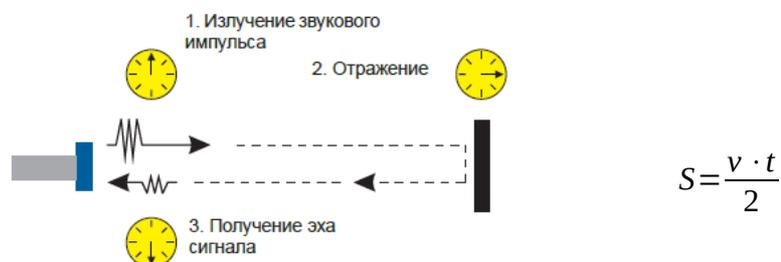


Особенности измерения расстояния / уровня ультразвуковыми датчиками

В современных автоматизированных системах управления технологическими процессами одной из распространенных задач является измерение расстояния до объектов, и в частном случае контроль уровня в емкостях с различными средами. Для решения этой задачи все большее распространение на российском рынке получают датчики **microsonic** на основе ультразвукового принципа измерения, работающие без непосредственного контакта с объектом. Благодаря этому, они могут работать:

- с густыми и вязкими средами (патока, сметана, карамель);
- с любыми жидкостями, в том числе диэлектриками (дистиллированная вода, масло);
- с сыпучими, неоднородными средами (гравий, сахар, овощи);
- с грязными средами (канализационно-насосные станции);
- с прозрачными объектами из стекла или пластика.

В основе данного принципа измерения лежит пьезокерамический элемент, излучающий с поверхности датчика ультразвуковую волну. Отразившись от объекта, волна возвращается обратно к датчику. Зная скорость распространения звука в воздухе (v) и измеряя время между излучением и принятием ультразвуковой волны (t), схемотехника датчика производит вычисление расстояния.



Однако, у данного метода измерений существует целый ряд особенностей и ограничений, которые влияют как на точность, так и на саму возможность измерения.

1. Скорость звука и точность

Для идеальных газов скорость звука определяется формулой Лапласа:

$$v = \sqrt{\frac{\gamma R}{M} T}$$

где γ — показатель адиабаты газа (7/5 для воздуха)

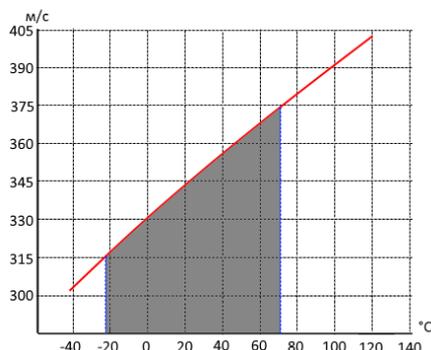
R — универсальная газовая постоянная (8,31 Дж/моль*К)

M — молярная масса (29 г/моль для воздуха)

T — абсолютная температура (в Кельвинах)

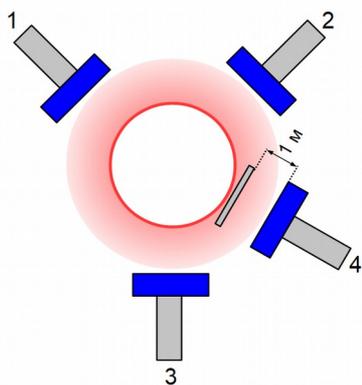
Общепромышленные ультразвуковые датчики калибруются в воздухе: скорость распространения звука в нем составляет 330 м/с при 0 С температуры окружающей среды. Соответственно, эксплуатировать датчик, например, в CO_2 невозможно, поскольку скорость звука при 0 С будет составлять уже 260 м/с и измерение не будет достоверным.

Скорость распространения звука в воздухе, в свою очередь, практически полностью зависит только от температуры.



По этой причине, в корпус ультразвуковых датчиков **microsonic** встроен сенсор температуры, обеспечивающий компенсацию изменения температуры воздуха во всем диапазоне эксплуатации $-25...+70$ С: **погрешность измерения составляет $\pm 1\%$ от измеряемого значения расстояния**. Однако, это справедливо в случае однородной температуры на всем пути распространения ультразвуковой волны: если же температура неоднородна, необходимы иные методы компенсации.

Один из таких методов применяется при измерении диаметра выдуваемого рукава полиэтиленовой пленки. Для точного контроля устанавливаются 3 ультразвуковых датчика под углом 120 градусов относительно друг друга.



