

УДК 677.027

**ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ПОЛЯ ТВЧ  
НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРОТЕКАНИЯ  
ХИМИКО-ТЕКСТИЛЬНЫХ ПРОЦЕССОВ ОТДЕЛОЧНОГО ПРОИЗВОДСТВА**

*О.Г. ЦИРКИНА, М.Б. ЕРМОЛАЕВ*

(Ивановская государственная текстильная академия  
Ивановский государственный химико-технологический университет)  
E-mail: ttp@igta.ru; rector@isuct.ru

*В настоящей работе предпринята попытка свести воедино влияние множественных факторов, которые имеют место при отделке тканей, на эффективность диэлектрического нагрева полимерного материала, пропитанного различными технологическими растворами.*

*The attempt to reduce together the influence of plural factors, which take place at finishing of fabrics, on the efficiency of dielectric heating of the polymeric material impregnated with various technological solutions is undertaken in the given paper.*

**Ключевые слова:** математическое моделирование, частота внешнего электромагнитного поля, хлопчатобумажные ткани, концентрация мочевины, щелочного агента красителя; эффективность нагрева целлюлозного материала в поле ТВЧ.

Целью математического моделирования любого технологического процесса является определение и анализ качественных и количественных характеристик режимов обработки полимерного материала и показателей качества готовой продукции. Изучение таких взаимосвязей осложнено тем, что они не являются строгими, функциональными зависимостями. Эти зависимости стохастичны по своей природе, то есть позволяют устанавливать вероятностные логические соотношения между изучаемыми явлениями. Сам процесс выявления взаимосвязей осуществляется, как правило, на основании статистического наблюдения за анализируемыми переменными. Решение задачи построения качественной математической модели, соответствующей эмпирическим данным и целям исследования, является весьма сложным и многоступенчатым процессом.

В настоящей работе нами предпринята попытка свести воедино влияние множественных факторов, которые имеют место при отделке тканей, на эффективность диэлектрического нагрева полимерного материала, пропитанного различными технологическими растворами.

Известно, что при использовании микроволнового нагрева мощность, выделяющаяся в объеме материала, описывается формулой [1]:

$$P = 5,55 \cdot 10^{-12} \operatorname{tg} \delta \varepsilon E^2 f, \quad (1)$$

где  $P$  – мощность, выделяемая в единице объема материала [ $\text{Вт}/\text{м}^3$ ];  $\operatorname{tg} \delta$  – тангенс угла диэлектрических потерь;  $\varepsilon$  – диэлектрическая проницаемость материала;  $f$  – частота внешнего электромагнитного поля [ $\text{Гц}$ ];  $E$  – напряженность поля [ $\text{В}/\text{м}$ ].

Универсальным критерием подобия нагрева полимерных материалов в ВЧ-поле является удельная мощность [2], которая определяется набором показателей, зависящих от состава и концентрации компонентов технологических растворов. В состав водных растворов, применяемых для облагораживания текстильных материалов, входят различные электролиты, способные в значительной степени влиять на

величину тангенса угла диэлектрических потерь ( $\operatorname{tg} \delta$ ) и диэлектрическую проницаемость материала ( $\varepsilon$ ). Поэтому от их суммарной величины напрямую зависит и эффективность нагрева текстильного материала в ВЧ/СВЧ-поле.

В качестве объектов исследования выбраны хлопчатобумажные ткани, обладающие разными объемными характеристиками: поверхностной плотностью и толщиной, а также водные растворы с различным содержанием щелочного агента ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) и мочевины ( $\text{CN}_2\text{H}_4\text{O}$ ). Ранее нами была составлена база данных, связывающих величину  $\operatorname{tg} \delta$  и  $\varepsilon$  с составом технологических растворов, температурой обработки и исходной влажностью тканей, на основании чего по методу регрессионного анализа и строится предложенная математическая модель.

