

УДК 678.027:330.43

**РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ
ДЛЯ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ НАГРЕВА
ТЕКСТИЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ
В ПОЛЕ ТОКОВ ВЫСОКОЙ ЧАСТОТЫ***

**DEVELOPMENT OF MATHEMATICAL MODELS
FOR THE ASSESSMENT EFFICIENCY
OF TEXTILE MATERIALS HEATING
IN THE HIGH FREQUENCY FIELD**

О.Г. ЦИРКИНА, А.Л. НИКИФОРОВ
O.G. TSIRKINA, A.L. NIKIFOROV

(Ивановский государственный политехнический университет,
Ивановский государственный химико-технологический университет)
(Ivanovo State Polytechnical University,
Ivanovo State University of Chemistry and Technology)
E-mail: ogtsirkina@mail.ru; anikiforoff@list.ru

Выработан общий подход к оптимизации технологических режимов высокочастотной обработки текстильных материалов в отделочном производстве. Предложен алгоритм расчета эффективности теплового нагрева текстильного материала в поле токов высокой частоты (ТВЧ). С помощью множественного корреляционного анализа получены и проанализированы математические зависимости диэлектрических показателей тканей от их геометрических характеристик, составов и концентраций компонентов различных технологических растворов.

The calculation algorithm of textile material's thermal heating efficiency in the high frequency field is offered. For optimization of technological processing of textile materials finishing the multiple correlation analysis is used. Mathematical dependences of dielectric indicators of fabrics on their geometrical characteristics, structures and concentration of components of various technological solutions are received and analysed.

Ключевые слова: отделочное производство, поле токов высокой частоты, диэлектрические свойства, текстильный материал, множественный корреляционный анализ.

Keywords: finishing production, high frequency field, dielectric properties, textile material, multiple correlation analysis.

* Работа выполнена на базе НИИ термодинамики и кинетики химических процессов.

В ранее проведенных исследованиях [1...3] изучены и проанализированы диэлектрические свойства целлюлозосодержащих тканей практически на всех технологических переходах отделочного производства.

Представленная работа обобщает полученные данные математического моделирования зависимости величины тангенса угла диэлектрических потерь ($\text{tg}\delta$) от различных внешних факторов и подбору на этой основе оптимальных режимов их обработки в поле ТВЧ в процессах отделоч-

ного производства. Математическая обработка данных проводилась методом множественного корреляционного анализа, предусматривающего построение моделей множественной регрессии [4], [2]. Практический интерес представляет целостный анализ полученного массива данных, пример которого приведен в табл.1, и создание алгоритма, позволяющего определять величину $\text{tg}\delta$ не экспериментальным, а расчетным путем, исходя из рецептуры технологических растворов.

Т а б л и ц а 1

№	$\text{tg}\delta$	Плотность ткани, г/м ²	Толщина ткани, м	Влажность ткани, %	Частота ЭМП f, Гц	Диэл. проницаемость ϵ	Напряженность E, В/м	Конц. соли, г/л	Конц. мочевины, г/л	Конц. соды, г/л	Конц. красителя, г/л	t°C обработки
	y	x ₁	x ₂	x ₃	x ₄	x ₅	x ₆	x ₇	x ₈	x ₉	x ₁₀	x ₁₁
1	0,018	210	0,00062	70	40680000	38	200000	0	0	0	0	20
...	0,115	260	0,00064	80	27120000	78	200000	0	20	15	10	30
...	0,189	410	0,00075	90	40680000	80	200000	0	100	20	40	40
...	0,120	101	0,00024	90	40680000	50	150000	0	50	25	15	50
...	0,390	410	0,00075	80	40680000	80	200000	50	20	15	10	90
...	0,15	210	0,00062	80	27120000	65	200000	10	50	10	10	20
506	0,125	260	0,00064	90	40680000	62	200000	0	100	15	10	20

На рис.1 приведен алгоритм расчета эффективности теплового нагрева текстильного материала в поле ТВЧ, где C_0 и Q_0 – емкость и добротность контура на данной частоте без измерительной ячейки; C_i и Q_i – емкость и добротность контура с измерительной ячейкой, значения которых необходимы для расчета величин $\text{tg}\delta$.

