

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОГО НАГРЕВА ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ В ВЧ/СВЧ-ПОЛЯХ

О.Г. ЦИРКИНА, А.Л. НИКИФОРОВ, М.В. УДАЛОВ

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

Получены экспериментальные зависимости температуры обрабатываемого материала и мощности, выделяющейся в единице объема, от времени экспозиции в ВЧ-поле. На основании экспериментально полученных температур рассчитана полезная мощность и мощность тепловых потерь, что позволяет оценить степень согласования системы генератор – нагрузка и моделировать процессы диэлектрического нагрева полимерных материалов. Показано, что различия между расчетными и измеренными значениями мощности являются незначительными, что позволяет судить о соответствии модели реально протекающим в полимерном материале процессам.

The experimental dependences of the temperature of the processed material and the power, allocated for the unit of volume, on the exposition time in the high frequency field. The efficient power and the power of the heating losses are calculated on the base of the experimentally obtained temperatures, which allow the estimation of the degree of the compatibility of the system “generator – load” and the modeling of the processes of the dielectric heating of the polymeric materials.

Ключевые слова: композиционные пленочные материалы, ВЧ-нагрев, изменение температуры, продолжительность нагрева, время экспозиции, полезная мощность, тепловые потери.

Известно, что в процессе диэлектрического нагрева электрофизические свойства обрабатываемых материалов нестабильны и постоянно изменяются [1]. Критические точки в энергетике процесса тепловыделения связаны с фазовыми переходами, происходящими в объекте микроволновой обработки. В случае, когда мы имеем дело с текстильными материалами, пропитанными различными технологическими растворами, эта картина представляется чрез-

вычайно сложной. Для создания наиболее эффективных технологий облагораживания тканей крайне важно знать, каким образом изменяется энергетика рассматриваемой системы и согласована ли она с источником энергии электромагнитных колебаний [2]. С этой целью разработан ряд методик, связанных с точным определением температуры, влажности и электрофизических характеристик обрабатываемого материала, а

также рассчитаны дискретные энергетические показатели мощностей.

Процесс изучался на композиционных пленочных материалах, которые обладают более стабильными свойствами, чем тканые материалы, менее гигроскопичны и, вместе с тем, по своим диэлектрическим свойствам – фактору диэлектрических потерь ($K = \epsilon \cdot \operatorname{tg} \delta$) – близки к тканям в сухом состоянии при нормальных условиях, что и было подтверждено экспериментальным путем. При этом численное значение фактора потерь как для выбранных пленок, так и для тканых материалов из натуральных и синтетических волокон составляла примерно $5 \dots 7 \cdot 10^{-2}$.

На практике нами были изучены случаи, связанные с изменением рабочих площадей электродов, что позволило обосновать выбор критерия подобия при проведении процессов ТВЧ-электротермии.

Обычно нагрев до рабочих температур в поле ТВЧ происходит за несколько секунд, что затрудняет измерения. Нам при-

шлось искусственно удлинять это время до нескольких минут путем изменения степени согласования системы генератор-нагрузка. Данные получены при моделировании процессов ВЧ-нагрева различных полимеров на установке для обработки листовых полимерных материалов, которая состоит из высокочастотного генератора с выходной мощностью 40 МГц и плоского конденсатора. Время обработки регулировалось вручную.

Экспериментальные результаты представляют собой зависимости температуры (Т) и мощности (Р) от времени. Практически все полученные кривые, независимо от типа нагреваемого материала, его толщины и площади электрода, аналогичны друг другу и различаются лишь численными значениями. На рис. 1-а, б приведены зависимости температуры (рис.1-а: 1 – на оси пакета, 2 – на поверхности пакета) и мощности (рис.1-б) от времени экспозиции образцов, полученные при моделировании процессов ВЧ-нагрева полимерных материалов.

