot \rho_B] \cdot g - [h \cdot \rho' + (H - h) \cdot \rho''] \cdot g = \\ &= [(H - h) \cdot (\rho' - \rho'') + h_1 \cdot (\rho_B - \rho')] \cdot g \end{aligned} \quad (6)$$

где ρ_B — плотность воды в трубке 2 на участке h_1 .

Из (6) видно, что на зависимость $\Delta p = f(H)$ влияет значение h_1 .

Рекомендуется значение h_1 выбирать из соотношения

$$h_1 = 1,222 \cdot (H - h_{cp}),$$

где h_{cp} — номинальный уровень в барабане относительно нулевой линии 00 (рис. 8).

На рис. 9 h_{cp} соответствует отметке шкалы 0.

На рис. 9 приведены графики зависимости показаний уровнемера с комбинированным уравнильным сосудом от значений уровня при расчетном давлении в барабане 16 МПа и при давлении 10 и 4 МПа. Как следует из графиков, минимальное влияние изменение давления оказывает практически при номинальном уровне.

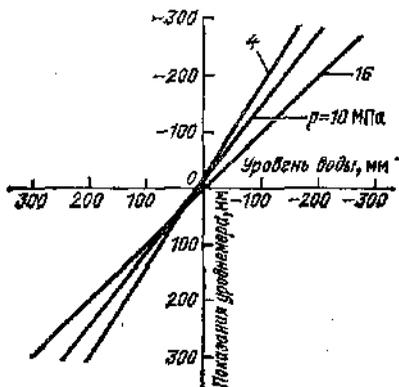


Рис. 9. Изменение показаний уровнемера с комбинированным уравнильным сосудом при изменении давления в барабане

Следует отметить, что в схемах с двухкамерными уравнильными сосудами важное значение имеет обеспечение равенства температур в барабане и сосуде. При любом изменении температуры в сосуде относительно барабана появится дополнительная погрешность, так как будет нарушено основное требование к уравнильным сосудам — стабилизация гидростатического давления в одной из камер дифманометра.

Все три рассмотренные схемы уровнемеров не обеспечивают независимости показаний от изменения давления при любом текущем значении контролируемого уровня.

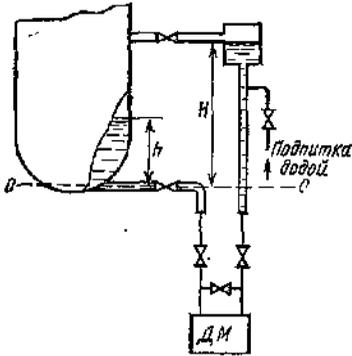


Рис. 10. Схема измерения уровня конденсата греющего пара в подогревателях

Все рассмотренные схемы подключения дифманометров-уровнемеров могут использоваться для измерения уровня жидкостей в объектах электростанций или промышленных предприятий. Конкретная схема измерения определяется условиями работы объекта и необходимой точностью измерения уровня. Так, при измерении уровня в подогревателях питательной или сетевой воды электростанций обычно используются однокамерные уравнительные сосуды (рис. 10). Перепад давления, действующий на дифманометр, определяется выражением

$$\Delta p = [H \cdot \rho_{\text{в}} - h \cdot \rho' - (H - h) \cdot \rho''] \cdot g$$

или

$$\Delta p = [H \cdot (\rho_{\text{в}} - \rho'') - h \cdot (\rho' - \rho'')] \cdot g,$$

где $\rho_{\text{в}}$, ρ' и ρ'' — плотности воды в плюсовой импульсной трубке, конденсата и пара.

Схема измерения уровня в конденсаторе турбины представлена на рис. 11. В схеме показан однокамерный уравнительный сосуд 7, посредством трубки 2 соединенный с паровым пространством конденсатора 3. Для того чтобы испарение воды в сосуде 1 не приводило к уменьшению уровня, а также для стабилизации температуры воды в плюсовой импульсной трубке, в нее непрерывно по трубе 4 через ограничительную диафрагму 5 подается конденсат из напорной линии конденсатного насоса. Избыток конденсата стекает по напорной линии 2 в конденсатор. Трубка 6 присоединена к всасывающей

трубе конденсатного насоса, уровень h в этой трубке соответствует измеряемому уровню.

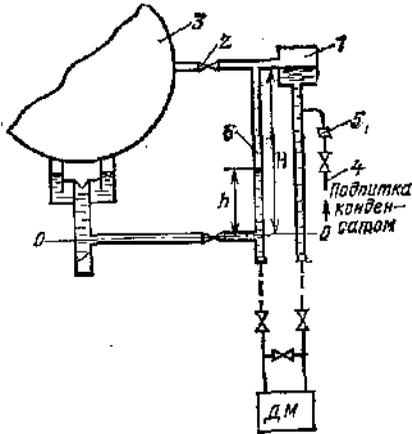


Рис. 11. Схема измерения уровня воды в конденсаторе турбины

Перепад Δp , действующий на дифманометр, определяется выражением $\Delta p = [H \cdot \rho' - h \cdot \rho - (H - h) \cdot \rho''] \cdot g = (H - h) \cdot (\rho' - \rho'') \cdot g$. Поскольку при давлении в конденсаторе $\rho' \gg \rho''$, выражение для перепада давления упрощается: $\Delta p = (H - h) \cdot \rho' \cdot g$. Дифманометры в качестве измерителей уровня нашли применение также и в криогенной технике для измерения уровня низкокипящих сред. Особенностью подключения дифманометров-уровнемеров к емкостям является отсутствие уравнивающих сосудов (рис. 12). Импульсные трубки выводятся из газовой полости и части, заполненной жидкостью, причем последняя выводится горизонтально для исключения возможного влияния столба жидкости в трубке. Если нижняя импульсная трубка будет заполнена жидкостью, то при ее испарении порциями возможно колебание давления в измерительной схеме. Во избежание этого отбор давления осуществляется из специального колпачкового устройства 1. В этом случае жидкость (за счет притока теплоты по импульсной трубке) испаряется в полость под колпачком, что исключает пульсацию давления.

В тех случаях, когда разность температур между контролируемой средой и средой, окружающей резервуар, меньше 50°C , для уменьшения пульсации давления в плюсовой импульсной трубке на ней вблизи резервуара устанавливается тепловая рубашка 2, в которую подается теплая среда. Этим обеспечивается надежное испарение жидкости в пространство под колпачком.

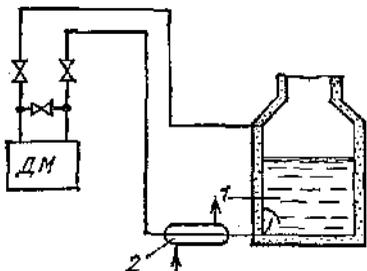


Рис. 12. Схема измерения уровня низкокипящих сред дифманометром

Метод измерения уровня дифманометрами обладает рядом достоинств. Такие уровнемеры отличаются механической прочностью, простотой монтажа, надежностью. Но им присущ один существенный недостаток: чувствительный элемент дифманометров находится в непосредственном контакте с контролируемой средой. При измерении уровня агрессивных сред это вызывает необходимость либо использования специальных материалов для дифманометров, либо применения схем подключения дифманометров, не допускающих попадания активных сред в дифманометр, например, включения в импульсные линии разделительных устройств, продувка импульсных линий чистой водой и т.д.

От этого недостатка свободен один из типов гидростатических уровнемеров — барботажный пневмоуровнемер.

2.3. Поплавковые и буйковые уровнемеры

Поплавковым называется уровнемер, основанный на измерении положения поплавка, частично погружаемого в жидкость, причем степень погружения поплавка (осадка) при неизменной плотности жидкости неизменна. Об уровне судят по положению указателя, соединенного с поплавком гибкой (лента, трос) или жесткой механической связью. Поплавок перемещается вертикально вместе с уровнем жидкости, и, следовательно, по его положению может быть определено значение уровня. При движении поплавок на него действуют следующие силы: сила тяжести поплавка G , выталкивающая сила газовой и жидкой фаз, силы сопротивления P_c в подвижных элементах уровнемера. Поплавковые уровнемеры используются для измерения уровня в резервуарах при невысоком избыточном давлении, поэтому выталкивающей силой газовой фазы на поплавок можно пренебречь. В этом случае силы, действующие на поплавок, связаны соотношением $G \pm P_c = V_{\text{ж}} \cdot \rho_{\text{ж}} \cdot g$, где $V_{\text{ж}}$ — объем погруженной части поплавка; $\rho_{\text{ж}}$ — плотность жидкости.

Сила сопротивления P_c направлена против движения поплавка и поэтому изменяет знак при изменении направления движения. Из последнего уравнения можно получить выражение

$$V_{\text{ж}} = \frac{G \pm P_c}{\rho_{\text{ж}} \cdot g} \quad (7)$$

Объем $V_{\text{ж}}$ однозначно определяет осадку (глубину погружения) поплавка. При изменении плотности контролируемой жидкости на $\Delta\rho_{\text{ж}}$ изменяется объем погруженной части на $\Delta V_{\text{ж}}$ что приводит к изменению осадки, т.е. к появлению дополнительной погрешности. Из (7) можно получить выражение для $\Delta V_{\text{ж}}$ в виде:

$$\Delta V_{\text{ж}} = \frac{\partial V_{\text{ж}}}{\partial \rho_{\text{ж}}} \cdot \Delta \rho_{\text{ж}} = -V_{\text{ж}} \cdot \frac{\Delta \rho_{\text{ж}}}{\rho_{\text{ж}}}$$

Таким образом, объем погруженной части $V_{\text{ж}}$, а, следовательно, осадка поплавка, является параметром, определяющим дополнительную погрешность, вызванную изменением плотности контролируемой жидкости. Для уменьшения этой погрешности целесообразно уменьшение осадки поплавка, что может быть достигнуто либо увеличением площади поперечного сечения поплавка, либо уменьшением сил P_c , либо облегчением поплавка.

Размеры поплавка ограничиваются размерами уровнемера, масса поплавка не может быть сильно уменьшена из-за необходимости обеспечения требуемого натяжения гибкого элемента и преодоления сил трения. Значение сил сопротивления определяется выбором схемы связи поплавка с измерительной схемой уровнемера.

