

**ПОЖАРНАЯ ОПАСНОСТЬ
ПРОЦЕССОВ ВЧ/СВЧ-СУШКИ
ЦЕЛЛЮЛОЗОСОДЕРЖАЩИХ МАТЕРИАЛОВ**

**FIRE DANGER
OF HIGH FREQUENCY OR MICROWAVE DRYING
OF CELLULOSE MATERIALS**

А.Л. НИКИФОРОВ, О.Г. ЦИРКИНА, С.Н. УЛЬЕВА, С.Н. КАРАСЕВА

A.L. NIKIFOROV, O.G. TSIRKINA, S.N. ULEVA, S.N. KARASEVA

(Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России)

(Ivanovo Fire and Rescue Academy of the State Fire Service of EMERCOM of Russia)

E-mail: anikiforoff@list.ru; ogsirkina@mail.ru; jivotyagina@mail.ru

Предложена математическая модель, позволяющая оценить скорость нагрева и максимальную температуру обрабатываемого в ВЧ/СВЧ-поле полимера в зависимости от его теплофизических и диэлектрических свойств. Показано, что для обеспечения пожарной безопасности установок ВЧ/СВЧ-сушки древесины и текстильных изделий необходимо оценивать предельно допустимые режимы воздействия электромагнитных излучений на обрабатываемый материал, а для безопасной работы источников электромагнитного излучения – ВЧ/СВЧ-генераторов – следует контролировать согласованные системы "генератор – нагрузка" по возможному изменению показателя коэффициента стоячей волны.

A mathematical model is proposed that allows one to estimate the heating rate and the maximum temperature of the polymer being processed, depending on its thermophysical and dielectric properties. It is shown that to ensure fire safety of high frequency or microwave drying of wood and textiles, it is necessary to evaluate the maximum allowable modes of electromagnetic radiation effects on the material being processed, and for the safe operation of electromagnetic radiation sources — high frequency or microwave generators — the coordination of the "generator – load" on the possible change in the standing wave ratio.

Ключевые слова: ВЧ/СВЧ-сушка, пожарная опасность, диэлектрик, целлюлозосодержащий материал, математическая модель.

Keywords: high-frequency or microwave drying, fire danger, dielectric, cellulose-containing material, mathematical model.

Наиболее эффективным процессом нагрева диэлектриков, к которым относятся древесина, ее производные, текстильные материалы, большинство пластмасс и пластиков, является использование энергии токов высокой и сверхвысокой частот (ВЧ/СВЧ) [1]. Преимущества применения микроволновой энергии при сушке и тепловой обработке

полимерных материалов обусловлены самим принципом нагрева. При таком способе обработки тепловая энергия генерируется внутри самого обрабатываемого материала при условии, что данный материал имеет полярное строение или содержит влагу. Суть явления заключается в том, что под действием электрического поля ионы и

электроны в материале меняют направление движения синхронно с изменением знака заряда электродов, дипольные молекулы приобретают вращательное движение, а неполярные молекулы поляризуются в результате смещения их зарядов. Указанные процессы, сопровождаемые интенсивным межмолекулярным трением, приводят к выделению большого количества тепла [1], [2], которое способно разогреть обрабатываемый материал до температуры самовоспламенения. При этом следует отметить, что неполярные диэлектрики, которые сами не нагреваются в электромагнитных полях, все же могут нагреваться. Инициатором такого нагрева может выступать сорбированная влага, которая разогревает исходный диэлектрик до температур, близких к 100°C, что существенно сказывается и на его диэлектрических свойствах – фактор диэлектрических потерь возрастает. Также интенсивное колебание диполей воды существенно "расшатывает" молекулярную структуру самого диэлектрика, поляризуя ее. Далее процесс нагрева идет с нарастающей интенсивностью и может закончиться электрическим пробоем диэлектрика и его термодеструкцией с возможным возгоранием.

Среди преимуществ использования энергии электромагнитных колебаний для сушки и тепловой обработки диэлектриков, которые нашли свое воплощение в конструкциях ВЧ/СВЧ-сушильных камер, сварочных установок, СВЧ-печей и установок ВЧ-термообработки, основным является высокий КПД преобразования электрической энергии в тепловую (80...85%).

Таким образом, ВЧ/СВЧ-сушка полимерных, и, в частности, целлюлозосодержащих материалов (древесины, паковок тканей, бобин с нитями т.д.), как и любой процесс, связанный с нагревом материала до высоких температур, сопряжена с вероятностью возникновения пожара.

Анализ ситуаций, при которых возможно возгорание материала при реализации технологических процессов сушки в электромагнитных полях высокой и сверхвысокой частот, может быть описан в виде математической модели нагрева.