Предположим, что функционирование изучаемого реального объекта (обработка суровой хлопчатобумажной ткани в отделочном производстве) описывается набором переменных:

а)  $x^{(1)}, \dots, x^{(m)}$  – так называемые "входные" переменные, описывающие условия функционирования (в нашем случае концентрации составляющих красильного раствора);

б)  $y^{(1)}, \dots, y^{(s)}$  – выходные переменные, характеризующие поведение или результат функционирования (величины  $\operatorname{tg} \delta, \varepsilon$ );

в)  $v^{(1)}, \dots, v^{(s)}$  – латентные случайные компоненты, отражающие влияние на выходные переменные неучтенных факторов, а также случайные ошибки в измерении анализируемых показателей (величины, учитываемые математической моделью, но не зависящие от произведенных нами измерений).

Исходя из вышесказанного общая задача анализа зависимостей может быть сформулирована следующим образом:

по результатам  $n$  измерений

$$\{(x_i^{(1)}, \dots, x_i^{(m)}; y_i^{(1)}, \dots, y_i^{(s)})\}_{i=1, \dots, n}$$

исследуемых переменных построить такую функцию:

$$\hat{f}(x^{(1)}, \dots, x^{(m)}) = \begin{pmatrix} \hat{f}^{(1)}(x^{(1)}, \dots, x^{(m)}) \\ \dots \\ \hat{f}^{(s)}(x^{(1)}, \dots, x^{(m)}) \end{pmatrix},$$

которая позволила бы восстанавливать значения результирующих (прогнозируемых) переменных:

$$\bar{y} = \text{col}(y^{(1)}, \dots, y^{(s)})$$

по заданным значениям объясняющих переменных  $\bar{x} = (x^{(1)}, \dots, x^{(m)})$ .

Сформулированная таким образом задача может быть решена методом корреляционно-регрессионного анализа [3] в зависимости от природы результирующих и объясняющих переменных, так как все выводы в данном исследовании строятся на основании имеющихся исходных статистических данных.

При изучении изменения какого-либо показателя (в частности,  $\text{tg}\delta$ ) необходимо рассматривать его во взаимосвязи не с одним, а с целым рядом влияющих на него факторов. Модель, отражающая взаимосвязь одной переменной с несколькими, влияющими на нее, является множественной регрессией и может быть представлена в виде:

$$y = f(x_1, x_2, K, x_m; v). \quad (2)$$

Здесь  $y$  – зависимая (результатирующая) переменная,  $x_1, x_2, \dots, x_m$  – независимые, объясняющие переменные,  $v$  – случайная составляющая.

$$\begin{aligned} \text{tg}\delta = & -8,72 \cdot 10^{-2} - 5,71 \cdot 10^{-6} x_1 + 1,11 x_2 + 2,75 \cdot 10^{-5} x_3 + 5,02 \cdot 10^{-10} x_4 - \\ & - 2,42 \cdot 10^5 x_5 + 4,43 \cdot 10^{-8} x_6 - 2,84 \cdot 10^{-4} x_7 - 1,07 \cdot 10^{-2} x_8 + 2,78 \cdot 10^{-2} x_9. \end{aligned} \quad (3)$$

Качество построенного уравнения может быть измерено на основе ряда показателей. Основным показателем оценки качества регрессии, имеющим универсальный характер, является так называемый коэффициент детерминации  $R^2$  [3]. На

Основной задачей регрессионного анализа является выявление регулярной составляющей  $\hat{f}(x_1, x_2, \dots, x_m)$ , максимально соответствующей имеющемуся массиву статистических данных. При этом массив статистических данных представляет собой ряд статистических наблюдений переменных, присутствующих в модели, которые можно записать с помощью табл. 1.

Т а б л и ц а 1

№ наблюдений	y	x <sub>1</sub>	x <sub>2</sub>	...	x <sub>m</sub>
1	y <sub>1</sub>	x <sub>11</sub>	x <sub>21</sub>	...	x <sub>m1</sub>
2	y <sub>2</sub>	x <sub>12</sub>	x <sub>22</sub>	...	x <sub>m2</sub>
...	...	...	...	...	...
n	y <sub>n</sub>	x <sub>1n</sub>	x <sub>2n</sub>	...	x <sub>mn</sub>

В нашем случае в качестве зависимой (результатирующей) переменной  $y$  выступает  $\text{tg}\delta$ , а в качестве объясняющих  $x_1, \dots, x_9$ :  $x_1$  – поверхностная плотность ткани, г/м<sup>3</sup>;  $x_2$  – толщина ткани, м;  $x_3$  – влажность ткани, %;  $x_4$  – частота внешнего электромагнитного поля, Гц;  $x_5$  – диэлектрическая проницаемость материала;  $x_6$  – напряженность внешнего электромагнитного поля, В/м;  $x_7$  – концентрация мочевины в пропиловом растворе, г/л;  $x_8$  – концентрация щелочного агента (соды), г/л;  $x_9$  – концентрация красителя в растворе, г/л.

