

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АКУСТИЧЕСКОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ПРОЦЕССА ЕСТЕСТВЕННОГО СОГРЕВАНИЯ В СРЕДЕ РАСТИТЕЛЬНОГО СЫРЬЯ

### Введение

Создание эффективных систем автоматизированного контроля процесса естественного согревания в среде растительного сырья является актуальной, современной задачей, преследующей цель минимизации энергозатрат при сохранении качества хранимых злаковых культур. Важным аспектом этой задачи является также обеспечение условий пожаробезопасности хранилищ и растительного сырья.

В настоящее время для контроля температуры растительного сырья, хранимого в элеваторах бункерного типа, используются термоподвесы, содержащие шесть точечных датчиков температуры проволочного типа. Датчики закреплены на тросовом подвесе с интервалом в четыре метра. Система закрепляется в верхней части элеватора и спускается вниз вдоль высоты бункера на длину 24 м. Недостатком такой системы является отсутствие возможности контролировать температуру сырья вдоль всей длины подвеса, необходимость проведения периодических профилактических и калибровочных работ, которые связаны с риском для исполнителей.

С целью устранения этих недостатков был разработан метод контроля температуры растительного сырья [1], использующий в качестве чувствительного элемента трубчатую магистраль (звуковод), заглушенную с одной стороны и имеющую внутри акустические неоднородности в виде колец одинакового диаметра, установленные на известном расстоянии  $\Delta z_i$ . К открытому концу трубчатой магистрали присоединен акустический излучатель-приемник. В процессе измерений подсчитываются интервалы времени  $\Delta t_i$  прохождения волны между неоднородностями и рассчитываются скорости распространения акустической волны:  $C_{si} = 2 \Delta z_i / \Delta t_i$ . Температура  $T_i$  на участках звуковода между отражателями рассчитывается по известной зависимости скорости распространения акустических волн  $C_s$  от температуры воздушной среды  $T_0$  [2]:

$$C_s = \sqrt{\frac{C_p}{C_v} R T_0} \quad (1)$$

или

$$T_i = C_{si}^2 \cdot \frac{C_v}{C_p R}, \quad (2)$$

где:  $C_p$ ,  $C_v$  – удельная теплоемкость при постоянном давлении и постоянном объеме соответственно;  $R$  – газовая постоянная.

Звуковод опускается в бункер элеватора и используется вместо точечного термоподвеса.

В настоящее время подобные системы в практике контроля температурного режима отсутствуют. Поэтому нам представилось важным привести данные по распространению звука в звуководах, изготовленных из стандартного трубного проката шовного типа, поскольку он имеет наименьшую стоимость и может быть перспективным в данном случае. Мы приводим данные по исследованию диапазона несущих частот зондирующего сигнала от 500 Гц до 5000 Гц, так как для этого диапазона существуют стандартные высокоэффективные электроакустические преобразователи (ЭАП), предназначенные для эксплуатации в условиях открытого пространства и в них предусмотрены меры электробезопасности. В конечном счете мы хотим разработать методику использования этих недорогих компонентов для создания системы достаточного качества. Мы считаем, что

темы достаточного качества. Мы считаем, что добиться этого можно путем сочетания оптимальной конструкции акустической неоднородности (отражателя) и оптимальной несущей частоты с относительно несложным алгоритмическим приемом – временной корректировкой усиления. Если этих мер будет достаточно и сигнал будет не слишком искажен помехами, то система окажется оптимальной также и по критерию стоимости и достаточного качества.

## 1 Затухание акустических эхосигналов

Если в идеальном цилиндрическом звуковом диаметром  $D$  возбуждено продольное акустическое колебание с длиной волны  $\lambda$ , то в нем, при соблюдении условия  $D \ll \lambda$ , распространяется плоская волна, интенсивность звука в которой практически не зависит от расстояния, пройденного волной [2]. По-видимому, стальную шовную трубу нельзя отнести к «идеальным» звуководам. Этому понятию в значительно большей степени отвечает калиброванный трубный прокат из латуни. Однако его стоимость примерно в 25 раз выше, чем стоимость шовного проката. В связи с этим возникает задача определения обобщенных характеристик затухания звука в волноводных трактах, изготовленных именно из стандартного трубного проката шовного типа.

