

ПНЕВМОДИНАМИЧЕСКИЙ БЕСКОНТАКТНЫЙ КОНТРОЛЬ ПЛОТНОСТИ ЖИДКИХ ВЕЩЕСТВ

Д.М. Мордасов

Кафедра «Автоматизированные системы и приборы», ТГТУ

*Представлена профессором С.В. Пономаревым
и членом редколлегии профессором В.И. Коноваловым*

Ключевые слова и фразы: бесконтактные методы измерения; кинетическое воздействие струи газа; плотность жидкостей; принцип измерения замещением.

Аннотация: Рассмотрены пневмодинамические бесконтактные методы контроля плотности жидкостей и реализующее их устройство. Методы основаны на зависимости времени изменения глубины лунки на поверхности жидкости на заданную величину и на зависимости величины давления на входе пневмометрической трубки в момент, когда углубление на поверхности жидкости достигает заданного значения от плотности жидкости.

Практически все известные пневматические методы предполагают контакт измерительного элемента с контролируемым веществом [1, 2]. Проблема создания пневматических бесконтактных методов контроля плотности не решена и до настоящего времени остается актуальной. Перспективным направлением в решении такой проблемы является развитие пневмодинамического принципа измерения замещением.

Физические основы пневмодинамических методов контроля плотности $\rho_{ж}$ жидких веществ базируются на эффектах, возникающих в результате воздействия на контролируемые вещества пневматическим сигналом, параметры которого изменяются во времени.

В пневмодинамических контактных методах измерения плотности обязательным является выполнение измерительного элемента в виде колокола (пневмогидравлической емкости), погруженного в контролируемую жидкость [3 – 6]. Процессы, происходящие в такого типа измерительном элементе при подаче в него газа с расходом $G = \text{const}$, описываются системой дифференциальных уравнений [4]

$$\begin{cases} h = \frac{1}{\rho_{ж}g}(P_{к} - P_{а}) - H_1, \\ h \frac{dP_{к}}{dt} + P_{к} \frac{dh}{dt} = \frac{RTG}{S}, \end{cases} \quad (1)$$

где $H_1 = H - l$ – уровень жидкости над пневмогидравлической емкостью, м; H – глубина погружения емкости, м; l – длина емкости, м; h – уровень жидкости, м; R – газовая постоянная Дж/(кг·К); T – абсолютная температура, К; S – площадь по-

перечного сечения емкости, m^2 ; g – ускорение свободного падения, m/c^2 ; t – время, c ; P_k, P_a – давление в емкости и над поверхностью жидкости соответственно, Па.

Время t_{12} изменения уровня жидкости в емкости l на заданную постоянную величину $\Delta h = h_2 - h_1$, где h_2, h_1 – максимальное и минимальное значения уровня, m , определяется из системы уравнений (1)

$$t_{12} = m_1 + m_2 \rho_{ж}, \quad (2)$$

где $m_1 = \frac{P_a S (h_2 - h_1)}{RTG}$, $m_2 = \frac{Sg (h_2 - h_1) (h_2 + h_1 + H_1)}{RTG}$.

Согласно уравнению (2) о плотности жидкости судят по времени изменения уровня жидкости в пневмогидравлическом измерительном элементе t_{12} на заданную величину при подаче на его вход газа с постоянным расходом G .

В настоящей работе приведено описание пневмодинамического бесконтактного метода контроля плотности жидких веществ и реализующего его устройства.

Сущность предлагаемого метода измерения состоит в воздействии на поверхность жидкости струей газа и фиксации параметров воздействующего сигнала, приводящих к изменению глубины $h_{п}$ лунки на поверхности жидкости на заданную величину. При этом осуществляется замещение совокупности архимедовой и поверхностной сил, действующих со стороны контролируемой жидкости, силой динамического воздействия газовой струи на поверхность жидкости.

На рис. 1 показана двухфазная система «струя газа – жидкость». Струя газа, вытекающая из струйной трубки 1, воздействует на поверхность жидкости 2 и при низкой скорости газа образует углубление 3 (лунку) устойчивой конфигурации с осевой симметрией.

Энергетические изменения в каждой единице объема газа в струе над поверхностью жидкости определяют глубину $h_{п}$ проникновения струи в жидкость. Коэффициент k позволяет исключить из рассмотрения полное поперечное сечение потока, проявляющееся в качестве потенциальной энергии взаимодействия [8].