Поскольку при реализации процессов отделочного производства используются различные по химическому составу растворы и композиции, целесообразно вывести индивидуальные математические зависимости изменения $\text{tg}\delta$ материалов для каждого этапа. Качество полученных уравнений оценивали в соответствии с методом статистического анализа [4], который подтверждает их высокую точность.

Пригодность математических моделей к использованию на практике оценена также экспериментальным путем, исходя из качественных характеристик тканей, полученных при проведении соответствующих процессов отделочного производства.

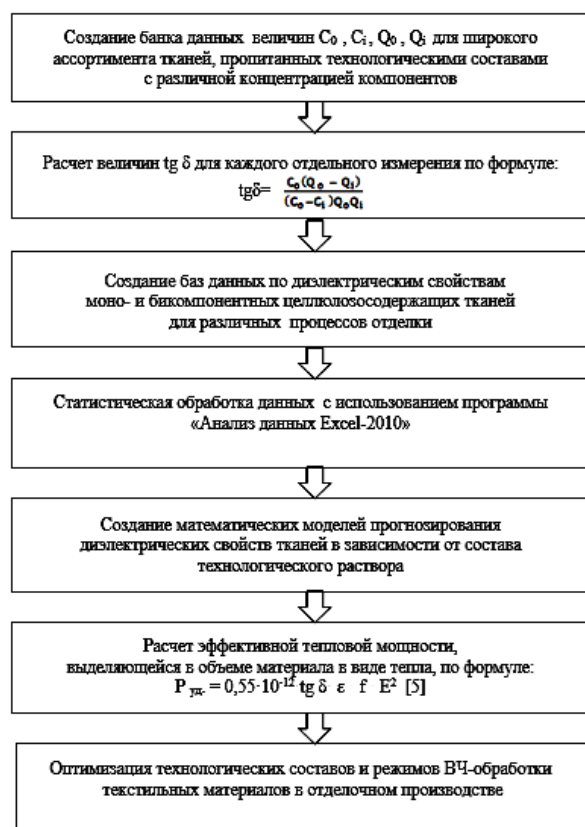


Рис. 1

При этом режимы обработок выбирались с учетом рассчитанных оптимальных значений $\text{tg}\delta$.

В ходе анализа процессов ВЧ-сушки текстильных материалов в качестве основных переменных, влияющих на величину $\text{tg}\delta$, приняты: x_1 – поверхностная плотность ткани, г/м^2 ; x_2 – толщина ткани, м; x_3

$$\text{Уравнение 1: } \text{tg}\delta_1 = \exp(-40,038)x_1^{0,4895} x_3^{0,0091} x_4^{0,2665} x_5^{0,6409} x_6^{2,0486}$$

характеризует "холостые" опыты, когда концентрации основных компонентов технологических растворов имеют нулевые значения, поэтому данную модель целесообразно использовать при подборе энергетически выгодного режима ВЧ-сушки целлюлозосодержащих тканей, обладающих

$$\text{Уравнение 2: } \text{tg}\delta_2 = \exp(-17,509)x_3^{(-0,823)} x_4^{0,359} x_5^{2,51}$$

получено для тканей с высокой поверхностной плотностью и толщиной при нулевых концентрациях компонентов технологических растворов. Данная зависимость лучше всего отражает процессы сушки "тяжелых" тканей, имеющих большую исходную влажность (80...120%).

$$\text{Уравнение 3: } \text{tg}\delta_3 = -0,25 + 1,45 \cdot 10^{-9}x_1 + 1,3 \cdot 10^{-3}x_2 - 2,2 \cdot 10^{-4}x_3 + 516,1x_4$$