Обычно затухание в локационных системах измеряют как потери мощности при распространении. В данном случае измерить мощность акустического сигнала оказывается затруднительно, так как КПД ЭАП известен только как оценочное значение, а для проведения калибровок потребовалась бы акустическая камера и соответствующая измерительная техника. Однако, поскольку приемник регистрирует напряжение, а также в связи с тем, что смысл исследования затухания эхосигналов состоит в определении возможности различения напряжения эхосигнала на фоне собственных шумов приемника, внешних помех и паразитного эхосигнала, для оценки потенциала системы удобно регистрировать входное напряжение приемника  $U_e$  при постоянном значении электрической мощности, подводимой к электроакустическому преобразователю.

### 1.1 Амплитудно-частотная характеристика (АЧХ)

Амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) системы «ЭАП – звуководный тракт» измерялась для фиксированной длины звуковода  $\Delta L = 2,66$  м, на конце которого устанавливалась металлическая заглушка. На выбранной длине можно наблюдать реальную АЧХ ЭАП, так как с увеличением дальности распространения проявляются свойства звуковода как фильтра нижних частот. На выходе приемника измерялись амплитуды эхосигналов, отраженных от заглушки. На рис.1 приведена полученная экспериментальная зависимость.

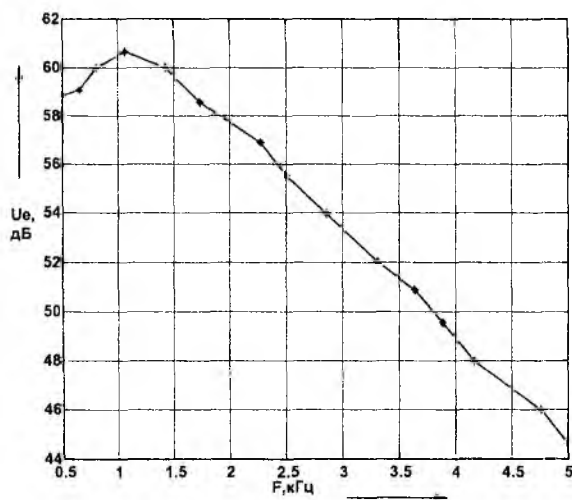


Рис. 1

Акустическая система, состоящая из подвижной мембраны и акустического трансформатора, нагруженная на звуковод, имеет собственную резонансную частоту  $f_p$ . Как следует из полученной зависимости, для данной системы эта частота, определенная экспериментально, имеет значение:  $f_p = 1000 \pm 50$  Гц. На частотах выше 1 кГц

эхосигнал быстро затухает, так что для рассматриваемых волноводов и ЭАП в практических целях могут быть использованы зондирующие сигналы с частотой заполнения не выше 1 кГц. В связи с этим зависимость затухания от дальности измерялось на двух частотах 1 кГц и 500 Гц.

## 1.2 Результаты экспериментальных исследований на частоте 1 кГц

Для получения обобщенной зависимости амплитуды эхосигнала  $U_e = \Psi(z)$ , где  $z$  - координата вдоль длины звуковода [м], длина звуковода изменялась дискретно путем последовательного присоединения отдельных 4-х метровых секций (по аналогии с реальными контактными системами). На выходе приемника измерялись амплитуды напряжения эхо-сигналов в децибелах (дБ) по отношению к значению 1 мВ. Напряжение зондирующего сигнала на входе ЭАП поддерживалось на постоянном уровне. В качестве источника эхосигнала использовалась заглушка, устанавливаемая в конце последней из присоединяемых секций. Отражатели при этом не устанавливались.

Измерение распределений  $U_e = \Psi(z)$  указанным выше способом для частоты 1 КГц приводят к обобщенному выражению, описывающему экспериментальное распределение с точностью не хуже 2%:

$$U_e = A \cdot e^{-z^{0,68}}, \quad (3)$$

где:  $-z = 2 \div 28$  [м];  $A$  - коэффициент пропорциональности, который определяется излучаемой мощностью, эффективностью ЭАП и его согласованностью со звуководом. Для частоты 1 кГц  $A = 6,2$ .

На рис. 2 приведен график этой зависимости в дБ по отношению к 1 мВ (кривая 1). Из полученной зависимости следует, что величина ослабления акустического давления является функцией дальности распространения акустической волны вдоль звуковода. Это явление наблюдается вследствие того, что высокочастотные составляющие спектра зондирующего сигнала по мере распространения затухают быстрее низкочастотных составляющих.