Для турбулентного потока

$$E = k \pi R_{тр}^2 \rho_{г} W^2 h_{п}, \quad (3)$$

где E – энергия струи газа, Дж; $R_{тр}$ – радиус струйной трубки, m ; $\rho_{г}$ – плотность газа (воздуха), kg/m^3 ; W – средняя скорость истечения на выходе сопла, m/c ; k – коэффициент формы.

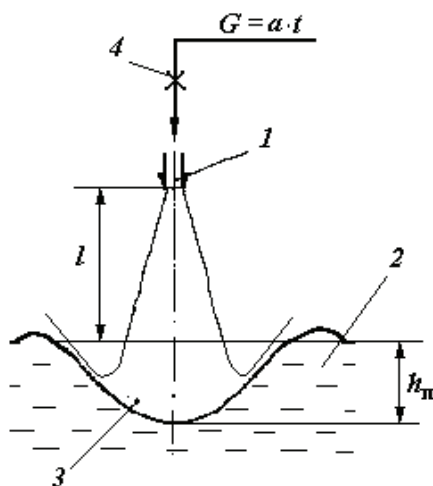


Рис. 1 Двухфазная система «струя газа – жидкость»

Энергетическое воздействие струи газа на жидкость проявляется в трех формах:

- перемещение жидкости (гравитационная энергия E_A , Дж);
- движение жидкости (кинетическая энергия E_K , Дж);
- увеличение поверхности (поверхностная энергия E_{II} , Дж).

При малой скорости перемещения жидкости ее энергией движения можно пренебречь.

Так как лунка имеет осевую симметрию, то энергия E_A , затрачиваемая на перемещение жидкости вследствие действия архимедовой силы, может быть определена из уравнения

$$E_A = (\rho_{ж} - \rho_{г}) V g h_{II}, \quad (4)$$

где $V = \frac{1}{2} \pi r^2 h_{II}$ – объем взаимодействия (лунки), m^3 ; r – радиус основания лунки, м.

Поверхностная энергия E_{II} равна произведению приращения поверхности углубления на поверхностное натяжение σ

$$E_{II} = \sigma \Delta S, \quad (5)$$

где $\Delta S = S_1 - S_2$ – разность между площадью поверхности лунки S_1 и площадью ее основания S_2 .

В соответствии с этим баланс энергий может быть записан

$$E = E_A + E_{II}. \quad (6)$$

При условии, что $\sigma = \sigma_{ср} \pm \Delta\sigma$, где $\sigma_{ср}$ – среднее значение поверхностного натяжения для выбранного диапазона контролируемых жидкостей, Н/м, уравнение (6) с учетом (3) – (5) после преобразований примет вид

$$W^2 = \frac{\Delta S}{k\pi R_{гп}^2 \rho_{г} h_{II}} \sigma_{ср} + \frac{gr^2 h_{II}}{2kR_{гп}^2 \rho_{г}} \left(\rho_{ж} \pm \frac{2\Delta S}{\pi gr^2 h_{II}^2} \Delta\sigma \right), \quad (7)$$

где $\frac{2\Delta S}{\pi gr^2 h_{II}^2} \Delta\sigma = \Delta\rho_{ж}$ – абсолютная погрешность измерения плотности, $кг/м^3$,

вызванная изменением поверхностного натяжения на $\Delta\sigma$; $\sigma_{ср}$ – среднее значение

поверхностного натяжения, Н/м; $\frac{\Delta S}{k\pi R_{гп}^2 \rho_{г} h_{II}} \sigma_{ср} = A$ – балластное значение

выходного сигнала, $м^2/с^2$.

Зависимость (7), если $\frac{2\Delta S}{\pi gr^2 h_{II}^2} \Delta\sigma \ll \rho_{ж}$,

примет вид

$$W^2 = A + B\rho_{ж}, \quad (8)$$

где $B = \frac{gr^2 h_{II}}{2kR_{гп}^2 \rho_{г}}$.

При изменении скорости газа во времени по линейному закону

$$W = at,$$

где a – ускорение, $м/с^2$, в пределах от $W_1 = 0$ до W_2 , соответствующей изменению глубины лунки на h_{II} , из (8) получим

$$t^2 = \frac{\Delta S}{a^2 k\pi R_{гп}^2 \rho_{г} h_{II}} \sigma_{ср} + \frac{gr^2 h_{II}}{2a^2 kR_{гп}^2 \rho_{г}} \rho_{ж}, \quad (9)$$

Одной из модификаций пневмодинамического бесконтактного метода является метод, согласно которому в качестве меры плотности жидкости принимают перепад давления ΔP на пневматическом сопротивлении 4 (см. рис. 1).