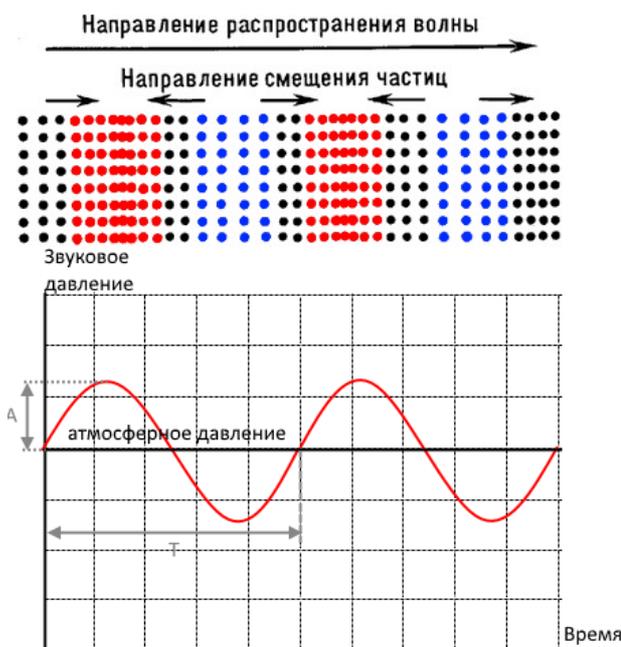
Поверхность пленки достаточно горячая: ультразвуковая волна, излучаемая датчиком, ускоряется с приближением к пленке, и вычисленное датчиком значение расстояния всегда будет меньше фактического. Для компенсации погрешности устанавливается дополнительный 4-й датчик в тех же температурных условиях, но измеряющий точно известное расстояние до неподвижного объекта. Показания всех четырех датчиков подключены к ПЛК — на сколько изменяются показания 4-го датчика относительно известного расстояния, на столько компенсируются показания 3-х остальных датчиков.

Важным условием измерения является плавное изменение температуры воздуха, поскольку если объект очень горячий (например, расплавленный металл), то образующаяся турбулентность воздуха приведет к отклонению ультразвуковой волны в сторону и невозможности измерения ультразвуковым методом.

2. Затухание звука и максимальное рабочее расстояние

Помимо точности измерения расстояния, важнейшим критерием является дальность распространения ультразвуковой волны, или **максимальное рабочее расстояние** датчика, вплоть до которого он способен производить измерение. В свою очередь, это расстояние зависит от затухания звука.

Звуковая волна в воздухе распространяется за счет продольных колебаний молекул воздуха относительно своего положения и их соударения друг с другом.



На рисунке отображены две зоны — разрежения (обозначена синим) и избыточного давления (обозначена красным). Соответственно, изменения звукового давления носят периодический характер (период колебаний T), графически описываются синусоидой и имеют определенную амплитуду (A). Сама ультразвуковая волна обладает энергией: в результате соударений молекул ее энергия рассеивается, поглощаясь самой средой, и преобразуется в тепловую энергию.

Затухание — это уменьшение амплитуды звукового давления с увеличением расстояния от источника звука (излучателя датчика). Если измеряемый объект находится на расстоянии большем, чем максимальное рабочее расстояние, то отправленная и затем отразившаяся обратно волна успевает полностью поглотиться средой и измерение становится невозможным.

$$A' = A_0 e^{-\delta r}$$

где A' — звуковое давление на расстоянии от источника звука r ;

A_0 — начальное звуковое давление;

δ — коэффициент затухания, измеряемый в дБ/метр или Нп/метр.

Преобразуя формулу выше, имеем:

$$\delta = \frac{1}{r} \ln \left(\frac{A'}{A_0} \right)$$

Однако данная формула позволяет рассчитать коэффициент только на основе экспериментальных данных. Существует следующая зависимость, связывающая коэффициент затухания с параметрами окружающей среды, влияющими на поглощение звука в воздухе:

$$\delta = \left(\frac{\omega^2}{2\rho c^3} \right) \left(\frac{4}{3} \eta + \zeta + \chi \left(\frac{1}{C_v} - \frac{1}{C_p} \right) \right)$$

