

## ВОЗДЕЙСТВИЕ КАНАЛА РАСПРОСТРАНЕНИЯ НА ФУНКЦИОНИРОВАНИЕ АКУСТИЧЕСКИХ УРОВНЕМЕРОВ ЛОКАЦИОННОГО ТИПА

### Введение

В [1 – 3] рассмотрены основные причины неустойчивой работы акустических уровнемеров локационного типа при контроле уровня сыпучих мелкодисперсных, жидких пенящихся, высокотемпературных и легкоиспаряющихся объектов. В этих работах было показано, что неудовлетворительное функционирование уровнемеров вызывается влиянием реальных каналов распространения акустических волн, которое может приводить к уменьшению рабочего диапазона, вплоть до отказов, и к увеличению паспортной погрешности приборов.

Повышение надежности функционирования акустических уровнемеров в процессе контроля уровня перечисленных и других объектов представляет практический интерес для различных отраслей промышленности, поэтому получение информации о фактических возможностях приборов и особенностях их эксплуатации на реальных объектах представляет актуальную задачу.

В работе приведены результаты исследований по снижению потенциала при контроле уровня сыпучих гранулированных объектов и влиянию пены на погрешность измерения уровня. Для двух рабочих длин волн обобщены особенности влияния канала распространения акустических волн при контроле уровня сыпучих, жидких и высокотемпературных объектов на надежность работы уровнемеров локационного типа.

### Канал распространения акустических волн

Для уровнемеров локационного типа канал распространения включает воздушную среду, расположенную между плоскостью установки антенны уровнемера и поверхностью контролируемого объекта, а также площадь  $\sigma$  поверхности контролируемого объекта, от которой происходит отражение акустической волны (рис.1).

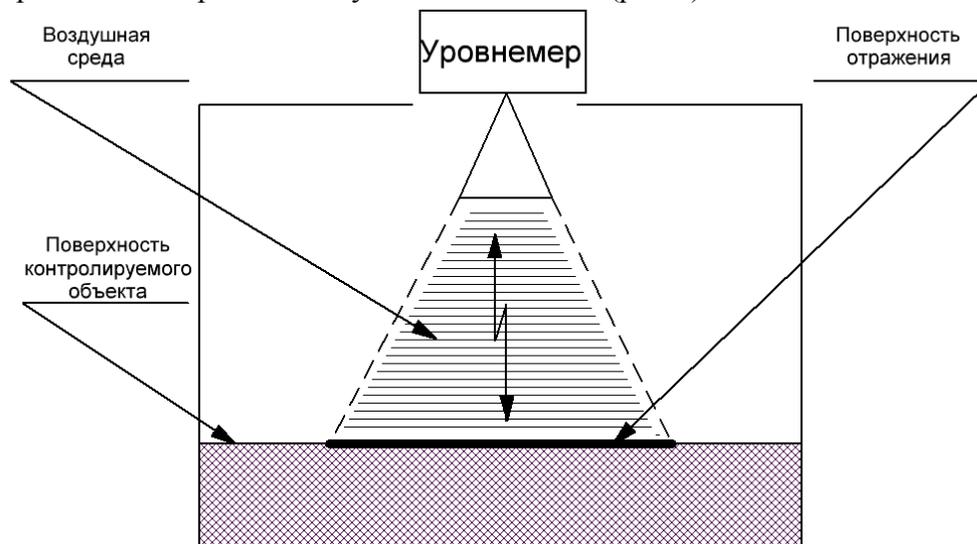


Рис. 1

В настоящее время технические параметры уровнемеров (рабочий диапазон, погрешность измерений и др.) принято определять для условий, при которых параметры канала распространения близки к стандартным, то есть удовлетворяющие следующим требованиям:

- параметры воздушной среды над поверхностью контролируемого объекта (температура, давление и влажность) должны соответствовать стандартной атмосфере [4];
- поверхность контролируемого объекта должна быть перпендикулярна направлению фронта акустической волны, а ее коэффициент отражения – близок к единице во всем рабочем диапазоне.

