

ТЕХНОЛОГИИ И СРЕДСТВА МЕХАНИЗАЦИИ СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА

УДК 537.228.1(088.8)

Ю.В. Кандрин,
О.В. Цымбалист

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЛНОВЫХ ПРОЦЕССОВ В ИЗМЕРИТЕЛЬНОМ КАНАЛЕ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ДАТЧИКА ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ ПЛОТНОСТИ ВОЛОКНИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ

Ключевые слова: волокнистый продукт, плотность, акустический канал, звуковое давление, ультразвуковые колебания, математическое моделирование.

Имеется ряд факторов, определяющих геометрическую форму звукового поля и его протяженность, распределение амплитуды и фазы звукового давления. Точное определение характеристик звукового поля – это сложная экспериментальная задача, однако приближенная оценка этих параметров может быть получена теоретически, на основании существующего математического аппарата для описания волновых процессов при определенных допущениях об условиях работы объекта. Изучение и описание любого физического процесса можно свести к нахождению достаточно адекватной математической модели. Применение вычислительной техники для имитационного моделирования дает возможность расширить круг рассматриваемых вопросов, провести большие объемы практических расчетов при различных параметрах модели.

Рассматриваемый преобразователь для контроля плотности волокнистых продуктов (рис. 1) содержит корпус, в котором выполнен формирующий канал, предназначенный для придания прозвучиваемому изделию постоянной и правильной формы в поперечном сечении. Перпендикулярно формирующему каналу в его централь-

ной части расположен измерительный акустический канал с излучателем и приемником ультразвуковых колебаний [1, 2]. Работа преобразователя заключается в следующем: ультразвуковые колебания проходят контролируемый продукт, который движется в формирующем канале, и попадают на приемник, преобразующий их в электрический сигнал. Различная плотность продукта вызывает разную интенсивность приходящей на приемник звуковой волны, что позволяет судить о параметрах объекта. Неоднородная структура контролируемых сред определяет основное условие точности измерения – достижение равной удельной чувствительности по всей зоне контроля.

В рамках решаемой задачи нам требуется описать волновые процессы в ультразвуковом преобразователе с учетом особенностей его конструкции и свойств контролируемого продукта. Полученные результаты помогают оптимизировать конструкцию элементов акустического датчика, а также определить его метрологические характеристики.

Для описания работы преобразователя рассмотрим поле плоского излучателя прямоугольной формы, совершающего колебания по нормали к своей поверхности. Вид излучателя определяется условиями его работы: контролируемый продукт прозвучивается в определенном объеме формирующего канала, представляющего собой параллелепипед. Из-

мерения производятся в ближней зоне преобразователя, поэтому расчет характеристик звукового поля необходимо производить с учетом приближения Френеля. Точного решения этой сложной дифракционной задачи не существует, его можно получить в виде бесконечных рядов, сходимость которых зависит от расстояния между излучателем и точкой пространства, для которой вычисляются параметры волны.

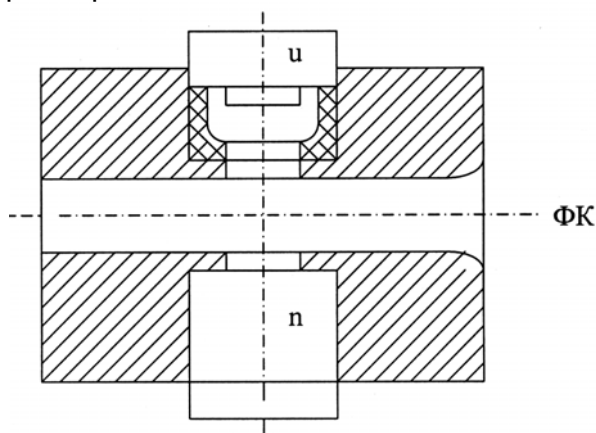


Рис. 1. Схема преобразователя

В основу дальнейших расчетов положим интегральную формулу Гюйгенса для потенциала скорости Φ в точке пространства $O_1(x_1, y_1, z_1)$ (координатные оси при этом расположены следующим образом: x, y – плоскости излучателя, z – по нормали к поверхности излучателя в направлении распространения волн).

$$\varphi = \frac{1}{2\pi} \int_S \frac{1}{l} U \exp(j(\omega t - kl)) dS, \quad (1)$$

где U – колебательная скорость в данной точке излучателя;

l – расстояние от точечного источника на излучающей поверхности с координатами $O_p(x_p, y_p, o)$ до точки O_1 ;

$$\varphi(t) = \frac{1}{2\pi} \int_L \frac{U(x)}{l} (\cos \omega t \cos kl + \sin \omega t \sin kl) dL = \frac{1}{2\pi} \left[\int_L \frac{U(x)}{l} \cos \omega t \cos kldL + \int_L \frac{U(x)}{l} \sin kldL \right] = \frac{1}{2\pi} \left[\cos \omega t \int_L \frac{U(x)}{l} \cos kldL + \sin \omega t \int_L \frac{U(x)}{l} \sin kldL \right]. \quad (3)$$