можно использовать для оценки величины $\text{tg}\delta$ в процессе мерсеризации на разрешенных к промышленному применению частотах (27,12 и 40, 68 МГц) при концентрациях едкого натра, не превышающих 200 г/л. Оценка сорбционной способности и изменения структуры целлюлозного волокна до и после проведения процесса мерсеризации в различных условиях показала, что при ВЧ-мерсеризации содержание модификации целлюлозы-II в кристаллитных областях соответствует традици-

$$\text{Уравнение 4: } \text{tg}\delta = -0,25 + 8,6 \cdot 10^{-9}x_1 - 0,11x_3 + 3,4 \cdot 10^{-2}x_4 + 3,2 \cdot 10^{-4}x_5 + 217,9x_6.$$

Предложенная зависимость может использоваться при расчете диэлектрических характеристик на промышленно разрешенных частотах для процесса беления.

– влажность ткани, %; x_4 – частота внешнего электромагнитного поля, Гц; x_5 – диэлектрическая проницаемость материала; x_6 – напряженность внешнего электромагнитного поля, В/м.

В результате получены следующие уравнения.

различными геометрическими характеристиками, на любых технологических переходах отделочного производства. Кинетические кривые ВЧ-сушки и взаимосвязь величины $\text{tg}\delta$ с различными параметрами ВЧ-обработки приведены в [1].

Для процесса мерсеризации хлопчатобумажных и хлопкополиэфирных тканей переменными, влияющими на величину диэлектрических потерь, являются: x_1 – частота внешнего электромагнитного поля, Гц; x_2 – концентрация едкого натра, г/л; x_3 – поверхностная плотность ткани, г/м^2 ; x_4 – толщина ткани, м.

онной или на 3...5% превышает аналогичный показатель, полученный по ходовой технологии.

Математическая модель процесса пероксидного беления построена с учетом основных компонентов белящего раствора, где x_1 – частота внешнего электромагнитного поля, Гц; x_2 – концентрация пероксида водорода (100%), г/л; x_3 – концентрация щелочи, г/л; x_4 – концентрация силиката натрия, г/л; x_5 – поверхностная плотность ткани, г/м^2 ; x_6 – толщина ткани, м.

При проверке статистической значимости параметров полученной модели была установлена незначимость коэффициента при переменной x_2 , поэтому соответству-

ющий показатель был исключен из уравнения множественной регрессии. При реализации процесса беления на практике показала, что при концентрации H_2O_2 4...5 г/л и длительности ВЧ-нагрева 12...16 с отбеленные ткани имеют показатель степени белизны, равный 76...81%, в зависимости от вида материала.

В отделочном производстве наиболее сложными и многообразными по составу являются красильные растворы и печатные композиции, в связи с чем наибольшее количество статистических данных было наработано для процессов колорирования текстильных материалов. Поэтому выведение математических зависимостей потребовало несколько иного подхода при систематизации данных. Математическая обработка проводилась последовательно в 2 этапа: кластерный анализ всего массива данных [4] и построение математической модели внутри каждого кластера методом множественного регрессионного анализа [4], [2].

Кластерный анализ позволяет сгруппировать множество факторов в отдельные

группы (кластеры) таким образом, чтобы параметры обработки, входящие в одну группу, были более однородными и сходными по сравнению с величинами, входящими в другие группы. Основными переменными для проводимой в данном случае математической обработки являются: x_1 – поверхностная плотность ткани, г/м²; 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 нейтрального электролита, г/л; x_8 – концентрация мочевины в пропиловом растворе, г/л; x_9 – концентрация щелочного агента (соды), г/л; x_{10} – концентрация красителя в растворе, г/л; x_{11} – температура обрабатываемого материала, °С.

