

ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ДАТЧИКА КОНТРОЛЯ ВОЛОКОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Ю.В. Кандрин

В статье приведено построение вероятностных моделей распределения контролируемого материала в зоне контроля.

Ключевые слова: ультразвук, преобразователь, контроль, нерегулярный, волоконный, акустический, волна, давление, приемник.

При контроле ультразвуковыми датчиками параметров волоконных материалов, как правило, не известны вероятностные характеристики случайного возмущающего воздействия на входе датчика, вызванного неравномерностью распределения материала в зоне контроля (нерегулярностью среды). Не ясно также, какому закону подчиняются эти вероятностные характеристики. Не определены области значений входных и выходных величин датчика при различных режимах заполнения средой прозвучиваемого объема. Не ясно, как следует оценивать точностные свойства датчика, по каким данным, поскольку при контроле могут быть различные варианты заполнения канала.

Целью настоящей статьи и является поиск ответов на поставленные вопросы.

Полученные автором в работе [1] соотношения для интегральных (усредненных) значений амплитуды и фазы звукового давления на поверхности приемника, а также графики, характеризующие распределение давления по приемной поверхности, справедливы в двух случаях:

- при отсутствии в зоне контроля материала,
- при равномерном заполнении зоны контроля волокном.

Снижение амплитуды сигнала приемника (соответственно, звукового давления на поверхности приемника $P(T)$) во втором случае обусловлено наличием множителя $e^{-\alpha_1 KT}$, т. е.:

$$P(T) = P_{cp} \exp(-\alpha_1 KT), \quad (1)$$

где P_{cp} - начальное значение среднего звукового давления на поверхности приемника;

K - величина, характеризующая параметры зоны прозвучивания;

α_1 - коэффициент затухания ультразвуковых колебаний в волокне;

T - линейная плотность изделия.

Нерегулярность волоконной структуры, при которой размеры локальных уплотнений или разрежений среды соизмеримы или превышают длину ультразвуковой (УЗ) волны, приводят к искажениям волнового фронта. Неопределенность фазы в различных точках прозвучиваемой поверхности не позволяет вычислять интегральные значения амплитуды звукового давления в аналитической форме. Но поставленную задачу можно решить построением вероятностных моделей распределения контролируемого материала в зоне контроля для конкретных значений параметров изделий.

Ограничившись рассмотрением произвольно выбранного, но конкретного состава волоконного материала, чтобы не принимать во внимание многочисленные влияющие факторы, отметим, что в общем случае звуковое давление P_{cp} на поверхности приемника зависит от линейной плотности изделий, т.е. от количества волокна в прозвучиваемом объеме, и от распределения этого волокна по прозвучиваемой поверхности:

$$P_{cp} = f(T, \eta), \quad (2)$$

где η - параметр, определяющий степень сжатия волокна в канале по координате X .

Численно величина η равна используемой в работе [2] величине ψ (изменению объемной плотности материала или объема, занимаемого волокном), но в соотношениях для скорости звука направление сжатия не играет роли, а P_{cp} зависит только от сжатия по координате X .

Параметр η введен из следующих соображений. Распределение волокна по прозвучиваемой поверхности (в данном случае представляет интерес распределение только по ширине формирующего канала) может быть равномерным. Тогда первая производ-

ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ДАТЧИКА КОНТРОЛЯ ВОЛОКОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

ная звукового давления p_v на поверхности приемника по координате X

$$\frac{dp_v}{dx} = 0.$$

Однако в реальных условиях распределение волокна зависит от многих параметров, значение которых величина случайная:

$$\frac{dp_v}{dx} = f(T, p_1, p_2, p_3, p_4), \quad (3)$$

где T – линейная плотность изделия;

p_1 – жесткость (упругость) волокон, которая, в свою очередь, есть функция влажности, температуры, технологии окраски и пр.;

p_2 – ориентация ленты в пространстве перед входом в датчик, определяющая количество перекрученных участков изделия на определенной его длине;

p_3 – состав волокнистой массы, характеризующий параметрами режимов смешивания сырья;

p_4 – параметр, зависящий от режимов работы оборудования при непосредственном изготовлении изделий.

Характер распределения волокна в канале определить невозможно, так как многие величины в (3) количественной оценке не подлежат. Но в достаточной мере можно определить интервалы, в которых находится величина η .