На первой стадии предполагалось, что воздействия перечисленных факторов носят линейный характер.

Построение регрессионного уравнения выполнялось с помощью пакета "Анализ данных", входящего в MS Excel 2003. В результате было получено следующее выражение для  $\text{tg}\delta$ :

практике при значительном числе наблюдений, чем ближе значение  $R^2$  к единице, тем качественнее построенное уравнение регрессии и тем сильнее влияние переменных  $x_1, x_2, \dots, x_m$  на переменную  $y$ . В нашем случае число наблюдений ( $k_2 = 164$ ) и

число объясняющих переменных ( $k_1 = 9$ ) на порядок отличаются друг от друга, поэтому коэффициент детерминации  $R^2=0,978$  говорит о высоком качестве полученной математической модели.

Статистическая значимость регрессии в целом может быть оценена с помощью F-критерия Фишера. Согласно известной методике [4] рассчитывается наблюдаемое значение F-статистики, в нашем случае  $F_{\text{набл}} = 821,02$ . Сравнивая полученное значение с критическим значением  $F_{\text{табл}} = 3,301$ , соответствующим принятому уровню значимости  $\alpha = 0,001$  со степенями свободы  $k_1=9$  и  $k_2=164$ , делаем вывод о значимости регрессии в целом.

Наконец, еще одним показателем общего качества построенной модели явля-

ется статистическая значимость коэффициентов, устанавливаемая на основе критерия Стьюдента. Эмпирические значения соответствующих t-статистик были рассчитаны на основе выходной информации, полученной при использовании пакета "Анализ данных". При сравнении этих значений с критическим значением при том же уровне значимости  $\alpha = 0,001$  была установлена значимость параметров при переменных  $x_4$ ,  $x_7$ ,  $x_8$ , и  $x_9$ . Таким образом, были выявлены факторы, в наибольшей степени влияющие на исследуемый результирующий показатель. Поэтому полученное нами уравнение (3) не вполне адекватно отражает исследуемую зависимость. После корректировки выражение для  $\text{tg}\delta$  приобретает следующий вид:

$$\text{tg}\delta = 1,11 \cdot 10^{-2} + 2,48 \cdot 10^{-10} x_4 - 2,84 \cdot 10^{-4} x_7 - 1,29 \cdot 10^{-2} x_8 + 3,09 \cdot 10^{-2} x_9. \quad (4)$$

Коэффициент детерминации немного уменьшается:  $R^2 = 0,960$ , однако по-прежнему свидетельствует о высоком статистическом качестве модели.

## ВЫВОДЫ

1. Выявлено, что вариация  $u$  (величина  $\text{tg}\delta$ ) на 97,8% определяется совокупным воздействием факторов  $x_1, \dots, x_9$  (составом и концентрацией компонентов технологических растворов).

2. Оценка статистической значимости регрессии с помощью F-критерия Фишера показала значимость регрессии в целом.

3. Предложенная математическая модель подтвердила полученные экспериментальным путем данные о влиянии частоты внешнего электромагнитного поля, а также концентрации мочевины, щелочного

агента и красителя на эффективность нагрева целлюлозного материала в поле ТВЧ.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Глуханов Н.П., Федоров И.Г. Высоочастотный нагрев диэлектрических материалов в машиностроении. – Л.: Машиностроение, 1983. С.160
2. Кулыгин Ю.Н., Циркина О.Г., Никифоров А.Л., Мельников Б.Н. // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2007, № 2. С.57...60.
3. Кендалл М.Дж., Стьюарт А. Статистические выводы и связи. – М.: Наука, 1973.
4. Дрейпер Н., Смит Г. Прикладной регрессионный анализ: в 2-х книгах. – М.: Финансы и статистика, 1986.

Рекомендована кафедрой химической технологии волокнистых материалов ИГХТУ. Поступила 26.09.10.