Отсюда, используя (2), находим:

$$P(t) = \rho \frac{d\varphi}{dt} = \frac{\rho\omega}{2\pi} \left[\cos \omega t \int_L \frac{U(x)}{l} \sin kldL - \sin \omega t \int_L \frac{U(x)}{l} \cos kldL \right]. \quad (4)$$

На действующих образцах акустического преобразователя приемник снабжен отражающей накладкой, выполненной с двумя идентичными гранями, образующими угол, вершина которого обращена к излучателю и лежит на оси симметрии измерительного канала. Эта накладка служит для получения в зоне контроля режима «бегущей волны», что позволяет исключить влияние интерференционных явлений. Другое назначение отражающей накладки – выравнивание чувствительности датчика по всей поверхности прозвучивания канала, достигаемое за счет оптимизации формы отражающей поверхности и

$$l = \sqrt{(x_1 - x_p)^2 + (y_1 - y_p)^2 + z_1^2}.$$

Обычно принимаемое предположение о равномерности распределения колебательной скорости по излучающей поверхности для описания работы данного пьезопреобразователя может быть использовано только в самом общем случае. Для оптимизации характеристик звукового поля необходимо учитывать также вид распределения U по плоскости излучателя $U = U(x, y)$.

Звуковое давление в точке O_1 равно

$$P = \rho \frac{d\varphi}{dt}, \quad (2)$$

где ρ – плотность среды распространения звуковой волны.

Ограничимся двумерным случаем и получим формулу для расчета поля в точке $O_1'(x_1, z_1)$ с учетом только действительной части в формуле (3)

$$\varphi(t) = \frac{1}{2\pi} \int_L \frac{U(x)}{l} (\cos(\omega t - kl)) dL,$$

где L – ширина излучателя;

$$l = \sqrt{(x_1 - x_p)^2 + z_1^2}.$$

Формула (4) представляет собой выражение для расчета звукового давления в точке $O_1'(x_1, z_1)$ как функции от времени t . Изменяя значения x_1 , можно получить форму распределения звукового давления в плоскости, лежащей на расстоянии z_1 от излучателя. Так как показания рассматриваемого преобразователя определяются мгновенным пространственным распределением амплитуды P по поверхности приемника, введенный параметр t позволяет проследить динамику изменения формы поверхности равной фазы звуковой волны.

толщины накладки. Так как принимающая поверхность имеет сложную конфигурацию и не является строго параллельной излучателю, то в выражение для r нужно ввести координату z точки приемника как функцию от $x - O(x, z(x))$.

Для получения суммарного звукового давления по принимающей поверхности возьмем интеграл

$$P_s(t) = \int_{L_1} P(t) dL_1,$$

где L_1 – линия, описывающая форму приемника.

$$P(t) = \frac{\rho\omega}{2\pi} \left[\cos \omega t \int_L \frac{U(x)}{I} \sin kldL dL_1 - \sin \omega t \int_L \frac{U(x)}{I} \cos kldL dL_1 \right]. \quad (5)$$

Участок канала, в котором осуществляется поперечное прозвучивание материала, представляет собой волноводную конструкцию прямоугольного сечения, образованную двумя параллельными стенками. Звуковой давление в произвольной точке волновода можно представить как сумму

$$P = P_1 + P_{отр.},$$

где P_1 определяется выражением (5);

$P_{отр.}$ – отраженная волна, являющаяся суперпозицией бесконечного числа волн, отраженных от стенок канала.

Вклад отраженных волн представляется как результат действия соответствующих мнимых источников, расположенных в плоскости излучателя, но за пределами реальной излучающей поверхности. Результирующее поле можно записать в виде

$$P = \sum_i \frac{\exp(-jkl_i)}{I_i}, \quad (6)$$

где l_i – расстояние, которое прошла отраженная волна.

При рассмотрении канала данного акустического датчика можно отметить некоторые ограничения, вносимые его конструкцией на соотношение размеров элементов: высота боковых стенок канала не превышает половину расстояния от приемника до излучателя и не более ширины излучателя [3].

С учетом этих условий, обратившись к рисунку 2, найдем более простые выражения для расчета звукового поля преобразователя. Рассмотрим точечный источник на излучающей поверхности $O(x_u, 0)$. Определим звуковое давление в точке $O_1(x_p, z_p)$ как

$$P = P_1 + P_{отр.},$$

где P_1 – давление, создаваемое сферической волной точечного источника на расстоянии r и равно

$$P = \frac{\exp(-jkr)}{r}, \quad r = \sqrt{(x_u - x_p)^2 + z_p^2}. \quad (7)$$

Геометрическое определение значения $P_{отр.}$ можно обосновать следующим: так как сферический источник равномерно излучает во все стороны, то и вся боковая грань будет источником отраженных волн, но в заданную точку O_1 попадает только одна, для которой выполняется условие $\beta_1 = \beta_2$ (рис. 2) с амплитудой

$$P_{отр.} = \frac{\exp(-jkr)}{r},$$

где r_1 – путь, пройденный отраженной волной через координаты [4].

