

Содержание

| | |
|------------------------------|----|
| Введение | 2 |
| 1 Попавковый плотномер | 4 |
| 2 Гидростатический плотномер | 6 |
| 3 Вибрационный плотномер | 8 |
| 4 Ультразвуковой плотномер | 10 |

| | | | | | | | | |
|--------------|--------------|--|--|--|--------------|--------------|--------------|--|
| Инв. № подл. | Подп. и дата | | | | Взам. инв. № | Инв. № дубл. | Подп. и дата | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |

Введение

Люди могли измерять плотность уже в древности. Так например Архимед в своем законе использует плотость жидкости. В настоящее время необходимость измерения плотности жидкости выросла до такой степени, что было выпущено множество статей и книг по способам и приборам измерения плотности.

Плотностью ρ однородного вещества называют отношение его массы m к объему V .

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (1)$$

Для неоднородного вещества плотность определяется как предел отношения массы к объему, когда объем стягивается к точке, в которой определяется плотность:

$$\rho = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta m}{\Delta V} \quad (2)$$

где Δm - масса элементарного объема ΔV .

Также в ряде отраслей науки и техники для характеристики вещества применяют **относительную плотность**, представляющая собой отношение плотности рассматриваемого вещества к плотности другого, условного, вещества при определенных физических условиях. В качестве условного вещества обычно принимают дистиллированную воду.

Существует достаточно много методов измерения плотности, на которых основана работа большого количества приборов.

Большую группу методов называют **поплавково-весовыми**, данные методы основаны на определении выталкивающей силы, действующее на испытуемое тело или вспомогательное тело (поплавок). Эта сила в соответствии с законом Архимеда прямо пропорциональна плотности среды, в которую погружено тело. Сюда можно отнести методы ареометра, гидростатического взвешивания, поплавковый, флотационный.

Следующую группу образуют **гидростатические** методы измерения, которые базируются на зависимости статического давления столба жидкости или газа постоянной высоты от их плотности.

Выделяют также **гидродинамические** методы, основанные на зависимости от плотности таких физических величин, как скорость истечения струи жид-

| | | | | | | | | | | |
|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|---------------------|--|--|--|--|------|
| Изн. № подл. | Подп. и дата | Взам. инв. № | Изн. № дубл. | Подп. и дата | КСУИ.207.435.001 ПЗ | | | | | Лист |
| | | | | | | | | | | 2 |
| | | | | | | | | | | Изм |

кости или газа из отверстия, сила удара струи о преграду, скорость падения тела в жидкости, энергия потока вещества, динамическое давление и др.

На сегодняшний день развились также и новые методы определения жидкости. **Радиационный** метод основан на зависимости плотности от ослабления радиоактивного излучения облученного вещества. **Ультразвуковой** метод основан на скорости распронения ультразвуковых волн в веществе. **Вибрационный** метод основан на зависимоtси плотности от параметров упругих колебаний, со-общаемых сусуду с исследуемым веществом.

Приборы, осуществляющие измерение плотности называются **плотноте-рами**. Далее будут рассмотрены плотномеры, работающие по разным принципам.

| | | | | | | | | | |
|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|---------------------|--|------|--|--|
| Инв. № подл. | Подп. и дата | Взам. инв. № | Инв. № дубл. | Подп. и дата | | | | | |
| | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | |
| Изм | Лист | № докум. | Подп. | Дата | КСУИ.207.435.001 ПЗ | | Лист | | |
| | | | | | | | 3 | | |

| Инв. № подл. | Подп. и дата | Взам. инв. № | Инв. № дубл. | Подп. и дата |
|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| | | | | |

На рисунке 1 представлена схема плотномера с плавающим поплавком. Жидкость по трубке 6 поступает в переливной сосуд 5, а оттуда по проводящей трубке 4 поступает в измерительный сосуд 2, который также снабжен переливным устройством. Требуемая скорость потока устанавливается диафрагмой 10. Для отвода излишков воды имеется трубка 9. В результате действия выталкивающей силы поплавков перемещается по вертикали, тем самым сердечник совершает те же перемещения вдоль индуктивного датчика 7, включенный в схему измерительного моста 1. Для коррекции показаний изменение температуры, используется датчик температуры 3.