Расход газа при турбулентном режиме течения по пневматическому сопротивлению 4 определяется уравнением [7]

$$G_4 = \alpha \varepsilon S_4 \sqrt{2\rho_r} \sqrt{\Delta P}, \quad (10)$$

где ε – поправочный множитель, учитывающий изменения плотности газа при протекании через пневматическое сопротивление; S_4 – площадь поперечного сечения дросселя, м²; α – коэффициент расхода; ΔP – перепад давлений на дросселе, Па.

С учетом неразрывности газового потока $G_4 = G_{тр}$ и того, что $G_{тр} = \rho_r W S_{тр} = \pi R_{тр}^2 \rho_r W$, скорость истечения газа на выходе из сопла можно представить

$$W = \frac{\alpha \varepsilon S_4}{\pi R_{тр}^2} \sqrt{\frac{2}{\rho_r}} \sqrt{\Delta P}. \quad (11)$$

Уравнение (8) с учетом (11) относительно ΔP можно записать

$$\Delta P = \frac{\pi \Delta S R_{тр}^2}{2k h_{п} \alpha^2 \varepsilon^2 S_4^2} \sigma_{ср} + \frac{\pi^2 g r^2 h_{п} R_{тр}^2}{4k \alpha^2 \varepsilon^2 S_4^2} \rho_{ж}.$$

На рис. 2 представлена схема устройства для реализации пневмодинамического метода измерения плотности жидких веществ; на рис. 3 – временная диаграмма работы.

Устройство содержит источник света 1 , два светоприемника 2 и 3 , расположенные над поверхностью жидкости 4 . Выходы светоприемников подключены соответственно к входам 5 и 6 триггера с отдельными входами 7 , у которого прямой выход 8 соединен с входом измерителя времени 9 , а инверсный выход 10 – через электропневмопреобразователь 11 – с камерой 12 пневмоклапана 13 . В камеру 14 пневмоклапана 13 подано давление подпора. Сопло 15 размещено в камере 16 клапана 13 , соединенной через дроссель 17 с атмосферой.

Источник газа (на рис. 2 не показан) подключен к входу пневматического тумблера 18 , выход которого соединен с входом 19 генератора линейно изменяющегося расхода 20 . Конструктивно такой генератор состоит из пневматического повторителя со сдвигом 21 , двух дросселей 22 и 23 , емкости 24 , пневматического клапана 13 , повторителя – усилителя мощности 27 , причем выход пневматического тумблера 18 соединен через дроссель 22 с камерой 26 , выход которой через регулируемый дроссель 23 соединен с емкостью 24 . Выход камеры 25 соединен с емкостью 24 непосредственно. Выход повторителя-усилителя мощности 27 через пневматическое сопротивление 28 подключен к струйной трубке 29 .

Пуск устройства осуществляется включением тумблера 18 и подачей на вход 19 давления питания сжатым воздухом $P_{пит}$.

В начальный момент времени поверхность жидкости не подвержена силовому воздействию газовой струи. Световой поток от источника света 1 , отражаясь от точки A недеформированной поверхности, попадает на светоприемник 2 , сигнал $U_2 = 1$ (рис. 3, б) с которого подается на вход 5 триггера с отдельными входами 7 . Сигнал $U_8 = 1$ (рис. 3, з) с прямого выхода 8 триггера 7 подается на измеритель времени 9 . Напряжение с инверсного выхода 10 триггера 7 поступает на вход электропневматического преобразователя 11 , где преобразуется в давление P_{11} и подается на управляющий вход 30 генератора линейно изменяющегося расхода 20 .