Наибольшее распространение получили уровнемеры с механической связью поплавка с измерительной схемой, причем эта связь может быть образована как гибкими элементами (тросом, лентой), так и жесткими (рычагом, рейкой). Использование гибких элементов практически исключено в уровнемерах для сосудов под давлением из-за сложности герметизации выводов. Герметизация проще обеспечивается в рычажных уровнемерах, однако их недостатком является небольшой диапазон измерения — до нескольких десятков сантиметров (при гибкой связи диапазон измерения достигает 12 м).

Некоторое распространение имеют уровнемеры с немеханической связью поплавка с измерительной схемой. Например, поплавок может нести ампулу с радиоактивным изотопом, а установленный в верхней части сосуда детектор регистрирует интенсивность излучения, пропорциональную удалению поплавка от детектора. В других конструкциях поплавков может нести пере-

мычку, закорачивающую по мере изменения уровня две параллельные струны из высокоомного материала, расположенные по высоте сосуда. Возможен также индуктивный способ определения положения поплавка. В таких уровнемерах поплавок несет какой-либо элемент, который может изменить индуктивность длинной катушки, расположенной по оси сосуда. Выходным сигналом является индуктивность катушки, которая определенным образом связана с положением поплавка, т.е. со значением уровня. Диапазон измерения индуктивных поплавковых уровнемеров может быть увеличен использованием дискретных схем. В этом случае используется ряд малых по высоте катушек, расположенных в изолированной от жидкости трубе. Перемещаясь вдоль этой трубы, поплавок будет изменять индуктивность той катушки, рядом с которой он находится, что фиксируется измерительной схемой.

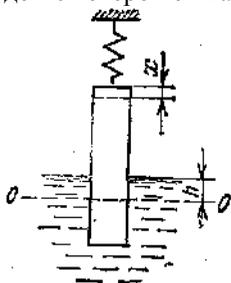


Рис. 13. Расчетная схема буйкового уровнемера

Поплавковые уровнемеры обладают определенными достоинствами: простотой устройства, большим диапазоном измерения, достаточно высокой точностью, возможностью измерения уровня агрессивных и вязких сред, широким температурным диапазоном измерения. Недостатки, ограничивающие их применение: наличие поплавка в резервуаре, трудности измерения уровня в резервуарах под давлением.

Буйковыми называются уровнемеры, основанные на законе Архимеда: зависимости выталкивающей силы, действующей на буйек, от уровня жидкости. Чувствительным элементом таких уровнемеров является массивное тело (например, цилиндр) — буйек, подвешенное вертикально внутри сосуда и частично погруженное в контролируемую жидкость (рис. 13). Буйек закреплен на упругой подвеске с жесткостью c , действующей на буйек с определенным усилием (на рис. 13 таким элементом является пружина). При увеличении уровня на h от нулевого положения 00 увеличится выталкивающая сила, что вызовет подъем буйка на X , причем при подъеме его увеличивается осадка, т.е. $X < h$. При этом изменяется усилие, с которым подвеска действует на буйек, причем изменение равно изменению выталкивающей силы, вызванной увеличением осадки буйка на $(h - X)$:

$$x \cdot c = (h - x) \cdot \rho_{\text{ж}} \cdot g \cdot F - (h - x) \cdot \rho_{\text{г}} \cdot g \cdot F,$$

где c — жесткость подвески; $\rho_{\text{ж}}$, $\rho_{\text{г}}$ — плотность жидкости и газа; F — площадь поперечного сечения буйка.

Отсюда легко получить выражение для статической характеристики буйкового уровнемера;

$$x = \frac{h}{\left[1 + \frac{c}{(\rho_{\text{ж}} - \rho_{\text{г}}) \cdot g \cdot F} \right]} \quad (8)$$

Таким образом, статическая характеристика буйкового уровнемера линейна, причем чувствительность его может быть увеличена увеличением F или уменьшением жесткости подвески c .

Из (8) легко установить, что при использовании конкретного уровнемера дополнительные погрешности могут возникнуть за счет изменения величин c , F , $(\rho_{\text{ж}} - \rho_{\text{г}})$. Причиной изменения этих величин является изменение температуры и давления в сосуде, при этом наибольшей является погрешность, вызванная изменением $(\rho_{\text{ж}} - \rho_{\text{г}})$.

На рис. 14 изображена схема уровнемера с торсионной подвеской и пневматическим выходом.

Бук 1 подвешен на рычаге 2 , закрепленном на призматической подушке 3 , которая опирается на ножевую опору 4 . К подушке жестко прикреплен конец торсионной трубки 5 , второй конец которой посредством фланца 6 жестко и герметично крепится на кронштейне 7 , представляющем собой часть корпуса уровнемера. Таким образом, конец 6 трубки неподвижен, другой конец может поворачиваться вместе с подушкой 3 . Внутри трубки пропущен жесткий стержень 8 , приваренный к подушке 3 . На свободном конце стержня находятся заслонка 9 пневмопреобразователя. При изменении уровня происходит поворот подушки 3 вместе с закрепленным на ней концом торсионной трубки 5 , при этом изменяется усилие, с которым трубка воздействует на бук. Одновременно с поворотом подушки 3 поворачивается заслонка 9 , изменяется зазор между ней и соплом 10 , что приводит к изменению давления на входе и выходе пневмоусилителя и изменению показаний измерительного прибора $МП$.

Основная погрешность такого уровнемера колеблется в пределах 1-1,5%. Кроме описанной схемы буйкового уровнемера существуют другие разновидности. В частности, выпускаются уровнемеры УБ-Эл, УБ-П соответственно с электрическим и пневматическим унифицированными выходными сигналами, основанные на принципе силовой компенсации. Эти преобразователи выпускаются классов 1 и 1,5 с диапазонами измерения 0-0,04 и 0-16 м.

Существуют буйковые уровнемеры, в которых буюк несет сердечник дифференциально-трансформаторного передающего преобразователя. Очевидно, что в таких уровнемерах максимальное перемещение буйка должно быть равно номинальному перемещению сердечника. Буйковые уровнемеры могут использоваться как для измерения уровня сжиженных газов с большой плотностью (азота, неона и др.), так и для контроля сред при давлении до 32 МПа и температуре до +400° С.

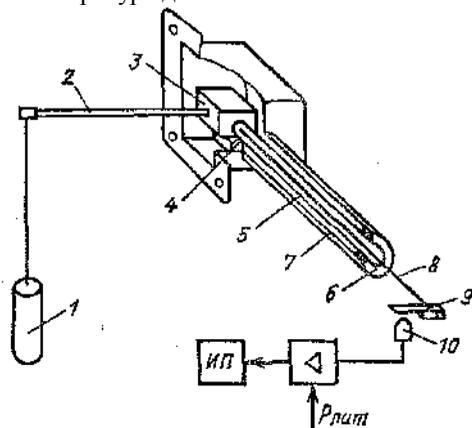


Рис. 14. Схема буйкового уровнемера с торсионной подвеской

2.4. Емкостные уровнемеры

Емкостными называются уровнемеры, основанные на зависимости электрической емкости конденсаторного преобразователя, образованного одним или несколькими стержнями, цилиндрами или пластинами, частично введенными в жидкость, от уровня жидкости.

Конструкция конденсаторных преобразователей различна для электропроводных и неэлектропроводных жидкостей. Электропроводными считают жидкости, имеющие удельное сопротивление $\rho < 10^6$ Ом-м и диэлектрическую проницаемость $\epsilon_{ж} \geq 7$. Различие преобразователей состоит в том, что один из электродов уровнемеров для электропроводных жидкостей покрыт изоляционным слоем, электроды преобразователей для неэлектропроводных жидкостей не изолированы.

Электроды могут быть в виде плоских пластин, стержней; в качестве электрода может использоваться металлическая стенка сосуда. Часто применяются цилиндрические электроды, обладающие по сравнению с другими формами электродов хорошей технологичностью, лучшей помехоустойчивостью и обеспечивающие большую жесткость конструкции.

На рис. 15, а изображен конденсаторный преобразователь для неэлектропроводных жидкостей, состоящий из двух коаксиально расположенных электродов 1 и 2, помещенных в резервуар 3, в котором производится измерение уровня.

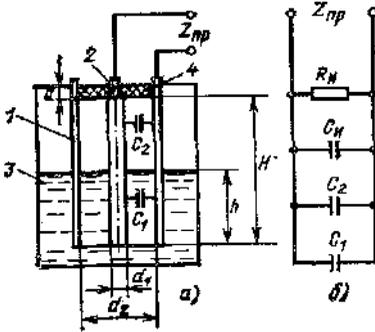


Рис. 15. Схема конденсаторного преобразователя уровня для неэлектропроводных жидкостей

Взаимное расположение электродов зафиксировано проходным изолятором 4. Электроды образуют цилиндрический конденсатор, часть межэлектродного пространства которого высотой h заполнена контролируемой жидкостью, оставшаяся часть высотой $(H - h)$ — ее парами.

В общем виде емкость цилиндрического конденсатора определяется выражением:

$$C = \frac{2 \cdot \pi \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot H}{\ln\left(\frac{d_2}{d_1}\right)}, \quad (9)$$

где $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м — диэлектрическая проницаемость вакуума; ε — относительная диэлектрическая проницаемость вещества, заполняющего межэлектродное пространство; H — высота электродов; d_1 , d_2 — диаметры соответственно внутреннего и наружного электродов.

На основании (9) легко записать выражения для емкости C_1 части преобразователя, находящейся в жидкости, и для емкости C_2 части, находящейся в газовом пространстве:

$$C_1 = \frac{2 \cdot \pi \cdot \varepsilon_{\text{ж}} \cdot \varepsilon_0 \cdot h}{\ln\left(\frac{d_2}{d_1}\right)}$$

$$C_1 = \frac{2 \cdot \pi \cdot \varepsilon_{\text{г}} \cdot \varepsilon_0 \cdot (H - h)}{\ln\left(\frac{d_2}{d_1}\right)},$$

где $\varepsilon_{\text{ж}}$ и $\varepsilon_{\text{г}}$ — относительные диэлектрические проницаемости жидкости и газа над ней.