При разработке такой модели искусственно задаемся рядом допущений. Для нашего случая сделаем предположение, что обработке подвергается материал, имеющий одинаковое значение фактора диэлектрических потерь в любой точке его объема. То есть если обработке подвергают однородный по структуре и свойствам целлюлозный материал, то при помещении его в ВЧ/СВЧ-поле в каждой точке объема обрабатываемого диэлектрика генерируется одинаковое количество тепла, в соответствии с уравнением [3]:

$$P_{уд} = 0,55 \cdot 10^{-12} \varepsilon \operatorname{tg} \delta E^2 f, \quad (1)$$

где $P_{уд}$ – удельная мощность, генерируемая в материале в форме тепла, Вт/м³; ε – диэлектрическая проницаемость; $\operatorname{tg} \delta$ – тангенс угла диэлектрических потерь; E – напряженность электрического поля, В/м; f – частота поля, Гц.

Организация процесса удаления влаги из целлюлозосодержащих материалов, в частности из древесины, а также математическое описание механизма тепло- и массопереноса в материале является достаточно сложным, что обусловлено необходимостью учета изменения в процессе сушки физико-механических и теплофизических свойств (плотности, прочности, влажности, теплопроводности) древесины [1...3].

Тепловыделение в полимерном материале также можно описать классическим уравнением теплопроводности первого порядка:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = a^2 \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + f(x, t). \quad (2)$$

Попытаемся решить его применительно к нашему процессу, то есть подразумевая наличие внутреннего источника тепла, распределенного равномерно по объему материала. Зададимся начальными (а) и граничными (б) условиями:

$$a) u_{t=0}, \quad (3)$$

где u_0 – температура окружающей среды;

$$\begin{aligned} \text{б) } \frac{\partial u}{\partial x} - h(u - u_0)_{x=0} &= 0, \\ \frac{\partial u}{\partial x} - h(u - u_0)_{x=1} &= 0. \end{aligned} \quad (4)$$

где h – коэффициент теплопередачи.

Так как реальный ВЧ/СВЧ-нагрев сопряжен с неоднородностью граничных и начальных условий, то имеет смысл свести их к однородным подстановкой в уравнения (3) и (4) с целью некоторого упрощения задачи. Таким образом, начальное условие будет иметь при

$$\theta = 0 \text{ при } t = 0 \quad (5),$$

а граничное

$$\begin{aligned} \frac{\partial \theta}{\partial x} - h\theta_{x=0} &= 0, \\ \frac{\partial \theta}{\partial x} + h\theta_{x=1} &= 0. \end{aligned} \quad (6)$$

$$f(x, t) = \sum_{n=1}^{\infty} f_n(t) \left(\cos \frac{\mu_n x}{\ell} + \frac{h\ell}{\mu_n} \sin \frac{\mu_n x}{\ell} \right) = \sum_{n=1}^{\infty} f_n(t) X_n(x). \quad (9)$$

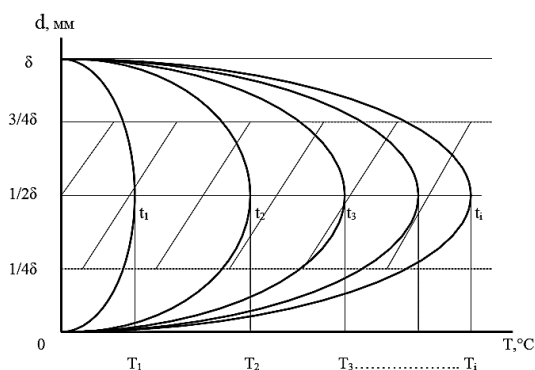


Рис. 1

В работе [4] с использованием приведенного уравнения разработана математическая модель ВЧ/СВЧ-нагрева диэлектриков, которая позволяет рассчитать распределение и динамику изменения температуры по толщине образца, нагреваемого в поле токов высокой частоты (ТВЧ). На рис. 1 показан профиль изменения температуры по толщине обрабатываемого объекта за определенные промежутки времени, из которого видно, что температура на оси ма-

Само уравнение теплопроводности (2) примет вид:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = a^2 \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + f(x, t). \quad (7)$$

Для решения данного уравнения с целью приближения результатов к реальным условиям необходимо рассмотреть сначала вспомогательное уравнение:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = a^2 \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2}, \quad (8),$$

которое следует решать применительно к выбранным граничным условиям. Для этого обозначим и решим его, разделяя переменные.