где ω — частота ультразвуковой волны, Гц

ρ — плотность среды, кг/м³

c — скорость распространения звука в среде, м/с

η — коэффициент сдвиговой вязкости

ζ — коэффициент объемной вязкости

χ — коэффициент теплопроводности

C_v — теплоемкость при постоянном объеме

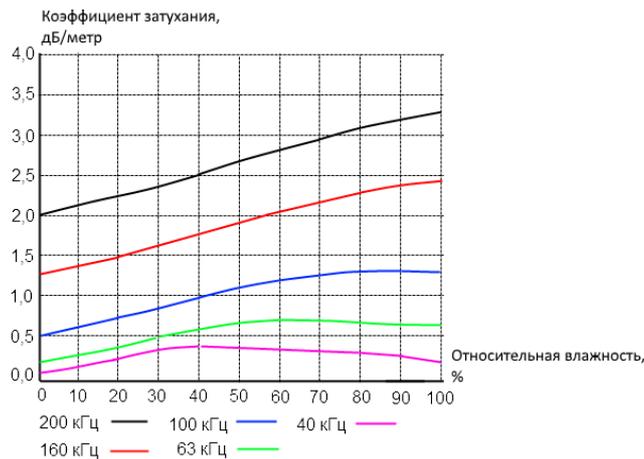
C_p — теплоемкость при постоянном давлении

Таким образом, следующие параметры среды влияют на рабочее расстояние датчика:

- Температура: влияет на вязкость, плотность и скорость распространения звука. **С ростом температуры, затухание увеличивается и максимальное расстояние уменьшается;**

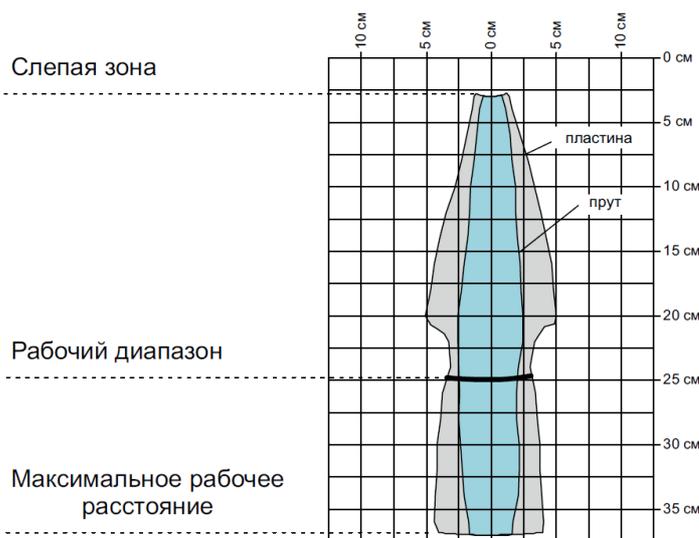
- Давление: в пределах 6 бар влияет только на плотность. **С повышением давления затухание уменьшается и максимальное расстояние увеличивается;**

- Относительная влажность: как и температура, влияет одновременно на несколько параметров. В реальности зависимость описывается эмпирически: график для частот 40, 63, 100, 160 и 200 кГц представлен на рисунке ниже. **На разных частотах, затухание будет максимальным при разной относительной влажности воздуха.**



- Частота ультразвука: зависит от характеристик конкретной модели датчика. **Чем выше рабочая частота, с которой датчик излучает ультразвуковую волну, тем быстрее затухает сама волна.**

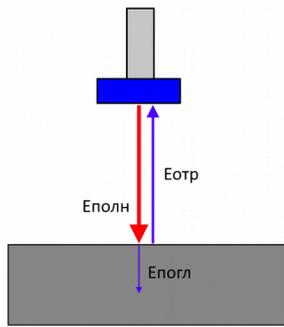
Например, датчик модификации **mic+600** (рабочий диапазон от 0,6 до 6 м) изготовлен с рабочей частотой излучателя 80 кГц, а датчик **mic+35** (рабочий диапазон от 65 до 350 мм) с рабочей частотой 400 кГц. Производителем составлены диаграммы направленности для различных моделей датчиков, которые позволяют увидеть зону распространения ультразвукового поля в объеме. Например, для модели **mic+35**:



Серая область — зона, в которой обнаруживается металлическая пластина размером 500x500 мм;
 Голубая область — зона, в которой обнаруживается круглый прут диаметром 10 мм;
 Слепая зона — область, в которой датчик не способен производить измерение;
 Рабочий диапазон — область, в которой датчик гарантированно будет производить измерения при атмосферном давлении, относительной влажности 0...100% и температуре -25...70 С;
 Максимальное рабочее расстояние — расстояние, достижимое лишь при идеальных условиях отражения и нормальных условиях окружающей среды (50% относительная влажность, давление 101,3 кПа, температура 20 С).