Суммарное выходное сопротивление преобразователя $Z_{\text{пр}}$ кроме емкостей C_1 и C_2 определяется также емкостью C_u проходного изолятора и его активным сопротивлением R_u (емкость C_u образуется электродами преобразователя на участке а; сопротивление R_u обусловлено проводимостью материала изолятора на этом участке), а также емкостью и проводимостью соединительного кабеля. Таким образом, электрическая схема преобразователя имеет вид, изображенный на рис. 15,б. Суммарная емкость преобразователя:

$$C_{\text{пр}} = C_1 + C_2 + C_u.$$

Емкость C_u от значения h не зависит, кроме того, для газов $\varepsilon_{\text{г}} \approx 1$, поэтому:

$$C_{\text{пр}} = C_u + \frac{2 \cdot \pi \cdot \varepsilon_0}{\ln\left(\frac{d_2}{d_1}\right)} \cdot H \cdot \left[1 + (\varepsilon_{\text{ж}} - 1) \cdot \frac{h}{H} \right]$$

Таким образом, при $\varepsilon_{\text{ж}} = \text{const}$, емкость $C_{\text{пр}}$ однозначно зависит от измеряемого уровня h . В реальных условиях $\varepsilon_{\text{ж}}$ может изменяться (например, при изменении температуры жидкости, ее состава и т.д.).

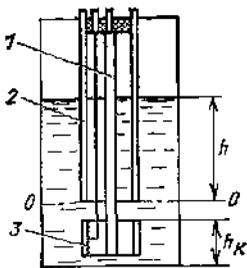


Рис. 16. Схема преобразователя с компенсационным конденсатором

Для уменьшения влияния изменения $\epsilon_{ж}$ на показания уровнемера обычно используется компенсационный конденсатор (рис. 16). Здесь 1 и 2 — электроды конденсаторного преобразователя, емкость которого зависит от измеряемого уровня h и диэлектрической проницаемости $\epsilon_{ж}$. Нижняя часть электрода 1 и дополнительный электрод 3 образуют компенсационный конденсатор, который постоянно погружен в жидкость, и, следовательно, его емкость зависит только от $\epsilon_{ж}$. Емкость компенсационного конденсатора используется в электронной схеме в качестве корректирующего сигнала.

Недостатком такой схемы введения поправки является увеличение по сравнению со схемой на рис. 15 неизмеряемого уровня, обусловленного высотой h_n электродов компенсационного конденсатора. Следует отметить, что отрицательное влияние на работу емкостных уровнемеров оказывает активное сопротивление преобразователя. Оно складывается из активного сопротивления проходного изолятора (R_n на рис. 15,б) 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. В конденсаторных преобразователях для электропроводных жидкостей один электрод выполняется изолированным. Если резервуар металлический, то его стенки могут быть использованы в качестве второго электрода.

Если резервуар неметаллический, то в жидкость устанавливается металлический неизолированный стержень, выполняющий роль второго электрода на рис. 17,а изображена схема преобразователя, выполненного в виде: стержня 1, покрытого слоем изоляции 2 и погруженного в металлический резервуар 3.

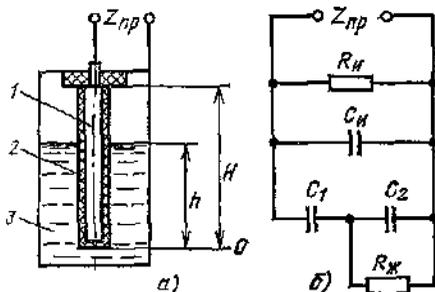


Рис. 17. Схема конденсаторного преобразователя уровня для электропроводных жидкостей

Если пренебречь диэлектрической проницаемостью газов над жидкостью по сравнению с диэлектрической проницаемостью изоляции электрода, то электрическую схему преобразователя можно представить в виде, изображенном на рис. 17,б. Зависящую от уровня емкость преобразователя можно представить, как емкость двух последовательно соединенных конденсаторов C_1 и C_2 . Параметр C_1 — емкость конденсатора, обкладками которого являются поверхность электрода 1 и поверхность электропроводной жидкости на границе с изолятором 2. Диэлектриком этого конденсатора является материал изолятора. При увеличении h увеличивается площадь обкладки — поверхность жидкости, что ведет к увеличению C_1 . Параметр C_2 — емкость конденсатора, одной обкладкой которого является поверхность жидкости на границе с изолятором 2 (общая с обкладкой конденсатора C_1), второй — поверхность резервуара 3. С увеличением h емкость C_2 также растет. Параметр $R_{ж}$ — активное сопротивление жидкости; $C_{и}, R_{и}$ — емкость и активное сопротивление проходного изолятора. Таким образом, полная емкость преобразователя определяется выражением:

$$C_{пр} = C_{и} + \frac{C_1 \cdot C_2}{(C_1 + C_2)}$$

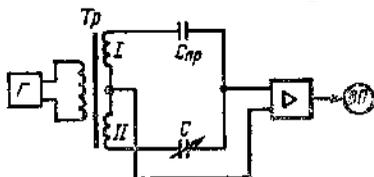


Рис. 18. Принципиальная схема электронного индикатора уровня ЭИУ

Как и в схеме рис. 15, наличие активной составляющей в выходном сопротивлении $Z_{пр}$ преобразователя может привести к появлению погрешности, во избежание чего в схеме устанавливается фазовый детектор.

В емкостных уровнемерах для измерения электрической емкости преобразователя используются резонансные F мостовые схемы.

Наиболее простыми являются мостовые схемы, примером которых может быть схема электронного индикатора уровня ЭИУ (рис. 18). Мост состоит из двух вторичных обмоток I и II трансформатора T_p (питаемого генератором G), емкости 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. Усилителем этот сигнал усиливается, преобразуется в унифицированный и измеряется вторичным прибором $ВП$. Диапазоны измерения уровнемеров ЭИУ определяются типом преобразователя и могут изменяться от 1 до 20 м; предел допускаемой основной погрешности 2,5%.

Емкостные уровнемеры нашли широкое распространение из-за дешевизны, простоты обслуживания, удобства монтажа первичного преобразователя на резервуаре, отсутствия подвижных элементов, возможности использования в достаточно широком интервале температур (от криогенных до $+200^\circ\text{C}$) и давлений (до 6 МПа). К числу недостатков их следует отнести непригодность для измерения уровня вязких (динамическая вязкость более 1 Па с), пленкообразующих, кристаллизующихся и выпадающих в осадок жидкостей, а также высокую чувствительность к изменению электрических свойств жидкости и изменению емкости кабеля, соединяющего первичный преобразователь с измерительным прибором.

2.5. Индуктивные уровнемеры

Принцип действия индуктивных уровнемеров основан на зависимости индуктивности одиночной катушки или взаимной индуктивности двух катушек от глубины погружения их в электропроводную жидкость. Такая зависимость обусловлена возникновением в жидкости под действием магнитного поля переменного тока возбуждения вихревых токов, магнитное поле которых оказывает размагничивающее действие на поле тока возбуждения. Действительно, по определению индуктивность L катушки представляет собой

отношение магнитного потока Φ к току I создающему этот поток: $L = \frac{\Phi}{I}$.

При погружении катушки в жидкость в ней создаются вихревые токи, маг-

нитное поле которых по закону Ленца направлено навстречу основному, т.е. результирующий магнитный поток будет меньше потока «сухой» катушки. Это означает, что индуктивность погруженной катушки меньше индуктивности сухой катушки. Таким образом, если индуктивный преобразователь представляет собой одиночную длинную катушку, то ее индуктивность и полное сопротивление $Z = R + j \cdot \omega \cdot L$ будут зависеть от глубины погружения R (R — активное сопротивление катушки, ω — круговая частота тока возбуждения). Существуют индуктивные преобразователи, содержащие две индуктивно связанные катушки, образующие трансформатор (трансформаторные преобразователи).

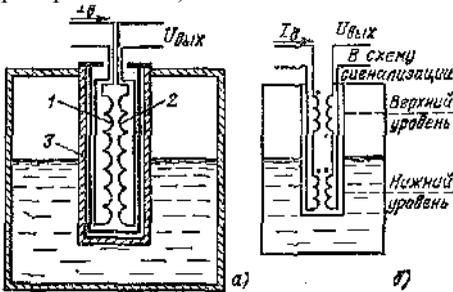


Рис. 19. Схема индуктивного трансформаторного преобразователя уровня:
а — аналогового уровнемера;
б — сигнализатора предельных значений уровня

При изменении индуктивностей L_1 и L_2 обеих катушек изменяется их взаимная индуктивность M в соответствии с выражением:

$$M = k \cdot \sqrt{L_1 \cdot L_2},$$

где k — коэффициент связи, определяемый потоками рассеяния.

В реальных конструкциях таких преобразователей обмотки выполняются намоткой в два провода, при этом $L_1 = L_2 = L$ и $k \approx 1$.

Из принципа действия индуктивных уровнемеров видно, что они пригодны для измерения уровня только электропроводных сред. Кроме того, поскольку интенсивность вихревых токов зависит от электропроводности среды, изменение ее в процессе измерения вызовет появление дополнительной погрешности.

Наибольшее распространение эти уровнемеры получили для измерения уровня жидкометаллического теплоносителя в ядерных энергетических установках.

Простейшая схема индуктивного трансформаторного преобразователя представлена на рис. 19,а. Преобразователь состоит из обмотки возбуждения 1, по которой протекает переменный ток возбуждения I_B и вторичной обмотки 2, с которой снимается выходной сигнал $U_{\text{вых}}$. Преобразователь помещен в металлический защитный чехол 3, который герметично закреплен в крышке резервуара. Это позволяет осуществлять замену уровнемера без нарушения герметичности контура. Как уже указывалось, под действием потока возбуждения в толще контролируемой среды (например, жидкого металла) возникают вихревые токи. Это приводит к зависимости взаимной индуктивности M между обмотками от уровня металла. Эта зависимость линейна по всей длине обмоток, кроме концевых участков, длиной, равной их диаметру, где характеристика искривляется. Таким образом, ЭДС $E = \omega \cdot M \cdot I_B$ во вторичной обмотке, а, следовательно, и выходное напряжение $U_{\text{вых}}$ будут линейно зависеть от уровня. Из рис. 19, а видно, что взаимодействие поля возбуждения и поля вихревых токов осуществляется через металлический защитный чехол, который ослабляет поля и, следовательно, ухудшает чувствительность преобразователя, причем экранирующее действие чехла увеличивается с ростом частоты ω тока возбуждения I_B . Однако выбирать низкое значение ω нецелесообразно, так как при этом уменьшается ЭДС E во вторичной обмотке, а, следовательно, и $U_{\text{вых}}$ (обычно частота выбирается равной 4-5 кГц).