Окончательная запись уравнения с соблюдением установленных начальных и граничных условий будет иметь вид:

териала существенно выше, чем на его поверхности. Это объясняется интенсивным процессом теплообмена нагретого образца с окружающей воздушной средой, которая при реализации ВЧ/СВЧ-обработки нагреву не подвергается, интенсифицируя процесс сушки, обусловленный спецификой градиентов тепловых и влажностных потоков

Таким образом, применение нагрева в поле токов высокой и сверхвысокой частоты создает возможность обеспечить равномерность нагрева всего объема тела при условии выравнивания температурного поля в объеме обрабатываемого изделия, что в реальных условиях не всегда соблюдается. Наличие же градиента температур сопряжено с вероятностью перегрева внутренних слоев материала и возникновением пожароопасных явлений, которые проявляются в виде термодеструкции полимера и его электрического пробоя. Электрический пробой и нагрев диэлектрика до температур самовоспламенения приводит к возникно-

вению источника зажигания. Учитывая высокую скорость разогрева обрабатываемого материала и тепловыделение, следует отнести процессы и устройства ВЧ/СВЧ-электротермии к пожароопасным. В связи с этим необходимо уделять таким процессам повышенное внимание в плане обеспечения пожарной безопасности и контроля за реализацией процессов на практике. Используя представленную модель нагрева диэлектриков в ВЧ/СВЧ-поле, можно априори определить продолжительность обработки по параметру достижения предельно допустимых температур для каждого конкретного полимера. Кроме этого, исходя из результатов расчетов, может быть определена оптимальная температура воздушной среды внутри рабочей камеры, что позволит не только улучшить эффективность тепловой обработки, но и избежать локальных перегревов материала и возникновения источников зажигания.

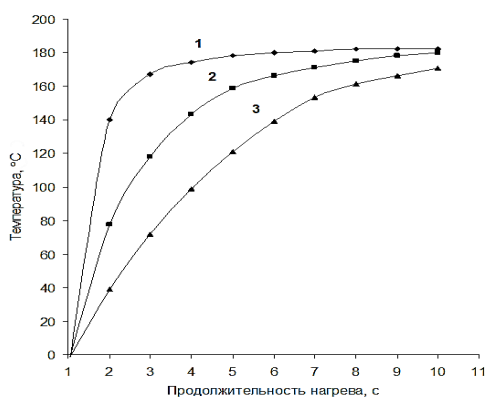


Рис. 2

Следует отметить, что все сказанное выше относится, в первую очередь, к объектам, имеющим большую толщину. При ВЧ/СВЧ-обработке листовых диэлектриков малая толщина объектов сушки способствует интенсивному теплообмену с окружающей средой. При этом критическая для материала температура не достигается. На рис. 2 представлены кинетические кривые нагрева листовых диэлектриков различной толщины в ВЧ-поле, где толщина нагреваемого пакета: 1 – 0,1 мм; 2 – 0,25 мм; 3 – 0,4 мм. Из приведенных данных видно, что достигаемые в материале температуры далеки от

значений температуры самовоспламенения целлюлозы.

Кроме всего прочего, ВЧ/СВЧ-оборудование само по себе имеет высокую пожарную опасность, что обусловлено наличием большого количества сгораемых материалов, специфических источников зажигания и сложных электрических устройств в составе ВЧ- и особенно СВЧ-сушилок. К специфическим источникам зажигания прежде всего следует отнести электрический пробой, искрение между электродами или между электродами и материалом. Эти явления могут иметь место при подаче повышенного напряжения на электроды и/или при их повреждении; при наличии сплошной пленки жидкости во влажном материале; при несоответствии габаритов высушиваемых материалов; при образовании воздушных зазоров между объектом сушки и электродами. Специфическим для высокочастотных сушилок является местный перегрев, ведущий к возгоранию высушиваемого материала и неисправности электрической части сушилки. Помимо этого, как отмечалось в [5], [6], высокий пожарный риск эксплуатации данных установок связан с вопросами согласования системы "генератор – нагрузка". Наивысший КПД достигается при показателе коэффициента стоячей волны (КСВ), равной единице: в данном случае волновые сопротивления источника питания и потребителя равны. В случае рассогласования системы КПД процесса снижается, при этом происходит отражение падающей электромагнитной волны от рабочей камеры, то есть вся энергия возвращается к источнику питания (генератору) и выделяется в виде теплоты в таких устройствах, как СВЧ-магнетроны, генераторно-усилительные лампы и мощные полупроводниковые приборы выходных каскадов ВЧ-генераторов. Температура перечисленных устройств может достигать уровня 1000°C и более, что приводит к их выходу из строя и возгоранию близкорасположенных горючих сред. В связи с этим необходимо прогнозировать не только изменение температуры обрабатываемого изделия, но и вероятность связанного с этим явлением рассогласования системы. Для

этого необходимо знать, как будет изменяться показатель диэлектрической проницаемости обрабатываемого материала по мере его нагрева на частоте работы генератора. Это позволит рассчитать изменение импеданса системы и предусмотреть меры, позволяющие его компенсировать в целях поддержания показателя КСВ, близкого к единице.