В реальных условиях эксплуатации температура, давление и влажность воздушной среды обычно отличаются от стандартных. В ней также могут присутствовать пена, пары и частицы пыли контролируемого объекта. Кроме того, поверхность контролируемого объекта может быть наклонной, взволнованной или пенящейся, а ее коэффициент отражения для акустической волны – быть меньше единицы.

В общем случае влияние реальных каналов распространения на работоспособность акустических уровнемеров локационного типа наиболее часто проявляется в уменьшении рабочего диапазона [1], неустойчивому функционированию в рабочем диапазоне [2], а также – в превышении паспортной величины погрешности измерения уровня [3].

В первых двух случаях обычно имеет место уменьшение отношения сигнал/шум на входе приемного устройства из-за изменчивости коэффициента отражения акустической волны поверхностью контролируемого объекта или ее рассеяния и поглощения неоднородностями коэффициента преломления воздуха в самой воздушной среде. В третьем случае происходит снижение скорости распространения акустической волны в воздушной среде при наличии в ней паров или пены контролируемого объекта.

### Влияние поверхности контролируемого объекта

Как известно [5], для устойчивого функционирования устройств локационного типа необходимо, чтобы во всем рабочем диапазоне отношение сигнал/шум на входе приемного устройства превышало заданную величину  $Z$

$$C/Ш = P_{np} / P_{мин} \geq Z, \quad (1)$$

где  $P_{np}$  – мощность отраженного сигнала на входе приемного устройства, а  $P_{мин}$  – пороговая чувствительность приемного устройства.

Для определения  $P_{np}$  в [1] было использовано выражение

$$P_{np} = A_{ак} P G^2 \lambda^2 \sigma / (4\pi)^3 R^4, \quad (2)$$

где  $P$  – излучаемая мощность;  $G$  – коэффициент усиления антенны;  $\lambda$  – длина волны;  $R$  – расстояние до контролируемой поверхности;  $\sigma$  – эффективная отражающая площадь контролируемой поверхности (рис.1).

В этом выражении  $A_{ак} = M\eta$ , где  $M$  – коэффициент, учитывающий снижение мощности из-за преобразования электрической мощности в акустическую и обратно,  $\eta$  – учитывает потери мощности акустической волны за счет вязкости и теплопроводности воздушной среды распространения.

Для оценки влияния реальных каналов распространения на снижение потенциала уровнемера в [1] был использован параметр  $\beta$ :

$$\beta = (C/Ш)_{станд} / (C/Ш)_{реал},$$

где  $(C/Ш)_{станд}$  – отношение сигнал/шум для стандартного канала, а  $(C/Ш)_{реал}$  – отношение сигнал/шум для реального канала.

В общем случае  $\beta$  является функцией, определяемой как фактическими параметрами поверхности отражения  $\sigma$  (угол наклона  $\alpha$  поверхности контролируемого объекта, ее коэффициент отражения  $K_{отр}$  для акустической волны, ширина диаграммы направленности антенны  $\theta$ , размер гранул  $l$ , высота  $h_B$  волнения поверхности жидкости), так и влиянием воздушной среды (погонное затухание в пыли  $\eta_{п}$ , высота  $h_{п}$  и плотность  $\gamma$  пены, поглоще-

ние и рассеяние  $\delta$  акустического сигнала на высокотемпературных неоднородностях коэффициента преломления воздуха)

$$\beta = f(\alpha; K_{omp}; \theta; l; \eta_{II}; h_B; h_{II}; \gamma; \delta). \quad (3)$$

Вид выражения (3) определяется конкретным типом контролируемого объекта. Однако для принятия решения о целесообразности применения уровнемера необходима оценка максимального снижения потенциала  $\beta$ , которую можно получить в рамках натуральных или лабораторных испытаний.

Влияние поверхности на величину снижения потенциала  $\beta$  наибольшим образом проявляется при контроле уровня сыпучих объектов, которые можно условно разделить на три типа:

- мелкодисперсные, размеры частиц которых гораздо меньше рабочей длины волны уровнемера  $l \ll \lambda$ ;
- гранулированные, для которых  $l \sim \lambda/2$ ;
- кусковые, для которых  $l > \lambda$ .