Если равномерно заполняющий поперечное сечение канала образец волокнистой массы подвергать сжатию с одной стороны к краю канала, или с двух сторон к центру сечения (рисунок 1), то получим предельные случаи неравномерного заполнения канала. Причем эти предельные значения η будут, в свою очередь, определяться количеством волокна в канале, т.е. величиной T . Таким образом, можем записать

$$\eta \in [1, \eta_k(T)], \quad (4)$$

где $1 = \eta_n$ – начальное сжатие, при котором имеет место случай равномерного заполнения волокном канала;

$\eta_k(T)$ – наибольшая степень сжатия при данном значении T , определяющая максимально возможную неравномерность заполнения канала.

Поперечное сечение лент в свободном состоянии имеет преимущественно овальную форму, с соотношением большего и меньшего размеров равным 2:1. С минимальными искажениями это сечение представляется в

ПОЛЗУНОВСКИЙ ВЕСТНИК №2/2 2011

виде прямоугольника с равновеликой площадью и с таким же соотношением сторон (рисунок 2)

Допуская, что площадь поперечного сечения изделия, находящегося в свободном состоянии, пропорциональна его линейной плотности, получим (рисунок 2) соотношение

$$b_l(T) = b_{ln} \sqrt{\frac{T}{T_n}}, \quad (5)$$

где b_{ln} – номинальное значение размера при номинальном значении, то есть при $T = T_n$.

Данное допущение справедливо в том, что рассматриваются предельные величины η , а так как наружные слои волокна обычно разрежены, то реальные изделия имеют несколько большие размеры сечения. Поэтому соотношение (4) будет всегда выполнено. Поперечное сечение формирующего канала, исходя из соображений наименьшей деформации ленты в канале и наименьших усилий протяжки изделия, используется с соотношением (рисунок 1):

$$\frac{b_k}{h_k} = 2.$$

При определении верхней границы интервала $\eta_k(T)$ можно предварительно предположить, что сжатие изделия по одной из осей не вызывает изменения размера по другой оси, хотя, в действительности, определенное изменение имеет место. Так как наименьшее сечение, которое может занимать волокнистая масса в формирующем канале, будет в случае входа ленты в канал, ориентированной своим большим размером по оси Y , то данное допущение только изменяет границу интервала в сторону увеличения, не изменяя при этом характер зависимостей. Таким образом:

$$\eta_k(T) = \frac{b_k}{x_1(T) - x_2(T)} \text{ или } \eta_k(T) = \frac{b_k}{h_l(T)}. \quad (6)$$

В соответствии с формулой (5) для размера h_l имеем

$$h_l(T) = h_{ln} \sqrt{\frac{T}{T_n}} \quad (7)$$

где h_{ln} – номинальный размер изделия по оси Y . Тогда

$$n_k(T) = b_k \left(h_{ln} \sqrt{\frac{T}{T_n}} \right)^{-1}. \quad (8)$$

Таким образом, определены предельные значения неравномерности распределения волокна по сечению формирующего канала.

Так как распределение волокна по сечению есть функция большого числа независимых случайных величин, то на основании центральной предельной теоремы теории вероятностей можно утверждать, что внутри интервала от $\eta_n(T) = 1$ до $\eta_k(T)$ степень сжатия распределяется по нормальному закону с дисперсией $\sigma(T)$ и математическим ожиданием $m_x(T)$

$$\left. \begin{aligned} m_x(T) &= \frac{\eta_k(T) + \eta_n(T)}{2}; \\ \sigma(T) &= \frac{\eta_k(T) - \eta_n(T)}{6} \end{aligned} \right\}. \quad (9)$$

Ее плотность вероятности

$$f(\eta) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{[x-m_x(T)]^2}{2\sigma^2(T)}}. \quad (10)$$

Зависимости звукового давления на поверхности приемника от положения границ (рисунок 1) открытой и закрытой волокном части формирующего канала при фиксированных значениях линейной плотности определяются выражением:

$$\bar{P}_{cp}(T, \eta) = \sum \bar{P}_{cpo.}(T, \eta) + \bar{P}_{cpz.}(T, \eta), \quad (11)$$

где $\sum \bar{P}_{cpo.}(T, \eta)$ - звуковое давление на участках, свободных от волокна;

$\bar{P}_{cpz.}(T, \eta)$ - звуковое давление на участке, занимаемом волокном.