Таким образом, в целях обеспечения пожарной безопасности установок ВЧ/СВЧ-сушки следует соблюдать ряд требований: интенсивность нагрева повышать не за счет увеличения напряжения, а за счет применения токов высокой частоты; соблюдать правила укладки материалов (одинаковой длины, сорта, влажности, сечения и т. п.) во избежание искрения и местного перегрева отдельных участков; исключить попадание в материал мусора, сучков, опилок, стружек, металлических включений; исключить попадание капель конденсата на пластины конденсаторов, иницирующих электрический пробой обрабатываемого материала; размещать электрические части сушилок изолированно от сушильной камеры.

ВЫВОДЫ

1. Для обеспечения пожарной безопасности установок ВЧ/СВЧ-сушки древесины и текстильных изделий необходимо оценивать предельно допустимые режимы воздействия электромагнитных излучений на обрабатываемый материал – продолжительность обработки и максимальная температура нагрева образца при заданных параметрах подводимой мощности, частоты и напряженности электромагнитного поля.

2. Предложена математическая модель, позволяющая оценить скорость нагрева и максимальную температуру обрабатываемого полимера в зависимости от его теплофизических и диэлектрических свойств.

3. Для обеспечения пожарной безопасности источников электромагнитного излучения (ВЧ/СВЧ-генераторов) необходимо контролировать согласование системы "генератор – нагрузка" по возможному изменению показателя КСВ в зависимости от

температуры обрабатываемого объекта и коррекции данного показателя.

ЛИТЕРАТУРА

1. Княжевская Г.С., Фирсова М.Г. Высокочастотный нагрев диэлектрических материалов. – Л.: Машиностроение, 1989.
2. Глуханов Н.П., Федорова И.Г. Высокочастотный нагрев диэлектрических материалов в машиностроении. – Л.: Машиностроение, 1983.
3. Лыков А.В. Тепло- и массообмен в процессах сушки. – М.– Л.: Госэнергоиздат, 1956.
4. Никифоров А.Л. Использование энергии электромагнитных колебаний для интенсификации химико-текстильных процессов и создания на их основе энерго- и ресурсосберегающих технологий: Дис.... докт. техн. наук. – Иваново, 2004.
5. Кулыгин Ю.Н., Циркина О.Г., Никифоров А.Л., Мельников Б.Н. Особенности энергетики технологических процессов облагораживания целлюлозосодержащих тканей в ВЧ/СВЧ-полях // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2007, № 2. С.57...60.
6. Циркина О.Г., Никифоров А.Л., Удалов М.В. О согласовании системы "источник ВЧ/СВЧ-излучения – нагрузка" при реализации процессов диэлектрического нагрева полимерных материалов // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2009, № 6. С.60...63.

REFERENCES

1. Knyazhevskaya G.S., Firsova M.G. Vysokochastotnyy nagrev dielektricheskikh materialov. – L.: Mashinostroenie, 1989.
2. Glukhanov N.P., Fedorova I.G. Vysokochastotnyy nagrev dielektricheskikh materialov v mashinostroenii. – L.: Mashinostroenie, 1983.
3. Lykov A.V. Teplo- i massoobmen v protsessakh sushki. – M.– L.: Gosenergoizdat, 1956.
4. Nikiforov A.L. Ispol'zovanie energii elektromagnitnykh kolebaniy dlya intensivatsii khimiko-tekstil'nykh protsessov i sozdaniya na ikh osnove energo- i resursosberegayushchikh tekhnologiy.: Dis.... dokt. tekhn. nauk. – Ivanovo, 2004.
5. Kulygin Yu.N., Tsirkina O.G., Nikiforov A.L., Mel'nikov B.N. Osobennosti energetiki tekhnologicheskikh protsessov oblagorazhivaniya tsellyulozoderzhashchikh tkaney v VCh/SVCh-polyakh // Izv. vuzov. Tekhnologiya tekstil'noy promyshlennosti. – 2007, № 2. S.57...60.
6. Tsirkina O.G., Nikiforov A.L., Udalov M.V. O soglasovanii sistemy "istochnik VCh/SVCh-izlucheniya – nagruzka" pri realizatsii protsessov dielektricheskogo nagreva polimernykh materialov // Izv. vuzov. Tekhnologiya tekstil'noy promyshlennosti. – 2009, № 6. S.60...63.

Рекомендована кафедрой пожарной безопасности объектов защиты. Поступила 05.02.19.