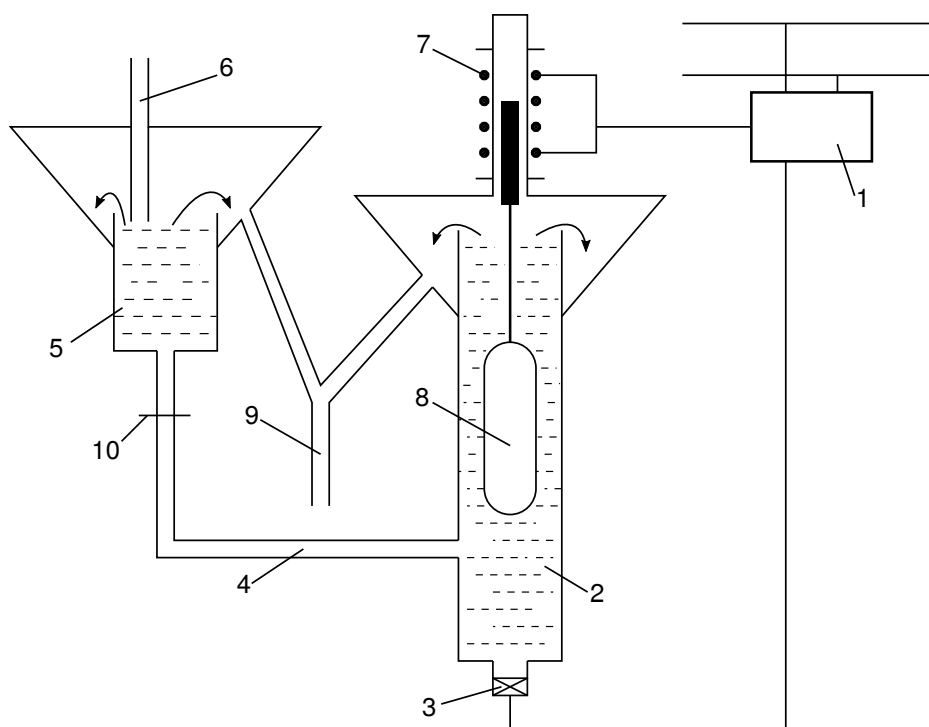


Рисунок 1 – Схема плотнометра с плавающим поплавком

На поплавков действует выталкивающая сила по закону Архимеда, эта сила компенсирует вес тела поплавок и вес миниска. В силу малости выталкивающей силы миниска в воздухе, она не учитывается. Таким образом сила Архимеда включает в себя две части:

$$P_a = (v + lS)\rho g \quad (3)$$

$$P_c = (V - v - lS)D \quad (4)$$

где выражение (1) характеризует вес жидкости в объеме погруженной части стержня, а выражение (2) вес воздуха в объеме погруженной части стержня.

Тогда можем записать закон архимеда, с учетом того, что поплавков не тонет:

$$m + La\rho = (v + lS)\rho + (V - v - lS)D \quad (5)$$

или

$$m - VD + La\rho = (v + lS)\rho - (v + lS)D \quad (6)$$

здесь v - объем нижней части поплавок без стержня; l - длина погруженной части стержня; L - длина окружности сечения стержня; M - масса поплавок в воздухе; m - масса поплавок; D - плотность воздуха; a - капиллярная постоянная. Выражение $La\rho$ характеризует массу миниска, обвалакивающего стержень.

Учитывая, что $m - VD$ есть масса M поплавок в воздухе, получим итоговое выражение для плотности.

$$\rho = \frac{M + (v + lS)D}{v + lS - La} \quad (7)$$

Объем поплавок определяют из пределов цены деления шкалы прибора.

Данный прибор имеет довольно простую и не дорогостоящую конструкцию, при том он позволяет измерять плотность с большой точностью (0.2 - 2%) и с учетом температурных изменений. Также прибор довольно инертный, из-за чего процесс измерения плотности становится довольно длительным.

| | | | | | | | | | | |
|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|---------------------|--|--|--|--|------|
| Инв. № подл. | Подп. и дата | Взам. инв. № | Инв. № дубл. | Подп. и дата | | | | | | |
| | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | |
| Изм | Лист | № докум. | Подп. | Дата | КСУИ.207.435.001 ПЗ | | | | | Лист |
| | | | | | | | | | | 5 |

2 Гидростатический плотномер

Гидростатический метод измерения плотности основан на зависимости давления P столба жидкости высотой H от плотности ρ жидкости. Эта зависимость определяется формулой:

$$P = \rho g H \quad (8)$$

Но на практике, чтобы исключить влияние колебаний уровня жидкости, применяют дифференциальный метод при измерении разности давлений ΔP двух столбов жидкости разной высоты:

$$\Delta P = \rho q h \quad (9)$$

где h - разность высот столбов жидкости.