Выражение (3) также показывает, что затухание звуковых волн при распространении в стальных шовных трубах внутренним диаметром 16 мм оказывается значительно выше, чем это может следовать из теоретической модели [3]. Исследования показывают, что основным фактором, определяющим аномальное затухание, является флуктуация площади поперечного сечения трубы вдоль координаты  $z$ . Доказательством этого служит непрерывный эхо-сигнал, который наблюдается в течение всего периода времени от момента излучения зондирующего импульса до момента прихода эхосигнала от заглушки и в данном случае считается паразитным. Амплитуда этого сигнала не имеет периодической структуры, но ее временная зависимость при неизменной температуре повторяется с высокой стабильностью от зондирования к зондированию для данного отрезка трубы или волновода в целом и может быть идентификатором соответствующего волноводного тракта. Подобные сигналы наблюдаются при облучении распределенной цели импульсным сигналом. В таких случаях общий эхосигнал представляет собой суперпозицию отражений от отдельных неоднородностей, расстояние между которыми меньше разрешающей способности локатора по дальности. Случайно расположенными неоднородностями в данном случае могут быть только дефекты внутренней поверхности звуковода и деформации его внутреннего объема. Эти дефекты возникают в частности за счет неоднородностей (наплывов) сварного шва у сварных труб и механических деформаций диаметра. Кроме того, шероховатости внутренней поверхности также вызывают дополнительное поглощение акустической энергии.

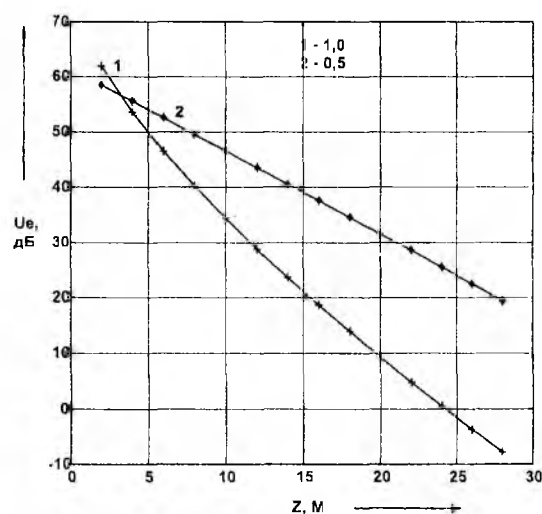


Рис. 2

На частоте 1 кГц амплитуда паразитного сигнала изменяется в соответствии с функцией (3), но коэффициент  $A$  при этом меньше, чем в случае эхосигнала от заглушки в среднем на 22 дБ. Из зависимости (3) также следует, что на дальностях, превышающих 15 м, эхосигнал от заглушки по напряжению становится ниже 20 дБ. В связи с тем, что паразитный эхосигнал ниже эхосигнала от заглушки только на 22 дБ, эхосигнал от встроенных отражателей (вставок) для этих дальностей может составлять величину только порядка 10 дБ. Из этого можно сделать вывод о том, что для данного типа волновода и несущей частоты 1 кГц дальность 15 м является предельной.

### 1.3 Результаты экспериментальных исследований на частоте 500 Гц

Полученные данные показывают, что в тех случаях, когда необходимо увеличение дальности действия системы, несущую частоту зондирующего сигнала необходимо уменьшить. В данном случае, исходя из поставленной задачи использования стандартных электроакустических преобразователей, были проведены эксперименты на частоте 500 Гц. В результате получена обобщающая зависимость вида:

$$U_e = U_0 \cdot 2^{-(0,25 \cdot z - 1)}, \quad (4)$$

где  $U_0$  – напряжение на входе приемника при отражении от заглушки, установленной на дальности  $z = 4$  м (в данном случае от конца первой секции звуковода);  $U_0 = 0,6$  В для данной системы зондирования; 0,25 – постоянный коэффициент.

В выражении (4) параметр «2» и коэффициент «0,25» отображают частное свойство этой зависимости, выражающееся в уменьшении входного напряжения эхосигнала в два раза на каждые 4 м увеличения дальности (длины звуковода). На рис. 2 приведен график выражения (4) кривая 2.