Экспериментальные зависимости  $\beta$  от угла наклона поверхности  $\alpha$  для мелкодисперсных контролируемых объектов (цемент [1] и гранотсев) и эталонной металлической поверхности для рабочих длин волн 1,7 и 3,4 см приведены на рис.2 и 3 соответственно штриховой, штрихпунктирной и сплошной линиями. Данные на этих рисунках были получены в рамках методики, разработанной в [1].

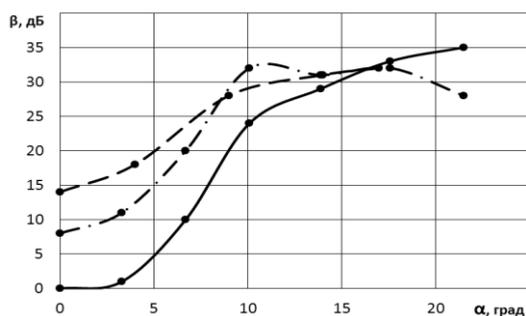


Рис. 2

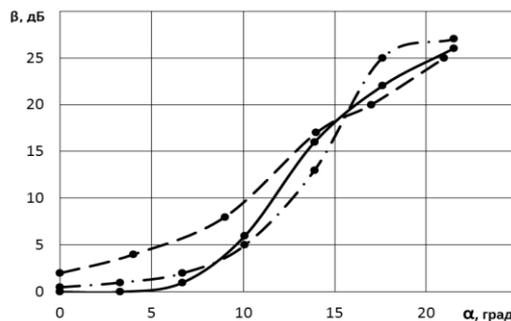


Рис. 3

На рис. 4 и 5 представлены аналогичные зависимости  $\beta$  для гранулированных объектов (керамзит – штриховые линии, щебень – штрихпунктирные линии), размеры гранул которых составляли 5 – 40 мм. Данные на рис. 4 соответствуют рабочей волне 1,7 см, а на рис.5 – волне 3,4 см. Сплошные линии на рис. 4 и 5 соответствуют металлической поверхности.

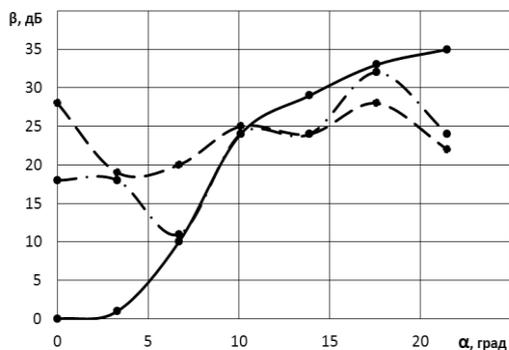


Рис. 4

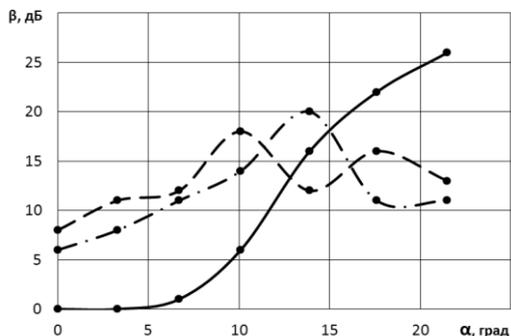


Рис. 5

Как показывают данные на рис. 2 – 3, при контроле уровня мелкодисперсных объектов наблюдается монотонность возрастания  $\beta$  с увеличением угла наклона  $\alpha$ . При контроле уровня гранулированных объектов зависимость  $\beta(\alpha)$  носит осциллирующий характер, что объясняется интерференцией отраженных сигналов от множества отдельных резонансных отражателей на контролируемой поверхности. Последнее обстоятельство не позволяет оценивать коэффициент отражения гранулированных объектов  $K_{отр}$  при  $\alpha = 0$ , что возможно для мелкодисперсных объектов (см. рис. 2 и 3). Погрешность оценки величины  $\beta$  на рис. 2 – 5 не превышала  $\pm 3$  дБ.