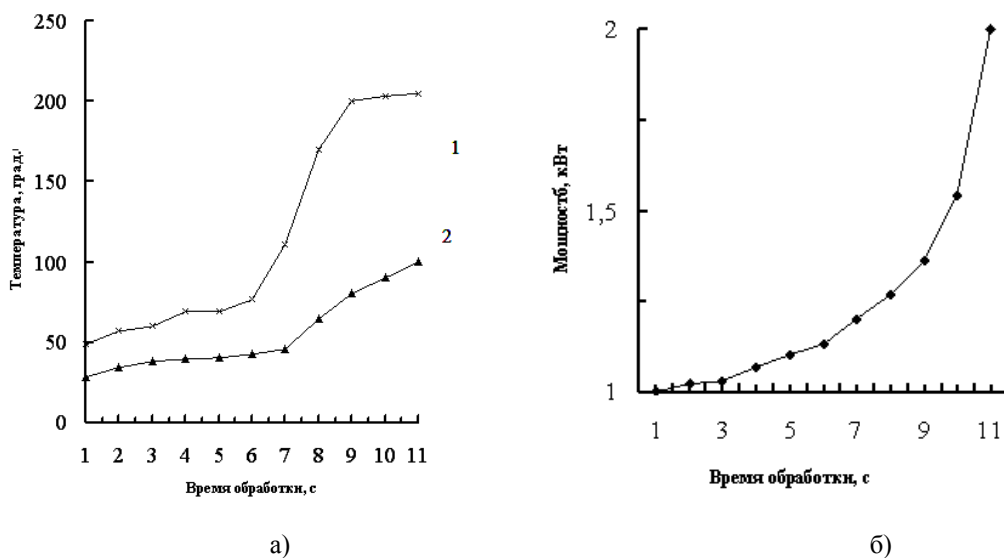


Рис. 1

При проведении эксперимента электроды не подогревались, теплоизолирующие прокладки не применялись, что в большей степени соответствует экономически выгодному процессу, так как исключает дополнительные затраты на охлаждение поверхности материала. При заданных условиях имеет место значительное рас-

хождение температуры на оси и поверхности пакета, что абсолютно недопустимо при проведении большинства химикотекстильных процессов. Для выравнивания температуры мы применяли прокладки из фторопласта-4 толщиной 0,01...0,03 мм, при этом разница температур на оси и поверхности образца, помещенного в ВЧ-

поле, составляла 3...5°C, что удовлетворяет требованиям, предъявляемым к текстильным технологическим процессам.

На рис.2 представлены зависимости изменения ожидаемой (кривая 1) и реальной (кривая 2) температур от продолжительности нагрева полимерного материала (ПВХ-7) в ВЧ- поле. Полученные зависимости температуры от времени отличаются от ожидаемой при постоянстве мощности.

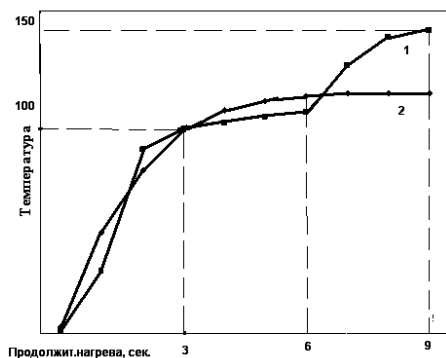


Рис. 2

Реальное изменение мощности в ходе процесса может только частично объяснить такой ход полученных температурных зависимостей, так как имелась возможность контролировать лишь уровень общей мощности (P), подводимой к аппликатору. Эта мощность расходуется на нагрев материала (полезная мощность – P_П) и на потери за счет теплообмена с окружающей средой (тепловые потери – P_{ТП})

Таким образом:

$$P = P_{П} + P_{ТП}.$$

Соотношение, позволяющее оценить вклад каждой составляющей в общую мощность P, можно вывести, решая уравнение непрерывности теплового потока, которое справедливо для любого бесконечно малого элемента объема, в результате чего получаем:

$$P = \frac{C_p \Delta T}{t} + 2\lambda \frac{\Delta T_0}{\delta^2},$$

где C – теплоемкость нагреваемого материала; ρ – плотность нагреваемого материала; λ – коэффициент теплопроводности материала; δ – толщина пакета; ΔT – разница между начальной и конечной температурами на временном участке продолжительностью t; ΔT₀ – разница между температурами на оси и стенке пакета в фиксированный момент времени [2].

Это выражение справедливо для тонкой пленки большой площади, которая охлаждается за счет теплопроводности.

Если профили температуры по толщине пленки считать заданными, то, зная зависимость изменения температуры от времени (рис.3), можно получить временную зависимость мощности источников.

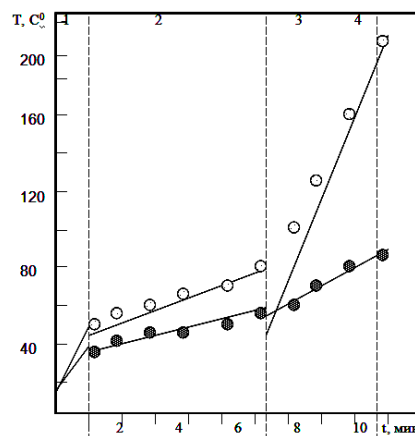


Рис. 3

На рис. 3 кривая, отображающая зависимость температуры на оси нагреваемого в ВЧ-поле диэлектрического материала от времени, имеет S-образный ход и может быть условно представлена в виде четырех прямолинейных участков. Такое изменение температуры можно объяснить лишь процессами, протекающими в диэлектрике при нагревании, которые в сильной мере сказываются на степени согласования системы генератор – нагрузка и на соотношении мощностей, затрачиваемых на нагрев материала и тепловые потери. S-образный ход кривой можно объяснить тем фактом, что до температуры 100°C полимер находится в стеклообразном состоянии, которое характеризуется лишь незначительными колебаниями небольших структурных единиц макромолекул, а затем полимер

переходит в высокоэластическое состояние, что сопровождается проявлением вращательных движений отдельных участков цепи (сегментов). Следовательно, полимер приобретает значительную реакционную способность.