Выражение (4) показывает, что для частоты 500 Гц ослабление амплитуды эхосигнала, выраженное в дБ, является линейной функцией « $x$ », т.е. не зависит от дальности распространения. Следовательно, в этом случае может быть использовано понятие погонного уменьшения напряжения эхосигнала  $V$ . В данном случае можно принять  $V \cong 1,5$  дБ/м. Из совместного рассмотрения кривых 1 и 2 следует, что рассматриваемый волновод при несущей частоте зондирующего сигнала 500 Гц обеспечивает дальность действия системы до 30 м.

В связи с тем, что исследуемый звуковод изготовлен из трубного проката, для которого ГОСТом не регламентируется качество внутренней поверхности, выражения (6) и (7) следует рассматривать только как оценочные. Однако их использование оказывается полезным для оптимизации параметров акустических систем контроля температуры при различных исходных требованиях.

## 2 Акустические отражатели

В устройстве, рассмотренном в [1], одна акустическая неоднородность в виде кольца рассматривается как источник только одного эхосигнала. Такое явление может наблюдаться только в том случае, если ширина кольца  $\Delta S$  меньше разрешающей способности  $\Delta l$  системы зондирования по дальности, где  $\Delta l$  определяется как [4]:

$$\Delta l = C_s \cdot \tau / 2, \quad (5)$$

где  $\tau$  – длительность зондирующего импульса.

Однако каждая неоднородность дает два отражения – от переднего и заднего торцов. При малой ширине кольца, когда выполняется условие  $\Delta S < \Delta l$ , эти два сигнала интерферируют и если ширина кольца равна одной четверти длины звуковой волны в звуковоме, то на выходе приемника наблюдается сложение этих двух сигналов в одинаковой фазе, начиная со второго полупериода зондирующего сигнала. Очевидно, что это приводит к увеличению амплитуды эхосигнала в два раза. Однако, поскольку  $C_s$  зависит от температуры, разрешающая способность  $\Delta l$ , а значит и фазовое соотношение интерферирующих эхосигналов также бу-

дут изменяться в зависимости от температуры. Следовательно, при этом будет изменяться и амплитуда эхосигнала. В связи с этим использование эффекта сложения амплитуд в общем случае нельзя считать оптимальным. Оптимальной будет такая длина отражателя, при которой сигналы от переднего и заднего торцов будут наблюдаться раздельно и отстоять на дальности, равной интервалу дискретности отсчетов  $\Delta z_i$  распределения (профиля) температуры  $T_i = F(\Delta z_i)$  вдоль звуковода, то есть  $\Delta S = \Delta z_i > \Delta l$  (например, для существующих контактных систем  $\Delta z_i = 4$  м). В этом случае оба отраженных сигнала будут полезными и при этом их амплитуды не будут зависеть от температуры среды. При соблюдении этого условия уменьшение  $\Delta S$  улучшает разрешающую способность системы по восстановлению профиля температуры  $T_i = F(\Delta z_i)$ . Минимальное значение  $\Delta z_{i \min}$  ограничено разрешающей способностью системы зондирования так, что должно выполняться условие:

$$\Delta S_{\min} = \Delta z_{i \min} > \Delta l = C_s \cdot \tau / 2 \quad (6)$$

или, привлекая (1):

$$\Delta S_{\min} > \sqrt{\frac{C_p}{C_v} R T_0} \cdot \tau / 2. \quad (7)$$

Выражение (7) позволяет рассчитать минимальный участок длины звуковода, на котором может быть усреднено измерение температуры. Очевидно, что максимальное значение  $N$  таких дискретных участков определится делением общей длины звуковода  $L$  на эту величину:  $N = L / \Delta S_{\min}$ . В существующих контактных системах  $N = 6$  при  $L = 24$  м, т.е.  $\Delta z_{i \min} = 4$  м. В данном случае число  $N$  ограничивается потерями, которые возникают за счет каждого акта частичного отражения от встроенного отражателя.