При контроле уровня кусковых объектов зависимость  $\beta(\alpha)$  обычно носит осциллирующий характер, однако для типичных представителей (уголь, гранит)  $K_{отр}$  близок к единице.

Сведения о факторах, влияющих на понижение потенциала уровнемера для сыпучих, жидких (взволнованных, пенящихся и легкоиспаряющихся) и высокотемпературных поверхностей приведены в табл. 1.

Таблица 1

Влияние типа поверхности контролируемого объекта на потенциал уровнемера

| Типы контролируемых объектов                  | Представители контролируемых объектов | Факторы, влияющие на понижение потенциала уровнемера   | $\beta$ , дБ |           |
|---|---------------------------------------|--|--------------|-----------|
|   |                                       |  | Длина волны  |           |
|   |                                       |  | 1,7см        | 3,4см     |
| сыпучие мелкодисперсные [1]<br>$l < \lambda$  | цемент, мука, песок, зерно, гранотсев | коэффициент отражения – $K_{отр}$ ;<br>угол наклона поверхности – $\alpha$ ;<br>ширина диагр. направл. – $\theta$  | $\leq 40$    | $\leq 30$ |
| сыпучие гранулированные<br>$l \sim \lambda/2$ | гравий, керамзит                      | коэффициент отражения – $K_{отр}$ ;<br>угол наклона поверхности – $\alpha$ ;<br>ширина диагр. направл. – $\theta$ ;<br>размеры и расположение гранул – $l$ | $\leq 40$    | $\leq 30$ |
| сыпучие кусковые<br>$l > (5...10)\lambda$     | гранит, уголь                         | угол наклона поверхности – $\alpha$ ;<br>ширина диагр. направл. – $\theta$ ;   | $\leq 40$    | $\leq 30$ |
| жидкие взволнованные [1]                      | вода                                  | высота волнения – $h_B \approx (3...4)$ см   | $\leq 25$    | $\leq 15$ |
| жидкие пенящиеся [1]                          | продукты брожения                     | высота пены – $h_{II} \approx (3...4)$ см;<br>плотность пены – $\gamma$  | $\leq 20$    | $\leq 5$  |
| жидкие легкоиспаряющиеся [3]                  | бензины, спирты, растворители         | Существенного влияния состояния поверхности на понижение потенциала не отмечалось  | (0...3)      |           |
| высокотемпературные [2]                       | битумы ( $t \geq 150^0 C$ )           | Существенного влияния состояния поверхности на понижение потенциала не отмечалось  | (0...3)      |           |

Как видно из данных табл. 1 и рис.2 – 5, для контроля уровня сыпучих объектов предпочтительной является рабочая длина волны 3,4 см. При этом запас потенциала на границе мертвой зоны должен быть не менее 30 – 35 дБ без учета ослабления акустического сигнала в пыли.

### Влияние среды распространения акустических волн

Воздушная среда над поверхностью контролируемого объекта может следующим образом оказывать воздействие на работоспособность акустических уровнемеров:

- снижать потенциал из-за поглощения и рассеяния акустического сигнала в пыли, пене и парах контролируемого объекта;

- вызывать существенное периодическое снижение потенциала из-за переотражения и рассеяния на границах неоднородностей воздушной среды с повышенной температурой [2];
- приводить к превышению паспортной величины погрешности измерения уровня из-за отличия температуры, давления и влажности в среде распространения от стандартных, а также уменьшения скорости распространения акустической волны в парах [3] или пене контролируемого объекта.

**Влияние пыли.** Исследование влияния пыли на снижение потенциала уровнемера представляет сложную задачу, для решения которой необходима информация о текущей концентрации пыли в реальных резервуарах. Однако на основании имеющегося опыта испытаний уровнемера с рабочей длиной волны 3,4 см на различных типах зерна необходимый дополнительный погонный запас потенциала на преодоление потерь в пыли можно оценить величиной  $\eta_{\Pi} \leq 1 \text{ дБ/м}$ .

**Влияние волнения.** Снижение потенциала при взволнованной поверхности [1] в основном определяется высотой  $h$  волнения. Как и ранее, преимуществом обладает уровнемер с рабочей длиной волны 3,4 см (см. табл. 1).