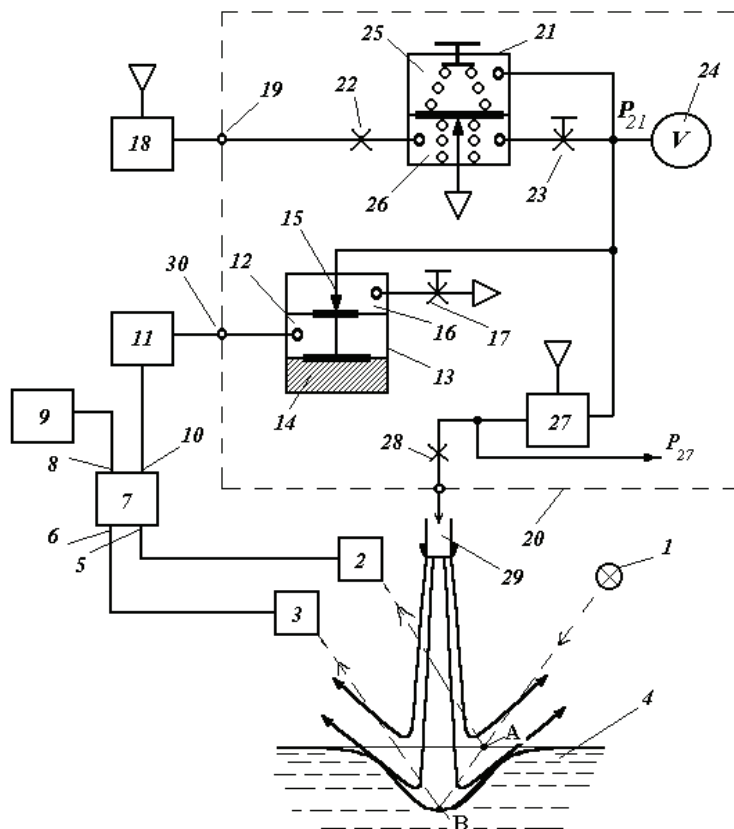


Рис. 2 Пневмодинамическое бесконтактное устройство контроля плотности жидких веществ

(в камеру 12 клапана 13). При давлении $P_{11} = 0$ сопло 15 клапана 13 закрыто, благодаря действию давления подпора поданного в камеру 14. Генератор линейно изменяющегося расхода 20 увеличивает во времени расход газа в струйную трубку 29.

Как только глубина лунки на поверхности жидкости достигнет заданного значения h_n (рис. 3, а), отраженный от точки В поверхности углубления световой поток поступит на светоприемник 3. Сигналом $U_3 = 1$ (рис. 3, в) с выхода светоприемника 3 триггер 7 переключится в новое положение, при котором напряжение $U_8 = 0$ на прямом выходе 8. Этим сигналом отключается измеритель времени 9, а сигнал $U_{10} = 1$ (рис. 3, д) с инверсного выхода 10, сформирует давление $P_{12} = 1$ в камере 12, что повлечет перемещение мембранного блока пневматического клапана 13 вниз. Сопло 15 откроется и через него произойдет сброс в атмосферу выходного сигнала с генератора линейно изменяющегося расхода 20, т.е. расход газа, подаваемый в струйную трубку 29, станет равным нулю.

На выходе генератора 20 линейно изменяющегося расхода при $U_{10} = 1$ формируется сигнал нулевого уровня, под действием которого поверхность контролируемой жидкости 4 принимает исходное состояние. Отраженный световой поток вернется в первоначальное положение, т.е. будет поступать на светоприемник 2, переключая триггер 7 и включая измеритель времени 9.

Состояние равновесия пневматического повторителя 21 описывается уравнением (при условии, что результирующая сила F_n , развиваемая пружинами, стремится закрыть сопло сброса в атмосферу)

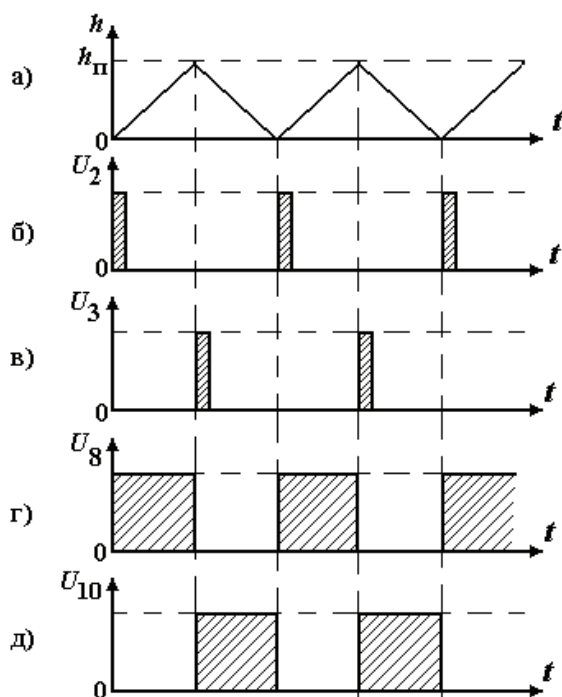


Рис. 3 Временная диаграмма работы устройства контроля плотности

$$P_{25} + P_c = P_{26}, \quad (12)$$

где $P_c = \frac{F_{п}}{S_m}$ – давление сдвига выходного сигнала повторителя 21, Па; P_{26} – давление в камере 26, Па; S_m – площадь мембраны пневматического повторителя 21, м²; P_{25} – давление в камере 25, Па.