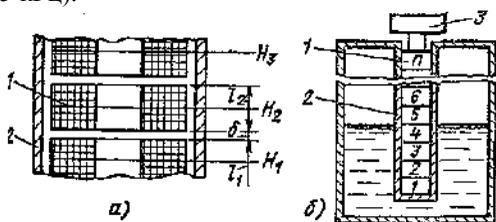


Рис. 20. Схема индуктивного преобразователя дискретных уровнемеров

Основным недостатком трансформаторных преобразователей уровня является влияние изменения температуры контролируемой среды на результат измерения. Это влияние обусловлено изменением активного сопротивления обмоток в зависимости от изменения температуры и изменением их индуктивности в связи с линейным расширением провода, а также изменением проводимости чехла и контролируемой среды. Кроме того, на результат измерения будут оказывать влияние изменения состава среды, а также изменение со временем свойств материалов чехла. При измерении уровня жидких металлов влияние будет оказывать также наличие на чехле пленки расплава

или пленки окислов. Автоматическая компенсация этих погрешностей представляет собой трудную задачу из-за сложности измерения влияющих величин и сложного характера влияния их на погрешность.

Преобразователи трансформаторного типа удобно использовать в качестве сигнализаторов предельных значений уровня. В этом случае преобразователь состоит из двух отдельных коротких трансформаторов, разнесенных на расстояние, равное разности верхнего и нижнего уровней (рис. 19,б). Первичные обмотки трансформаторов включены последовательно и питаются от одного источника. Вторичные обмотки включены встречно, и разностный сигнал идет в схему сигнализации.

Срабатывание схемы аварийной сигнализации происходит при нулевом значении выходного напряжения $U_{\text{вых}}$ т.е. если ЭДС во вторичных обмотках трансформаторов будут равными. Очевидно, что это будет в том случае, если оба трансформатора окажутся одновременно либо ниже уровня (т.е. когда уровень достигнет верхнего аварийного значения), либо выше уровня (когда уровень достигнет нижнего аварийного значения). При промежуточных значениях уровня $U_{\text{вых}} \neq 0$ и срабатывания схемы сигнализации не происходит.

Меньшее влияние перечисленные выше факторы оказывают на работу индуктивных уровнемеров дискретного действия. В таких уровнемерах фиксируется достижение определенных значений уровня, т.е. указатель переместится на соседнюю отметку только при изменении уровня на определенное значение — шаг дискретности.

Преобразователь дискретного уровнемера представляет собой ряд коротких катушек индуктивности 1 (рис. 20,а), помещенных в виде столба внутри металлического чехла 2, отделяющего катушки от среды (рис 20,б). Как уже указывалось, индуктивность катушки зависит от глубины ее погружения в среду, поэтому индуктивность и комплексное сопротивление катушки, расположенной ниже уровня, имеют меньшее значение, чем катушки, расположенной выше уровня. В головке преобразователя 3 располагаются вспомогательные катушки, индуктивность которых от уровня не зависит. Все рабочие катушки 1, 2, 3, ..., n и вспомогательные катушки включены в следящую логическую схему, которая отыскивает первую сверху катушку, расположенную ниже уровня. Это дает возможность судить о положении уровня, если известны размеры катушек и их положение относительно дна резервуара. Принципиально важным является то обстоятельство, что следящая система не измеряет непосредственно индуктивности рабочих катушек, а отыскивает две соседние катушки с резко различающимися индуктивностями (это имеет место, если одна из них расположена ниже уровня металла, а вторая — выше), причем количественное различие индуктивностей роли не играет. Это

означает, что следящая система работает в релейном режиме, обеспечивающем высокую помехозащищенность дискретных индуктивных уровнемеров. Обратимся к рис. 20, а. Предположим, что индуктивность катушки изменяется скачком при прохождении уровня через ее середину. Из этого следует, что при изменении уровня в интервале $H_1 - H_2$ или $H_2 - H_3$ и т. д. индуктивности катушек не изменяются, т. е. показания приборов также не изменяются. Изменение показаний будет происходить только при достижении уровнем значений H_1 и H_3 и т. д. Таким образом, шаг дискретности уровнемера будет равен $H_2 - H_1$, $H_3 - H_2$ и т. д. Очевидно, что погрешность Δ измерения, вызванная дискретностью, будет определяться длиной l соседних катушек а расстоянием δ между ними $\Delta = \delta + \frac{(l_1 + l_2)}{2}$.

Это дает возможность обеспечить высокую точность измерения путем уменьшения длины катушек и расстояния между ними на рабочих участках изменения уровня (на остальных участках длина катушек может быть увеличенной).

Изменение свойств контролируемого жидкого металла (в том числе и за счет изменения температуры), а также налипший на чехол слой металла или его окислов не приведет к нарушению работоспособности прибора. Действительно, перечисленные факторы могут только уменьшить степень изменения индуктивности катушек, погруженных в металл, относительно «сухих», что, как указывалось выше, не влияет на работу следящей системы. Суммируя сказанное, можно перечислить достоинства дискретных индуктивных уровнемеров: независимость показаний от изменения температуры среды и наличия на чехле пленок расплава или окислов (при измерении уровня металла).

В настоящее время выпускаются дискретные индуктивные уровнемеры типа «Квант», предназначенные для измерения уровня расплавленных металлов с температурой до 680° С.

2.6. Радиоволновые уровнемеры

Рассмотренные выше уровнемеры можно считать уровнемерами общепромышленного назначения, так как они могут быть использованы в подавляющем большинстве случаев, требующих измерения уровня в различных отраслях промышленности. Существуют, однако, технологические процессы, требующие измерения уровня, но характеризующиеся тяжелыми условиями работы уровнемеров. К числу таких процессов относятся, например, процессы металлургического производства, в которых требуется измерение уровня жидкого металла. Особые условия работы уровнемеров обусловлены высо-

кой (до 2000° С) температурой жидкого металла, агрессивностью жидкого металла и шлака, разнообразием конструкций объектов измерения, требованием высокой точностью измерения и надежностью работы.

Среди рассматриваемых типов уровнемеров для этой цели возможно применение радиоизотопных уровнемеров, однако их эксплуатация затруднительна из-за необходимости принятия специальных мер биологической защиты и сложности обслуживания.

Перспективным методом измерения уровня жидких металлов является радиоволновой метод. Радиоволновыми называются уровнемеры, основанные на зависимости параметров колебаний электромагнитных волн от высоты уровня жидкости.

К радиоволновым методам относятся радиолокационный, радиоинтерференционный, эндовибраторный и резонансный.

Работа радиолокационных уровнемеров основывается на явлении отражения электромагнитных волн от границы раздела сред, различающихся электрическими и магнитными свойствами.

Скорость V распространения электромагнитной волны в среде определяется значениями ее диэлектрической ϵ и магнитной μ проницаемостей:

$$V = \frac{C}{\sqrt{\epsilon \cdot \mu}},$$

где C — скорость света в вакууме.

Схема уровнемера (рис. 21) состоит из излучателя 1, приемника 2 электромагнитной энергии и схемы 5 измерения интервала времени. Значение уровня h определяется посредством измерения временного интервала между моментом посылки сигнала излучателем 1 и приходом отраженного сигнала на приемник 2. Эта величины связаны соотношением:

$$\tau = 2 \cdot (H - h) \cdot \sqrt{\frac{\epsilon \cdot \mu}{c}}.$$

Обычно локация ведется через газовую среду над жидкостью (в принципе, локация может осуществляться и через жидкость, если она неэлектропроводна). Локация через газ предпочтительнее, так как излучатели не подвергаются воздействию жидкости, кроме того, магнитные и диэлектрические проницаемости газов невелики и практически не зависят от изменения параметров и свойств газа. Это делает показания уровнемера практически не зависящими от свойств жидкости. Недостатком таких уровнемеров является трудность точного измерения малых интервалов времени. Кроме того, они очень чувствительны к нахождению в зоне излучения посторонних предметов, например, металлических стенок емкостей. Для устранения этого недостатка необходимо применять узконаправленное излучение с помощью рупорных антенн.

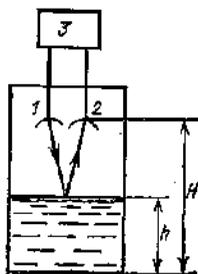


Рис. 21. Схема радиолокационного уровнемера

Существуют схемы радиолокационных уровнемеров, в которых локация осуществляется через стенку рабочей емкости. Применительно к металлургическому производству таким образом можно контролировать границу раздела шлак-металл, либо осуществлять непрерывное измерение уровня (существующие приборы имеют диапазон измерения до 200 мм).

Схема такого прибора представлена на рис. 22. В качестве излучателя радиоволн, генерируемых генератором 1, используется рупор 2, высота раскрытия которого равна диапазону измерения. Изменение уровня среды по высоте рупора приводит к изменению прошедшей и отраженной высокочастотной энергии, вследствие чего изменяется сигнал на детекторе 3 и вторичном преобразователе 4. Для использования этого метода измерения в стенках емкости должны быть радиопрозрачные окна, в которые вставляются рупорные излучатели. При измерении уровня жидких металлов в объектах металлургии такие окна достаточно делать лишь в металлических стенках 5, так как используемые в настоящее время футеровочные материалы 6 радиопрозрачны.

