

УДК 677.05-791

**УЧЕТ ВЛАГОСОДЕРЖАНИЯ ВОЛОКНИСТОГО МАТЕРИАЛА
ПРИ ИЗМЕРЕНИИ ЕГО МАССЫ ЕМКОСТНЫМ МЕТОДОМ**

**ACCOUNTING OF MOISTURE IN FIBROUS MATERIAL
UNDER THE MEASUREMENT OF ITS WEIGHT BY THE CAPACITANCE METHOD**

Н.А. КОРОБОВ, П.В. БУЙЛОВ
N.A. KOROBOV, P.V. BUJLOV

(Ивановская государственная текстильная академия)
(Ivanovo State Textile Academy)
E-mail: ttp@igta.ru

Емкостный метод измерения линейной плотности продукта наряду с достоинствами (простота реализации и высокая скорость измерения) обладает и недостатком – сильной зависимостью результата измерения от влажности материала. Учесть влияние влажности материала можно, измерив диэлектрическую проницаемость материала не на одной, фиксированной частоте, а на нескольких, то есть в более широком диапазоне частот.

The electric-capacity method of measurement of a product linear density along with the advantages (simplicity of realization and high speed of measurement) possesses also the lacks - strong dependence of a measurement result on humidity of a material. It is possible to note the influence of a material humidity by measuring dielectric penetrability of a material not on one fixed frequency, but on several ones, that is in a wider range of frequencies.

Ключевые слова: волокнистый материал, учет влагосодержания, диэлектрическая проницаемость, широкий диапазон частот, масса сухого продукта.

Keywords: fibrous material, moisture accounting, dielectric penetrability, a wide range of frequencies, dry product mass.

В текстильной промышленности необходимость измерения массы волокнистого материала возникает при определении линейной плотности продукта. При этом широкое распространение получил емкостный метод измерения. Однако наряду с такими достоинствами, как простота реализации и высокая скорость измерения, данный метод измерения обладает и недостатком – сильной зависимостью результата измерения от влажности материала. В работе [1] показано, что указанная зависимость обусловлена существенно большей диэлектрической проницаемостью адсорбированной волокном воды по сравнению с диэлектрической проницаемостью сухого волокна. Поэтому для повышения точности измерения массы волокнистого материала необходима разработка методов учета влияния влажности на результат измерения.

Из [1] диэлектрическая проницаемость смеси волокнистого влагосодержащего материала с воздухом ε определяется по формуле:

$$\varepsilon = 1 + \frac{m_{\text{вол}}}{V\rho_{\text{вол}}}(\varepsilon_{\text{вол}} - 1) + \frac{m_{\text{в}}}{V\rho_{\text{в}}}(\varepsilon_{\text{в}}(f, w) - 1), \quad (1)$$

где $m_{\text{вол}}$ – масса волокна, г; V – объем датчика, м^3 ; $\rho_{\text{вол}}$ – плотность волокна, $\text{г}/\text{м}^3$; $\varepsilon_{\text{вол}}$ – относительная диэлектрическая проницаемость волокна; $m_{\text{в}}$ – масса воды, г; $\rho_{\text{в}}$ – плотность воды, $\text{г}/\text{м}^3$; $\varepsilon_{\text{в}}$ – относительная диэлектрическая проницаемость воды; f – частота, Гц; w – влажность материала.

Авторами были выполнены экспериментальные исследования диэлектрической проницаемости влагосодержащего волокнистого материала (исследовались пробы волокна хлопка, льна и лавсана) в диапазоне частот от 1 кГц до 10 МГц для различных значений влажности материала.

Измерения выполнялись согласно ГОСТу 22372–77 [2]. Графики полученных зависимостей для хлопкового волокна приведены на рис. 1 (экспериментальная частотная зависимость диэлектрической проницаемости конденсатора с диэлектриком из влагосодержащего хлопкового волокна).

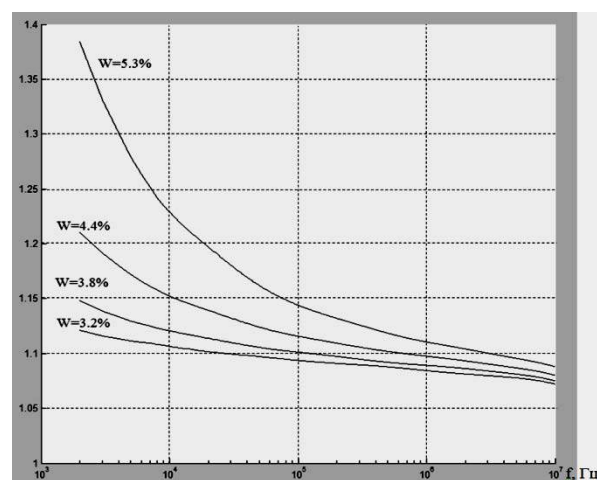


Рис. 1

Выделим из семейства кривых одну характеристику, например, для влажности $W = \text{const} = 4,4\%$. Согласно (1) изменение диэлектрической проницаемости, обусловленное наличием в измерительном конденсаторе волокнистого влагосодержащего диэлектрика:

$$\Delta\varepsilon(f) = \Delta\varepsilon_{\text{вол}} + \Delta\varepsilon_{\text{в}}(f, w), \quad (2)$$