На основании экспериментально полученных температур рассчитывались полезная мощность и мощность тепловых потерь. Ниже приведен пример такого расчета для листового диэлектрика, имеющего следующие характеристики: $C = 2,09 \cdot 10^3$ (Дж/кг·°С); $\rho = 1,19$ г/см³ = $=1,19 \cdot 10^3$ кг/м³; $\delta = 10^{-3}$ м; $\lambda = 0,169$ Вт/м·°С.

На участке I имеем: $P_{п1} = 1,7 \cdot 10^6$ (Вт/м³); $P_{тп1} = 4,7 \cdot 10^6$ (Вт/м³);

для участка II: $P_{п2} = 1,7 \cdot 10^6$ (Вт/м³); $P_{тп2} = 7,4 \cdot 10^6$ (Вт/м³);

для участка III: $P_{п3} = 1,3 \cdot 10^6$ (Вт/м³); $P_{тп3} = 39,9 \cdot 10^6$ (Вт/м³);

для участка IV: $P_{п4} = 0,21 \cdot 10^6$ (Вт/м³); $P_{тп4} = 39,5 \cdot 10^6$ (Вт/м³).

Общий показатель мощности складывается из мощностей, пошедших на нагрев материала и на тепловые потери. Таким образом, были получены значения удельной мощности и мощностей источника, соответственно:

$$\begin{aligned} \Sigma P_1 &= 6,4 \cdot 10^6 \text{ (Вт/м}^3\text{)}; P_1 = 307,2 \text{ Вт;} \\ \Sigma P_2 &= 7,6 \cdot 10^6 \text{ (Вт/м}^3\text{)}; P_2 = 364,8 \text{ Вт;} \\ \Sigma P_3 &= 41,2 \cdot 10^6 \text{ (Вт/м}^3\text{)}; P_3 = 1977,6 \text{ Вт;} \\ \Sigma P_4 &= 39,7 \cdot 10^6 \text{ (Вт/м}^3\text{)}; P_4 = 1905,6 \text{ Вт.} \end{aligned}$$

Сравнивая полученные таким образом величины мощности с измеренными на практике, можно отметить различие в результатах: расчетная мощность всегда меньше измеренной. Это связано, по-видимому, с тем, что часть мощности, подводимой к аппликатору, теряется в паразитных емкостях в виде излучения в приэлектродном пространстве.

На основании экспериментальных данных был построен график зависимости поглощаемой материалом мощности от температуры для различных степеней согласования в процессах термостабилизации (рис. 4).

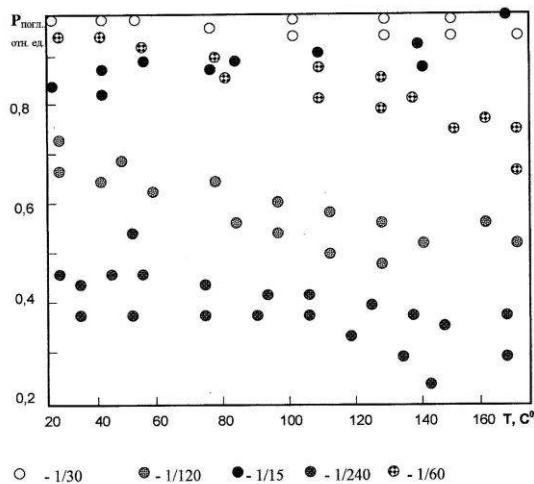


Рис. 4

Полученные данные отражают соотношение между расчетными и экспериментальными значениями для различных величин d/s , где d – толщина обрабатываемого материала, s – его площадь, которые наглядно доказывают достаточно высокое соответствие модели реальным результатам.

ВЫВОДЫ

1. Получены экспериментальные зависимости температуры обрабатываемого материала и мощности, выделяющейся в единице объема от времени экспозиции в ВЧ-поле.

2. На основании экспериментально полученных температур рассчитывались полезная мощность и мощность тепловых потерь, что позволяет оценивать степень согласования системы генератор – нагрузка и моделировать процессы диэлектрического нагрева полимерных материалов.

3. Показано, что различия между расчетными и измеренными значениями мощности являются незначительными, что позволяет судить о соответствии модели реально протекающим в полимерном материале процессам.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Лыков А.В.* Тепло- и массообмен в процессах сушки. – М.: Государственное энергетическое издательство. – 1956. С.464

2. *Кулыгин Ю.Н., Циркина О.Г., Никифоров А.Л., Мельников Б.Н.* // Изв. вузов. Технология

текстильной промышленности. – 2007, № 2. С.57...60.

Рекомендована кафедрой химической технологии волокнистых материалов ИГХТУ. Поступила 02.12.09.