**Влияние паров.** Существенного снижения потенциала в парах жидких контролируемых объектов установлено не было [1, 3] ( $\beta \approx 1$ ).

**Влияние высокотемпературных неоднородностей.** В процессе контроля уровня высокотемпературных объектов [1, 2] наблюдается кратковременное существенное снижение потенциала, которое приводит к потере работоспособности в эти моменты. Преимущества длины волны 3,4 см установлено не было.

**Отличия температуры, давления и влажности воздушной среды от стандартных.** При равномерном распределении перечисленных факторов в воздушной среде их влияние на скорость акустической волны компенсируют:

- при абсолютном методе измерения – путем контроля текущей температуры  $t$  и введения поправок для фактического давления  $P$ ;
- при относительном методе [6] – введением эталонного канала или эталонного отражателя.

**Влияние паров легкоиспаряющихся жидкостей.** Проведенные исследования [3] показали, что над поверхностью легкоиспаряющихся жидкостей (бензины, спирты, растворители) имеет место неравномерное распределение плотности паров. Например, для высокооктановых нефтяных бензинов ошибка измерения уровня может достигать минус 80 – 90 мм [3]. При этом ее величина остается практически неизменной для всего диапазона контролируемых уровней, что, в конечном итоге, свидетельствует о нелинейном высотном распределении скорости акустической волны над поверхностью бензина, которое требует дальнейшего исследования.

**Влияние пены.** Некоторые сведения о снижении потенциала в пене для рабочих длин волн 1,7 и 3,4 см, приведенные в [1], а также результаты, полученные для пены различной плотности, свидетельствуют о преимуществе использования длины волны 3,4 см. Так, снижение потенциала в плотной пене высотой 3 – 4 см (см. табл. 1) для длины волны 1,7 см достигало 20 дБ, а для волны 3,4 см – не более 5 дБ. В целом снижение потенциала уровнемера определяется плотностью  $\gamma$  и высотой  $h$  пены.

Результаты контроля расстояния до поверхности пенящихся объектов представлены в табл. 2.

Таблица 2

Влияние пены

| Параметры            | Длина волны 1,7 см |                | Длина волны 3,4 см |                |
|----------------------|--------------------|----------------|--------------------|----------------|
|                      | Расстояние, мм     | Ослабление, дБ | Расстояние, мм     | Ослабление, дБ |
| Поверхность без пены | 1028               | 0              | 1020               | 0              |
| Высота пены 4 см     | 1031               | 18 – 20        | 1022               | 4 – 5          |

Данные табл. 2 показывают, что наличие пены приводило к увеличению измеряемого уровнемером расстояния до поверхности жидкости на обеих длинах волн. Данное обстоятельство свидетельствует, что при высоте пены около 4 см акустическая волна проникает сквозь пену и отражается от поверхности жидкости. При этом в процессе ее распространения акустической волны в пене происходит как дополнительное ослабление ее интенсивности, так и уменьшение ее скорости по сравнению со скоростью в воздушной среде над пеной.

Если предположить, что скорость акустической волны над поверхностью жидкости и над пеной остается практически неизменной, то величину скорости в пене можно оценить следующим образом

$$V_{\text{пены}} \approx (R_{\text{пены}}^{\text{геом}} / R_{\text{пены}}^{\text{электр}}) V_{\text{возд}}, \quad (4)$$

где  $R_{\text{пены}}^{\text{геом}}$  и  $R_{\text{пены}}^{\text{электр}}$  – соответственно геометрическая и измеряемая уровнемером высота пены,  $V_{\text{возд}} \approx 342 \text{ м/с}$  – скорость акустической волны в воздушной среде при температуре воздуха около 20°C.

Например, для данных, приведенных в табл. 2, величины скорости акустической волны в пене составляли 318 м/с для рабочей длины волны 1,7 см и 325 м/с – для длины волны 3,4 см. Различие величин скорости акустической волны в пене для обеих длин волн соответствует погрешности измерения расстояния  $\pm 1 \text{ мм}$ .