3. Отражающие свойства объектов

Помимо поглощения звука самой средой, ультразвук взаимодействует с самим объектом, отражаясь от его поверхности. При достижении ультразвуковой волной поверхности объекта, часть энергии волны проходит внутрь объекта, а остальная часть энергии отражается обратно.



$$E_{\text{полн}} = E_{\text{отр}} + E_{\text{погл}}$$

В свою очередь, чем меньше **акустическое сопротивление** объекта, тем большая часть энергии $E_{\text{погл}}$ проникает внутрь среды и тем сильнее уменьшается максимальное рабочее расстояние вместе с уменьшением $E_{\text{отр}}$.

$$Z = \rho c$$

где Z – акустическое сопротивление, Па*с/м
 ρ – плотность среды, кг/м³
 c — скорость звука в среде, м/с

Для расчета коэффициента отражения, используется формула Френеля:

$$R = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1}$$

где Z_2 – акустическое сопротивление объекта, Па*с/м

Z_1 – акустическое сопротивление воздуха, Па*с/м

Чем больше коэффициент отражения, тем большая часть энергии волны $E_{\text{отр}}$ отразится обратно и тем больше расстояние, на котором может происходить измерение.

К объектам с высоким акустическим сопротивлением относятся: жидкости, сталь, дерево, стекло, пластик. В случае, если параметры окружающего воздуха (температура, влажность, давление) соответствуют нормальным условиям, то измерение расстояния до объектов из подобных материалов возможно на **максимальном рабочем расстоянии**.

К объектам с низким акустическим сопротивлениями относятся: пена, шерсть, поролон, пух. По причине высокой пористости, большая часть энергии волны сквозь эти поры попадает внутрь объекта и «гасится» во внутренних полостях. При работе с подобными материалами, даже если параметры окружающей среды соответствуют нормальным, измерение может стать невозможным даже в пределах **рабочего диапазона**.

Как правило, ультразвуковые датчики не применяются для измерения уровня пенящихся сред (пиво, шампанское и прочих). Но в ряде случаев, если использовать датчик на большое рабочее расстояние, с мощным излучателем и измерять им насколько возможно близко, то степени поглощения звука материалом объекта может не хватить, чтобы волна полностью «погасилась» и не вернулась обратно к датчику: измерение станет возможным.

4. Слепая зона

Еще одной важной особенностью работы ультразвуковых датчиков является невозможность измерения уровня на близком от датчика расстоянии. Это связано с тем, что излучатель датчика является одновременно и его приемником.

В основе датчика лежит пьезокерамический элемент, который начинает колебаться при подачи на него напряжения. В зависимости от его характеристик, он излучает ультразвуковую волну определенной частоты, после чего переходит в режим приема и ожидает возвращения отраженной от объекта волны.

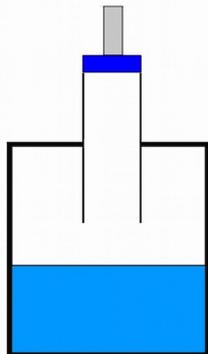
Однако после прекращения подачи напряжения, в пьезокерамическом элементе наблюдаются затухающие автоколебания, которые невозможно избежать. Если объект находится слишком близко, то отраженная волна вернется к излучателю в тот момент, пока автоколебания еще не прекратились. И как следствие, измерение станет невозможным. Слепая зона — это расстояние, которое ультразвуковая волна проходит за время полного затухания автоколебаний. Это фиксированная величина, являющаяся характеристикой конкретной модели датчика, не подлежит настройки и не зависит от параметров окружающей среды.

5. Монтаж датчиков

Залогом корректной работы ультразвуковых датчиков является их правильный монтаж.

1. При работе с хорошо отражающими звук объектами, предъявляются особые требования к монтажу — излучаемая волна должна строго перпендикулярно отражаться от гладкой поверхности, чтобы вернуться обратно к излучателю датчика.

2. В случае наличия выступающих частей (например, приваренной арматуры) в емкости с измеряемой средой, ультразвуковая волна может отражаться от этих выступов, если они попадают в зону распространения волны. Необходимо или замонтировать датчик в другом месте, или опустить его ниже (тем самым сузив область распространения, в которую может попадать препятствие), или использовать волновод: трубку из любого отражающего звук материала произвольной длины, в которую устанавливается датчик и тем самым сужается зона распространения звуковой волны.

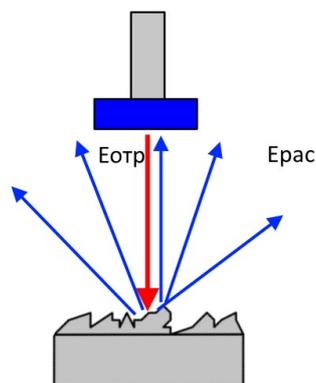


Аналогичны рекомендации, когда датчик расположен над отверстием и измеряет уровень в емкости через него, при этом диаметр отверстия меньше, чем диаметр пятна ультразвуковой волны в соответствии с диаграммой направленности.