Давайте рассмотрим патент RU 2 589 773 С1. Ниже, на рисунке 2, представлен разработанный прибор измеряющий расход и плотность пульпы в напорных трубопроводах.

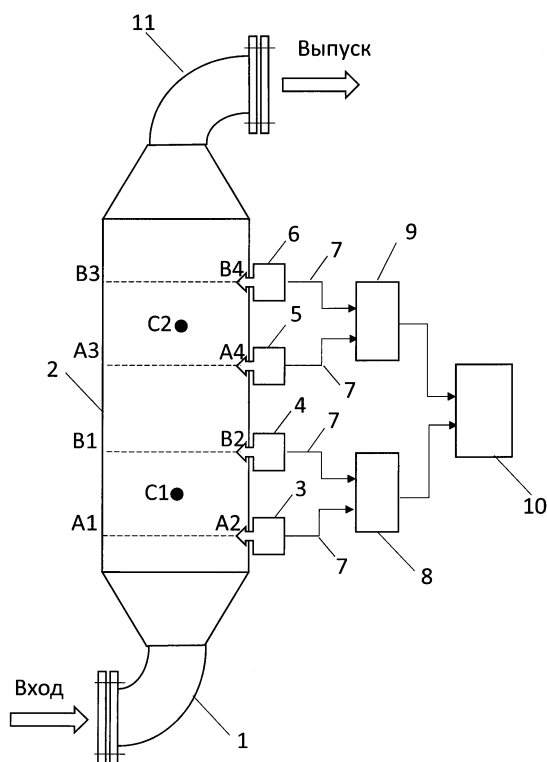


Рисунок 2 – Устройство для измерения плотности и расхода жидкости

| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--------------|------|--------------|-------|------|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|
| Инв. № подл. | | Подп. и дата | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Взам. инв. № | | Подп. и дата | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Инв. № дубл. | | Подп. и дата | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Подп. и дата | | Подп. и дата | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Инв. № подл. | | Подп. и дата | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Изм | Лист | № докум. | Подп. | Дата | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

Данное устройство содержит впускной патрубок 1, напорный трубопровод 2, устройства 3, 4, 5 и 6 отбора давления, импульсные линии 7, датчики перепада давления 8 и 9, вычислительное устройство 10, выпускной патрубок 11.

Измерив при помощи датчиков давления 3 - 6 мы можем найти разность давления:

$$\Delta P_1 = P_2 - P_1 \tag{10}$$

$$\Delta P_2 = P_4 - P_3 \tag{11}$$

где P_1 и P_2 - величины давлений пульпы, измеренных на нижней и верхней границах 1-го участка; ΔP_1 - величина перепада давления на первом участке. Аналогично для второго участка.

Теперь воспользовавшись выражением (9) можем найти значение плотности данной жидкости.

$$\rho = \frac{\Delta P_1}{gh} \tag{12}$$

Хочется также дополнить, что расстояние между двумя точками измерения давления определяется из пределов измерения плотности и давления:

$$\begin{cases} \Delta P_{max} = gh\rho_{max} \\ \Delta P_{min} = gh\rho_{min} \end{cases} \tag{13}$$

Данный прибор обладает высокой погрешностью - $\pm 1\%$ диапазона шкалы. Такими плотномерами можно измерять плотность вязких, загрязненных, кристаллизирующихся и агрессивных жедкостей, они пригодны как для открытых, так и для закрытых резервуаров. Их показания не зависят от скорости потока жидкости и ее поверхностного натяжения.

Из недостатков хочется отметить, что для высокой точности требуется большая высота столба, что делает прибор довольно громоздким.

| | | | | | | | | | | |
|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|---------------------|--|--|--|--|------|
| Инв. № подл. | Подп. и дата | Взам. инв. № | Инв. № дубл. | Подп. и дата | | | | | | |
| | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | |
| Изм | Лист | № докум. | Подп. | Дата | КСУИ.207.435.001 ПЗ | | | | | Лист |
| | | | | | | | | | | 7 |

3 Вибрационный плотномер

На рисунке 3 представлена упрощенная схема вибрационного плотномера. Данный прибор относится к частотному типу вибрационных плотномеров, в которых измеряют функционально связанную с плотностью вещества частоту собственных колебаний резонатора.