где $\Delta\varepsilon_{\text{вол}} = \frac{m_{\text{вол}}}{V\rho_{\text{вол}}}(\varepsilon_{\text{вол}} - 1)$ – изменение диэлектрической проницаемости, обусловленное наличием в датчике сухого волокна; $\Delta\varepsilon_{\text{в}}(f) = \frac{m_{\text{в}}}{V\rho_{\text{в}}}(\varepsilon_{\text{в}}(f, w) - 1)$ – изменение диэлектрической проницаемости, обусловленное наличием в датчике влаги.

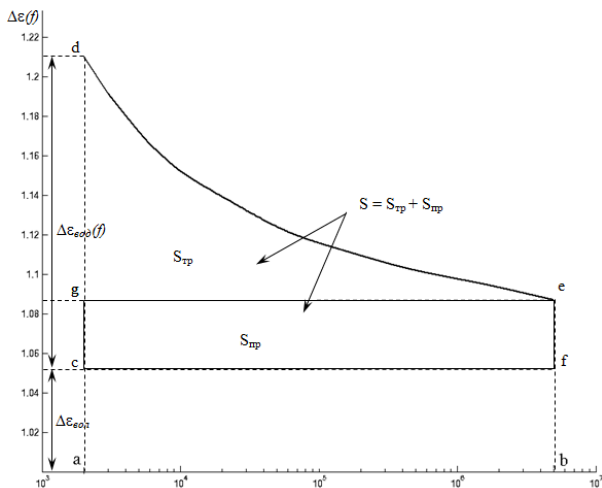


Рис. 2

На выбранной зависимости $\Delta\epsilon(f)$ (рис. 2 – геометрическая модель влагосодержащего диэлектрика) рассмотрим криволинейную трапецию, ограниченную кривой $\Delta\epsilon(f)$ на участке ab . Внутри этой трапеции выделим прямоугольник с основанием ab и высотой $\Delta\epsilon_{\text{вол}}$. Данный прямоугольник обусловлен наличием в датчике сухого волокна, диэлектрическая проницаемость которого не зависит от частоты. При постоянных значениях V , $\rho_{\text{вол}}$, $\epsilon_{\text{вол}}$ его высота растет прямо пропорционально массе волокна $m_{\text{вол}}$ (сухого вещества).

Далее рассмотрим криволинейную трапецию ($cdef$), расположенную над выделенным прямоугольником. Эта трапеция обусловлена наличием в волокне сорбированной влаги, диэлектрическая проницаемость которой зависит от частоты электрического поля. Разделим рассматриваемую криволинейную трапецию на криволинейный треугольник и прямоугольник. Для этого из точки $\Delta\epsilon(b)$ проведем линию, параллельную горизонтальной оси, до пересечения с прямой, проведенной из абсциссы a .

Площадь S трапеции $cdef$ равна сумме площадей прямоугольника $S_{\text{пр}}$ и криволинейного треугольника $S_{\text{тр}}$.

Заметим, что величины площадей $S_{\text{тр}}$ и $S_{\text{пр}}$ функционально взаимосвязаны. Действительно, при стремлении влажности материала к 0 кривая $\Delta\epsilon(f)$ вырождается в прямую линию, параллельную оси абсцисс. При этом площадь треугольника

стремится к 0. Площадь $S_{\text{пр}}$ также стремится к 0. При отсутствии влаги обе эти площади стремятся к 0, и на графике остается только прямоугольник $acfb$, обусловленный наличием в датчике сухого волокна. Таким образом, функциональная зависимость между $S_{\text{тр}}$ и $S_{\text{пр}}$ – прямая, то есть при увеличении $S_{\text{тр}}$ увеличивается и $S_{\text{пр}}$. Проверка выявленной зависимости по данным эксперимента показала, что она является прямой пропорциональной со свободным членом, равным 0, и описывается соотношением:

$$S_{\text{пр}} = k_1 S_{\text{тр}}, \quad (3)$$

где k_1 – коэффициент пропорциональности, зависящий от вида волокна, коэффициента передачи схемы измерения, рассматриваемого диапазона частот и т. п.

Поскольку изменение диэлектрической проницаемости отображается на рис. 2 вдоль оси ординат, то для упрощения рассуждений перейдем от площадей геометрических фигур к их высотам (то есть диэлектрическим проницаностям). Для этого разделим площадь $S_{\text{тр}}$ на длину основания ab и получим высоту эквивалентного (равного по площади) прямоугольника $H_{\text{эпр}}$:

$$H_{\text{эпр}} = \Delta\epsilon_{\text{эчзв}} = \frac{S_{\text{тр}}}{b - a}, \quad (4)$$

где $\Delta\epsilon_{\text{эчзв}}$ – эквивалентная диэлектрическая проницаемость частотно-зависимой составляющей $\Delta\epsilon_{\text{в}}(f)$.