При увеличении высоты пены до 8 – 9 см измеряемое уровнемером расстояние возрастало на 5 мм на волне 3,4 см и уменьшалось на 20 мм – на волне 1,7 см. Потери потенциала составляли около 8 и 28 дБ соответственно. Таким образом, при увеличении высоты пены до 8 – 9 см акустическая волна длиной 1,7 см не достигала поверхности жидкости, а отражалась от неоднородностей воздушно-капельной фракции внутри пены.

В табл. 3 представлены сведения о влиянии воздушной среды на снижение потенциала уровнемера и увеличение погрешности измерения уровня.

Таблица 3

Влияние среды распространения

| Тип контролируемого объекта | Факторы, влияющие на понижение потенциала  | Факторы, влияющие на увеличение погрешности измерения  |
|-----------------------------|--|--|
| сыпучие и кусковые          | Погонное затухание в пыли – $\eta_{\text{п}}$  | существенного влияния не отмечалось  |
| жидкие взволнованные        | существенного влияния не отмечалось  | существенного влияния не отмечалось  |
| жидкие пенящиеся            | высота пены – $h_{\text{п}}$ ;<br>плотность пены – $\gamma$  | снижение скорости акустической волны внутри пены   |
| жидкие легкоиспаряющиеся    | существенного влияния не отмечалось  | снижение скорости акустической волны в парах жидкости  |
| высокотемпературные         | Кратковременное существенное снижение потенциала из-за рассеяния и переотражения от границ неоднородностей воздуха с повышенной температурой [2] | Возрастание скорости акустической волны с увеличением средней температуры в закрытых резервуарах [1].<br>Возникновение ложных сигналов, отраженных элементами конструкций резервуаров [2]. |

Данные табл. 3 показывают, что влияние среды распространения на снижение потенциала уровнемера наблюдается при контроле уровня высокотемпературных, взволнованных и пенящихся объектов, а на скорость акустической волны – при контроле уровня пенящихся, легкоиспаряющихся и высокотемпературных объектов.

## Выводы

1. Результаты выполненных исследований свидетельствуют, что воздействие реальных каналов распространения проявляется при контроле уровня сыпучих, взволнованных, пенящихся, легкоиспаряющихся и высокотемпературных объектов.

2. Для повышения надежности функционирования акустических уровнемеров при контроле уровня сыпучих, взволнованных и пенящихся объектов целесообразно применять приборы с рабочей частотой не выше  $10 \text{ кГц}$  (длина волны не менее  $3,4 \text{ см}$ ) и запасом потенциала на границе верхнего неизмеряемого уровня не менее  $40 - 50 \text{ дБ}$ .

3. При контроле уровня пенящихся, легкоиспаряющихся и высокотемпературных объектов акустические уровнемеры могут использоваться только в качестве технологических, из-за невозможности аппаратурной компенсации отрицательного воздействия среды распространения на скорость акустической волны.

**Список литературы:** 1. Жуков, Б.В., Березин, Е.И. Особенности функционирования акустических уровнемеров локационного типа при нестандартных условиях эксплуатации // Радиотехника. – 2009. – Вып.158. – С.21 – 26. 2. Жуков, Б.В., Нетребенко, К.В., Одновол, А.В. Контроль уровня высокотемпературных объектов методом акустической локации // Радиотехника. – 2011. – Вып.166. – С.233 – 238. 3. Жуков, Б.В., Одновол, А.В. Контроль уровня легкоиспаряющихся жидкостей методом акустической локации // Радиотехника. – 2012. – Вып.171. – С.239 – 244. 4. ГОСТ 4401-81. Атмосфера стандартная. Параметры. 5. Справочник по радиолокации. В 4-х т. Т.1. Основы радиолокации ; пер. с англ. ; под ред. М. Сколника. – М. : Сов. радио, 1976. – 456с. 6. Жуков, Б.В., Солярский, Н.Ф. и др. Акустический уровнемер Зонд -3М // Датчики и системы. – 2006. – №.2. – С.35-40.

*Институт радиофизики и электроники  
НАН Украины*

*Поступила в редколлегию 12.08.2014*