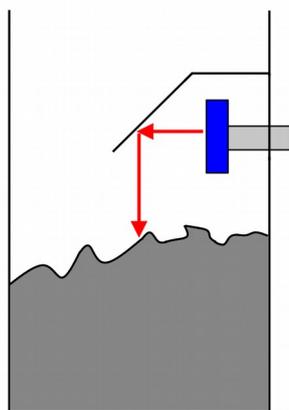
3. Важнейшим преимуществом ультразвукового метода измерения является возможность непрерывного контроля уровня сыпучего компонента, такого как: картофель, щепка, ягоды, свекла, сахар, щебень и т. д.



Поверхность имеет неоднородную структуру и форму, что приводит к тому, что отраженная волна не только отражается обратно к датчику, но и рассеивается в разные стороны на неоднородностях поверхности. С одной стороны, это позволяет гарантированно измерять уровень, даже если поверхность находится под значительным углом по отношению к датчику (когда насыпание происходит «с горкой»), но с другой стороны, отраженная энергия $E_{отр}$ уменьшается за счет увеличения рассеиваемой энергии $E_{рас}$. В результате, при измерении уровня сыпучего компонента, максимальное расстояние измерения может уменьшаться.



4. Как правило, сыпучий компонент засыпается сверху емкости. И в случае, если сыплющийся поток постоянно попадает в зону распространения ультразвуковой волны, датчик не сможет производить измерение. Возможным решением проблемы, помимо переноса датчика в другое место, может являться установка его под козырьком, который одновременно будет являться отражателем.



5. Зачастую при измерении уровня сыпучего, мелкодисперсного компонента (например, муки), в воздухе присутствует высокая запыленность. Существует ряд ограничений, при которых измерение станет невозможным:

- при достаточно высоком уровне запыленности, ультразвуковая волна может постоянно отражаться от пылевого облака;
- если пыль налипает на излучатель толстым слоем и/или затвердевает при высокой влажности;



- аналогичная ситуация проявляется при отрицательных температурах - если конденсат на поверхности датчика замерзнет с образованием корки льда;
- в емкости часто включается принудительная аэрация для поддержания рыхлости. При достаточной скорости воздуха, направление распространения ультразвуковой волны будет изменяться и не позволит отраженной волне от объекта вернуться обратно к датчику.

6. Выводы

Применение ультразвукового метода имеет ряд ограничений, которые необходимо учитывать при эксплуатации и подборе датчиков:

- температурный диапазон в месте монтажа датчика должен соответствовать температуре эксплуатации датчиков -25...70 С;
- температура между датчиком и объектом должна быть однородной, в противном случае необходимы дополнительные меры компенсации;
- максимальное расстояние, на котором датчик способен производить измерение, зависит от большого количества факторов: температуры, влажности, давления, отражающих свойств среды. Рекомендуется проведение дополнительного тестирования на объекте;
- измерение с поглощающими звук средами невозможно. Прежде всего к ним относятся среды, содержащие на поверхности пену (пиво, шампанское, моющие растворы);
- измерение в пределах слепой зоны невозможно;
- необходимо отсутствие препятствий в зоне распространения ультразвуковой волны;
- наличие сильного потока воздуха при аэрации, высокая запыленность или наледь препятствуют работе датчиков.

Несмотря на данные ограничения, датчики **microsonic** с успехом применяются в таких отраслях промышленности, как: сельское хозяйство, химическое производство, водоочистка, автомобилестроение, производство сахара, кондитерское производство, печатные машины, автоматы розлива и многих других.

Список использованной литературы

Балдев Радж, В. Раджендран, П. Паланичами, Применения ультразвука, М., «Техносфера», 2006

Б. А. Агранат, В. И. Башкиров, Ю. И. Китайгородский, Н. Н. Хавский, Ультразвуковая технология, М., «Металлургия», 1974

Колесников А. Е., Ультразвуковые измерения, 2 изд., М., 1982

Ультразвуковые датчики в окружающей среде, «ГлавАвтоматика», Челябинск, 2012.

ISO 9613-1:1993 Acoustics – Attenuation of sound during propagation outdoors – Part1: Calculation of the absorption of sound by the atmosphere

L. Jakevičius, A. Demčenko Ultrasound attenuation dependence on air temperature in closed chambers, ISSN 1392-2114 ULTRAGARSAS (ULTRASOUND), Vol. 63, No.1, 2008

Donald P. Massa Choosing an Ultrasonic Sensor for Proximity or Distance Measurement. Part 1: Acoustic Considerations February 1, 1999

Автор статьи:

Евгений Рывкин
инженер ООО «КИП-Сервис»
17.07.2018