Так как давление в камеру 25 поступает из емкости пневматического инерционного звена первого порядка (дрозсель 23, емкость 24), входным давлением для которого является P_{26} , то изменение давления P_{25} будет описываться дифференциальным уравнением

$$\tau \frac{dP_{25}}{dt} + P_{25} = P_{26}, \quad (13)$$

где $\tau = \frac{V_{24}}{RT\beta_{23}}$ – постоянная времени инерционного звена, с; V_{24} – объем емкости 24, м³; β_{23} – проводимость дросселя 23, м·с.

С учетом (12) уравнение (13) примет вид

$$\tau \frac{dP_{25}}{dt} = P_c. \quad (14)$$

Решая дифференциальное уравнение (14) относительно P_{25} , получим

$$P_{25} = \frac{1}{\tau} P_c t. \quad (15)$$

Расход газа G_{29} по струйной трубке 29, проводимость которой $\alpha_{29} \rightarrow \infty$, определяется расходом газа G_{28} по пневматическому сопротивлению 28, и при линейном режиме течения

$$G_{29} = G_{28} = \alpha_{28}(P_{27} - P_{\text{атм}}), \quad (16)$$

где α_{28} – проводимость пневматического сопротивления 28, м·с; $P_{27} = P_{25}$ – давление на выходе усилителя мощности 27, Па.

Учитывая (16), из уравнения (15) при $P_{\text{атм}} = 0$ получим

$$G_{29}(t) = \frac{\alpha_{28}}{\tau} P_c t. \quad (17)$$

С другой стороны, расход газа вычисляется как произведение скорости $W(t)$ истечения газа из трубки, плотности газа ρ_r и площади поперечного сечения трубки 29, т.е.

$$G_{29}(t) = W(t) \rho_r S_{29}. \quad (18)$$

Из (17) и (18) скорость истечения газа можно представить в виде

$$W(t) = \frac{G_{29}(t)}{\rho_r S_{29}} = \frac{\alpha_{28}}{\tau} \frac{P_c}{\rho_r S_{29}} t, \quad (19)$$

где α_{28} , ρ_r , τ , P_c , S_{29} – постоянные величины; $S_{29} = \pi R_{29}^2$ – площадь поперечного сечения струйной трубки 29, м².

Из уравнения (19) видно, что скорость истечения газа из трубки линейно возрастает с ускорением

$$a = \frac{\alpha_{28}}{\tau} \frac{P_c}{\rho_r S_{29}}. \quad (20)$$

Уравнение (8) с учетом (20) можно записать в виде

$$t^2 = \frac{\tau^2 \rho_r \pi R_{29}^2 \Delta S}{\alpha_{28}^2 P_c^2 k h_{\text{п}}} \sigma_{\text{ср}} + \frac{\tau^2 \rho_r \pi^2 R_{29}^2 g r^2 h_{\text{п}}}{2 \alpha_{28}^2 P_c^2 k} \rho_{\text{ж}}. \quad (21)$$

Плотность жидких веществ определяют по времени, за которое линейно нарастающий расход газа изменяет глубину лунки на поверхности контролируемой жидкости на заданную величину.

Одной из модификаций рассмотренного метода является метод, согласно которому мерой плотности жидкости является давление на выходе усилителя мощности 27.

Расход газа при турбулентном режиме течения по пневматическому сопротивлению 28 определяется уравнением [7]

$$G = \alpha \varepsilon S_{28} \sqrt{2 \rho_r} \sqrt{P_{27} - P_{29}},$$

где S_{28} – площадь поперечного сечения дросселя, м².