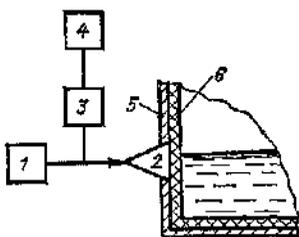


Рис. 22. Схема радиолокационного уровнемера для контроля уровня жидких металлов

В резонансных уровнемерах, резонансные колебания возбуждаются в отрезках длинной электрической линии. Этот отрезок длинной линии — первичный преобразователь — либо выполняется в виде отдельного конструктивного элемента, помещенного в резервуар, либо его роль могут выполнять

конструктивные элементы технологической установки (например, при измерении уровня жидких металлов в металлургии).

Обычно первичный преобразователь представляет собой тонкостенную металлическую трубу с боковыми отверстиями и соосно расположенным в ней металлическим стержнем (рис. 23). Применение резонансных уровнемеров при измерении уровня проводящих жидкостей основывается на шунтировании элементов преобразователя, т.е. уровень эквивалентен подвижной перемычке между трубой и стержнем преобразователя. При изменении уровня изменяется длина линии, что ведет к изменению резонансной частоты преобразователя. Например, при заполнении преобразователя (рис. 23) уменьшается его длина и увеличивается резонансная частота. Эта зависимость является нелинейной.

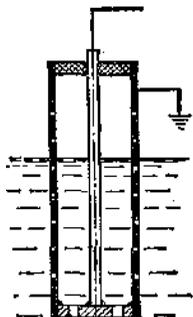


Рис. 23. Схема преобразователя резонансного уровнемера

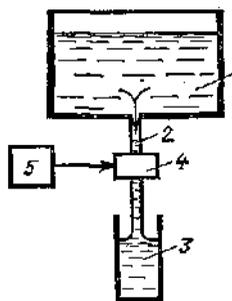
Применительно к конкретным условиям работы могут использоваться преобразователи других конструкций. Например, для кристаллизаторов машин непрерывного литья заготовок большого сечения (не менее 250x550 мм) преобразователь подобен изображенному на рис. 23, но на конце его вместо металлического доньшка закреплен виток проволочного проводника. Преобразователь закрепляется таким образом, чтобы виток находился над уровнем металла, при этом его индуктивность будет зависеть от уровня металла. Резонансная частота такой электрической линии с индуктивностью на конце зависит от этой индуктивности, т.е. от уровня металла. Такие уровнемеры жидких металлов имеют диапазон измерения до 200 мм, основная погрешность измерения $\pm 2\%$.

Для кристаллизаторов малого сечения (с максимальным поперечным размером сечения 150 мм) применение преобразователя с индуктивной нагрузкой неэффективно, так как при уменьшении размеров витка уменьшается диапазон измерения. Для таких кристаллизаторов разработан уровнемер (рис. 24), в котором система «металл промежуточного ковша 1 — струя металла 2 — металл кристаллизатора 3» рассматривается, как измерительный отрезок

длинной электрической линии, длина которого, a , следовательно, и резонансная частота определяются уровнем металла в кристаллизаторе.

Подвод энергии к колебательной системе может быть осуществлен, например, посредством металлического кольца 4, установленного между ковшем и кристаллизатором на одной оси со струей металла и подключенного к высокочастотному генератору 5.

Диапазон измерения такого уровнемера составляет 300 мм.



7

Рис. 24. Схема резонансного уровнемера для машин непрерывного литья

2.7. Акустические уровнемеры

По принципу действия акустические уровнемеры можно подразделить на локационные, поглощения и резонансные.

В локационных уровнемерах используется эффект отражения ультразвуковых колебаний от границы раздела жидкость-газ. Положение 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 измерения частоты собственных колебаний столба газа над уровнем жидкости, которая зависит от уровня жидкости.

Наибольшее распространение получили локационные уровнемеры. Локация уровня может производиться либо через газовую среду над жидкостью (такие уровнемеры иногда называют акустическими), либо снизу через слой жидкости (такие уровнемеры иногда называют ультразвуковыми). Недостатком первого типа уровнемеров являются погрешность от зависимости скорости ультразвука от давления и температуры газа и сильное поглощение ультразвука газом, что требует большей мощности источника, чем при локации через жидкость. Однако, на показаниях таких уровнемеров не сказывается изменение характеристик жидкости, поэтому такие уровнемеры могут быть

использованы для измерения уровня жидкостей неоднородных, содержащих пузырьки газа или кристаллизующихся. Такие уровнемеры используются для жидкостей, имеющих температуру не более 80° С и давление не более 4 МПа.

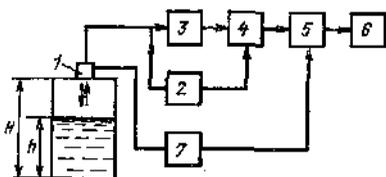


Рис. 25. Схема акустического уровнемера ЭХО-1

Уровнемеры 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 в жидкости. На рис. 25 представлена упрощенная схема акустического уровнемера с локацией уровня со стороны газа типа ЭХО-1. Источником и одновременно приемником отраженных ультразвуковых колебаний является пьезоэлемент, заключенный в акустический преобразователь 1. Локация осуществляется ультразвуковыми импульсами, которые возбуждаются пьезоэлементом путем подачи на него электрических импульсов от генератора 2. Одновременно генератор включает схему измерения времени 4. Отраженный ультразвуковой импульс возвращается на пьезоэлемент через время t , соответствующее контролируемому уровню в соответствии с выражением

$$t = \frac{2 \cdot (H - h)}{c},$$

где c — скорость ультразвука в газе.

Пьезоэлемент преобразует отраженный ультразвуковой импульс в электрический сигнал, который усиливается усилителем 3 и подается на схему измерения времени 4. Преобразователь 5 преобразует значение времени в унифицированный выходной сигнал 0-5 мА, измеряемый вторичным прибором 6.

Для уменьшения влияния изменения температуры газа имеется блок температурной компенсации 7, включающий в себя термометр сопротивления, расположенный внутри акустического преобразователя. Уровнемер ЭХО-1 может иметь диапазоны измерения 0-1, 0-2, 0-3 м; класс точности уровнемера 2,5.

Принципиальная схема уровнемера с локацией через жидкость аналогична представленной на рис. 25. Разница может заключаться в ином способе температурной компенсации. Основная погрешность уровнемеров с локацией через жидкость не превышает 2,5% диапазона измерения уровня.

2.8. Термокондуктометрические уровнемеры

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

Чувствительный элемент таких уровнемеров представляет собой протяженный терморезистор, электрическое сопротивление которого определяется его температурой. Обычно они изготавливаются из платины или вольфрама, причем чувствительность преобразователя увеличивается с ростом температурного коэффициента электросопротивления материала. Термокондуктометрический преобразователь помещается в резервуар таким образом, что часть его находится в жидкости, остальная часть — в газовом пространстве (рис. 26). При изменении уровня изменяется длина этих участков.

Так как в общем случае температура жидкости и ее паров может быть одинаковой, то осуществляется подогрев преобразователя. При прямом подогреве подогрев преобразователя осуществляется проходящим через него током постоянной силы. При косвенном подогреве преобразователь должен иметь дополнительный подогреватель.

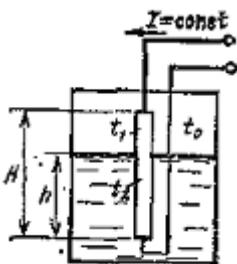


Рис. 26. Схема термокондуктометрического преобразователя уровня

Принцип действия термокондуктометрического преобразователя заключается в использовании различия теплоотдачи от нагретого терморезистора к жидкости и газу, вследствие чего участки его, находящиеся в жидкости и газе, имеют различную температуру и, следовательно, различное сопротивление. Таким образом, суммарное их сопротивление будет определяться

уровнем. Если предположить, что преобразователь имеет линейную зависимость сопротивления от температуры, то можно легко получить выражение статической характеристики такого преобразователя.

Предположим, что при отсутствии жидкости («сухой» преобразователь) преобразователь имеет температуру t_1 , при этом его погонное (на единицу длины) сопротивление равно r_0 и температурный коэффициент сопротивления равен α . При длине преобразователя H его полное сопротивление $R_0 = r_0 \cdot H$.

При уровне жидкости h погруженная часть стала иметь температуру t_2 , при этом полное сопротивление преобразователя определяется выражением $R_h = r_0 \cdot h \cdot [1 + \alpha \cdot (t_2 - t_1)] + r_0 \cdot (H - h)$. Таким образом, зависимость между приращением сопротивления ΔR и уровнем h (статическая характеристика) будет иметь вид

$$\Delta R = R_h - R_0 = r_0 \cdot \alpha \cdot (t_2 - t_1) \cdot h \quad (10)$$

Из (10) следует, что статическая характеристика преобразователя линейна (при линейной характеристике терморезистора). Коэффициент преобразова-

ния $\frac{\Delta R}{h}$ растет с увеличением погонного сопротивления терморезистора и

его температурного коэффициента сопротивления. Коэффициент преобразования увеличивается также с ростом температуры t_1 «сухого» преобразователя (так как при этом увеличивается разность $t_2 - t_1$), однако чрезмерное повышение температуры «сухого» преобразователя недопустимо из-за опасности нарушения режима теплоотдачи, повреждения терморезистора и подгрева контролируемой жидкости. Основной областью применения термокондуктометрических уровнемеров является криогенная техника, где они используются для измерения уровня сжиженных газов.

Для измерения уровня жидкого гелия широко используются уровнемеры, использующие явление сверхпроводимости. Эффект сверхпроводимости состоит в том, что при температуре металла ниже критической T_k его сопротивление становится нулевым. Таким образом, если температура погруженной части преобразователя будет ниже критической, то сопротивление этой части будет нулевым, и общее сопротивление преобразователя будет определяться только сопротивлением его сухой части. Чувствительные элементы таких преобразователей изготавливают из тантала ($T_k = 4,3$ К), сплава 65-БТ ($T_k \approx 10$ К), сплавов ниобия с титаном ($T_k = 9,7$ К) и ниобия с цирконием ($T_k = 10,8$ К). Тантал может быть использован для измерения уровня гелия, находящегося при атмосферном или слегка пониженном давлении. При значительном понижении давления над жидким гелием работа уровнемера

ухудшается, а при давлениях, даже немного превышающих атмосферное, чувствительный элемент из тантала вообще не переходит в сверхпроводящее состояние. В этих случаях нужно применять сплав 65-БТ или сплавы ниобия с титаном или цирконием. При использовании сплава 65-БТ нет необходимости в дополнительном подогревателе; кроме того, изменение температуры газовой фазы мало сказывается на показаниях. Из-за высокой критической температуры при измерении уровня жидкого гелия граница между сверхпроводящей и нормальной частями терморезистора практически не изменяется при понижении температуры ванны (при понижении температуры она смещается вверх относительно контролируемого уровня). Следует отметить, что на результате измерения сказывается изменение интенсивности испарения жидкого газа из-за изменения режима охлаждения сухой части терморезистора.