Тогда на основании соотношений, рассмотренных в работе [2], можем записать

$$P_{cpo.}(T, \eta) = \int_0^{x_1(\eta)} P(x) \cos \omega \left[t - \frac{y(x)}{c} \right] dx + \quad (12)$$

$$+ \int_{x_2(\eta)}^{b_k} P(x) \cos \omega \left[t - \frac{y(x)}{c} \right] dx;$$

$$P_{cpz.}(T, \eta) =$$

$$= \int_{x_1(\eta)}^{x_2(\eta)} P(x) \cos \omega \left[t - \frac{y(x)}{c} - \frac{h_k}{c_1} \right] e^{-\alpha_1 K T} dx, \quad (13)$$

где $P(x)$ – уравнение кривой распределения звукового давления по сечению УЗ пучка;

$x_1(\eta)$, $x_2(\eta)$ – границы открытой и закрытой части сечения формирующего канала;

h_k – высота канала;

C_1 , – скорость звука в волокне (с учетом того, что $\Psi = \eta$);

C – скорость звука в воздухе;

$y(x)$ – уравнение образующей отражающей грани приемника;

t – момент времени, соответствующий максимальному значению P_{cp} (определяет

фазу сигнала);

α_1 – коэффициент затухания волокна (определяется из экспериментальных данных);

K – коэффициент, зависящий от размера изделия при прозвучивании;

T – линейная плотность (фиксированное значение для конкретно заданной зависимости).

Для определения t необходимо найти первую производную от выражения (11) по времени. Затем, приравняв ее 0, можно вычислить t . Численное решение задачи при определении $P_{cp}(T, \eta)$ проведено методом Симпсона (вычисление синусных и косинусных интегралов Френеля). Результаты расчетов представлены в виде семейства кривых, изображенных на рисунке 3 и 4.

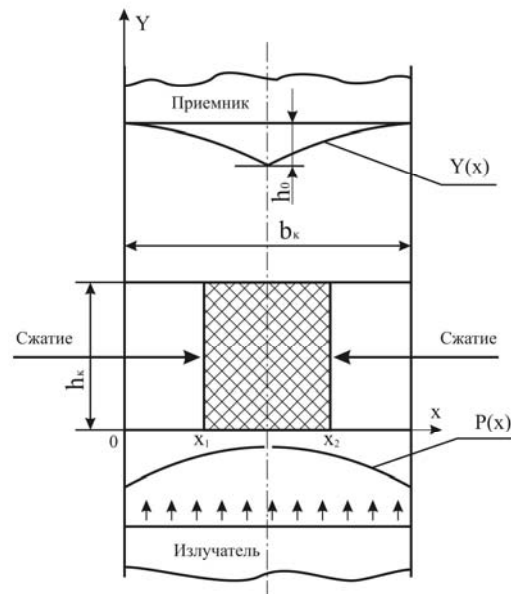


Рисунок 1 – Предельные варианты неравномерного заполнения зоны прозвучивания

Зависимости показаны в функции величины суммарного просвета и в функции степени сжатия материала в канале (пересчет координаты произведен в соответствии с (6)).

Расчеты произведены для трех вариантов заполнения канала:

а) заполнение с одной стороны равномерно распределенным по сечению образцом;

б) сжатие образца заданной линейной плотности с одной стороны;

в) сжатие образца с двух сторон.

Наибольшее отклонение от значений, определяемых номинальной функцией преобразования датчика (1) дает сжатие мате-

ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ДАТЧИКА КОНТРОЛЯ ВОЛОКОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

риала с двух сторон к центру канала (рисунок 4), причем такое предельное расположение материала в канале представляется наиболее вероятным.

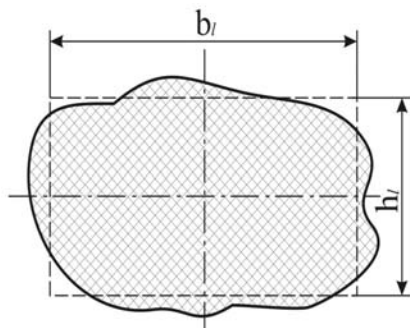


Рисунок 2 – Поперечное сечение контролируемого изделия пунктирные линии – заполнение канала образцом постоянной плотности, сплошные – сжатие к одному краю канала

