

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 σ поверхности контролируемого объекта, от которой происходит отражение акустической волны (рис. 1).

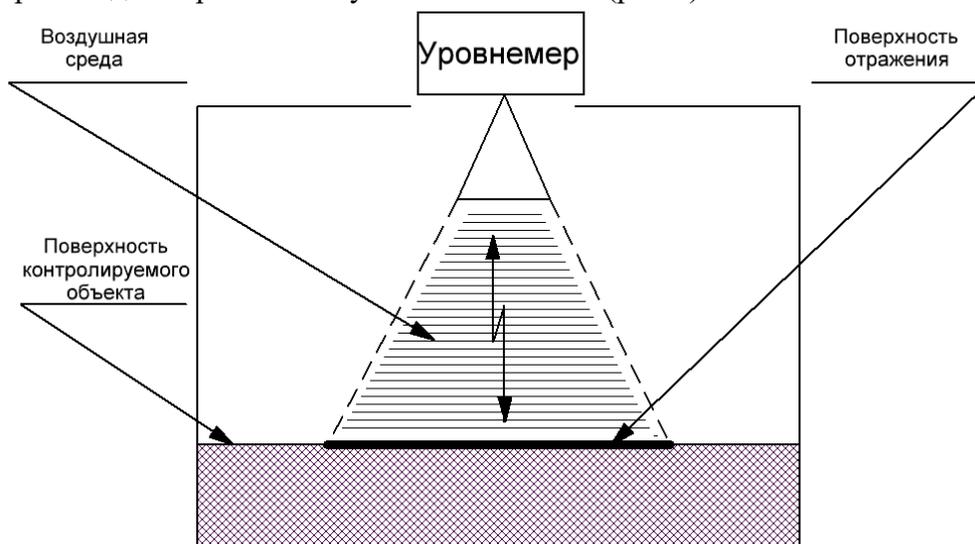


Рис. 1

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; λ – длина волны; R – расстояние до контролируемой поверхности; σ – 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, η – 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 β :

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

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

В общем случае β является функцией, определяемой как фактическими параметрами поверхности отражения σ (угол наклона α поверхности контролируемого объекта, ее

коэффициент отражения K_{omp} для акустической волны, ширина диаграммы направленности антенны θ , размер гранул l , высота h_B волнения поверхности жидкости), так и влиянием воздушной среды (погонное затухание в пыли η_{II} , высота h_{II} и плотность γ пены, поглощение и рассеяние δ 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 β , которую можно получить в рамках натуральных или лабораторных испытаний.

Влияние поверхности на величину снижения потенциала β 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 β от угла наклона поверхности α 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].

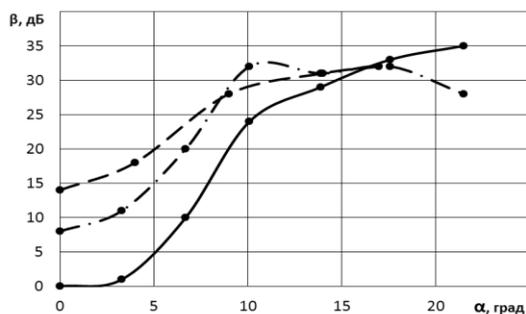


Рис. 2

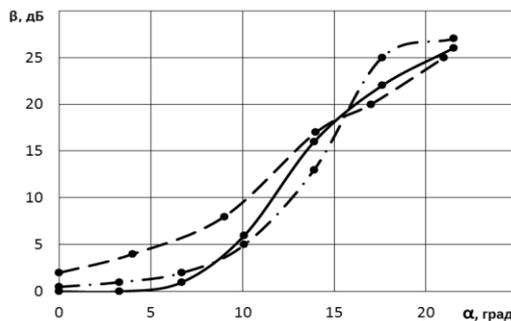
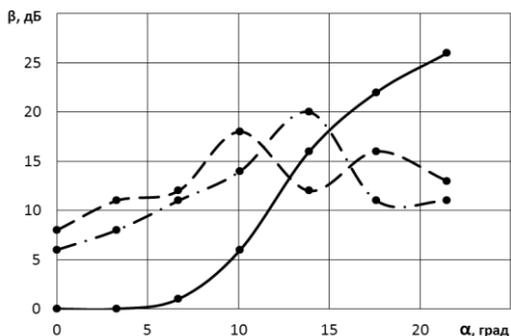
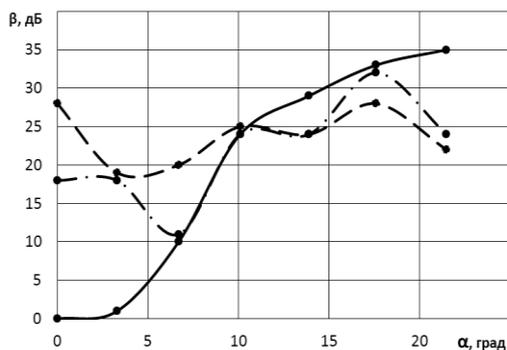


Рис. 3

На рис. 4 и 5 представлены аналогичные зависимости β 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.



Как показывают данные на рис. 2 – 3, при контроле уровня мелкодисперсных объектов наблюдается монотонность возрастания β с увеличением угла наклона α . 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 β на рис. 2 – 5 не превышала ± 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	β , дБ	
			Длина волны	
			1,7 см	3,4 см
сыпучие мелкодисперсные [1] $l < \lambda$	цемент, мука, песок, зерно, гранотсев	коэффициент отражения – $K_{отр}$; угол наклона поверхности – α ; ширина диагр. направл. – θ	≤ 40	≤ 30
сыпучие гранулированные $l \sim \lambda/2$	гравий, керамзит	коэффициент отражения – $K_{отр}$; угол наклона поверхности – α ; ширина диагр. направл. – θ ; размеры и расположение гранул – l	≤ 40	≤ 30
сыпучие кусковые $l > (5...10)\lambda$	гранит, уголь	угол наклона поверхности – α ; ширина диагр. направл. – θ ;	≤ 40	≤ 30
жидкие взволнованные [1]	вода	высота волнения – $h_B \approx (3...4)$ см	≤ 25	≤ 15
жидкие пенящиеся [1]	продукты брожения	высота пены – $h_{II} \approx (3...4)$ см; плотность пены – γ	≤ 20	≤ 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 $\eta_{\text{п}} \leq 1$ 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 γ 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 уровнем 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 уровнем 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 уровнем 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 уровня 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 – $h_{\text{п}}$; плотность пены – γ	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]. 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 кГц (длина волны не менее 3,4 см) и запасом потенциала на границе верхнего неизмеряемого уровня не менее 40 – 50 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. Скольника. – 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