Термокондуктометрические преобразователи обычно изготавливаются в виде тонкой проволоки со специальным защитным покрытием, закрепленной на каркасе. При использовании преобразователей в криогенной технике при измерении уровня сжиженных газов для уменьшения влияния градиента температур в криостате и интенсивности испарения терморезистор рекомендуется помещать внутри теплоизолирующей вакуумной рубашки дьюаровского типа.

В качестве вторичных приборов могут быть использованы либо приборы, измеряющие падение напряжения на терморезисторе (которое пропорционально уровню при постоянном токе питания), либо мосты.

Погрешности терморезисторных уровнемеров определяются отклонением от расчетных значений величин, определяющих его статическую характеристику (10). Стабильность r_0 и α обеспечивается обработкой материала и защитным покрытием проволоки во избежание коррозии поверхности и уменьшения сечения. Изменение температур t_1 и t_{21} может произойти из-за изменения температур газовой и жидкой фаз, изменения коэффициентов теплоотдачи на сухом и погруженном участках преобразователя. Влияние изменения температуры газовой фазы может быть уменьшено повышением температуры t_1 сухого участка преобразователя (однако, как уже указывалось, следует иметь в виду опасность чрезмерного увеличения температуры резистора из-за возможного нарушения режима теплоотдачи и разрушения резистора). Распространенным способом уменьшения температурной погрешности является использование компенсационных терморезисторов, один из которых постоянно находится в жидкости, второй — в газе. Все три терморезистора включаются в схему логометра, являющегося вторичным прибором.

2.9. Измерение уровня сыпучих материалов

Имеется ряд обстоятельств, усложняющих задачу измерения уровня сыпучих материалов: сравнению с измерением уровня жидкостей. Прежде всего, это неоднородность веществ в объеме, связанная с наличием заполненного газом пространства между твердыми частицами. Степень неоднородности зависит от размеров частиц и непосредственно влияет на физические свойства материала, что усложняет применение методов измерения уровня, использующих определенные физические свойства, следующая трудность измерения уровня обусловлена ограниченной подвижностью частиц из-за действия сил трения и сцепления между частицами, результатом чего является отсутствие горизонтальной плоскости раздела газ-материал. Поверхность сыпучего материала расположена к горизонтали под углом естественного откоса, причем этот угол при заполнении или опорожнении емкости может быть различным. Ограниченная подвижность частиц приводит также к сводообразованию, влияющему на нормальную работу измерительных устройств.

Следствием ограниченной подвижности является зависимость давления внутри сыпучей массы от ориентации единичной площадки, массы бункера, коэффициента трения материала о стенки, что ограничивает применение методов измерения уровня, основанных на зависимости давления от уровня (по типу гидростатических).

Отрицательными качествами сыпучих материалов является также способность к налипанию и абразивное воздействие. Усложнить работу уровнемеров может также запыленность фазового пространства, что влияет на электрические свойства среды, а также предъявляет завышенные требования к обеспечению взрывобезопасности.

Простейшими по принципу действия уровнемерами для сыпучих тел являются массовые, основанные на взвешивании бункера вместе с заполняющим его материалом. В качестве преобразователя в этих уровнемерах может быть использована гидравлическая мессдоза, которая является опорой одной из лап бункера. Мессдоза представляет собой стальной корпус, герметично закрытый мембраной с закрепленным на ней поршнем, на который опирается лапа бункера. Внутренняя полость корпуса (под мембраной) заполнена жидкостью и соединимой линией соединяется с манометром, Давление жидкости в системе мессдозы — манометр равно силе тяжести бункера с материалом, деленной на площадь поршня. Манометр градуируется в единицах массы или уровня, погрешность таких уровнемеров достигает 10%.

В массовых уровнемерах вместо мессдозы могут применяться и более совершенные магнитоупругие преобразователи, обеспечивающие злее высокую точность измерения (их погрешность не более $\pm 5\%$),. Основным элементом таких преобразователей является металлический чувствительный элемент, магнитная проницаемость которого изменяется при упругой механической деформации. Магнитоупругие преобразователи устанавливаются под опоры

бункера и включаются в схему неуравновешенного моста, выходной сигнал которого будет зависеть от степени деформации преобразователя, т.е. от количества материала в бункере.

Из всех электрических методов измерения уровня наиболее применимым является емкостный метод. Это объясняется как простотой конструкции емкостного преобразователя, так и малой чувствительностью их к неоднородностям. Как правило, преобразователи применяются одноэлектродными в виде зондов или изолированных тросов, вторым электродом является стенка бункера или вспомогательный электрод. Основными эксплуатационными трудностями применения таких уровнемеров является разрушение изоляционного покрытия преобразователя, налипание материала, зависимость показаний от изменения электрических свойств материала, вызванной, например, изменением его состава или влажности.

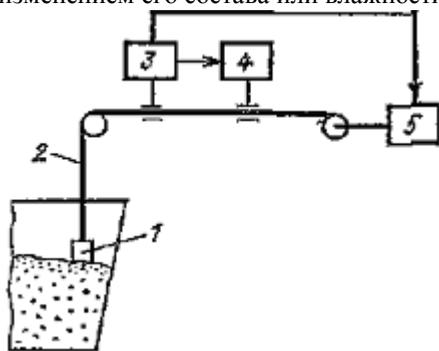


Рис. 27. Схема лотового уровнемера сыпучих материалов

Специфическим уровнемером для сыпучих материалов является лотовый (рис. 27). Чувствительным элементом таких уровнемеров является массивное тело (лот) 1, подвешенное на гибком тросе 2. В начале цикла измерений лот зафиксирован в предельном верхнем положении. Цикл измерения уровня начинается с момента растормаживания лота, при этом под действием собственного веса лот начинает опускаться. В этот же момент сигнальным устройством 3, реагирующим на натяжение троса, включается отсчетное устройство 4, регистрирующее смещение лота относительно первоначального предельного положения. В момент касания лотом поверхности натяжение троса уменьшается, и сигнальное устройство 3 отключает отсчетное устройство, одновременно включая механизм подъема 5 лота, который поднимает лот в исходное положение, после чего цикл измерения повторяется. Показания отсчетного устройства позволяют определить текущее значение уровня. Перед началом следующего цикла измерения показания отсчетного устройства должны быть сброшены. Для сигнализации загрузки или опорожнения бун-

керов применяются сигнализаторы уровня. Для электропроводных материалов наиболее простыми являются кондуктометрические сигнализаторы уровня (например, типа ИКС). Сигнализатор может контролировать либо только верхний уровень сыпучего материала в бункере (в этом случае применяется только один электрод), либо верхний и нижний уровни (применяются два электрода). Принцип действия таких сигнализаторов (рис. 28) заключается в замыкании электрической цепи «стенка бункера-материал-электрод» при касании поверхностью материала электрода. Основные недостатки при эксплуатации: механическое разрушение электродов под действием материала, возможность ложных срабатываний из-за утечек через запыленную среду (обычно во избежание этого на электроды устанавливают охранные кольца). Для надежной работы сигнализаторы должны быть установлены в местах, где исключена возможность образования пустот.

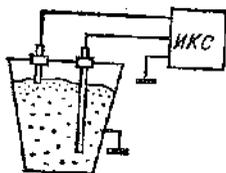


Рис. 28. Схема кондуктометрического сигнализатора уровня

В качестве сигнализаторов уровня могут использоваться емкостные сигнализаторы с резонансной схемой измерения (а не мостовой), например, типа ЭСУ-1, ЭСУ-2 и др.

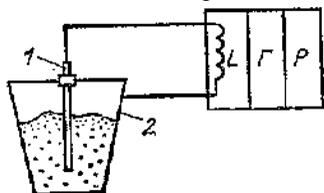


Рис. 29. Схема емкостного сигнализатора уровня

В таких устройствах емкостный преобразователь, образованный электродом 1 и стенкой бункера 2 (рис. 29), совместно с катушкой индуктивности L образуют колебательный контур, резонансная частота которого определяется емкостью преобразователя, т.е. текущим значением уровня. При совпадении резонансной частоты контура с частотой напряжения генератора G (соответствующей предельному значению уровня) реле P включает схему сигнализации.

3. АЛГОРИТМ ВЫБОРА ДАТЧИКОВ

Рациональная последовательность выбора технических устройств показана на следующей схеме алгоритма действий.