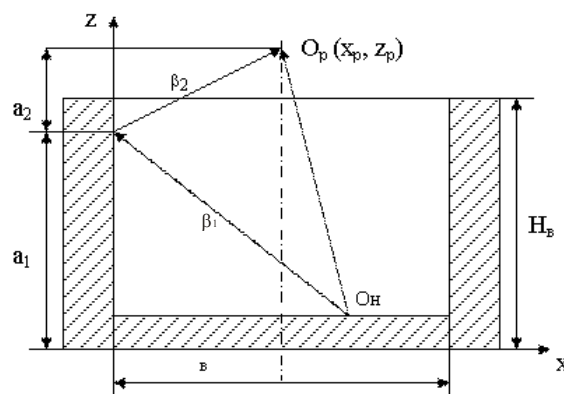


Рис. 2. Преобразователь с отражающими стенками

Выразим r_1 точек O и O_1 :

$$\begin{cases} a_1 + a_2 = z_p \\ \frac{x_u}{a_1} = \frac{x_p}{a_2} \end{cases} \rightarrow \begin{cases} a_1 = \frac{x_u z_p}{(x_u + x_p)} \\ a_2 = \frac{x_p z_p}{x_u + x_p} \end{cases},$$

$$r_1 = \sqrt{\frac{x_u^2 + x_u^2 z_p^2}{(x_u + x_p)^2}} + \sqrt{\frac{x_p^2 + x_p^2 z_p^2}{(x_u + x_p)^2}}. \quad (8)$$

Но при этом необходимо учитывать условия существования отраженной волны в зависимости от высоты стенки канала:

$$I_1 \leq H_b, \frac{x_U z_p}{(x_U + x_p)} \geq H_b, \quad (9)$$

где H_b – высота отражающей стенки.

$$r_2 = \sqrt{\frac{(b-x_U)^2 + (b-x_U)^2 z_p^2}{(2b-x_U-x_p)^2}} + \sqrt{\frac{(b-x_U)^2 + (b-x_U)^2 z_p^2}{(2b-x_U-x_p)^2}}, \quad (10)$$

условие существования: $(b-x_U)^2 \frac{z_p^2}{2b-x_U-x_p} \leq H_b$,
где b – ширина излучателя.

На основании полученных выражений можно определить звуковое давление на приемнике:

$$P(t) = \frac{\rho \omega}{2\pi} \left[\cos \omega t \int_{L_1} \int_{L_1} U(x) \left[\frac{\sin kl}{l} + \frac{\sin kr_1}{r_1} + \frac{\sin kr_2}{r_2} \right] dL_1 - \sin \omega t \int_{L_1} \int_{L_1} U(x) \left[\frac{\cos kl}{l} + \frac{\cos kr_1}{r_1} + \frac{\cos kr_2}{r_2} \right] dL_1 \right] \quad (11)$$

Полученные выражения позволяют оптимизировать размеры элементов конструкции ультразвукового датчика при заданных ограничениях. Перспективным является подбор наиболее эффективной формы приемника для повышения точности работы преобразователя. Ряд технических решений положен в основу действующих образцов акустических датчиков для контроля неоднородных волокнистых образцов.

Библиографический список

1. А.с. 1585743 СССР МКИ G01N29/02. Устройство для ультразвукового контроля линейной плотности волокнистой ленты / В.М. Иливанов, В.А. Цымбалист; Заявитель

Из аналогичных рассуждений можно найти выражения для вклада волн, отраженных от второй стенки, в суммарное звуковое давление на поверхности приемника. Путь, пройденный отраженной волной, будет равен

и патентообладатель Алт. сельскохозяйственный институт. №4361809/25-28; заявл. 11.01.88; опубл. 15.08.90, бюл. № 30. 3 с.

2. А.с. 1659542 СССР МКИ D01N13/32. Датчик для контроля линейной плотности волокнистого продукта / В.М. Иливанов, В.А. Цымбалист; заявитель и патентообладатель Алт. сельскохозяйственный институт. №4472311/12; заявл. 30.06.88; опубл. 30.06.91, бюл. № 24.4 с.

3. Иливанов В.М. Физическая акустика: монография. 2-е изд., доп. / В.М. Иливанов, Ю.В. Кандрин, В.А. Цымбалист. – Барнаул: Изд-во АГАУ, 2004 – 158 с.

4. Кикучи Е.Д. Ультразвуковые преобразователи / Е.Д. Кикучи. – М.: МИР, 1972. – 424 с.



УДК 631.22.01

Ю.М. Исаев,
Н.М. Семашкин,
В.А. Злобин

ПРОЦЕСС ВЫГРУЗКИ ЗЕРНОВОГО МАТЕРИАЛА СПИРАЛЬНО-ВИНТОВЫМИ УСТРОЙСТВАМИ

Ключевые слова: спиральный винт, транспортировка, скорость, бункер, сыпучий материал, теоретические исследования, активный слой.

В бункерах для хранения зерна при разгрузке применяются спирально-винтовые транспортеры в кожухах, а также без кожухов. Для уменьшения мощности привода над спиралью могут устанавли-