Результатом проведенного математического анализа явилось разбиение массива данных на отдельные кластеры, получение соответствующих математических моделей и рекомендации по их практическому использованию.

$$\text{Уравнение 5: } \text{tg}\delta_5 = \exp(-11,428 - 0,01489x_3 + 0,261x_5 + 0,0208x_7 + 0,0159x_8 + 0,086x_9 + 0,221x_{10})$$

получено для тканей с невысокой поверхностной плотностью и толщиной. Рекомендуется для выбора режима ВЧ-обработки "легких" тканей на частоте 40,68 МГц при реализации процессов колорирования, так как основное влияние на эффективность нагрева материала будет

оказывать состав и концентрация компонентов технологической композиции. При этом данное уравнение может быть использовано для всех классов красителей, составы для колорирования которыми содержат щелочной агент, нейтральный электролит и мочевины.

$$\text{Уравнение 6: } \text{tg}\delta_6 = 0,275 + 0,001x_1 - 1051,73x_2 + 0,043 \ln x_3 + 3,664 \cdot 10^{-9}x_4 - 7,732 \cdot 10^{-6}x_8 - 0,002x_9 + 0,00006x_7$$

содержит наибольшее количество переменных при постоянстве концентрации красителя и температуры, поэтому его наиболее целесообразно применять при

выборе условий колорирования целлюлозосодержащих тканей различной поверхностной плотности и толщины на любых промышленно разрешенных частотах.

$$\text{Уравнение 7: } \text{tg}\delta_7 = -0,034 + 0,0008x_1 + 80,255x_2 + 0,001x_5 + 0,001x_{11}$$

характеризует отсутствие в растворе нейтрального электролита, наличие мочевины 50 г/л, соды 20 г/л и красителя 25 г/л. Модель пригодна при подборе условий

крашения и сушки тканей различной поверхностной плотности и толщины на промышленно разрешенной частоте 40,68 МГц.

Полученные при ВЧ-колорировании и традиционных способах значения интенсивности окраски гладкокрашенных и напечатанных тканей оценивали по функции k/s . Отмечено, что, при прочих равных условиях, обработка тканей в поле ТВЧ приводит к увеличению указанной характеристики в среднем на 15...20%, по сравнению с фиксацией в паровой среде; и сопоставимы со значениями, полученными при фиксации в среде горячего воздуха. При этом устойчивость окрасок к мокрым обработкам соответствует показателям, свойственным традиционным способам

$$\text{Уравнение 8: } \text{tg}\delta_8 = -0,194 + 3,19 \cdot 10^{-9} x_1 + 7,58 \cdot 10^{-4} x_2 - 8,45 \cdot 10^{-2} x_3 + 8,75 \cdot 10^{-4} x_4 - 3,58 \cdot 10^{-3} x_5 - 2,5 \cdot 10^{-2} x_6 - 2,48 \cdot 10^{-3} x_7$$

учитывает влияние всех обозначенных переменных, поэтому является универсальным при оценке величины $\text{tg}\delta$ в процессах малосминаемой отделки целлюлозосодержащих тканей. Оценка показателей готовой ткани выявила, что обработка в поле ТВЧ приводит к увеличению длины поперечных "сшивков" между макромолекулами целлюлозы и уменьшению их числа. Это обуславливает возможность перераспределения нагрузки между отдельными структурными элементами волокна при разрыве и снижение потерь прочности тканей после прохождения малосминаемой отделки. При этом потеря прочности ткани после ВЧ-обработки составляет ~ 25%, против ~ 30% при конвективном нагреве, а показатель несминаемости в обоих случаях соответствует 205...210°.

Анализ полученных математических и экспериментальных данных показал, что во всех рассмотренных случаях первостепенное влияние на величину $\text{tg}\delta$ оказывают геометрические характеристики обрабатываемого материала, концентрация наиболее сильного электролита, влагосодержание ткани и частота ВЧ-поля. Качественные показатели текстильных материалов, обработанных в поле ТВЧ, доказывают возможность использования предложенных математических уравнений и прогнозирование конечного результата химико-

подвода тепла (для активных красителей: 5/4/4 – к стирке, 5/4 – к мокрому трению).