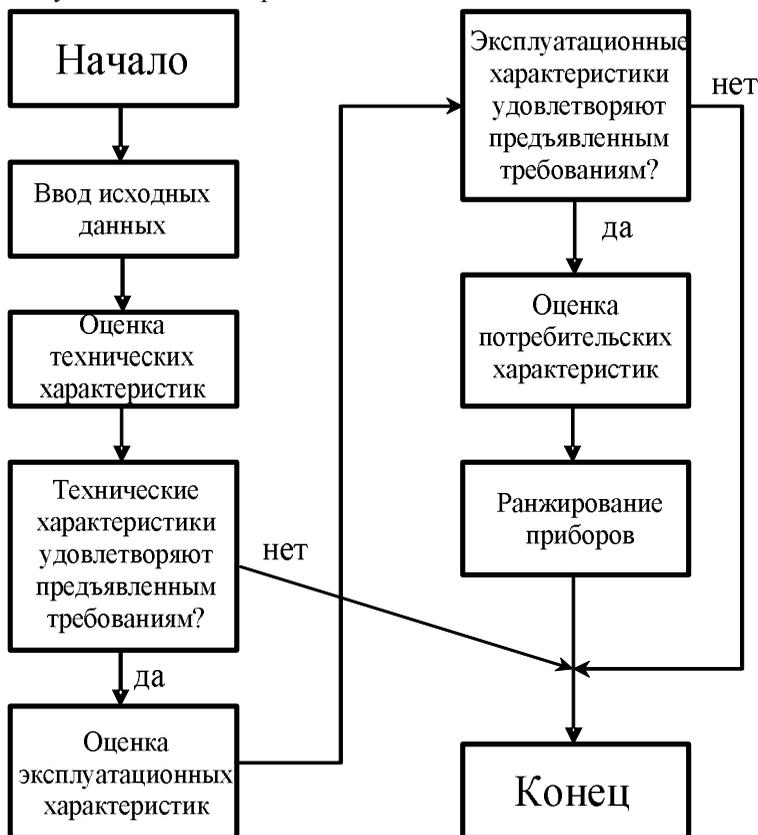


Рис. 30. Схема алгоритма выбора технических средств

При этом критериями выбора можно считать потребительские свойства, т.е. соотношение показателей затраты/производительность/надежность, а технические и эксплуатационные характеристики – ограничениями для процедуры выбора. Кроме того, необходимо разделить характеристики на прямые (для которых положительным результатом является её увеличение) и обратные (для которых положительным результатом является её уменьшение). Так как характеристики между собой конфликтны, т.е. улучшение одной характеристики почти всегда приводит к ухудшению другой, необходимо для каждой характеристики K_i определить весовой коэффициент a_i , учитываю-

щий степень влияния данной характеристики на полезность устройства. Терминология и состав критериев оценки приведены в соответствии с основными положениями квалиметрии и стандартами качества (ГОСТ 15467-79). Выбор аппаратуры производится в четыре этапа (рис. 30):

- определение соответствия технических характеристик предъявленным требованиям;
- определение соответствия эксплуатационных характеристик предъявленным требованиям;
- оценка потребительских свойств выбираемой аппаратуры;
- ранжирование изделий.

На первом этапе каждая техническая характеристика анализируемого изделия сравнивается с предъявленными к проектируемой системе требованиями, и, если данная характеристика не удовлетворяет этим требованиям, изделие снимается с рассмотрения.

Такой же анализ проводится на втором этапе с эксплуатационными характеристиками, и только, если технические и эксплуатационные характеристики соответствуют поставленной задаче и предъявленным требованиям, проводится оценка потребительских свойств.

Для этого используется аддитивный метод оценки, когда суммарная оценка каждого свойства вычисляется по следующей формуле:

$$K = \sum_{i=1}^n \frac{K_i}{K_i^{\wedge}} \cdot \alpha_i + \sum_{j=1}^m \frac{1}{\frac{K_j}{K_j^{\wedge}}} \cdot \alpha_j,$$

где: K_i, K_j - прямая и обратная характеристики выбираемого изделия; $K_i^{\wedge}, K_j^{\wedge}$ - соответствующие характеристики аналога; α_i, α_j - весовые коэффициенты характеристик; n, m количество прямых и обратных характеристик.

Деление на характеристики аналога необходимо для приведения всех свойств к относительным величинам. Определение весовых коэффициентов для характеристик технического средства является одной из самых ответственных задач, т.к. именно от их правильной величины зависит достоверность результатов анализа. Для нахождения усредненной оценки каждого коэффициента может быть рекомендована следующая методика экспертных оценок и программа их расчета.

Составляется матрица «эксперты-коэффициенты», в которой проставляются полученные от каждого эксперта оценки коэффициентов по шкале от 0 до 10.

Рассчитывается относительная значимость (W_{ij}) всех коэффициентов в отдельности для каждого эксперта. С этой целью оценки, полученные от каждого эксперта, суммируются (по горизонтали), а затем нормируются:

$$W_{ij} = \frac{\alpha_{ij}}{\sum_{i=1}^n \alpha_{ij}}, \text{ при } j = \text{const.}$$

Вычисляется усредненная оценка, данная всеми экспертами каждому коэффициенту. Для этого нормированные оценки, полученные в предыдущем шаге, суммируются (по вертикали), а затем рассчитывается среднее арифметическое для каждого коэффициента:

$$\alpha_i = \frac{\sum_{j=1}^m W_{ij}}{m}, \text{ при } i = \text{const.}$$

В результате анализа потребительских свойств аппаратуры составляется матрица изделия – потребительские свойства, которая содержит исходные данные для выбора технического устройства.

Ранжирование изделий, т.е. расположение их в порядке возрастания (или убывания) соотношения показателей затраты/производительность/надежность целесообразно проводить по формуле:

$$P = П+Н+З.$$

4. ПРИМЕР ВЫПОЛНЕНИЯ ПОСТАВЛЕННОЙ ЗАДАЧИ

Выбрать первичный преобразователь для измерения уровня (в аппарате, трубопроводе, насосе и т.д.), удовлетворяющий следующим характеристикам.

Таблица 2

Характеристики преобразователя

Уровень, мм	Рабочая температура, °С	Абсолютная погрешность измерения, единицы измерения	Характеристики среды измерения: наименование, давление, Мпа, агрегатное состояние
1200	76	0,5	аммиак, 0,4 газ

Для выбранных средств измерения требуется указать следующие характеристики.

1. Модель и наименование (тип прибора, классификация и т.д.).
2. Класс допуска (класс точности, погрешности измерения и т.д.).
3. Особенности конструкции датчика (внутреннее устройство датчика, материалы, использующиеся в приборе).
4. Градуировка (номинальные статические характеристики).
5. Габаритные и присоединительные размеры (способы соединения, размеры различных частей и элементов и т.д.).
6. Материал монтажных частей (вид монтажа прибора к аппарату и материалы монтажных изделий и т.п.).
7. Соответствие техническим условиям, ГОСТ и другим нормативным документам (ТУ, ГОСТы, международные стандарты, реестр средств измерения).
8. Требования гарантийного обслуживания и сроки поверки приборов (сложность поверки и условия поверки).
9. Требования по герметичности и взрывозащите;

Решение.

Для поставленной задачи можно выбираем уровнемер, имеющий следующие характеристики.

Датчик Rosemount 3051L

Характеристики датчика:

- измеряемые среды: жидкости, в т.ч. агрессивные;
- основная приведенная погрешность: $\pm 0,075\%$;
- перенастройка диапазонов измерений: 100:1;
- выходные сигналы: 4-20 мА с цифровым сигналом на базе HART-протокола;

- диапазон измеряемых давлений: 0,00062- 2,068 МПа;
- влияние вибрации: незначительно;
- климатическое исполнение: от -40 до +80° С;
- взрывозащищенное исполнение.

Датчики предназначены для измерения уровня жидкостей в закрытых и открытых резервуарах, для производственных процессов с различными типами фланцевых соединений, с возможностью промывки мембран и защитой от парафиновых отложений.

Датчики нашли применение во всех отраслях промышленности и зарекомендовали себя, как надежные и качественные приборы измерения гидростатического давления (уровня), имеют взрывозащищенное и искробезопасное исполнение.

Влияние монтажного положения

Изменение монтажного положения не влияет на диапазон измерения. Отклонение нуля составляет для датчиков:

- при вертикальном монтаже датчика 0,249 кПа;
- при горизонтальном монтаже датчика 1,243 кПа.

В любом варианте смещение нуля может быть устранено калибровкой.

Влияние вибрации

Влияние вибрации незначительно, за исключением резонансных частот. При резонансных частотах влияние вибрации не превышает (0,1P_{max})% на единицу перегрузки (g) от 10 до 2000 Гц в любом направлении.

Смачиваемые детали модели 3051L

Технологические соединения на фланцах (сторона высокого давления):

- рабочие мембраны, включая поверхность уплотняющей прокладки, нержавеющая сталь 316 L, Hastelloy (сплав С-276) или тантал;
- удлинители, CF-3М (отливка из нержавеющей стали 316 L), Hastelloy (сплав С-276), подходит к номенклатуре труб сортамента 40 и 80;
- монтажный фланец: углеродистая сталь с цинково-кобальтовым покрытием или нержавеющая сталь.

Стандартные технологические соединения (сторона низкого давления):

- разделительные мембраны: нержавеющая сталь 316 L, Hastelloy (сплав С-276);
- стандартные фланцы и переходники: CF-3М (отливка из нержавеющей стали 316).

Детали, не подвергающиеся воздействию рабочей среды (несмачиваемые)

- корпус электроники: алюминиевый с низким содержанием меди или CF-3М (отливка из нержавеющей стали 316), полиуретановое покрытие, защита от пыли и влаги IP65, IP66.
- корпус сенсорного модуля Coplanar: CF-3М (отливка из нержавеющей стали 316).
- болты: углеродистая сталь с покрытием цинк-кобальт; аустенитная нержавеющая сталь 316 L; легированная сталь с цинковым покрытием; сплав К-500 (Monel).

Уплотнительные кольца крышек

Vupa-N

Сертификаты РФ

- Свидетельство об утверждении типа средств измерений №39252;
- разрешение на применение №РРС 00-30679, №РРС 00-40768;
- разрешение на применение №РРС 00-33760 (для датчиков, собранных в ПГ "Метран");
- Сертификат соответствия №РОСС US.ГБ06.В03543, №РОСС RU.МЕ55.В03543.

Взрывозащищенность

Искробезопасная электрическая цепь

- 0ЕхIаIIСТ5 X (-60°C ≤ Токр. ≤ 40°C)
- 0ЕхIаIIСТ4 X (-60°C ≤ Токр. ≤ 70°C)

Входные параметры

U_{вх} = 30 В I_{вх} = 200 мА

P_{вх} = 0,9 Вт C_{вх} = 0,012 мкФ

ГАБАРИТНЫЕ И УСТАНОВОЧНЫЕ РАЗМЕРЫ

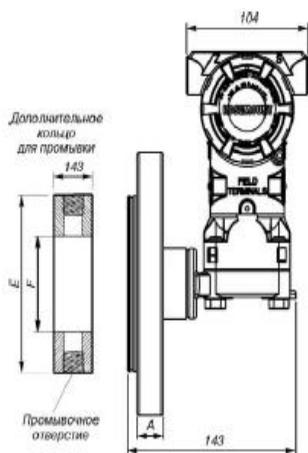


Рис.3. Конфигурация датчика 3051_L с фланцем заподлицо.