Рисунок 3 – Упрощенная схема плотномера DE40/DE45

Здесь контроллер колебаний, представляющий собой катушку индуктивности с переменным напряжением определенной частоты, изменение магнитного поля катушки заставляет магнит, то отталкиваться, то притягиваться, что вызывает колебания измерительной трубки с измеряемой жидкостью.

Период колебаний T системы определяется следующим выражением:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{\rho V_c + m_c}{K}} \quad (14)$$

здесь ρ - плотность содержимого трубки, V_c - объем внутренней части трубки, m_c - масса трубки, K - коэффициент жесткости трубки.

Теперь можем получить выражение для плотности:

$$\rho = \frac{K}{4\pi^2 V_c} T^2 - \frac{m_c}{V_c} = AT^2 + B$$

Далее измерения можно упростить, введя ρ_W - плотность воды, ρ_A - плотность воздуха. Найдем их разность, пользуясь выражением (15), получим:

$$\rho_A - \rho_W = A(T_A^2 - T_W^2)$$

Тогда можем найти коэффициент A :

| | | | | | |
|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--|
| Изн. № подл. | Подп. и дата | Взам. инв. № | Инв. № дубл. | Подп. и дата | сти с переменным напряжением определенной частоты, изменение магнитного поля катушки заставляет магнит, то отталкиваться, то притягиваться, что вызывает колебания измерительно трубки с измеряемой жидкостью. |
| | | | | | Период колебаний T системы определяется следующим выражением: |
| | | | | | $T = 2\pi\sqrt{\frac{\rho V_c + m_c}{K}}$ (14) |
| | | | | | здесь ρ - плотность содержимого трубки, V_c - объем внутренней части трубки, m_c - масса трубки, K - коэффициент жесткосит трубки. |
| | | | | | Теперь можем получить вырежение для плотности: |
| | | | | | $\rho = \frac{K}{4\pi^2 V_c} T^2 - \frac{m_c}{V_c} = AT^2 + B$ |
| | | | | | Далее измерения можно упростить, введя ρ_W - плотность воды, ρ_A - плотность воздуха. Найдем их разность, полюзуясь выражением (15), получим: |
| | | | | | $\rho_A - \rho_W = A(T_A^2 - T_W^2)$ |
| | | | | | Тогда можем найти коэффициент A : |
| Изн. № подл. | Подп. и дата | Взам. инв. № | Инв. № дубл. | Подп. и дата | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| Изм | Лист | № докум. | Подп. | Дата | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| </ | | | | | |

$$A = \frac{\rho_A - \rho_W}{T_A^2 - T_W^2}$$

данную процедуру также называют калибровкой плотномера.

И поскольку плотность воздуха ρ_A является табличной величиной, его можно использовать при измерении искомой плотности жидкости ρ_S .

$$A(T_A^2 - T_S^2) = \rho_A - \rho_S$$

В итоге получим искомое значение плотности жидкости:

$$\rho_S = \rho_A - A(T_A^2 - T_S^2) \tag{15}$$

Как видно из выражения (15) пределы измерения зависит от жесткости и объема трубки, а также от частоты колебаний контроллера.

Основным достоинством данных плотномеров является высокая точность, чувствительность и надежность.

Вместе с тем частотные плотномеры обладают и недостатками, к которым относятся ограниченность допускаемого расзода вещества определяемого площадью сечения канала, нелинейность шкалы.

| | | | | | | | | | | |
|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|---------------------|--|--|--|--|------|
| Инв. № подл. | Подп. и дата | Взам. инв. № | Инв. № дубл. | Подп. и дата | | | | | | |
| | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | |
| Изм | Лист | № докум. | Подп. | Дата | КСУИ.207.435.001 ПЗ | | | | | Лист |
| | | | | | | | | | | 9 |

4 Ультразвуковой плотномер

| | | | | | | | | | | | |
|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|---------------------|--|--|--|--|------|------|
| Инв. № подл. | Подп. и дата | Взам. инв. № | Инв. № дубл. | Подп. и дата | | | | | | Лист | |
| | | | | | | | | | | 10 | |
| | | | | | | | | | | Изм | Лист |
| | | | | | КСУИ.207.435.001 ПЗ | | | | | | |