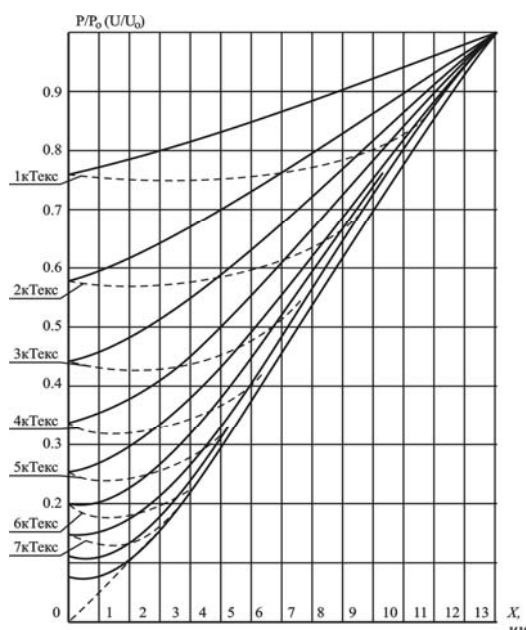


Рисунок 3 – Зависимости усредненного значения звукового давления от размера открытой части канала сжатие с двух сторон, 1 – сравнительное положение кривой при одностороннем сжатии материала

Таким образом, в результате проведенного анализа показано, что вероятностные характеристики случайного возмущающего воздействия на входе датчика, вызванного неравномерностью распределения материала в зоне контроля (нерегулярностью среды), подчиняются нормальному закону. Опреде-

лены области значений входных и выходных величин датчика при различных режимах заполнения средой прозвучиваемого объема. Исходя из условий наихудшего случая, точностные свойства датчика следует оценивать по данным, полученным при моделировании двухстороннего сжатия материала.

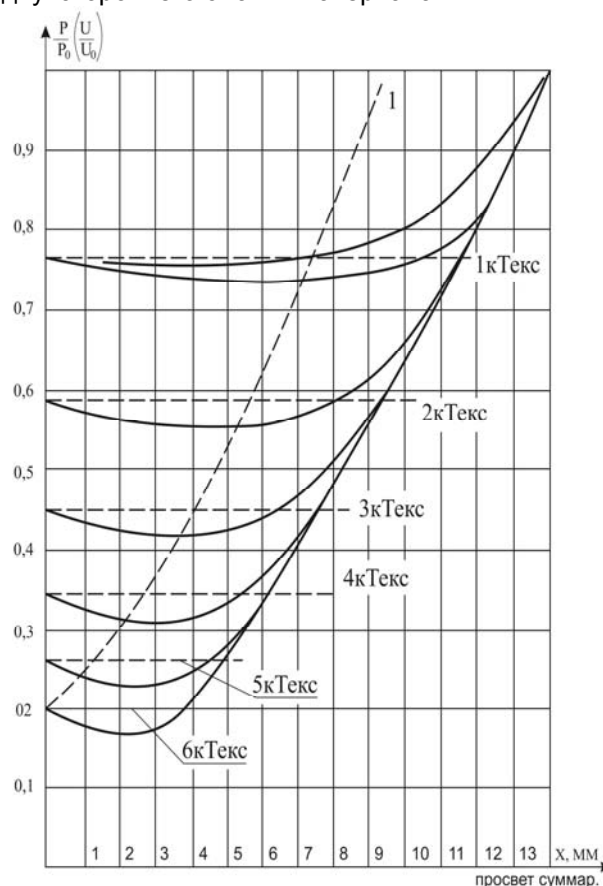


Рисунок 4 – Зависимость усредненного значения звукового давления от размера открытой части канала

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кандрин, Ю.В. Анализ работы акустического тракта ультразвуковых преобразователей в условиях неравномерности волнового поля и нерегулярности контролируемой среды / Н.П. Воробьев, Ю.В. Кандрин, О.В. Цымбалист // Ползуновский вестник. – Барнаул, 2010. – № 2. – С. 50–52.
2. Кандрин, Ю.В. Акустический контроль параметров технологических процессов: монография / Н. П. Воробьев [и др.]; Алт. гос. техн. ун-т им. И. И. Ползунова. – Барнаул : Изд-во АлтГТУ, 2010. – 266 с.

Кандрин Ю.В., аспирант, АлтГТУ им. И.И. Ползунова, директор фирмы «АККОН» (Барнаул), тел.: (3852) 55-04-27, 77-35-44, E-mail: ukandrin@mail.ru; mail@akkon.ru