Множественный регрессионный анализ был также применен при статистической обработке данных, полученных для процессов малосминаемой отделки, где в качестве объясняющих переменных выступали: x_1 – частота внешнего электромагнитного поля, Гц; x_2 – поверхностная плотность ткани, г/м²; x_3 – толщина ткани, м; x_4 – концентрация предконденсата терморезактивной смолы (ПТРС), г/л; x_5 и x_6 – концентрации катализаторов, соответственно MgCl_2 и CH_3COOH (30%), г/л; x_7 – концентрация смягчителя, г/л.

текстильного процесса, исходя из величины фактора диэлектрических потерь материала и энергетических характеристик внешнего электромагнитного поля.

ВЫВОДЫ

1. Выработан общий подход к оптимизации технологических режимов высокочастотной обработки текстильных материалов в отделочном производстве.

2. Предложены математические уравнения, позволяющие расчетным путем определить величину диэлектрических потерь целлюлозосодержащих тканей, и выданы рекомендации по их использованию при выборе наиболее энергетически выгодных условий обработки материалов в поле ТВЧ.

3. Экспериментально доказана пригодность полученных уравнений для прогнозирования эффективности ВЧ-обработки тканей в процессах их отделки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Циркина О.Г., Никифоров А.Л. Комплексная оценка диэлектрических характеристик текстильных материалов с целью определения энергетически выгодного режима их обработки // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2008, №6. С. 85...88.

2. Циркина О.Г., Ермолаев М.Б. Прогнозирование воздействия поля ТВЧ на эффективность про-

текания химико-текстильных процессов отделочного производства // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2010, №8. С. 51...54.

3. Циркина О.Г., Ермолаев М.Б., Никифоров А.Л. Кластерный анализ показателей диэлектрических свойств текстильных материалов при изменении условий их обработки в отделочном производстве // Изв. вузов. Химия и химическая технология. – 2013, №11. С. 79...81.

4. Дрейпер Н., Смит Г. Прикладной регрессионный анализ. – В 2-х кн. – М.: Финансы и статистика, 2008.

5. Лыков А.В. Тепло- и массообмен в процессах сушки. – М.: Государственное энергетическое издательство, 1956.

REFERENCES

1. Cirkina O.G., Nikiforov A.L. Kompleksnaja ocenka dijelektricheskih harakteristik tekstil'nyh materialov s cel'ju opredelenija jenergeticheski vygodnogo rezhima ih obrabotki // Izv. vuzov.

Tehnologija tekstil'noj promyshlennosti. – 2008, №6. S. 85...88.

2. Cirkina O.G., Ermolaev M.B. Prognozirovanie vozdeystvija polja TVCh na jeffektivnost' protekanija himiko-tekstil'nyh processov otdelochnogo proizvodstva // Izv. vuzov. Tehnologija tekstil'noj promyshlennosti. – 2010, №8. S. 51...54.

3. Cirkina O.G., Ermolaev M.B., Nikiforov A.L. Klasternyj analiz pokazatelej dijelektricheskih svojstv tekstil'nyh materialov pri izmenenii uslovij ih obrabotki v otdelochnom proizvodstve // Izv. vuzov. Himija i himicheskaja tehnologija. – 2013, №11. S. 79...81.

4. Drejper N., Smit G. Prikladnoj regressionnyj analiz. – V 2-h kn. – M.: Finansy i statistika, 2008.

5. Lykov A.V. Teplo- i massoobmen v processah sushki. – M.: Gosudarstvennoe jenergeticheskoe izdatel'stvo, 1956.

Рекомендована кафедрой химической технологии волокнистых материалов ИГХТУ. Поступила 30.04.15.