Тогда высота прямоугольника с площадью $S_{\text{пр}}$:

$$H_{\text{пр}} = \Delta\epsilon_{\text{чнв}} = k_1 H_{\text{эпр}}, \quad (5)$$

где $\Delta\epsilon_{\text{чнв}}$ – диэлектрическая проницаемость частотно-независимой составляющей $\Delta\epsilon_{\text{в}}(f)$.

Для нахождения изменения диэлектрической проницаемости, вызванной наличием в датчике сухого волокна, необходимо из $\Delta\epsilon(b)$ вычесть $\Delta\epsilon_{\text{чнв}}$:

$$\Delta \varepsilon_{\text{вол}} = \Delta \varepsilon(b) - \Delta \varepsilon_{\text{чнв}} = \Delta \varepsilon(b) - k_1 \Delta \varepsilon_{\text{эчзв}} = \Delta \varepsilon(b) - k_1 \frac{S_{\text{тр}}}{b-a}. \quad (6)$$

Масса сухого вещества (волокна), как это следует из формулы (2), связана с $\Delta \varepsilon_{\text{вол}}$ прямой пропорциональной зависимостью:

$$m_{\text{вол}} = k_2 \Delta \varepsilon_{\text{вол}} = k_2 \left(\Delta \varepsilon(b) - k_1 \frac{S_{\text{тр}}}{b-a} \right), \quad (7)$$

где k_2 – коэффициент пропорциональности, зависящий от геометрических размеров датчика, коэффициента передачи измерительного устройства и плотности волокна.

Масса воды в продукте прямо пропорциональна эквивалентной диэлектрической проницаемости частотно-зависимой составляющей $\Delta \varepsilon_b(f)$ [2]:

$$m_b = k_3 \Delta \varepsilon_{\text{эчзв}}, \quad (8)$$

где k_3 – коэффициент пропорциональности, зависящий от параметров измерительного устройства.

Зная массу волокна и массу воды, нетрудно рассчитать массу влагосодержащего волокна:

$$m = m_{\text{вол}} + m_b = k_2 \Delta \varepsilon(b) + (k_3 - k_1 k_2) \Delta \varepsilon_{\text{эчзв}}. \quad (9)$$

Для подтверждения выявленных зависимостей авторы сравнили величины массы воды и волокна для образцов хлопкового волокна различной влажности и массы, измеренные весовым методом, и соответствующие значения масс для тех же образцов, измеренные емкостным методом, и обработанные с использованием формул (7) и (8). Погрешность измерения массы весовым методом не превышала 5%. Результаты сведены в табл. 1.

Таблица 1

Масса волокна			Общая масса (с учетом влаги), мг		
весовой	емкостный	$\delta, \%$	весовой	емкостный	$\delta, \%$
1	2	3	4	5	6
203,00	191,08	-5,9	209,78	197,31	-5,9
299,77	281,25	-6,2	309,78	291,89	-5,8
396,54	416,42	5,0	409,78	430,48	5,1
493,31	485,54	-1,6	509,78	503,41	-1,2
203,00	218,63	7,7	211,13	226,49	7,3
299,15	308,83	3,2	311,13	319,89	2,8
395,30	409,15	3,5	411,13	425,30	3,4
491,46	505,02	2,8	511,13	526,01	2,9
203,00	189,78	-6,5	212,40	198,42	-6,6
298,58	305,21	2,2	312,40	318,17	1,8
394,15	404,34	2,6	412,40	423,59	2,7
489,73	504,37	3,0	512,40	528,79	3,2
203,00	191,24	-5,8	214,30	202,57	-5,5
297,73	293,15	-1,5	314,30	310,08	-1,3
392,46	392,61	0,0	414,30	414,98	0,2
487,19	517,07	6,1	514,30	546,68	6,3

Величина погрешности определения общей массы влагосодержащего волокнистого материала емкостным методом (6-й столбец в табл. 1), с использованием многочастотного подхода, не превышает 7,3% (при использовании более точных измерительных приборов величина погрешности

будет ниже). В [1] показано, что минимальная, теоретически достижимая погрешность измерения емкостным методом, с использованием одночастотного подхода, составляет около 20%.

Предложенный метод также применим для учета влияния сорбированной влаги на

результат измерения массы материала (или массы сорбированной влаги) емкостным методом в других отраслях промышленности, например деревообрабатывающей.

ВЫВОДЫ

Измерение диэлектрической проницаемости влагосодержащего материала на нескольких, разнесенных друг от друга, частотах позволяет вычислить массу сорбированной материалом воды, а также массу сухого продукта.

ЛИТЕРАТУРА

1 Буйлов П. В., Коробов Н. А. Модель конденсатора с волокнистым влагосодержащим диэлектриком // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2011, № 3.

2 ГОСТ 22372-77. Материалы диэлектрические. Методы определения диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь в диапазоне частот от 100 до $5 \cdot 10^6$ Гц

Рекомендована кафедрой прикладной математики и информационных технологий. Поступила 06.10.11.