В рассматриваемых экспериментах отражатели устанавливались в начале каждой секции ( $\Delta z_i = 4$  м) за исключением первой. Вместо колец [1] в качестве отражателей использовались стальные пластины. Высота пластин подгонялась по внутреннему диаметру трубы так, чтобы обеспечить примерно плотную посадку. Их минимально допустимая длина  $\Delta S_{\min}$  определяется следующим образом. Исходя из (1), в выражении (7) следует использовать максимальное значение температуры  $T_{0 \max}$ . При диапазоне возможных температур от  $-30^\circ\text{C}$  до  $+120^\circ\text{C}$   $T_{0 \max} = 293^\circ\text{K}$ . Если принять, что импульсная посылка должна содержать по крайней мере один период, то при максимальном (в данном эксперименте) значении периода несущей частоты зондирующего сигнала  $T = 2 \cdot 10^{-3}$  с из (7) получим:  $\Delta S_{\min} = \Delta z_{\min} > 0,396$  м. Исходя из этого, была выбрана длина пластины  $\Delta S = 0,5$  м, т.е. условие (6) соблюдалось во всем диапазоне контролируемых температур, при этом сигналы, отраженные от каждого из торцов пластины наблюдались раздельно. Однако условие  $\Delta S = \Delta z_i$  не соблюдалось, то есть было принято  $\Delta S < \Delta z_i = 4$  м как это принято в существующей системе контроля элеваторов. Оптимальное значение  $\Delta z_i$  в пределах  $\Delta S \leq \Delta z_i < 4$  м для конкретной системы может быть определено на основании данных о затухании сигналов при распространении в реальном звуковом.

Толщина пластин отражателей подбиралась экспериментально по величине требуемого отраженного сигнала от каждого из отражателей, исходя из условия превышения амплитуды эхосигнала над паразитным сигналом, по крайней мере, на 10 дБ, так как увеличение отражательной способности отражателя неизбежно приводит к ослаблению последующих эхосигналов. Исходя из этих соображений, была подобрана толщина пластин  $\delta = 2$  мм. При таких параметрах пластин и интервала их установки распределение амплитуд эхосигналов от отражателей по виду не отличается от описываемого выражением (4) с той лишь разницей, что  $U_0 = 0,115$  в.

### Заключение

Проведенные теоретические и экспериментальные исследования подтвердили возможность использования акустического зондирования внутреннего пространства звуководов,

изготовленных из стандартного трубного проката для контроля температурного режима окружающей среды. Использование акустического локатора позволяет вести наблюдение непрерывно (круглосуточно). Метод позволяет проводить измерения температур в диапазоне от  $-30^{\circ}\text{C}$  до  $+120^{\circ}\text{C}$  при разрешающей способности не хуже  $\pm 0,2^{\circ}\text{C}$ , что удовлетворяет потребностям температурного контроля. Электроакустический преобразователь (датчик) устанавливается вне контролируемой зоны, что повышает пожарозащищенность метода и ремонтпригодность устройства.

По сравнению с используемыми в настоящее время системами точечного измерения температуры на базе терморезисторов акустическая система обладает значительно большей информативностью, так как измеряет усредненные значения температуры на участках длиной 4 м. Использование звуковода устраняет необходимость периодических калибровок датчиков и обеспечивает ремонтпригодность чувствительных элементов на уровне электроакустического преобразователя, который располагается в легко доступной зоне.

Однако экспериментальные исследования также показывают необходимость и целесообразность проведения дальнейших исследований с целью оптимизации системы для контроля температуры на более протяженных трассах, например в кабельных каналах телецентров, для чего целесообразно исследовать другие типы трубного проката.

В настоящее время нами проводятся исследования по определению передаточной функции температуры в системе «контролируемая среда – измерительная система». С целью автоматизации процесса контроля разрабатывается аппаратно-программный комплекс системы измерения температуры, включающий 256 контролируемых объектов (бункера).

**Список литературы:** 1. Патент України №49219 А МПК7G08B17/10,G01K11. Спосіб контролю за температурою / В. Семенець, В. Єлізаров, А. Сидоренко, В. Леонідов, С. Муравйов, О. Олевський, опубл. 16.09.2002 Бюл. №9. 2. Э. Госсард, У. Хук. Волны в атмосфере, М.: Мир, 1978. 532 с. 3. Иофе В, Корольков В, Сапожков М. Справочник по акустике. М. 1979. 312 с. 4. Дымова А, Альбац М, Бонч-Бруевич А. Радиотехнические системы. М.: Сов. радио, 1975. 439 с.

Харьковский национальный  
университет радиоэлектроники

Поступила в редколлегию 06.08.2003