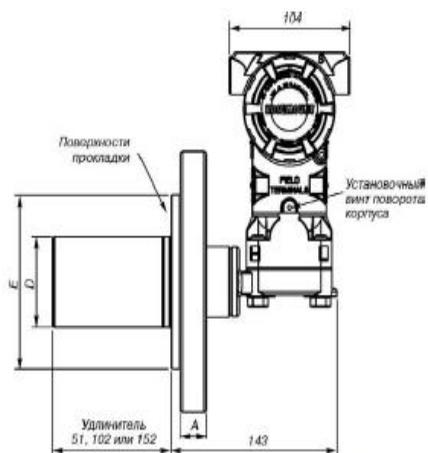


Рис.4. Конфигурация датчика 3051_L с удлинителем.

Рис. 31. Конфигурации датчиков

ЗАДАНИЯ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ

Рассчитать рабочую измерительную схему и выбрать первичный преобразователь для измерения уровня (в аппарате, трубопроводе, насосе и т.д.), удовлетворяющий следующим характеристикам.

Таблица 3

Характеристики преобразователя

№ варианта	Уровень, мм	Рабочая температура, °С	Абсолютная погрешность измерения, единицы измерения	Характеристики среды измерения: наименование, давление, Мпа, агрегатное состояние
1	1000	150	0,5	аммиак, -0,2 жидкость
2	120	76	0,5	аммиак, 0,4 газ
3	100	56	1	соляная кислота, 0,6 жидкость
4	50	-32	1	серная кислота, 0,8 жидкость
5	2000	-129	0,2	пропилен, 0,2 жидкость
6	2500	500	0,3	пропилен, 0,05 газ
7	3500	64	0,4	вода, 0,2 жидкость
8	1000	298	0,5	пар, 1 газ
9	850	870	0,6	хлор, 1,2 газ
10	456	125	0,7	фтор, -0,2 газ
11	698	298	0,8	трансформаторное масло, 0,9 жидкость

12	457	-50	0,9	уксусная кислота, 0,5 жидкость
13	320	-70	1	уксусная кислота, -0,02 газ
14	500	-80	1,1	угольная кислота, -0,02 жидкость
15	698	-90	1,2	муравьиная кислота, 0,01 жидкость
16	587	100	1,3	азотная кислота, 2 жидкость
17	200	156	1,4	фреон, 0,02 газ
18	256	148	1,5	бензин, 0,2 жидкость
19	248	169	0,5	керосин, -0,2 жидкость
20	639	289	0,5	битум, 0,5 жидкость
21	369	165	1	стирол, 1 жидкость
22	487	157	1	бензол, 2 жидкость
23	630	60	0,2	этилен, 2 жидкость
24	100	59	0,3	полиэферы, -0,2 жидкость
25	589	197	0,4	едкий натр, 2 жидкость
26	1258	121	0,5	щелочь, 1 жидкость
27	1369	178	0,6	молоко, 0,1 жидкость
28	425	125	0,7	пиво, 0,1 жидкость

29	1586	134	0,8	спирт, 0,1 жидкость
30	1236	145	0,9	серная кислота, 0,5 жидкость
31	1245	-10	1	аммиак, -0,2 жидкость
32	1458	251	1,1	аммиак, 0,4 газ
33	1658	-76	1,2	соляная кислота, 0,6 жидкость
34	1236	-56	1,3	серная кислота, 0,8 жидкость
35	1598	-32	1,4	пропилен, 0,2 жидкость
36	1245	-129	1,5	пропилен, -0,05 газ
37	1685	102	0,5	вода, 0,2 жидкость
38	2100	150	0,5	пар, 1 газ
39	2150	298	1	хлор, 1,2 газ
40	2147	870	1	фтор, 0,2 газ
41	2630	258	0,2	трансформаторное масло, 0,9 жидкость
42	2189	49	0,3	уксусная кислота, 0,5 жидкость
43	1872	132	0,4	уксусная кислота, 0,02 газ
44	1658	126	0,5	угольная кислота, -0,02 жидкость
45	1965	4	0,6	муравьиная кислота, 0,01 жидкость

46	1478	45	0,7	азотная кислота, 2 жидкость
47	1365	168	0,8	фреон, 0,02 газ
48	1856	56	0,9	бензин, 0,2 жидкость
49	1698	48	1	керосин, 0,2 жидкость
50	123	269	1,1	битум, 0,5 жидкость
51	156	289	1,2	стирол, 1 жидкость
52	145	165	1,3	бензол, 2 жидкость
53	254	-57	1,4	этилен, 2 жидкость
54	265	18	1,5	полиэферы, 0,2 жидкость
55	345	89	0,5	едкий натр, 2 жидкость
56	385	97	0,5	щелочь, 1 жидкость
57	396	21	1	молоко, 0,1 жидкость
58	452	78	1	Пиво, 0,1 жидкость
59	469	25	0,2	спирт, 0,1 жидкость
60	478	34	0,3	серная кислота, 0,5 жидкость
61	521	45	0,4	аммиак, -0,2 жидкость
62	263	15	0,5	аммиак, -0,4 газ

63	569	11	0,6	соляная кислота, 0,6 жидкость
64	687	-76	0,7	серная кислота, 0,8 жидкость
65	623	-56	0,8	пропилен, 0,2 жидкость
66	789	-32	0,9	пропилен, 0,05 газ
67	752	29	1	вода, 0,2 жидкость
68	745	160	1,1	пар, 1 газ
69	763	41	1,2	хлор, 1,2 газ
70	852	98	1,3	фтор, 0,2 газ
71	863	70	1,4	трансформаторное масло, 0,9 жидкость
72	841	58	1,5	уксусная кислота, 0,5 жидкость
73	956	69	0,5	уксусная кислота, 0,02 газ
74	974	12	0,5	угольная кислота, 0,02 жидкость
75	985	16	1	муравьиная кислота, 0,01 жидкость
76	963	14	1	азотная кислота, 2 жидкость
77	941	14	0,2	фреон, 0,02 газ
78	1234	-18	0,3	бензин, 0,2 жидкость
79	1235	56	0,4	керосин, 0,2 жидкость

80	1369	134	0,5	битум, 0,5 жидкость
81	1456	269	0,6	стирол, 1 жидкость
82	1789	89	0,7	бензол, 2 жидкость
83	1256	-65	0,8	этилен, 2 жидкость
84	1458	57	0,9	полиэферы, 0,2 жидкость
85	1697	88	1	едкий натр, 2 жидкость
86	165	89	1,1	щелочь, 1 жидкость
87	126	97	1,2	молоко, 0,1 жидкость
88	256	82	1,3	Пиво, 0,1 жидкость
89	284	78	1,4	спирт, 0,1 жидкость
90	269	25	1,5	серная кислота, 0,5 жидкость
91	369	134	0,5	аммиак, -0,2 жидкость
92	357	137	0,5	аммиак, -0,4 газ
93	346	18	1	соляная кислота, 0,6 жидкость
94	387	11	1	серная кислота, 0,8 жидкость
95	395	7	0,2	пропилен, 0,2 жидкость
96	324	5	0,3	пропилен, -0,05 газ

97	469	32	0,4	вода, 0,2 жидкость
98	587	129	0,5	пар, 1 газ
99	694	120	0,6	хлор, 1,2 газ
100	758	61	0,7	фтор, 0,2 газ

Для выбранных средств измерения требуется указать следующие характеристики.

1. Модель и наименование (тип прибора, классификация и т.д.).
2. Класс точности, погрешности измерения и т.д.
3. Особенности конструкции датчика (внутреннее устройство датчика, материалы, использующиеся в приборе).
4. Градуировка (номинальные статические характеристики).
5. Диапазон измерения.
6. Выходной сигнал.
7. Методика поверки.
8. Габаритные и присоединительные размеры (способы соединения, размеры различных частей и элементов и т.д.).
9. Материал монтажных частей (вид монтажа прибора к аппарату и материалы монтажных изделий и т.п.).
10. Соответствие техническим условиям, ГОСТ и другим нормативным документам (ТУ, ГОСТы, международные стандарты, реестр средств измерения).
11. Требования гарантийного обслуживания и сроки поверки приборов (сложность поверки и условия поверки).
12. Требования по герметичности и взрывозащите.

Рассчитать характеристики необходимые для выбора прибора и нормальной эксплуатации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Правильный выбор датчиков уровня приводит к адекватной реакции системы управления на возникающие в объекте управления возмущения и улучшает динамические характеристики контуров регулирования.

При адекватном выборе датчиков уровня сохраняется материальный баланс по жидкой фазе, увеличивается выход качественной продукции на производстве и, как следствие, годовая прибыль.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кулаков М.В. Технологические измерения и приборы для химических производств: Учебник для вузов по специальности «Автоматизация и комплексная механизация химико-технологических процессов». – 3-е изд. – перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1983.-424 с., ил.

2. Беспалов А.В., Харитонов Н.И. Задачник по системам управления химико-технологическими процессами: Учебное пособие для вузов. – М.: ИКЦ «Академкнига», 2005.-307 с.

3. Беспалов А.В., Харитонов Н.И. Системы управления химико-технологическими процессами: Учебное пособие для вузов. – М.: ИКЦ «Академкнига», 2007.-690 с.

4. Каталог. Приборы и средства автоматизации. Том 3. Приборы для измерения уровня жидкости и сыпучих веществ. Москва ООО Издательство «Научтехлитиздат» - 2005 г. - 368 с.

Учебное издание

Минигалиев Григорий Барыевич

Долганов Андрей Викторович,
кандидат технических наук

ВЫБОР ДАТЧИКОВ УРОВНЯ

УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ

Корректор Белова И.М.
Худ. редактор Федорова Л.Г.

Сдано в набор 13.12.2014.
Подписано в печать 12.01.2015.
Бумага писчая. Гарнитура Таймс.
Усл. печ. л. 3,6. Тираж 100 экз.
Заказ № 26.

НХТИ (филиал) ФГБОУ ВПО «КНИТУ»,
г. Нижнекамск, 423570, ул. 30 лет Победы, д. 5а.