Принимая $\alpha \varepsilon S_{28} = m = \text{const}$, с учетом

$$G = W S_{29} \rho_r,$$

получим выражение для определения скорости W течения газа по струйной трубке

$$W^2 = \frac{2m^2 (P_{27} - P_{29})}{S_{29}^2 \rho_r}.$$

Подставляя полученное значение скорости в (8) при условии $S_{29} = \pi R_{29}^2$ и $P_{29} = P_{\text{атм}} = 0$, получим уравнение для определения давления P_{27} в виде

$$P_{27} = \frac{\pi R_{29}^2 \Delta S}{2m^2 k h_{\text{п}}} \sigma_{\text{ср}} + \frac{\pi^2 R_{29}^2 g r^2 h_{\text{п}}}{4m^2 k} \rho_{\text{ж}}. \quad (22)$$

Таким образом, величина давления P_{27} на выходе усилителя мощности 27 в момент времени, когда глубина лунки достигает заданного значения $h_{\text{п}}$, определяет плотность $\rho_{\text{ж}}$ контролируемой жидкости.

Предложенные и рассмотренные выше методы позволяют повысить надежность измерений как в лабораторных, так и в производственных условиях при контроле плотности вязких жидких гетерогенных сред, контакт с которыми нежелателен.

Список литературы

1. Глыбин И.П. Автоматические плотномеры / И.П. Глыбин. – Киев: Техника, 1965. – 258 с.
2. Кивилис С.С. Плотномеры / С.С. Кивилис. – М.: Энергия, 1980. – 279 с.
3. Мордасов М.М. Контроль плотности жидких веществ пневмометрическими методами / М.М. Мордасов, С.В. Мищенко, Д.М. Мордасов // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 1998. – Т. 68, № 7. – С. 31-37.
4. Мордасов М.М. Физические основы измерения плотности и поверхностного натяжения пневматическими методами: учеб. пособие / М.М. Мордасов, С.В. Мищенко, Д.М. Мордасов. – Тамбов: Изд-во ТГТУ, 1999. – 76 с.
5. Лаптев В.И. Барботажно-пьезометрические методы контроля физико-химических свойств жидкостей / В.И. Лаптев. – М.: Энергоиздат, 1984. – 79 с.
6. Авторское свидетельство СССР № 493702. Пьезометрический плотномер / Мордасов М.М., Шаталов Ю.С. // Открытия. Изобретения, 1975, № 44.
7. Ибрагимов А.И. Элементы и системы пневмоавтоматики / А.И. Ибрагимов, Н.Г. Фарзана, Л.И. Илясов. – М.: Высш. шк., 1975. – 360 с.
8. Rosler R. Impingement of Gas Jets on Liquid Surfaces / R. Rosler, G. Stewart // Fluid Mech. – 1968. – Vol. 31. Part 1. – Pp. 163-174.

Pneumo-Dynamic Non-Contact Control of Liquid Substances Density

D.M. Mordasov

Department "Automated Systems and Devices", TSTU

Key words and phrases: kinetic influence of gas stream; liquids density; non-contact methods of measurement; principle of measurement by replacement.

Abstract: Pneumo-dynamic non-contact methods of control over liquids density and the device used for their implementation are considered. The methods are based on dependence of measurement time of indentation depth in the liquid surface on the given quantity and the dependence of pressure quantity at the inlet of pneumo-metric pipe at the moment when the indentation in the liquid surface reaches the given point on the liquid density.

Druckluftdynamische kontaktlose Kontrolle der Dichte von Flüssigkeiten

Zusammenfassung: Es sind die druckluftdynamischen kontaktlosen Methoden der Kontrolle der Flüssigkeitsdichte und die sie realisierende Anlage beobachtet. Die Methoden stützen sich auf die Abhängigkeit der Zeit der Veränderung der Lochtiefe auf der Flüssigkeitsoberfläche für die aufgegebene Größe und auf die Abhängigkeit der Druckgröße beim Eingang der pneumometrischen Röhre im Moment, wann die Vertiefung auf der Flüssigkeitsoberfläche den Vorgabewert erreicht, von der Flüssigkeitsdichte.

Contrôle pneumodynamique sans contact de la densité des liquides

Résumé: L'article est consacré à l'étude de la structure de la connaissance humaine. Sont envisagées les méthodes pneumodynamiques sans contact du contrôle de la densité des liquides et le dispositif qui les réalise. Les méthodes sont fondées sur la dépendance du temps de la mesure de la profondeur du poquet sur la surface du liquide et la grandeur de la pression de l'entrée de la tube pneumatique de la densité du liquide.
